04-2026 | ISSN 2734-9888 | tapchixaydung.vn

XÂY DỰNG

TẠP CHÍ CỦA BỘ XÂY DỰNG
JOURNAL OF CONSTRUCTION

DINH AN
GROUP

CÔNG TY TNHH TẬP ĐOÀN ĐỊNH AN

Hội tụ - Hợp tác - Phát triển

Công trình cầu Thượng Cát thuộc Dự án đầu tư xây dựng cầu Thượng Cát qua sông Hồng trên tuyến đường Vành đai 3,5 nằm trong Quy hoạch giao thông vận tải Thủ đô Hà Nội đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2050.

CÔNG TY CỔ PHẦN
KIẾN TRÚC VÀ XÂY DỰNG VIETARCH

Địa chỉ: **phố Cự Lộc, phường Thanh Xuân, TP Hà Nội** Điện thoại: **0977565648** Email: **lethuxanh@yahoo.com**

Thiết kế Khu nhà ở xã hội Biên Hoà, tỉnh Đồng Nai

Thiết kế Khu nhà ở xã hội Bộ Quốc phòng

CHỨC NĂNG, NGÀNH NGHỀ HOẠT ĐỘNG

1. Tư vấn giám sát công tác xây dựng công trình dân dụng và công nghiệp, công trình hạ tầng kỹ thuật
2. Thiết kế, thẩm tra thiết kế xây dựng công trình dân dụng và công nghiệp, công trình hạ tầng kỹ thuật
3. Thiết kế quy hoạch xây dựng.
4. Khảo sát địa hình, địa chất công trình
5. Quản lý đầu tư xây dựng công trình dân dụng và công nghiệp, công trình hạ tầng kỹ thuật.

KINH NGHIỆM VÀ NĂNG LỰC

Công ty Cổ phần Kiến trúc và xây dựng VIETARCH, thành lập năm 2010, trải qua 16 năm hình thành và phát triển, Công ty đã tham gia hoạt động trong lĩnh vực tư vấn thiết kế, giám sát, thẩm tra và quản lý dự án nhiều công trình có quy mô lớn, trải dài trên khắp các tỉnh, thành phố của Việt Nam. Trong đó có nhiều công trình "MẬT" mang tính chất đặc thù và yêu cầu kỹ thuật cao. Công ty có đội ngũ chuyên gia là các KTS, Họa sĩ và KS các chuyên ngành, có bằng cấp và trình độ cao. Qua quá trình hoạt động, VIETARCH đã tạo dấu ấn với nhiều công trình chất lượng, có giá trị thẩm mỹ, góp phần vào sự phát triển bền vững của các đô thị Việt Nam.

MỤC LỤC CONTENT

04.2026 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: Các dự án đường sắt tốc độ cao được đầu tư trực tiếp từ nguồn vốn tư nhân là bước đột phá, giúp đẩy nhanh tiến độ triển khai, đồng thời góp phần nâng cao hiệu quả kinh tế - xã hội, phù hợp tinh thần Nghị quyết số 68-NQ/TW của Bộ Chính trị về phát triển kinh tế tư nhân.

Giá 75.000 đồng

QUẢN LÝ NGÀNH
NGỌC HÀ 6 Tăng tính tự chủ và trách nhiệm của các chủ thể tham gia hoạt động xây dựng
THANH NGA 8 Quản lý chi phí đầu tư xây dựng: Yêu cầu hoàn thiện theo hướng tiếp cận thị trường và dữ liệu
TS NGUYỄN LIÊN HƯƠNG, PGS.TS NGUYỄN QUỐC TOÀN 10 Nâng cao hiệu quả quản lý chi phí dự phòng trong đầu tư xây dựng: Giải pháp từ kinh nghiệm quốc tế và tiêu chuẩn AACE
TỪ CHÍNH SÁCH ĐẾN CUỘC SỐNG
THẠCH LONG 14 Vận tải xanh ở Việt Nam trong bối cảnh mới
PGS.TS ĐẶNG CÔNG XƯỞNG 16 Vận tải xanh góp phần vào mục tiêu tăng trưởng bền vững
VÕ TRÍ DŨNG 18 Vai trò của hệ thống điện bờ trong chiến lược phát triển cảng xanh tại Việt Nam
ĐỖ THU LÝ 20 Thị trường tài chính xanh và tài trợ cảng xanh trong bối cảnh biến động toàn cầu
NGUYỄN XUÂN KỲ 22 Xây dựng hệ sinh thái logistics bền vững
TS NGUYỄN TIẾN TĨNH, TS LÊ ANH TUẤN 24 Chiến lược phát triển và yếu tố tổ chức lãnh thổ của đường sắt và đường sắt cao tốc ở LB Nga
TS LÊ ANH TUẤN, ĐÀM HỮU HƯNG 27 Mô hình quản lý và kinh tế vận tải của đường sắt và đường sắt cao tốc LB Nga từ năm 2000 đến nay
TS ĐÀM HỮU HƯNG 30 Phát triển đường sắt và đường sắt tốc độ cao ở Việt Nam: Từ kinh nghiệm của LB Nga
KTS PHẠM THANH TÙNG 32 Quy hoạch Hà Nội tầm nhìn 100 năm: Từ bản vẽ đến hiện thực
PGS.TS.KTS NGUYỄN VŨ PHƯƠNG 34 Siêu đô thị thế hệ mới - Động lực tái cấu trúc hệ thống đô thị Việt Nam
TRÒ CHUYỆN VỚI CHUYÊN GIA
NGUYỄN HOÀNG LINH 40 Kiến tạo một hệ thống năng lượng tự chủ, chống chịu tốt trước các cú sốc từ bên ngoài
GÓC NHÌN TỪ THỰC TIỄN
NGUYỄN MINH VÂN 46 Những kỳ vọng về điện hạt nhân quy mô nhỏ - SMR
THS LÊ TÙNG LÂM 48 BIM và ngôn từ...
NHÂN LỰC XÂY DỰNG 4.0
HOÀNG THẠCH 50 70 năm Trường Đại học Hàng hải Việt Nam: Khát vọng vươn ra biển lớn
AN TOÀN GIAO THÔNG
HUY THẮNG 52 Quảng Ngãi đổi mới tuyên truyền, nâng cao kỹ năng giao thông cho học sinh
GIỚI THIỆU SÁCH MỚI
AN NHIÊN 54 Hợp đồng trong hoạt động kinh doanh
NGHIÊN CỨU KHOA HỌC
THS.KS BẠCH NGỌC TÙNG 60 Chuyển đổi số trong quản lý hạ tầng kỹ thuật khu công nghiệp sinh thái: Từ khung lý thuyết đến mô hình thực tiễn tại Việt Nam
TS NGUYỄN VĂN NAM, THS NGUYỄN BÍCH NGỌC, THS NGÔ DUY DƯƠNG 64 Quản lý kỹ thuật cấp nước đô thị trong kỷ nguyên chuyển đổi số tại Việt Nam
THS NGUYỄN MẠNH HÙNG, THS LÊ VĂN CHÈ 69 Định hướng chuyển đổi số trong đánh giá chất lượng vận hành giao thông công cộng tại TP Hà Nội
TS THÂN ĐÌNH VINH, THS ĐẶNG THỊ NGA, THS LÊ VĂN CHÈ 74 Ứng dụng khung 3V của Ngân hàng Thế giới trong đánh giá tiềm năng TOD quanh các ga thuộc tuyến đường sắt đô thị số 2A Hà Nội
THS NGUYỄN XUÂN HỒNG 80 Tổng quan về một số giải pháp điều khiển hệ thống BESS trong hỗ trợ điều chỉnh tần số
THS HOÀNG THUYÊN 84 Đánh giá ảnh hưởng của các đặc trưng khí tượng đến độ chính xác của mô hình dự báo công suất điện mặt trời
PGS.TS NGHIÊM VĂN KHANH, PGS.TS MAI THỊ LIÊN HƯƠNG 88 Giải pháp chuẩn hóa và phân tích dữ liệu trong quản lý các bãi chôn lấp đã đóng cửa tại Việt Nam
TS NGUYỄN THANH PHONG 92 Kinh nghiệm thực tiễn và giải pháp đấu nối thoát nước hộ gia đình trong điều kiện đô thị Việt Nam
TS NGUYỄN THANH THƯ, TS NGUYỄN THỊ MỸ HẠNH, THS NGUYỄN BÍCH NGỌC 98 Quản trị dữ liệu - nền tảng của chuyển đổi số bền vững trong ngành cấp thoát nước
KTS LÊ BÁ TOÀN, TS.KTS PHẠM NGỌC TUẤN 103 Tích hợp di sản công nghiệp và khả năng phục hồi đô thị: Cách tiếp cận lớp đệm hình thái cho hành lang đường sắt Phan Thiết - Mương Mán
PGS.TS VŨ THỊ VINH, TS PHAN ĐỨC HOÀNG 108 Quá trình phát triển giao thông Hà Nội: Từ đô thị di sản đến siêu đô thị thế hệ mới
THS.KTS NGUYỄN TẤN VĨNH NAM 114 Thực trạng và giải pháp nâng cao việc chuẩn hóa cơ sở dữ liệu quốc gia về đất đai làm nền tảng cho công tác quản lý đô thị phục vụ chính quyền hai cấp tại TP Hồ Chí Minh
THS.KTS ĐẶNG HOÀNG QUYÊN 118 Phát triển kiến trúc xí nghiệp công nghiệp nhẹ theo hướng xanh tại Vùng kinh tế trọng điểm phía Nam
PGS.TS.KTS VŨ HỒNG CƯƠNG, THS NGUYỄN THANH VÂN 122 Vai trò trung tâm của thiết kế nội thất trong một dự án xây dựng
THS.KTS LÊ BÁ THÁI QUYỀN, TS.KTS LÊ KIM THƯ 126 Nghiên cứu giải pháp tổ chức không gian kiến trúc - cảnh quan khu dân cư thích ứng với điều kiện khí hậu bất lợi tại vùng Tây Nam Bộ Việt Nam
THS.KTS VÕ NGỌC TRƯỞNG, TS.KTS NGUYỄN BẢO THÀNH, TS.KTS TRẦN ANH TUẤN 129 Ứng dụng công nghệ cao trong trùng tu và khai thác bền vững di sản địa đạo Củ Chi cho du lịch và giáo dục
THS PHẠM THỊ THANH NHÀN, PGS.TS NGUYỄN ANH DŨNG 134 Kiểm soát ô nhiễm môi trường tại công trường xây dựng nhà cao tầng: Kinh nghiệm quốc tế và khả năng áp dụng tại Việt Nam
KS ĐÀO QUỐC ĐAO, TS NGUYỄN VĂN ĐĂNG 139 Nghiên cứu định hướng xây dựng tiêu chuẩn ray cho đường sắt Việt Nam
PGS.TS NGUYỄN HỒNG TIẾN 142 Sử dụng năng lượng tái tạo cho chiếu sáng tại Việt Nam
THS PHẠM NGỌC CHÍNH 146 Đề xuất bộ tiêu chí quản lý cấp nước các khu vực đô thị tỉnh Quảng Ninh bảo đảm cấp nước an toàn
TS DOÃN THỊ NỘI 150 Phân tích phân bố mưa lớn và nguy cơ sạt lở đến tuyến Quốc lộ 6 khu vực Sơn La - Hòa Bình
KS NGUYỄN MẠNH TIẾN, TS LÊ CÔNG THÀNH, KS PHẠM VĂN CHƯ 154 Giải pháp thiết kế đoạn chuyển tiếp giữa nền đất và công trình nhân tạo trong đường sắt tốc độ cao
THS TRẦN THỊ THU HIỀN 158 Đánh giá ổn định hố đào và nội lực kết cấu ga S11 thi công top-down trong điều kiện mực nước ngầm cao
PGS.TS BÙI NGỌC TOÀN, KS NGUYỄN XUÂN ẢNH 162 Đánh giá mô hình quản lý bảo trì hệ thống quốc lộ Việt Nam sau phân cấp, phân quyền
TS ĐỖ HỒNG ANH, TS NGUYỄN LAN HƯƠNG, GS.TS TRẦN THỊ VIỆT NGA 166 Nghiên cứu hiện trạng chất lượng nước và đánh giá khả năng tiếp nhận nước thải của lưu vực sông Vu Gia - Thu Bồn đoạn chảy qua trung tâm TP Đà Nẵng đến năm 2030
THS PHẠM DUY HÒA 172 Một số vấn đề về sửa chữa đường sắt không khe nối
TS NGUYỄN PHƯƠNG THẢO 175 Đánh giá hiện trạng và định hướng công nghệ xử lý nước cho hệ thống cấp nước sinh hoạt nông thôn tỉnh Quảng Ninh
THS VŨ HOÀNG ANH, TS PHẠM VĂN DƯƠNG 180 Kinh tế tuần hoàn: Hướng tiếp cận mới trong quản lý hệ thống thoát nước và xử lý nước thải đô thị Việt Nam

INDUSTRY MANAGEMENT

NGOC HA 6 Increase the autonomy and responsibility of entities involved in construction activities

THANH NGA 8 Construction investment cost management: Requires improvement through a market and data-driven approach

NGUYEN LIEN HUONG, NGUYEN QUOC TOAN 10 Improving the effectiveness of managing contingency costs in construction investment: Solutions from international experience and AACE standards

FROM POLICY TO LIFE

THACH LONG 14 Green transportation of Vietnam in the new context

DANG CONG XUONG 16 Green transportation contributes to the goal of sustainable growth

VO TRI DUNG 18 The role of onshore power systems in the green port development strategy in Vietnam

DO THU LY 20 Green finance markets and green port financing in the context of global changes

NGUYEN XUAN KY 22 Building a sustainable logistics ecosystem

NGUYEN TIEN TINH, LE ANH TUAN 24 Development strategy and territorial organization factors of railways and high-speed rail in the Russian Federation

LE ANH TUAN, DAM HUU HUNG 27 The management and economic model of railway and high-speed rail transport in the Russian Federation from 2000 to the present

DAM HUU HUNG 30 Railway and high-speed rail development in Vietnam: Lessons from the Russian Federation

PHAM THANH TUNG 32 Hanoi's 100-Year Master Plan: From Drawings to Reality

NGUYEN VU PHUONG 34 Next-generation megacities - Driving forces for restructuring Vietnam's urban system

TALK WITH EXPERTS

NGUYEN HOANG LINH 40 Creating a self-sufficient energy system that is resilient to external shocks

PERSPECTIVE TO PRACTICAL

NGUYEN MINH VAN 46 Expectations for Small-Scale Nuclear Power (SMR)

LE TUNG LAM 48 BIM and the power of language

CONSTRUCTION HUMAN RESOURCES 4.0

HOANG THACH 50 70 Years of Vietnam Maritime University: Aspiration to reach rut to the open sea

TRANSPORTATION SAFETY

HUY THANG 52 Quang Ngai innovates its communication efforts to improve traffic safety skills for students

ABOUT NEW BOOK

AN NHIEN 54 Contracts in business operations

SCIENTIFIC RESEARCH

BACH NGOC TUNG 60 Digital transformation in technical infrastructure management of eco-industrial parks: From theoretical framework to practical model in Vietnam

NGUYEN VAN NAM, NGUYEN BICH NGOC, NGO DUY DUONG 64 Urban water supply technical management in the era of digital transformation in Vietnam

NGUYEN MANH HUNG, LE VAN CHE 69 Directions for Digital Transformation in the Assessment of public transport service quality in Hanoi city

THAN DINH VINH, DANG THI NGA, LE VAN CHE 74 Assessing TOD development potential around Hanoi metro line 2A stations using the World Bank's 3V framework

NGUYEN XUAN HONG 80 Overview of some control methods of BESS in supporting frequency regulation

HOANG THUYEN 84 Assessment of the Influence of Meteorological features on the Accuracy of a Solar power forecasting model

NGHIEM VAN KHANH, MAI THI LIEN HUONG 88 Standardization and data analysis solutions in the management of closed landfills inVietnam

NGUYEN THANH PHONG 92 Practical experience and solutions in connecting domestic wastewater drainage systems in Vietnamese urban conditions

NGUYEN THANH THU, NGUYEN THI MY HANH, NGUYEN BICH NGOC 98 Data governance as the foundation for sustainable digital transformation in the water and wastewater sector

LE BA TOAN, PHAM NGOC TUAN 103 Integrating Industrial Heritage and Urban Resilience: A Morphological buffer approach for Railway corridor landscape in Phan Thiet - Muong Man

VU THI VINH, PHAN DUC HOANG 108 Urban transport development in Hanoi: From a heritage city to a new-generation megacity

NGUYEN TAN VINH NAM 114 The context and enhanced solutions to form the standardization of national database on land for urban management in order to service the two levels of local government in Ho Chi Minh City

DANG HOANG QUYEN 118 Developing architecture for light industrial factories towards green development in the Southern Key Economic Region

VU HONG CUONG, NGUYEN THANH VAN 122 The central role of interior design in construction projects

LE BA THAI QUYEN, LE KIM THU 126 Research planning solutions - residential architecture to adapt to climate change in South West Delta area Vietnam

VO NGOC TRUONG, NGUYEN BAO THANH, TRAN ANH TUAN 129 Application of Advanced Technologies in the Conservation and Sustainable Utilization of the Cu Chi Tunnels Heritage for Tourism and Education

PHAM THI THANH NHAN, NGUYEN ANH DUNG 134 Environmental pollution control at high-rise building construction sites: International Experience and Applicability in Vietnam

DAO QUOC DAO, NGUYEN VAN DANG 139 Research oriented to developing rail standards for Vietnam railways

NGUYEN HONG TIEN 142 The use of renewable energy for lighting in Vietnam

PHAM NGOC CHINH 146 Proposed set of criteria for urban water supply management in Quang Ninh province to ensure water safety

DOAN THI NOI 150 Analysis of heavy rainfall distribution and potential impacts on National Highway 6 in the Son La - Hoa Binh region

NGUYEN MANH TIEN, LE CONG THANH, PHAM VAN CHU 154 Design solutions for transition zones between earthworks and structures in high-speed railways

TRAN THI THU HIEN 158 Assessment of excavation stability and structural internal forces of S11 underground station constructed by the top-down method under high groundwater conditions

BUI NGOC TOAN, NGUYEN XUAN ANH 162 Assessing Vietnam's national highway maintenance management model in the context of decentralization and delegation of authority

DO HONG ANH, NGUYEN LAN HUONG, TRAN THI VIET NGA 166 Study on the current status of water quality and assessment of the wastewater reception capacity of the Vu Gia - Thu Bon river basin section flowing through the central area of Da Nang City, toward 2030

PHAM DUY HOA 172 Some issues related to the maintenance of continuous welded rail (CWR)

NGUYEN PHUONG THAO 175 Assessment of the current status and water treatment technology orientation for rural

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

04.2026 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 NGUYỄN VĂN HIỂN	183	Dự báo mức độ nhiễm mặn khu vực hạ lưu sông Thái Bình và sông Luộc tại TP Hải Phòng để lựa chọn vị trí công trình thu nước hợp lý
THS NGUYỄN VŨ THIÊM, TS PHẠM VĂN TRUNG	186	Nghiên cứu xác định tải trọng phá hoại hệ kết cấu do hình thành khớp dẻo
KS NGUYỄN TRUNG KIÊN, PGS.TS VŨ TÂN VĂN	190	So sánh gia tốc đỉnh theo phương dọc gió của công trình nhiều tầng theo TCVN 2737:2023 và EN 1991-1-4
THS NGUYỄN TRỌNG ANH MINH, PGS.TS NGUYỄN HOÀNG LONG, PGS.TS TRẦN VĂN QUÂN, TS LÊ THANH HẢI	195	Một số kết quả nghiên cứu bước đầu về hỗn hợp Stone Mastic Asphalt sử dụng xỉ thép trong xây dựng mặt đường ở Việt Nam
TS BÙI THỊ QUỲNH ANH, HOÀNG MẠNH HÙNG	200	Ảnh hưởng của tro bay và phụ gia chống thấm WP307 đến cường độ nén và độ chống thấm nước của bê tông xi măng
TS NGÔ ĐỨC CHINH, PGS.TS NGUYỄN THANH SANG	204	Ảnh hưởng của tro bay và xỉ lò cao đến độ rỗng và khả năng chống thấm ion clo của bê tông hạt nhỏ
THS.NCS HUỲNH THỊ MỸ DUNG, TS HUỲNH VĂN HIỆP, PGS.TS NGUYỄN THANH SANG	208	Đặc tính cơ học dài hạn của bê tông nhiều tro bay sử dụng cát nhiễm mặn trong công trình ở đồng bằng sông Cửu Long
TS TRẦN VIỆT HƯNG	213	Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép đến sức kháng uốn của dầm bê tông tính năng siêu cao
TS NGUYỄN THU TRANG	218	Ứng dụng mô hình 2S2P1D để mô phỏng đặc tính đàn nhớt của bê tông asphalt - lưu huỳnh ở vùng nhiệt độ và tần số rộng
THS HỨA XUÂN LONG, THS ĐẶNG ĐÌNH PHÚC, THS NGUYỄN DUY QUANG	223	Nghiên cứu xây dựng bộ điều khiển Hybrid Fuzzy-PID cho hệ thống xử lý dầu cặn trên tàu thủy
PGS.TS HOÀNG ĐỨC TUẤN, KS NGUYỄN MẠNH HÙNG	228	Nghiên cứu ứng dụng mạng nơ-ron nhân tạo trong nhận diện và dự báo nồng độ khí hydrocarbon trên tàu biển
PGS.TS HOÀNG HÀ	232	Phân tích hiệu ứng động lực do tác dụng của hoạt tải đoàn tàu đối với một số dạng cầu dầm liên tục trên đường sắt tốc độ cao bằng phương pháp tính toán đơn giản theo tiêu chuẩn thiết kế
THS LÊ VĂN TÂM	238	Nghiên cứu ứng dụng điều khiển thông minh trong quản lý, ổn định nhiệt độ
TS NGUYỄN HỮU QUYỀN, THS PHAN ĐĂNG ĐÀO	242	Điều khiển tối ưu hệ thống định vị động tàu biển dựa trên thuật toán MPC và bộ quan sát Kalman mở rộng có xét đến ràng buộc điều khiển
THS PHẠM TRUNG MINH, TS NGUYỄN CẢNH TOÀN	248	Ứng dụng mô hình SAM2 trong giám sát và phân tích luồng giao thông đa bối cảnh
TS PHẠM VIỆT HƯNG, THS NGUYỄN PHƯƠNG LÂM	252	Nghiên cứu ứng dụng của hệ thống nhận dạng tự động trong dự đoán hành trình tàu biển
ĐOÀN HỮU KHÁNH, PGS.TS ĐINH ANH TUẤN, TS TRƯƠNG CÔNG MỸ	256	Xây dựng giải pháp phần cứng IoT giám sát nhiên liệu tàu thủy tương thích với hạ tầng truyền dẫn vệ tinh
PGS.TS LÊ QUANG HANH	260	Ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong quản lý và thi công công trình cầu: Tổng quan và định hướng nghiên cứu
NGUYỄN ĐÌNH CHỨC, NGUYỄN VĂN SƠN, NGUYỄN HỮU HUẾ	264	Xây dựng và kiểm chứng khung mô hình ANFIS - HFIS trong đánh giá rủi ro thi công công trình kè biển Việt Nam
LÊ KIM THƯ, TRẦN THANH SƠN, LÊ ANH TUẤN, LÊ VĂN NHU	268	Nâng cao chất lượng xử lý tín hiệu cho kính hiển vi giao thoa ánh sáng trắng
THS PHẠM TẤT TIỆP, PGS.TS NGUYỄN VĂN SƯỚNG, THS BÙI VĂN HƯNG	272	Nghiên cứu thuật toán di truyền (GA) tối ưu hóa tham số luật điều khiển PID cho hệ thống giảm lắc Rotor Magnus tàu thủy
TS NGUYỄN SỸ NAM	277	Phân tích ảnh hưởng của biến dạng đàn hồi đến sai lệch động học của cơ cấu hồi nhanh dạng máy bào ngang
TS VĂN NGỌC TRÚC PHƯƠNG, THS NGUYỄN TRỌNG NHÂN, THS LÊ THIÊN BẢO	282	Đánh giá khả năng phân loại lớp phủ bề mặt của thuật toán Machine Learning và Deep Learning trên ảnh PlanetScope - Trường hợp nghiên cứu tại phường Long An, tỉnh Tây Ninh
PGS.TS MAI THỊ HẢI VÂN, TS LÊ THANH HẢI, KS NGUYỄN XUÂN MẠNH	287	Dự báo độ ổn định Marshall của SMA bằng mô hình Rừng cây ngẫu nhiên có sử dụng kỹ thuật tối ưu hóa các siêu tham số
TS NGUYỄN MẠNH CƯỜNG, THS VŨ VĂN RỰC	292	Nghiên cứu thuật toán lọc và phân cụm mục tiêu trên biển cho hệ thống radar hàng hải
PGS.TS.KTS PHẠM TRỌNG THUẬT	297	Chỉ số HPR và chủ trương thí điểm phát triển nhà ở thương mại giá phù hợp tại Việt Nam
THS LÊ KHÁNH CHI, THS LÊ KIM NHUNG	302	Đánh giá những rủi ro trong liên doanh thực hiện dự án đầu tư xây dựng hạ tầng giao thông đường bộ theo hình thức đối tác công tư (PPP)
TS PHAN NGUYỄN HOÀI NAM	306	Thực trạng chuyển dịch xanh của các doanh nghiệp vận tải niêm yết ở Việt Nam giai đoạn 2020 - 2024
TS LƯƠNG THỊ KIM DUNG, THS VŨ THỊ THANH LAN, THS NGUYỄN VIẾT HÀ	310	Hoàn thiện pháp luật về quản lý rủi ro thiên tai và nước biển dâng đối với hệ thống cảng biển Việt Nam
TS NGUYỄN THỊ THÚY HỒNG	314	Tác động của thương mại đến phát thải CO_2 đội tàu biển Việt Nam: Phân tích bằng mô hình hiệu chỉnh sai số vector (VECM) và kiểm định ổn định cấu trúc
THS NGUYỄN MINH PHƯƠNG, THS NGUYỄN THỊ HƯỜNG	318	Đánh giá mức độ sẵn sàng triển khai các tiêu chuẩn Môi trường, Xã hội và Quản trị (ESG) tại các doanh nghiệp vận tải biển Việt Nam
TS NGUYỄN VĂN TRUNG, THS NGUYỄN THÁI SƠN	323	Cơ sở pháp lý thực hiện đầu tư xây dựng hệ thống trường học theo chương trình mục tiêu quốc gia và thực tiễn triển khai
CN TRẦN NGUYỄN NHƯ PHƯƠNG, PGS.TS HỒ THỊ THU HÒA, KS NGUYỄN THANH DANH	326	Tối ưu hóa chi phí mạng lưới phân phối có thu hồi sản phẩm đã qua sử dụng dưới ràng buộc phát thải carbon: Trường hợp doanh nghiệp thương mại phân phối phụ tùng
TS ĐỖ VĂN THUẬN, PGS.TS NGUYỄN LƯƠNG HẢI	331	Phân tích tác động của hoạt động điều hành kế hoạch vốn đến tiến độ giải ngân vốn đầu tư công trong các dự án giao thông đường bộ tại Việt Nam
TS NGUYỄN VĂN TRƯỜNG, CN PHẠM THỊ THIÊN MINH, THS TRẦN LÊ THU TRANG	334	Luật mềm và bảo vệ môi trường biển do tác động của tàu thuyền: Một số vấn đề lý luận và thực tiễn ở biển Đông
TS ĐỖ DUY ĐỊNH	339	Các yếu tố ảnh hưởng đến thái độ và ý định chấp nhận xe máy điện tại Hà Nội, Việt Nam: Vai trò của cảm nhận về xu hướng xã hội và mức độ tiếp xúc với truyền thông xã hội
LÊ VĂN PHƯỚC NHÂN, TRẦN MINH TIẾN	344	Nghiên cứu thực nghiệm ứng xử uốn của dầm liên tục thép - bê tông liên hợp với mức độ liên kết khác nhau
TS NGUYỄN HỮU THẾ	348	Áp dụng một số vật liệu có tính chất đặc biệt để gia cường công trình trong tình trạng khẩn cấp
PGS.TS LÊ THỊ HƯƠNG GIANG, TS TRẦN NGỌC AN, TS LÊ TÙNG ANH	352	Nghiên cứu so sánh tính toán tải trọng tác dụng lên xích phao neo tàu theo tiêu chuẩn thiết kế của Liên Xô cũ và Việt Nam
TS NGUYỄN THỊ HỒNG TUYẾN	356	Tìm hiểu cụm giới từ trong tiếng Anh kỹ thuật dựa trên hàm từ vựng nhằm hỗ trợ sinh viên học chuyên môn bằng tiếng Anh

domestic water supply systems in Quang Ninh province

VU HOANG ANH, PHAM VAN DUONG 180 Circular economy: A new approach to the management of urban drainage and wastewater treatment systems in Vietnam

NGUYEN VAN HIEN 183 Forecasting salinity intrusion in the downstream areas of the Thai Binh and Luoc rivers in Hai Phong city for the selection of appropriate water intake locations

NGUYEN VU THIEM, PHAM VAN TRUNG 186 Research to determine the failure load of structural systems due to plastic hinge formation

NGUYEN TRUNG KIEN, VU TAN VAN 190 Comparison of along-wind peak accelerations of high-rise buildings using TCVN 2737:2023 and EN 1991-1-4

NGUYEN TRONG ANH MINH, NGUYEN HOANG LONG, TRAN VAN QUAN, LE THANH HAI 195 Preliminary investigation on the performance of Stone Mastic Asphalt (SMA) mixtures incorporating steel slag for pavement construction in Vietnam

BUI THI QUYNH ANH, HOANG MANH HUNG 200 Effects of fly ash and WP307 waterproofing admixture on the compressive strength and water impermeability of cement concrete

NGO DUC CHINH, NGUYEN THANH SANG 204 Effects of fly ash and ground granulated blast furnace slag on the porosity and chloride ion penetration resistance of fine-grained concrete

HUYNH THI MY DUNG, HUYNH VAN HIEP, NGUYEN THANH SANG 208 Long-term mechanical properties of high-volume fly ash concrete using saline sand for construction in the Mekong Delta

TRAN VIET HUNG 213 Investigation of the influence of reinforcement ratio on the flexural capacity of ultra-highperformance concrete beams

NGUYEN THU TRANG 218 Application of the 2S2P1D model to simulate the linear viscoelastic properties of SulfurExtended Asphalt over a wide range of temperatures and frequencies

HUA XUAN LONG, DANG DINH PHUC, NGUYEN DUY QUANG 223 Research and development of a Hybrid Fuzzy-PID controller for shipboard sludge oil treatment systems

HOANG DAC TUAN, NGUYEN MANH HUNG 228 Research on the application of artificial neural networks for the identification and prediction of hydrocarbon gas concentration on ships

HOANG HA 232 Analysis of dynamic effects due to train live load on several types of continuous beam bridges on high-speed railways using simple calculation methods according to design standards

LE VAN TAM 238 Research on the application of intelligent control in temperature management and stabilization

NGUYEN HUU QUYEN, PHAN DANG DAO 242 Optimal control of marine dynamic positioning system based on MPC algorithm and extended Kalman observer considering control constraints

PHAM TRUNG MINH, NGUYEN CANH TOAN 248 Application of SAM2 Model for multi-context traffic flow monitoring and analysis

PHAM VIET HUNG, NGUYEN PHUONG LAM 252 Research on applying the automatic identification system in vessel trajectory prediction

DOAN HUU KHANH, DINH ANH TUAN, TRUONG CONG MY 256 Development of an IoT hardware solution for ship fuel monitoring compatible with satellite transmission infrastructure

LE QUANG HANH 260 Application of artificial intelligence in bridge construction management: Overview and research directions

NGUYEN DINH CHUC, NGUYEN VAN SON, NGUYEN HUU HUE 264 Development and validation of an ANFIS - HFIS Framework for Risk assessment in the Construction of coastal seawall projects in Vietnam

LE KIM THU, TRAN THANH SON, LE ANH TUAN, LE VAN NHU 268 Improving signal processing quality for white light interference microscopes

PHAM TAT TIEP, NGUYEN VAN SUONG, BUI VAN HUNG 272 A study on genetic algorithm (GA)-based optimization of PID controller parameters for a ship roll stabilization system using a magnus rotor

NGUYEN SY NAM 277 Analysis of the effect of elastic deformation on kinematic deviation in a planer-type qickreturn mechanism

VAN NGOC TRUC PHUONG, NGUYEN TRONG NHAN, LE THIEN BAO 282 Assessing the performance of Machine Learning and Deep Learning algorithms in surface land cover classification using Planet Scope imagery: A case study of Long An Ward, Tay Ninh Province

MAI THI HAI VAN, LE THANH HAI, NGUYEN XUAN MANH 287 Predicting the Marshall stability of Stone Mastic Asphalt using the Random Forest model with hyperparameter optimization methods

NGUYEN MANH CUONG, VU VAN RUC 292 Research on algorithms for sea target filtering and clustering in marine radar systems

PHAM TRONG THUAT 297 The Housing Price-to-Income Ratio (HPR) and the Pilot policy for Affordable commercial housing development in Vietnam

LE KHANH CHI, LE KIM NHUNG 302 Assessing risks in joint ventures implementing road infrastructure investment projects under the public-private partnership (PPP) model

PHAN NGUYEN HOAI NAM 306 Green transition dynamics of Vietnam's listed transportation sector: Period 2020 - 2024

LUONG THI KIM DUNG, VU THI THANH LAN, NGUYEN VIET HA 310 Improving the legal framework for risk management of natural disasters and sea level rise in Vietnamese seaports

NGUYEN THI THUY HONG 314 Trade effects on maritime CO_2 emissions in Vietnam: A VECM approach with structural stability Tests

NGUYEN MINH PHUONG, NGUYEN THI HUONG 318 Assessing the Readiness for Implementing Environmental, Social and Governance (ESG) Standards in Vietnamese shipping enterprises

NGUYEN VAN TRUNG, NGUYEN THAI SON 323 Legal basis for investment in and construction of the school system under the national target program and the current status of program execution

TRAN NGUYEN NHU PHUONG, HO THI THU HOA, NGUYEN THANH DANH 326 Cost optimization of a distribution network with used-product returns under carbon emission constraints: A case study of a spare-parts trading company

DO VAN THUAN, NGUYEN LUONG HAI 331 Analyzing the impact of capital plan execution on the disbursement progress of public investment in road transport projects in Vietnam

NGUYEN VAN TRUONG, PHAM THI THIEN MINH, TRAN LE THU TRANG 334 Soft law and marine environmental protection from the impacts of shipping: Theoretical and practical issues in the Vietnamese east se

DO DUY DINH 339 Factors influencing attitudes toward and intention to adopt electric motorcycles in Hanoi, Vietnam: The roles of perceived social trend and social media exposure

VAN PHUOC NHAN LE, MINH TIEN TRAN 344 Experimental studying the bending behavior of the continuous steel - concrete composite beams with different shear connection degree

NGUYEN HUU THE 348 Application of materials with special properties to reinforce structures in emergencies

LE THI HUONG GIANG, TRAN NGOC AN, LE TUNG ANH 352 Comparative analysis of load calculations for ship mooring buoy chains under the design standards of the former Soviet Union and Vietnam

NGUYEN THI HONG TUYEN 356 A study on technical English prepositional phrases based on Lexical Functions to support EMI students

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

Tăng tính tự chủ và trách nhiệm của các chủ thể tham gia hoạt động xây dựng

NGỌC HÀ

Luật Xây dựng số 135/2025/QH15 đánh dấu bước cải cách quan trọng khi chuyển từ tiền kiểm sang hậu kiểm, cắt giảm thủ tục hành chính và đề cao trách nhiệm của các chủ thể tham gia xây dựng, góp phần nâng cao chất lượng công trình và cải thiện môi trường đầu tư.

HOÀN THIỆN KHUNG PHÁP LÝ THEO HƯỚNG LINH HOẠT, PHÂN ĐỊNH RÕ TRÁCH NHIỆM

Luật Xây dựng số 135/2025/QH15 được Quốc hội khóa XV thông qua ngày 10/12/2025 và sẽ có hiệu lực từ ngày 01/7/2026. Một trong những điểm nổi bật của Luật là được xây dựng theo nguyên tắc luật khung, chỉ quy định các vấn đề mang tính nguyên tắc, cốt lõi và ổn định lâu dài, đồng thời giao Chính phủ và các Bộ quy định chi tiết.

Tinh thần xuyên suốt của Luật là tăng cường tính tự chủ và trách nhiệm của các chủ thể tham gia hoạt động xây dựng. Theo đó, Luật phân định rõ chức năng quản lý nhà nước với quyền, nghĩa vụ của từng chủ thể, từ chủ đầu tư, nhà thầu thi công, đơn vị thiết kế đến tư vấn giám sát.

Đáng chú ý, tại khoản 3 Điều 57, Luật quy định chủ đầu tư có trách nhiệm tổ chức nghiệm thu công trình xây dựng; các tổ chức, cá nhân tham gia nghiệm thu phải chịu trách nhiệm về phần việc do mình xác nhận.

Một trong những cải cách đáng chú ý của Luật Xây dựng số 135/2025/QH15 là thể chế hóa Nghị quyết số 66/NQ-CP về cắt giảm, đơn giản hóa thủ tục hành chính trong hoạt động sản xuất kinh doanh.

Cụ thể, Luật đã mở rộng đối tượng được miễn giấy phép xây dựng, đồng thời cắt giảm nhiều thủ tục như thẩm định thiết kế triển khai sau thiết kế cơ sở. Ngoài ra, Luật cũng không còn yêu cầu chứng chỉ năng lực đối với tổ chức tham gia hoạt động xây dựng trong một số trường hợp, góp phần giảm bớt rào cản gia nhập thị trường.

Các điều kiện kinh doanh cũng được rà soát, cắt giảm nhằm tạo môi trường đầu tư thông thoáng hơn. Đặc biệt, Luật giảm đối tượng phải thực hiện thủ tục kiểm tra công tác nghiệm thu của cơ quan nhà nước có thẩm quyền, qua đó nâng cao tính chủ động cho doanh nghiệp và chủ đầu tư.

Ngoài ra, Luật Xây dựng 2025 còn bổ sung các quy định về hệ thống thông tin, cơ sở dữ liệu quốc gia về hoạt động xây dựng nhằm "định danh công trình" và đẩy mạnh chuyển đổi số trong quản lý nhà nước và cung cấp dịch vụ công. Quản lý trật tự xây dựng nhằm bảo đảm đáp ứng yêu cầu quản lý khi đẩy mạnh việc phân cấp, phân quyền, tăng cường hậu kiểm. Quy trình rút gọn đối với dự án đầu tư công đặc biệt.

QUY ĐỊNH CHI TIẾT VỀ QUẢN LÝ HOẠT ĐỘNG XÂY DỰNG

Đối với Nghị định quy định chi tiết một số điều và biện pháp để tổ chức, hướng dẫn thi hành Luật Xây dựng về quản lý hoạt động xây dựng, về thẩm quyền thẩm định Báo cáo nghiên cứu khả thi tại cơ quan chuyên môn về xây dựng, dự thảo Nghị định đề xuất rõ thẩm quyền của các cơ quan chuyên môn về xây dựng thuộc Bộ quản lý công trình xây dựng chuyên ngành, UBND cấp tỉnh và cấp xã.

Riêng cơ quan chuyên môn về xây dựng thuộc UBND TP Hà Nội và TP.HCM thẩm định đối với các dự án được đầu tư xây dựng trên địa bàn hành chính thành phố.

Đồng thời, giao UBND cấp tỉnh được quy định lại thẩm quyền giữa các cơ quan chuyên môn cấp tỉnh và cấp xã (để đảm bảo linh hoạt cho địa phương).

Về điều kiện của chủ đầu tư và hình thức BQLDA, dự thảo Nghị định dự kiến quy định về điều kiện của chủ đầu tư trong trường hợp không có BQLDA đầu tư xây dựng, người quyết định đầu tư giao cơ quan, tổ chức này có đủ bộ máy chuyên môn về quản lý, sử dụng vốn đầu tư; quản lý, thanh, quyết toán hợp đồng xây dựng; quản lý chất lượng xây dựng; Người quyết định đầu tư quyết định hình thức quản lý dự án với các hình thức sau: (1) BQLDA đầu tư xây dựng (2) Chủ đầu tư tổ chức quản lý dự án.

Về thời gian cấp Giấy phép xây dựng, dự thảo Nghị định đề xuất giảm số lượng còn 10 ngày làm việc đối với trường

Ngày 10/12/2025 Quốc hội đã thông qua Luật Xây dựng số 135/2025/QH15 với nhiều nội dung cụ thể liên quan đến: (i) Sửa đổi quy định về phân loại dự án đầu tư xây dựng; (ii) Về lập, thẩm định, phê duyệt dự án đầu tư xây dựng; (iii) Về lập, thẩm định, phê duyệt thiết kế xây dựng; (iv) Sửa đổi quy định về hình thức quản lý dự án; (v) Về cấp Giấy phép xây dựng; (vi) Về xây dựng công trình; (vii) Về xác định, quản lý chi phí; (viii) Về quản lý hợp đồng; (ix) Về quản lý năng lực hoạt động xây dựng; (x) Sửa đổi, bổ sung quy định nhằm tăng cường ứng dụng công nghệ thông tin, chuyển đổi số trong quản lý nhà nước; (xi) Bổ sung các quy định về Hệ thống thông tin, Cơ sở dữ liệu quốc gia về hoạt động xây dựng, quản lý trật tự xây dựng, quy trình rút gọn đối với dự án đầu tư công đặc biệt...".

Dự thảo Nghị định về thi công xây dựng, quản lý chất lượng và bảo trì công trình được xây dựng đã tách biệt rõ các trường hợp nghiệm thu như nghiệm thu hoàn thành, nghiệm thu có điều kiện và nghiệm thu từng phần.

hợp cấp Giấy phép xây dựng công trình 07 ngày làm việc đối với nhà ở riêng lẻ (giảm khoảng 50% so với quy định cũ).

Về phê duyệt của Chủ đầu tư đối với bước thiết kế xây dựng triển khai sau khi dự án được phê duyệt, dự thảo Nghị định đề xuất quy định chủ đầu tư thực hiện thẩm định, kiểm soát, phê duyệt thiết kế xây dựng triển khai sau khi dự án được phê duyệt. Trường hợp dự án sử dụng thiết kế kỹ thuật hoặc sử dụng thiết kế FEED tại Báo cáo nghiên cứu khả thi và lựa chọn nhà thầu thi công, EPC, EC, EP ngay sau khi dự án được duyệt thì giao chủ đầu tư tự quyết định việc kiểm soát thiết kế theo thảo thuận hợp đồng (không bắt buộc thực hiện theo quy trình thẩm định, phê duyệt như thông thường)…

CỤ THỂ HÓA QUẢN LÝ CHẤT LƯỢNG, THI CÔNG VÀ BẢO TRÌ CÔNG TRÌNH

Dự thảo Nghị định về thi công xây dựng, quản lý chất lượng và bảo trì công trình được xây dựng nhằm cụ thể hóa các quy định, đảm bảo tính đồng bộ của hệ thống pháp luật.

Dự thảo Nghị định kế thừa các nội dung phù hợp của Nghị định số 06/2021/NĐ-CP, đồng thời tập trung sửa đổi, bổ sung những vấn đề cấp bách, còn vướng mắc trong thực tiễn.

Một số nội dung mới, đáng chú ý đó là: Đối với nguyên tắc quản lý thi công, bổ sung quy định các chủ thể phải chịu trách nhiệm về chất lượng công việc do mình thực hiện.

Về thí nghiệm, kiểm định, giám định xây dựng, tăng cường kiểm soát hoạt động thí nghiệm, bổ sung quy định về quan trắc công trình trong quá trình thi công.

Quản lý nhà ở riêng lẻ, bổ sung quy định đối với nhà ở kết hợp mục đích khác và chuyển đổi công năng.

Về an toàn thi công, quy định rõ trách nhiệm của nhà thầu trong việc lập và thực hiện biện pháp đảm bảo an toàn.

Đặc biệt, trong công tác nghiệm thu, Dự thảo đã tách biệt rõ các trường hợp nghiệm thu như: Nghiệm thu hoàn thành, nghiệm thu có điều kiện và nghiệm thu từng phần. Đồng thời, cho phép chủ đầu tư nghiệm thu riêng từng nhà thầu, tạo sự linh hoạt trong tổ chức thực hiện.

Dự thảo Nghị định cũng bổ sung các yêu cầu đánh giá sự phù hợp của công trình với thiết kế đã được thẩm định về phòng cháy, chữa cháy, bao gồm các nội dung về khoảng cách an toàn, lối thoát nạn, giải pháp chống cháy lan, chống khói…

Một điểm đáng chú ý khác là việc tiếp tục đơn giản hóa thủ tục hành chính trong dự thảo Nghị định. Thời gian thực hiện các thủ tục như kiểm tra nghiệm thu, đánh giá an toàn công trình, gia hạn thời gian sử dụng công trình được rút ngắn đáng kể.

Đồng thời, Dự thảo Nghị định cũng rà soát lại đối tượng phải thực hiện các thủ tục này, đảm bảo phù hợp thực tế, giảm phiền hà cho người dân và doanh nghiệp.

Trong quản lý chất lượng, dự thảo Nghị định bổ sung quy định đối với các công trình đặc thù như công trình khẩn cấp, cấp bách hoặc thuộc dự án đầu tư công đặc biệt.

Nội dung đánh giá an toàn công trình được làm rõ, tập trung vào kiểm tra khả năng chịu lực của kết cấu chính và các bộ phận có nguy cơ mất an toàn.

Đối với sự cố công trình, Dự thảo Nghị định bỏ quy định phân cấp sự cố, đồng thời quy định rõ thẩm quyền giải quyết và giám định nguyên nhân. Theo đó, Bộ quản lý công trình chuyên ngành sẽ chủ trì xử lý các công trình thuộc phạm vi quản lý hoặc do Thủ tướng giao. UBND cấp tỉnh có thể phân cấp cho cấp xã xử lý một số trường hợp cụ thể.

Dự thảo Nghị định cũng làm rõ trách nhiệm quản lý nhà nước của Bộ Xây dựng, các bộ chuyên ngành và UBND cấp tỉnh trong lĩnh vực chất lượng công trình, an toàn thi công và bảo trì công trình.❖

QUẢN LÝ CHI PHÍ ĐẦU TƯ XÂY DỰNG:

Yêu cầu hoàn thiện theo hướng tiếp cận thị trường và dữ liệu

THANH NGA

Trong bối cảnh thị trường xây dựng biến động nhanh, việc tiếp tục hoàn thiện hệ thống quản lý chi phí theo hướng gắn với dữ liệu và điều kiện thực tế là một yêu cầu cấp thiết.

KHOẢNG CÁCH GIỮA DỰ TOÁN VÀ THỰC TẾ TRIỂN KHAI

Hệ thống quản lý chi phí xây dựng hiện hành đã hình thành đầy đủ các công cụ định mức, đơn giá và phương pháp xác định chi phí. Tuy nhiên, trong quá trình triển khai các dự án, nhiều chủ đầu tư và nhà thầu phản ánh sự chênh lệch giữa chi phí được phê duyệt và chi phí thực tế.

Theo phản ánh của ông Nguyễn Quốc Hiệp - Chủ tịch Hiệp hội các Nhà thầu xây dựng Việt Nam (VACC), giá vật liệu và nhân công do một số địa phương công bố có thể thấp hơn đáng kể so với thị trường. Cụ thể, đơn giá nhân công phổ biến trong công bố khoảng 210 - 240 nghìn đ/công, trong khi thực tế doanh nghiệp phải chi trả trên 400 nghìn đ/công; giá cát đắp nền trên địa bàn tỉnh Phú Thọ công bố khoảng 118 nghìn đ/m^3, nhưng giá mua thực tế có thể lên tới 180 nghìn đ/m^3; hay cấp phối đá dăm loại I công bố là 200 nghìn đ/m^3 nhưng trong thực tế giao dịch lên tới 400 nghìn đ/m^3.

Khoảng chênh lệch này có thể ảnh hưởng đến khả năng thực hiện hợp đồng của nhà thầu, tiến độ triển khai dự án cũng như công tác điều chỉnh, thanh toán chi phí. Hiện tượng này không chỉ xuất hiện ở một vài dự án riêng lẻ, mà có xu hướng tích tụ, trở thành một dạng rủi ro trong quản lý chi phí xây dựng.

Theo BQLDA Mỹ Thuận (Bộ Xây dựng), ngay cả việc xác định giá cát tại mỏ theo cơ chế đặc thù cũng rất khó khăn, đặc biệt trong trường hợp các mỏ không khai thác hết trữ lượng do khối lượng còn lại không bảo đảm chất lượng (nên dừng để đóng cửa mỏ hoặc mỏ bị sạt lở phải đóng cửa mỏ…), nhưng các chi phí vẫn phải thực hiện đầy đủ theo khối lượng được cấp phép.

Thực tiễn tại một số địa phương cho thấy, công cụ quản lý chi phí không thiếu, nhưng chất lượng dữ liệu đầu vào còn hạn chế. Tại Hà Nội, công cụ quản lý chi phí không thiếu, nhưng vấn đề nằm ở chất lượng dữ liệu đầu vào. Sở Xây dựng Hà Nội cho biết, giá VLXD được công bố định kỳ, song nguồn dữ liệu chủ yếu dựa vào báo giá từ các doanh nghiệp cung cấp, trong khi chưa có cơ chế kiểm chứng độc lập hoặc hệ thống thu thập dữ liệu chuẩn hóa.

Hệ quả là, giá công bố không phản ánh đầy đủ thị trường; cùng một loại vật liệu có thể có nhiều mức giá khác nhau; chủ đầu tư và tư vấn gặp khó khăn khi lập dự toán sát thực tế.

Trong bối cảnh giá vật liệu phụ thuộc mạnh vào biến động xăng dầu và thị trường quốc tế, cơ chế công bố theo tháng hoặc quý càng làm gia tăng độ trễ, khiến công cụ quản lý giảm tính cập nhật so với thị trường.

Trong khi đó, tại TP.HCM, thách thức nằm ở quy mô và độ phức tạp của thị trường. Theo Sở Xây dựng TP.HCM, sau quá trình sáp nhập và mở rộng không gian phát triển, Thành phố phải quản lý chi phí trong một hệ sinh thái bao gồm: đô thị trung tâm; khu công nghiệp; khu logistics - cảng biển; khu vực ven biển và du lịch.

Trong điều kiện đó, giá vật liệu, nhân công và chi phí thi công có thể biến động nhanh theo khu vực và thời điểm. Tuy nhiên, hệ thống công bố giá vẫn vận hành theo chu kỳ, dẫn đến khoảng cách ngày càng lớn giữa công cụ quản lý và thực tế thị trường.

Đồng thời, nhiều loại công trình đặc thù như: metro, công trình ngầm, công trình trong đô thị mật độ cao, chưa có định mức phù hợp, khiến việc áp dụng hệ thống định mức hiện hành trở nên lúng túng.

Còn tại Đà Nẵng, vấn đề nổi bật không chỉ là giá hay định mức, mà là phương thức quản lý chi phí. Theo Sở Xây dựng Đà Nẵng, việc kiểm soát chi phí diễn ra chủ yếu ở giai đoạn thẩm định hoặc quyết toán, dẫn đến sai lệch chi phí chỉ được phát hiện khi dự án đã triển khai; khoảng cách giữa dự toán và giá trúng thầu ngày càng lớn; cơ quan quản lý phải xử lý hậu quả thay vì kiểm soát rủi ro từ đầu.

Đồng thời, việc thiếu cơ sở dữ liệu chi phí khiến công tác so sánh, dự báo và điều chỉnh chi phí còn hạn chế.

Trong bối cảnh giá vật liệu phụ thuộc mạnh vào biến động xăng dầu và thị trường quốc tế, cơ chế công bố theo tháng hoặc quý càng làm gia tăng độ trễ, khiến công cụ quản lý giảm tính cập nhật so với thị trường.

YÊU CẦU HOÀN THIỆN MÔ HÌNH QUẢN LÝ CHI PHÍ

Từ thực tiễn trên có thể thấy, hệ thống quản lý chi phí hiện nay còn mang tính ổn định cao, trong khi thị trường xây dựng có xu hướng biến động nhanh.

Theo phân tích của Viện Kinh tế xây dựng (Bộ Xây dựng), vấn đề không chỉ nằm ở từng công cụ riêng lẻ, giá hay định mức, mà ở mối liên kết giữa các công cụ quản lý chi phí tổng mức đầu tư - dự toán - gói thầu đang vận hành rời rạc, thiếu liên kết, chưa được thiết kế đồng bộ, dẫn đến chênh lệch chi phí giữa các giai đoạn nhưng không có cơ chế xử lý.

Nhìn ra thế giới cho thấy, cách tiếp cận của Nhật Bản là một hướng đi khá phù hợp với Việt Nam trong ngắn hạn: Duy trì kỷ luật chi phí thông qua hệ thống định mức và giá trần. TS Phạm Văn Khánh - Tổng hội Xây dựng Việt Nam cho biết, tại Nhật Bản, Nhà nước xây dựng hệ thống định mức và dự toán chi tiết, từ đó xác lập giá trần cho các dự án công. Mô hình này đảm bảo: kỷ luật ngân sách; tính minh bạch; khả năng kiểm soát chi phí ở mức cao. Tuy nhiên, mô hình này cũng bộc lộ hạn chế khi thị trường biến động nhanh. Do đó, nó có thể phù hợp với Việt Nam trong ngắn hạn, khi hệ thống định mức vẫn đóng vai trò chủ đạo.

Ngược lại, mô hình của New Zealand cho thấy cách xử lý bài toán mà Việt Nam đang gặp phải: Đưa dữ liệu thị trường và lập kế hoạch chi phí vào trung tâm quản lý... Theo TS Lê Thị Hoài Ân - Trường Đại học Massey, tại New Zealand, chi phí được quản lý theo phương pháp lập kế hoạch chi phí, là một quá trình liên tục gắn với thiết kế và vòng đời dự án. Hệ thống này dựa trên: Cơ sở dữ liệu chi phí; đội ngũ chuyên gia định giá; chỉ số giá và giá trị chuẩn tham chiếu thị trường. Nhờ đó, chi phí được điều chỉnh linh hoạt theo thực tế, giảm sai lệch và tăng hiệu quả đầu tư. Mô hình này gợi mở cách tiếp cận có thể tham khảo đối với Việt Nam, đặc biệt trong xử lý vấn đề dữ liệu và liên kết chi phí.

Theo ông Nguyễn Thành Long - Chủ tịch HĐTV, Giám đốc Điều hành VinaQS, xu hướng quốc tế trong quản lý chi phí xây dựng hiện nay không còn dừng ở việc hoàn thiện định mức hay đơn giá riêng lẻ, mà đang chuyển sang chuẩn hóa và số hóa toàn bộ quá trình quản lý chi phí.

Cụ thể, các chuẩn mực của RICS - Một tổ chức nghề nghiệp quốc tế trong lĩnh vực xây dựng và bất động sản của Anh quốc cho thấy 3 hướng chuyển dịch chính: Thứ nhất, chuẩn hóa đo bóc khối lượng, tức là thống nhất cách tính khối lượng công việc giữa các chủ thể (chủ đầu tư, tư vấn, nhà thầu), qua đó hạn chế sai lệch ngay từ đầu; Thứ hai, tích hợp chi phí vào Mô hình thông tin công trình (BIM 5D), cho phép theo dõi và cập nhật chi phí theo thời gian thực cùng với tiến độ và thiết kế; Thứ ba, quản lý chi phí theo rủi ro và vòng đời dự án, thay vì chỉ kiểm soát chi phí tại một thời điểm, giúp nhận diện và xử lý sớm các biến động ngay từ giai đoạn chuẩn bị đầu tư.

Theo cách tiếp cận này, chi phí xây dựng không còn là một "con số tĩnh" trong hồ sơ, mà trở thành một dòng dữ liệu động, được cập nhật liên tục và gắn với toàn bộ quá trình hình thành, vận hành công trình. Mô hình này đặt ra yêu cầu chuyển đổi số mà Việt Nam hiện mới ở giai đoạn khởi đầu.

Các kinh nghiệm này không phải là mô hình áp dụng trực tiếp, nhưng gợi mở cách tiếp cận đáng để Việt Nam tham khảo, đặc biệt trong việc nâng cao chất lượng dữ liệu; tăng tính linh hoạt của công cụ quản lý; gắn chi phí với vòng đời dự án.

Từ các phân tích trên, có thể xem xét lộ trình hoàn thiện hệ thống quản lý chi phí theo các bước. Trong ngắn hạn, thực hiện rà soát, cập nhật định mức và giá xây dựng; trong trung hạn, xây dựng cơ sở dữ liệu giá và tăng cường liên thông giữa các công cụ; và trong dài hạn, từng bước tiếp cận quản lý chi phí dựa trên dữ liệu, thị trường và vòng đời dự án. Đây là điều kiện quan trọng để nâng cao hiệu quả đầu tư và hạn chế rủi ro trong hoạt động xây dựng.❖

NÂNG CAO HIỆU QUẢ QUẢN LÝ CHI PHÍ DỰ PHÒNG TRONG ĐẦU TƯ XÂY DỰNG:

Giải pháp từ kinh nghiệm quốc tế và tiêu chuẩn AACE

> **TS NGUYỄN LIÊN HƯƠNG, PGS.TS NGUYỄN QUỐC TOẢN**

Sự nhầm lẫn giữa dự phòng và chi phí phát sinh do thay đổi phạm vi công việc cũng là vấn đề phổ biến, dễ dẫn đến tranh chấp kéo dài giữa chủ đầu tư và nhà thầu.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh Việt Nam đang đẩy mạnh đầu tư phát triển cơ sở hạ tầng với tổng mức đầu tư toàn xã hội hàng năm chiếm tỷ trọng lớn trong GDP, quản lý chi phí (QLCP) đầu tư xây dựng (ĐTXD) trở thành một trong những công cụ quản trị công quan trọng nhất. Chi phí dự phòng, với tư cách là một cấu thành không thể thiếu trong tổng mức đầu tư, được thiết lập nhằm ứng phó với những rủi ro và bất định không thể lường trước trong quá trình thực hiện dự án. Tuy nhiên, thực tiễn QLCP tại các dự án công ở Việt Nam đang bộc lộ những yếu kém mang tính hệ thống, mà nguyên nhân sâu xa bắt nguồn từ sự lạc hậu trong phương pháp xác định và QLCP dự phòng.

Kết quả kiểm toán của Kiểm toán nhà nước và phản ánh từ các cơ quan truyền thông chuyên ngành liên tục chỉ ra tình trạng sai sót trong công tác lập dự toán, dẫn đến phải điều chỉnh tổng mức đầu tư, đội vốn và chậm tiến độ [1]. Một trong những nguyên nhân cốt lõi là việc áp dụng một tỷ lệ dự phòng cứng nhắc (thường từ 5% đến 10%) cho mọi loại hình dự án, không phản ánh được cấu trúc rủi ro đặc thù và mức độ bất định riêng của từng công trình. Các báo cáo phân tích thị trường của Viện Kinh tế Xây dựng cho thấy, giá vật liệu xây dựng biến động liên tục, nhưng cách xác định dự phòng hiện nay chưa thực sự bám sát diễn biến này [2]. Trong khi đó, trên thế giới, việc quản lý rủi ro và xác định chi phí dự phòng đã được chuẩn hóa thành các quy trình và tiêu chuẩn chặt chẽ. AACE International (Hiệp hội Kỹ thuật Chi phí Hoa Kỳ) là tổ chức hàng đầu trong lĩnh vực này, đã phát triển một hệ thống các hướng dẫn thực hành (Recommended Practices) toàn diện. Các hướng dẫn này nhấn mạnh việc xác định dự phòng phải dựa trên phân tích rủi ro định lượng, phân biệt rõ các loại rủi ro khác nhau và tích hợp với quy trình quản lý dự án tổng thể.

Xuất phát từ thực tiễn bất cập trong nước và yêu cầu tiếp cận với thông lệ quốc tế tiên tiến, bài viết tập trung phân tích những hạn chế trong xác định và QLCP dự phòng tại Việt Nam, nghiên cứu hệ thống tiêu chuẩn của AACE International, từ đó đề xuất các giải pháp hoàn thiện, góp phần nâng cao hiệu quả QLCP ĐTXD.

2. THỰC TRẠNG QLCP DỰ PHÒNG TẠI VIỆT NAM

2.1. Phương pháp xác định theo tỷ lệ phần trăm cứng nhắc

Thực tiễn hiện nay tại Việt Nam, chi phí dự phòng thường được xác định bằng một tỷ lệ phần trăm (%) cố định trên tổng các khoản mục chi phí, với tỷ lệ được ấn định tùy theo mức độ chi tiết của thiết kế và thời gian thực hiện dự án. Cách tiếp cận này, theo đánh giá của AACE International, là một phương pháp "xác định" (deterministic) mang tính chủ quan cao, không phản ánh được cấu trúc rủi ro đặc thù của từng dự án. Nguyên tắc "risk-driven" được đặt ra trong RP 40R-08 nhấn mạnh rằng một phương pháp xác định dự phòng phù hợp phải có sự liên kết rõ ràng giữa rủi ro và tác động của nó đến chi phí, đồng thời phải được tích hợp vào quy trình quản lý rủi ro tổng thể [3].

Hệ quả của phương pháp này là dẫn đến hai tình huống tiêu cực. Một là, đối với các dự án có nhiều yếu tố bất định

(*) Khoa Kinh tế và Quản lý xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

Quản lý rủi ro và chi phí dự phòng là một lĩnh vực phức tạp, đòi hỏi sự kết hợp giữa phương pháp luận khoa học, công cụ phân tích định lượng và kinh nghiệm thực tiễn.

(công nghệ mới, điều kiện địa chất phức tạp, thủ tục giải phóng mặt bằng kéo dài), tỷ lệ dự phòng thường quá thấp, không đủ bù đắp các rủi ro phát sinh, dẫn đến thiếu hụt vốn, phải điều chỉnh tổng mức đầu tư và đội vốn. Hai là, đối với các dự án có độ bất định thấp (công nghệ đã được kiểm chứng, mặt bằng sạch), tỷ lệ dự phòng lại quá cao so với nhu cầu thực tế, tạo ra nguồn lực nhàn rỗi, gây lãng phí và có nguy cơ bị sử dụng sai mục đích.

2.2. Thiếu phân biệt giữa các loại rủi ro

Một hạn chế cơ bản khác là sự thiếu phân biệt rõ ràng giữa các loại rủi ro trong quá trình xác định dự phòng. AACE International phân biệt hai loại rủi ro cơ bản. Thứ nhất là rủi ro hệ thống (systemic risks) gắn với tính bất định vốn có của quá trình ước tính, bao gồm các yếu tố như biến động giá cả, năng suất lao động, điều kiện thời tiết. Thứ hai là rủi ro dự án cụ thể (project-specific risks) là các sự kiện rủi ro có thể xác định được, như thay đổi thiết kế, chậm trễ trong giải phóng mặt bằng, sự cố kỹ thuật, hoặc các vấn đề về nhà thầu [3]. Đối với mỗi loại rủi ro, cần có phương pháp định lượng khác nhau.

Tại Việt Nam, sự phân biệt tinh tế này hầu như không được đề cập trong các quy định và cũng ít được áp dụng trong thực tiễn. Các dự án thường chỉ có một con số dự phòng duy nhất, được tính gộp chung cho mọi loại rủi ro. Việc không phân định rõ rủi ro hệ thống và rủi ro dự án cụ thể khiến cho quá trình theo dõi và sử dụng dự phòng trở nên thiếu minh bạch, khó xác định trách nhiệm khi rủi ro xảy ra. Các báo cáo nghiên cứu khả thi thường liệt kê rủi ro một cách hình thức, không lượng hóa được tác động và xác suất xảy ra, dẫn đến việc xác định dự phòng thiếu cơ sở thuyết phục.

2.3. Xác định dự phòng không dựa trên phân tích rủi ro có hệ thống

Thực trạng phổ biến hiện nay là việc xác định dự phòng không dựa trên phân tích rủi ro có hệ thống. Theo AACE RP 40R-08, một phương pháp xác định dự phòng phù hợp phải dựa trên nguyên tắc "risk-driven", nghĩa là phải có sự liên kết rõ ràng giữa rủi ro và tác động của nó đến chi phí [3]. Các ước tính dựa trên đánh giá chủ quan của nhóm dự án có thể phản ánh đáng tin cậy các bất định chi phí, nhưng chỉ khi được thực hiện một cách có cấu trúc và có sự tham gia của các chuyên gia am hiểu.

Tuy nhiên, thực tiễn tại Việt Nam cho thấy việc xác định dự phòng thường được thực hiện một cách cơ học, không có quy trình nhận diện, phân tích và định lượng rủi ro bài bản. Các báo cáo nghiên cứu khả thi thường liệt kê rủi ro một cách hình thức, không lượng hóa được tác động và xác suất xảy ra. Nghiên cứu quy mô lớn của Flyvbjerg và Bester (2021) trên 2.062 dự án đầu tư công từ 104 quốc gia cho thấy các phân tích chi phí - lợi ích hiện nay thường không chính xác và thiên lệch, với mức đánh giá quá cao tỷ suất lợi ích - chi phí từ 50% đến 200% [4]. Nguyên nhân chính được xác định là do sự thiếu vắng các phân tích rủi ro khách quan và xu hướng lạc quan thái quá (optimism bias) trong quá trình lập dự toán.

2.4. Bất cập trong cơ chế quản lý và sử dụng chi phí dự phòng

Cơ chế quản lý và sử dụng chi phí dự phòng tại Việt Nam cũng đang bộc lộ nhiều bất cập. Trong thực tiễn quốc tế, chi phí dự phòng được quản lý như một quỹ dự phòng có kiểm

soát (controlled reserve), và việc giải ngân chỉ được thực hiện khi có đầy đủ tài liệu chứng minh và sự chấp thuận chính thức của chủ đầu tư dựa trên quy trình quản lý thay đổi (change management). Khi kết thúc dự án, phần dự phòng không sử dụng được hoàn trả cho chủ đầu tư hoặc được phân bổ lại theo thỏa thuận [3].

Tại Việt Nam, việc thiếu các hướng dẫn chi tiết về quy trình giải ngân, hồ sơ chứng minh và trách nhiệm giải trình khi sử dụng dự phòng đã tạo ra kẽ hở cho việc sử dụng không đúng mục đích. Không có cơ chế bắt buộc hoàn trả phần dự phòng không sử dụng, dẫn đến tình trạng nhiều dự án "chi cho hết" dự phòng dù không thực sự cần thiết. Sự nhầm lẫn giữa dự phòng và chi phí phát sinh do thay đổi phạm vi công việc cũng là vấn đề phổ biến, dễ dẫn đến tranh chấp kéo dài giữa chủ đầu tư và nhà thầu.

3. HỆ THỐNG TIÊU CHUẨN AACE INTERNATIONAL VỀ QUẢN LÝ RỦI RO VÀ CHI PHÍ DỰ PHÒNG

3.1. Hệ thống phân loại dự toán (RP 18R-97)

Nền tảng của hệ thống AACE là phân loại dự toán thành 5 cấp độ dựa trên mức độ hoàn thiện của định nghĩa dự án (project definition), từ Class 5 (ước tính sơ bộ) đến Class 1 (dự toán chi tiết). Mỗi cấp độ tương ứng với một dải sai số dự kiến và phương pháp xác định dự phòng phù hợp [5]. Điểm cốt lõi là việc phân loại dự toán không chỉ dựa trên tỷ lệ phần trăm thiết kế mà còn dựa trên chất lượng của các đầu vào thiết kế, giúp lựa chọn phương pháp phân tích rủi ro phù hợp.

3.2. Các nguyên tắc chung xác định dự phòng (RP 40R-08)

RP 40R-08 đặt ra 8 nguyên tắc cốt lõi mà bất kỳ phương pháp xác định dự phòng nào cũng phải tuân thủ, trong đó nổi bật là các nguyên tắc: phương pháp phải liên kết rõ ràng yếu tố rủi ro với tác động chi phí/tiến độ (risk-driven); phải sử dụng dữ liệu thực nghiệm (employ empiricism); phải bắt đầu bằng việc xác định các yếu tố gây rủi ro (risk drivers); và phải tránh tạo ra các rủi ro tự làm hại (iatrogenic risks) [3]. Các nguyên tắc này đặt ra một khuôn khổ để đánh giá và lựa chọn phương pháp phù hợp cho từng loại dự án.

3.3. Các phương pháp định lượng rủi ro

Phương pháp tham số (RP 42R-08): Được sử dụng để định lượng rủi ro hệ thống (systemic risks) dựa trên phân tích dữ liệu lịch sử. Phương pháp này xây dựng các mô hình hồi quy, trong đó kết quả đầu ra (ví dụ: mức tăng chi phí) được liên kết với các yếu tố đầu vào như mức độ định nghĩa phạm vi, độ phức tạp công nghệ, năng lực nhóm dự án [6]. Đây là phương pháp tối ưu cho các dự án giai đoạn sớm (Class 5, 4) khi dữ liệu thực tế về rủi ro cụ thể còn thiếu.

Phương pháp giá trị kỳ vọng (RP 44R-08): Được sử dụng để định lượng các rủi ro dự án cụ thể (project-specific risks) dưới dạng sự kiện.

Công thức [7]: Giá trị kỳ vọng = Xác suất rủi ro xảy ra × Tác động nếu xảy ra

Phương pháp này lý tưởng cho các sự kiện rủi ro có thể xác định được và thường được kết hợp với phương pháp tham số để tạo thành cách tiếp cận hỗn hợp (hybrid) toàn diện.

Phương pháp ước lượng bằng khoảng giá trị (RP 41R-08, 118R-21): Đây là phương pháp sử dụng mô phỏng Monte Carlo (MCS) trên các khoảng giá trị do chuyên gia ước lượng. Các nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng phương pháp này chỉ nên được áp dụng cho rủi ro hệ thống (inherent risks) khi dự án có định nghĩa phạm vi rõ ràng (Class 3 trở lên), không có công nghệ mới và độ phức tạp thấp. Không khuyến nghị sử dụng khi có rủi ro dự án cụ thể đáng kể vì có xu hướng đánh giá thấp dự phòng [8, 9].

3.4. Tích hợp các phương pháp (RP 117R-21)

RP 117R-21 hướng dẫn cách tích hợp phương pháp tham số và phương pháp giá trị kỳ vọng vào một mô hình phân tích chi phí và tiến độ tích hợp (Integrated Cost and Schedule Risk Analysis - ICSRA) dựa trên sơ đồ mạng CPM. Đây là phương pháp tiên tiến nhất, giải quyết vấn đề trùng lặp rủi ro (double-counting) khi kết hợp hai phương pháp [10]. Quy trình này bao gồm: phát triển mô hình tham số để xác định rủi ro hệ thống, sử dụng mô phỏng Monte Carlo để trừ đi phần rủi ro đã được xác định trong mô hình CPM, sau đó thêm vào các rủi ro dự án cụ thể để tạo thành phân bố xác suất tổng hợp.

4. ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP HOÀN THIỆN CHO VIỆT NAM

4.1. Xây dựng danh mục rủi ro đặc thù cho từng loại dự án

Bộ Xây dựng cần chủ trì, phối hợp với các Bộ chuyên ngành và các hiệp hội nghề nghiệp xây dựng và ban hành "Sổ tay hướng dẫn nhận diện và phân loại rủi ro cho các dự án đầu tư xây dựng". Sổ tay này cần phân loại rủi ro theo các nhóm chính, tham khảo phân loại của AACE [3]:

- Rủi ro về kỹ thuật - công nghệ: thiết kế, công nghệ thi công, vật liệu mới, điều kiện địa chất, địa hình.
- Rủi ro về thị trường - giá cả: biến động giá vật liệu, nhân công, máy thi công, tỷ giá, lạm phát.
- Rủi ro về pháp lý - thủ tục: chậm trễ giải phóng mặt bằng, thay đổi chính sách, vướng mắc thủ tục đầu tư, đấu thầu.
- Rủi ro về tổ chức - quản lý: năng lực của chủ đầu tư, nhà thầu, tư vấn, phối hợp giữa các bên.
- Rủi ro về tự nhiên - môi trường: thiên tai, dịch bệnh, sự cố môi trường. Đối với mỗi loại rủi ro, sổ tay cần cung cấp hướng dẫn về phương pháp nhận diện, đánh giá mức độ tác động và xác suất xảy ra, cũng như các biện pháp phòng ngừa và giảm thiểu.

4.2. Chuyển đổi phương pháp xác định dự phòng sang phân tích rủi ro định lượng

Cần thay thế phương pháp xác định dự phòng theo tỷ lệ phần trăm cứng nhắc bằng phương pháp phân tích rủi ro định lượng, phù hợp với hồ sơ rủi ro riêng của từng dự án. Lộ trình thực hiện:

- Ngắn hạn (2026-2027): Khuyến khích áp dụng các phương pháp đơn giản như phân tích độ nhạy (sensitivity analysis) và phân tích kịch bản (scenario analysis) cho các dự án quy mô vừa và nhỏ. Ban hành hướng dẫn cụ thể về các phương pháp này.
- Trung hạn (2028-2030): Đối với dự án nhóm A, yêu cầu

áp dụng phương pháp phân tích rủi ro định lượng tiên tiến hơn như mô phỏng Monte Carlo cho rủi ro hệ thống, kết hợp với phương pháp giá trị kỳ vọng cho rủi ro dạng sự kiện. Ban hành hướng dẫn chi tiết tham khảo các tiêu chuẩn của AACE (RP 40R-08, 41R-08, 44R-08, 117R-21) [3, 7, 9, 10].

• Dài hạn (sau 2031): Xác định chi phí dự phòng dựa trên tổng hợp các rủi ro đã được định lượng, với mức độ tin cậy phù hợp (80-90%). Thể chế hóa quy định này trong các văn bản hướng dẫn về lập tổng mức đầu tư và dự toán.

4.3. Thiết lập cơ chế quản lý và sử dụng dự phòng minh bạch, có kiểm soát cần xây dựng cơ chế QLCP dự phòng minh bạch, có kiểm soát, gắn liền với quy trình quản lý thay đổi và trách nhiệm giải trình rõ ràng [3]. Cụ thể:

• Chi phí dự phòng được quản lý như một quỹ dự phòng có kiểm soát (controlled reserve), không phải là khoản chi phí thông thường.

• Việc giải ngân chỉ được thực hiện khi có đầy đủ tài liệu chứng minh rủi ro đã xảy ra và sự chấp thuận chính thức của chủ đầu tư (đối với dự án nhóm B, C) hoặc cấp có thẩm quyền (đối với dự án nhóm A, đặc biệt).

• Xây dựng quy trình quản lý thay đổi (change management) chặt chẽ, phân định rõ ranh giới giữa dự phòng và các khoản chi phí phát sinh do thay đổi phạm vi.

• Khi kết thúc dự án, phần dự phòng không sử dụng được hoàn trả cho chủ đầu tư hoặc nộp ngân sách nhà nước (đối với dự án công).

Đối với các dự án PPP và dự án phức tạp, có thể nghiên cứu áp dụng thí điểm mô hình hợp đồng Cost+ với cơ chế "sổ sách mở" (open-book principle) và chia sẻ lợi nhuận/thua lỗ, học hỏi kinh nghiệm từ các nước phát triển.

4.4. Nâng cao năng lực chuyên môn về quản lý rủi ro

Các trường đại học cần đưa nội dung quản lý rủi ro dự án, phân tích rủi ro định lượng vào chương trình đào tạo bắt buộc cho sinh viên ngành Xây dựng, kinh tế xây dựng và quản lý dự án. Nội dung đào tạo cần bao gồm các phương pháp phân tích rủi ro, sử dụng phần mềm chuyên dụng (như @Risk, Crystal Ball), và các tiêu chuẩn quốc tế (AACE, ISO 31000).

Bộ Xây dựng phối hợp với các hiệp hội nghề nghiệp tổ chức các khóa đào tạo ngắn hạn, cấp chứng chỉ về phân tích rủi ro và xác định dự phòng theo tiêu chuẩn quốc tế. Việc hợp tác với AACE International để chuyển giao chương trình đào tạo và công nhận chứng chỉ chuyên gia QLCP (Certified Cost Professional - CCP) cũng cần được đẩy mạnh.

5. KẾT LUẬN

Quản lý rủi ro và chi phí dự phòng là một lĩnh vực phức tạp, đòi hỏi sự kết hợp giữa phương pháp luận khoa học, công cụ phân tích định lượng và kinh nghiệm thực tiễn. Thực trạng tại Việt Nam cho thấy nhiều bất cập: phương pháp tỷ lệ phần trăm cứng nhắc, thiếu phân biệt các loại rủi ro, xác định dự phòng không dựa trên phân tích rủi ro có hệ thống, và cơ chế quản lý, sử dụng dự phòng thiếu minh bạch.

Hệ thống tiêu chuẩn AACE International cung cấp một khuôn khổ toàn diện với các nguyên tắc rõ ràng và các phương pháp định lượng tiên tiến. Từ việc phân loại dự toán (RP 18R-97), các nguyên tắc chung (RP 40R-08), đến các phương pháp cụ thể như tham số (RP 42R-08), giá trị kỳ vọng (RP 44R-08), và tích hợp (RP 117R-21), tất cả đều nhấn mạnh tầm quan trọng của việc tiếp cận khoa học, dựa trên dữ liệu và phân tích rủi ro có hệ thống.

Các giải pháp đề xuất bao gồm xây dựng danh mục rủi ro đặc thù, chuyển đổi phương pháp xác định dự phòng sang phân tích rủi ro định lượng, thiết lập cơ chế quản lý minh bạch và nâng cao năng lực chuyên môn. Với lộ trình thực hiện cụ thể và sự quyết tâm của các cơ quan quản lý nhà nước, cộng đồng doanh nghiệp và các hiệp hội nghề nghiệp, Việt Nam hoàn toàn có thể xây dựng một hệ thống QLCP ĐTXD hiện đại, minh bạch, hiệu quả, đáp ứng yêu cầu phát triển bền vững và hội nhập quốc tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Tuấn Minh, "Nhiều bất cập trong quản lý, xây dựng dự án đầu tư công," Báo Kiểm toán, [Online]. Available: http://baokiemtoan.vn/nhieu-bat-cap-trong-quan-ly-xay-dung-du-an-dau-tu-cong-45035.html

[2] Viện Kinh tế Xây dựng. (2023). *Báo cáo diễn biến thị trường vật liệu xây dựng chủ yếu tháng 10/2023*. Số: /VKT-GXD. [Online]. Available: https://kinhtexaydung.gov.vn/chuyen-muc-thong-tin-cong-bo/cac-bao-cao-nghien-cuu-thi-truong/

[3] AACE International. (2021). Risk analysis and contingency determination (AACE International Recommended Practice No. 40R-08). [Online]. Available: https://web.aacei.org/docs/default-source/toc/toc_40r-08.pdf

[4] B. Flyvbjerg and D. Bester. (2021). "The cost-benefit fallacy: Why cost-benefit analyses are systematically biased," Transport Reviews, vol. 41, no. 4, pp. 411-433.

[5] AACE International. (2020). Cost estimate classification system - As applied in engineering, procurement, and construction for the process industries (AACE International Recommended Practice No. 18R-97). [Online].

Available: https://web.aacei.org/docs/default-source/toc/toc_18r-97.pdf

[6] AACE International. (2021). Risk analysis and contingency determination using parametric estimating (AACE International Recommended Practice No. 42R-08). [Online]. Available: https://web.aacei.org/docs/default-source/toc/toc_42r-08.pdf

[7] AACE International. (2021). Risk analysis and contingency determination using expected value (AACE International Recommended Practice No. 44R-08). [Online]. Available: https://web.aacei.org/docs/default-source/toc/toc_44r-08.pdf

[8] AACE International. (2022). Understanding estimate ranging (AACE International Recommended Practice No. 41R-08). [Online].

Available: https://web.aacei.org/docs/default-source/toc/toc_41r-08.pdf

[9] AACE International. (2022). Cost risk analysis and contingency determination using estimate ranging for inherent risks with Monte Carlo simulation (AACE International Recommended Practice No. 118R-21). [Online]. Available: https://web.aacei.org/docs/default-source/toc/toc_118r-21.pdf

[10] AACE International. (2022). Integrated cost and schedule risk analysis and contingency determination using combined parametric modelling and Monte Carlo simulation of a CPM model (AACE International Recommended Practice No. 117R-21). [Online]. Available: https://web.aacei.org/docs/default-source/toc/toc_117r-21.pdf

Vận tải xanh ở Việt Nam trong bối cảnh mới

> THẠCH LONG

Sự tăng trưởng nhanh của ngành logistics và vận tải của Việt Nam đã góp phần thúc đẩy phát triển kinh tế, nhưng đồng thời cũng gây áp lực lớn lên môi trường. Trước cam kết đạt phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050, việc phát triển vận tải xanh trở thành một yêu cầu cấp thiết.

THỰC TRẠNG VẬN TẢI XANH TẠI VIỆT NAM

Vận tải xanh (green transport) là hệ thống vận chuyển sử dụng các phương tiện và công nghệ thân thiện với môi trường nhằm giảm phát thải khí nhà kính, tiết kiệm năng lượng và tối ưu hóa tài nguyên. Khái niệm này bao gồm cả việc sử dụng năng lượng tái tạo, tối ưu hóa tuyến đường và nâng cao hiệu quả logistics.

Trong những năm gần đây, các số liệu thống kê cho thấy mức độ phát thải và sự phụ thuộc vào vận tải truyền thống tại Việt Nam vẫn ở mức cao. Theo Bộ NN&MT, ngành giao thông vận tải hiện chiếm khoảng 10 - 15% tổng lượng phát thải CO_2 quốc gia (Monre, 2024), tương đương 36 - 54 triệu tấn CO_2 mỗi năm.

Đặc biệt, theo Ngân hàng Thế giới (WB), tổng lượng phát thải từ hoạt động vận tải tại Việt Nam đạt hơn 50 triệu tấn CO_2/năm (WB, 2024), và có xu hướng tăng nhanh nếu không có biện pháp kiểm soát hiệu quả.

Cơ cấu vận tải hiện nay cho thấy sự mất cân đối rõ rệt: Khoảng 75% hàng hóa vận chuyển bằng đường bộ (VLA, 2025); chỉ khoảng 12% bằng đường biển và 2% bằng đường sắt. Sự phụ thuộc này dẫn đến hệ quả nghiêm trọng về môi trường. Ước tính 95% lượng phát thải từ vận chuyển hàng hóa đến từ vận tải đường bộ.

Ngoài ra, hiệu quả vận tải còn thấp khi: Xe tải chạy rỗng chiều về chiếm tới 70% số chuyến; Khoảng 95% phương tiện vẫn sử dụng nhiên liệu hóa thạch. Điều này cho thấy hệ thống vận tải hiện tại chưa tối ưu và còn nhiều dư địa để chuyển đổi xanh. (Bảng 1)

Thực trạng vận tải tại Việt Nam thể hiện rõ nhất ở 4 điểm sau:

- Cơ cấu vận tải chưa hợp lý: Vận tải đường bộ hiện chiếm tỷ trọng lớn nhất trong tổng vận tải hàng hóa, dẫn đến mức tiêu thụ nhiên liệu cao và phát thải lớn. Trong khi đó, vận tải đường sắt và đường thủy - vốn có mức phát thải thấp hơn - lại chưa được khai thác hiệu quả.

- Hạ tầng giao thông còn hạn chế: Hệ thống hạ tầng giao thông chưa đồng bộ, thiếu các công trình hỗ trợ vận tải xanh như trạm sạc điện, cảng xanh và trung tâm logistics hiện đại. Điều này làm giảm khả năng triển khai các giải pháp vận tải thân thiện môi trường.

- Công nghệ và phương tiện: Phần lớn phương tiện vận tải tại Việt Nam vẫn sử dụng nhiên liệu hóa thạch. Xe điện và các phương tiện sử dụng năng lượng sạch còn chiếm tỷ lệ thấp do chi phí cao và hạn chế về công nghệ.

- Nhận thức và nguồn nhân lực: Nhận thức về vận tải xanh của doanh nghiệp còn hạn chế. Đồng thời, nguồn nhân lực có chuyên môn trong lĩnh vực logistics xanh còn thiếu, ảnh hưởng đến khả năng triển khai các giải pháp mới.

THÁCH THỨC ĐỐI VỚI VẬN TẢI XANH

Một thách thức lớn là tốc độ gia tăng phát thải trong tương lai. Theo dự báo của Bộ Xây dựng và WB, lượng phát thải CO_2 từ vận tải tại Việt Nam có thể đạt gần 90 triệu tấn vào năm 2030 (Bộ GTVT, 2024), tăng gần gấp đôi so với hiện nay nếu không có biện pháp can thiệp mạnh mẽ.

Bên cạnh đó, cơ cấu phương tiện vận tải cũng gây ra nhiều bất cập. Việt Nam hiện có khoảng 1,5 triệu xe tải, trong đó 65% là xe tải nhẹ dưới 5 tấn, dẫn đến việc phải sử dụng nhiều phương tiện hơn để vận chuyển cùng khối lượng hàng hóa, làm tăng chi phí và phát thải.

Ngoài ra, phát thải từ vận tải đang tăng với tốc độ trung bình 6 - 7% mỗi năm, phản ánh áp lực ngày càng lớn đối với môi trường và hệ thống hạ tầng.

Những chỉ số trên đang cho thấy việc phát triển vận tải xanh đang đứng trước nhiều thách thức lớn. Đặc biệt, với tốc độ tăng trưởng phát thải (~7 - 8%/năm) cao hơn tốc độ cải thiện hiệu quả năng lượng, cho thấy các chính sách hiện tại chưa đủ để đảo chiều xu hướng gia tăng phát thải.

Bên cạnh đó, chúng ta còn những thách thức trước mắt.

Trước hết về chi phí đầu tư: Chi phí đầu tư ban đầu cho phương tiện và hạ tầng xanh là rất lớn, trong khi thời gian hoàn vốn dài. Điều này khiến nhiều doanh nghiệp e ngại khi chuyển đổi.

Thứ hai, hạ tầng chưa đáp ứng: Dù đã rất cố gắng, nhưng hạ tầng giao thông ở Việt Nam vẫn gặp những rào cản lớn

Bảng 1. Tổng hợp các chỉ số vận tải và phát thải tại Việt Nam (2023 - 2024)

Chỉ tiêu	Giá trị	Nguồn
Phát thải CO_2 từ vận tải	~51,4 triệu tấn (2024)	WB
Phát thải đường bộ	~44 triệu tấn CO_2e (2024)	ATO
Tỷ trọng phát thải từ đường bộ	~84% tổng phát thải vận tải	ATO
Tăng trưởng phát thải vận tải	~7,9%/năm (2023–2024)	WB
Tăng trưởng dài hạn	~6,2%/năm (2000–2024)	ATO
Tỷ trọng vận tải đường bộ	~75% hàng hóa	VCCI
Phương tiện sử dụng nhiên liệu hóa thạch	~95%	VCCI
Mật độ phương tiện	752 xe/1000 dân (2024)	ATO

Bảng 1 cho thấy phát thải vận tải tại Việt Nam đang gia tăng nhanh cả về quy mô tuyệt đối lẫn tốc độ tăng trưởng. Đặc biệt, sự phụ thuộc lớn vào vận tải đường bộ (chiếm khoảng 84% phát thải) là nguyên nhân chính làm gia tăng lượng khí nhà kính trong ngành giao thông.

như thiếu trạm sạc điện, hệ thống cung cấp nhiên liệu xanh và mạng lưới vận tải đa phương thức…

Thứ ba, về chính sách và thể chế: Mặc dù đã có nhiều chính sách hỗ trợ, nhưng hệ thống pháp lý vẫn chưa hoàn thiện, thiếu các cơ chế khuyến khích đủ mạnh.

Thứ tư, thiếu liên kết chuỗi cung ứng: Sự thiếu liên kết giữa các doanh nghiệp logistics làm giảm hiệu quả vận tải và gây lãng phí tài nguyên.

CƠ HỘI PHÁT TRIỂN VẬN TẢI XANH

Mặc dù còn nhiều thách thức, nhưng với những nỗ lực của Chính phủ thời gian qua, Việt Nam đã có những tín hiệu tích cực trong quá trình chuyển đổi xanh. Việt Nam đã cam kết đạt phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050, tạo động lực mạnh mẽ cho chuyển đổi xanh. Các hiệp định thương mại tự do yêu cầu tiêu chuẩn môi trường cao hơn, thúc đẩy doanh nghiệp cải tiến hệ thống vận tải. Sự phát triển của xe điện, trí tuệ nhân tạo và công nghệ số giúp tối ưu hóa vận tải và giảm phát thải.

Trong đó, thể hiện rõ nhất là một số mô hình thí điểm đã được triển khai: Xe buýt điện tại Hà Nội và TP.HCM giúp giảm khoảng 30 tấn CO_2 mỗi năm; Một số doanh nghiệp logistics lớn đã bắt đầu thử nghiệm xe tải điện và giải pháp giao hàng xanh.

Ngoài ra, thị trường logistics toàn cầu đang tăng trưởng mạnh, với quy mô dự kiến đạt 21,91 nghìn tỷ USD vào năm 2033, tạo cơ hội cho Việt Nam tham gia sâu hơn vào chuỗi cung ứng xanh toàn cầu.

Đáng chú ý, ngành logistics tại Việt Nam hiện chỉ chiếm khoảng 7 - 8% tổng phát thải CO_2, cho thấy còn nhiều dư địa để cải thiện hiệu quả và giảm phát thải thông qua các giải pháp công nghệ và quản trị. Đặc biệt, với lợi thế về vận tải biển và đường thủy nội địa, sẽ là điều kiện để chúng ta phát triển vận tải xanh.

Việt Nam là một trong những quốc gia có tốc độ gia tăng phát thải nhanh nhất trong ASEAN do quá trình đô thị hóa và gia tăng phương tiện cá nhân. Theo số liệu của Ngân hàng Thế giới, tổng phát thải CO_2 từ vận tải trong ASEAN khoảng 310 triệu tấn/năm, chiếm khoảng 5% phát thải vận tải toàn cầu; Việt Nam đóng góp khoảng 50 triệu tấn (~16%), thuộc nhóm phát thải lớn trong khu vực.

Tuy nhiên, nhìn toàn khu vực châu Á - Thái Bình Dương chiếm 40% phát thải vận tải toàn cầu, tốc độ tăng phát thải cao nhất thế giới (~6,6%/năm). Như vậy, Việt Nam không phải trường hợp cá biệt mà nằm trong xu hướng chung của khu vực - nơi nhu cầu vận tải tăng nhanh hơn khả năng "xanh hóa".

Số liệu từ WB cũng cho thấy, lĩnh vực vận tải đang chiếm khoảng 24% phát thải CO_2 từ năng lượng toàn cầu; tại Việt Nam, theo tỷ lệ này thấp hơn (~10 - 15%) nhưng tăng nhanh hơn trung bình thế giới (WB, 2024). Điều này cho thấy, thế giới phát thải cao, nhưng đang giảm tốc nhờ công nghệ; trong khi đó, Việt Nam phát thải thấp hơn nhưng lại đang ở giai đoạn tăng trưởng nhanh.

Từ các số liệu trên, có thể thấy rằng Việt Nam đang ở giai đoạn "tăng trưởng phát thải nhanh" trong lĩnh vực vận tải, tương tự nhiều quốc gia đang phát triển trong ASEAN. Tuy nhiên, điểm khác biệt là tốc độ gia tăng phương tiện cá nhân và sự phụ thuộc vào đường bộ cao hơn mức trung bình khu vực. Nếu không có các chính sách can thiệp mạnh mẽ, phát thải từ vận tải có thể trở thành một trong những nguồn phát thải lớn nhất trong nền kinh tế.

Có thể thấy, quá trình phát triển vận tải xanh tại Việt Nam đang đứng trước sự đan xen giữa thách thức và cơ hội. Áp lực từ gia tăng phát thải, hạn chế về hạ tầng, chi phí đầu tư và thể chế vẫn là những rào cản lớn. Tuy nhiên, các cam kết quốc tế, tiến bộ công nghệ và xu hướng chuyển đổi xanh toàn cầu đang mở ra những điều kiện thuận lợi để Việt Nam bứt phá. Nếu tận dụng hiệu quả "cửa sổ cơ hội" hiện nay, kết hợp hài hòa giữa chính sách, đổi mới công nghệ và nâng cao năng lực quản trị, Việt Nam hoàn toàn có thể xây dựng một hệ thống vận tải hiện đại, hiệu quả và thân thiện với môi trường, góp phần thực hiện mục tiêu phát triển bền vững trong dài hạn.

Vận tải xanh góp phần vào mục tiêu tăng trưởng bền vững

> PGS.TS ĐẶNG CÔNG XƯỞNG*

Chuyển dịch sang vận tải xanh không chỉ là xu hướng tất yếu mà còn là giải pháp quan trọng nhằm duy trì tăng trưởng, giảm chi phí và hướng tới mục tiêu phát triển bền vững.

CẢI THIỆN NĂNG LỰC CẠNH TRANH CỦA TOÀN BỘ CHUỖI CUNG ỨNG

Sự mở rộng mạnh mẽ của hoạt động xuất nhập khẩu, sự phát triển của công nghiệp chế biến, chế tạo, cùng với sự bùng nổ của thương mại điện tử đã làm gia tăng đáng kể nhu cầu vận tải hàng hóa trong cả nước. Tuy nhiên, đi cùng với sự tăng trưởng đó là những thách thức ngày càng rõ nét về môi trường và hiệu quả vận hành. Tổng khối lượng hàng hóa vận chuyển nội địa đã đạt gần 2 tỷ tấn mỗi năm, nhưng chi phí logistics của Việt Nam vẫn ở mức cao, khoảng 20 - 21% GDP, cao hơn đáng kể so với mức trung bình của nhiều quốc gia phát triển [1]. Một trong những nguyên nhân cốt lõi nằm ở cấu trúc vận tải chưa hợp lý, với sự phụ thuộc lớn vào vận tải đường bộ - phương thức tiêu tốn nhiều năng lượng và phát thải khí nhà kính cao.

Giữa bối cảnh toàn cầu đang chuyển dịch mạnh mẽ sang mô hình kinh tế xanh và phát triển bền vững, vận tải xanh đã trở thành xu thế tất yếu. Các cam kết quốc tế về biến đổi khí hậu, đặc biệt là mục tiêu đạt phát thải ròng bằng "0" vào năm 2050 của Việt Nam, đang đặt ra những yêu cầu cấp thiết đối với ngành logistics. Không chỉ dừng lại ở việc giảm phát thải, vận tải xanh còn hướng tới tối ưu hóa năng lượng, nâng cao hiệu quả vận hành và cải thiện năng lực cạnh tranh của toàn bộ chuỗi cung ứng.

Thực tế cho thấy, hệ thống vận tải của Việt Nam hiện nay đang tồn tại sự mất cân đối đáng kể về cơ cấu phương thức. Vận tải đường bộ chiếm khoảng 74 - 77% tổng khối lượng hàng hóa vận chuyển, trong khi vận tải đường thủy nội địa chỉ chiếm khoảng 18 - 19%, còn lại là vận tải đường sắt và hàng không với tỷ trọng rất nhỏ. Sự phụ thuộc quá mức vào vận tải đường bộ dẫn đến nhiều hệ lụy như chi phí vận tải cao, áp lực lớn lên hạ tầng giao thông, gia tăng ùn tắc và tai nạn, đồng thời làm gia tăng phát thải khí nhà kính.

Mặc dù vận tải đường bộ có ưu điểm về tính linh hoạt và khả năng cung cấp dịch vụ tận nơi, nhưng trong bối cảnh phát triển bền vững, việc duy trì tỷ trọng quá lớn của phương thức này là không phù hợp. Theo đánh giá của các tổ chức quốc tế, việc tái cơ cấu hệ thống vận tải theo hướng tăng tỷ trọng các phương thức có hiệu suất năng lượng cao hơn là điều kiện tiên quyết để giảm chi phí logistics và giảm phát thải. Trong khi đó, các phương thức vận tải thay thế như đường sắt và đường thủy nội địa, dù có nhiều lợi thế về môi trường và chi phí, lại chưa được khai thác hiệu quả. Vận tải đường sắt tại Việt Nam vẫn gặp nhiều hạn chế do hạ tầng lạc hậu, khổ đường ray không đồng bộ và thiếu kết nối với các cảng biển và trung tâm logistics. Điều này khiến vận tải đường sắt chưa thể đóng vai trò quan trọng trong vận tải hàng hóa liên vùng. Đáng chú ý hơn là vận tải thủy nội địa - phương thức được đánh giá có mức phát thải thấp nhất và chi phí vận chuyển cạnh tranh nhất - vẫn chưa phát huy hết tiềm năng.

Trong bối cảnh đó, một số doanh nghiệp logistics và vận tải đã bắt đầu triển khai các giải pháp nhằm giảm phát thải và tối ưu hóa vận hành. Bên cạnh đó, vai trò của các hiệp hội ngành nghề ngày càng được thể hiện rõ trong việc thúc đẩy vận tải xanh. Các sáng kiến phát triển vận tải ven biển bằng phương tiện VR-SB đã góp phần tạo ra một phương thức vận tải thay thế hiệu quả cho đường bộ trên các tuyến Bắc - Nam. Số lượng phương tiện VR-SB đã tăng mạnh trong những năm gần đây, từ khoảng 500 phương tiện năm 2014 lên gần 2.844 phương tiện vào năm 2023, cho thấy xu hướng chuyển dịch tích cực [3].

Công ty CP Tập đoàn Macstar, thành viên của Hiệp hội Logistics Hải Phòng đã tiên phong, từng bước vững chắc xây dựng thương hiệu với các dịch vụ vận tải container ven biển kết nối Hải Phòng và các cảng biển miền Trung, với các cỡ tàu 135 TEU, 180 TEU và 294 TEU. Không chỉ với tuyến Hải Phòng - Nghi Sơn (Thanh Hoá), tuyến vận tải container đường thủy do Macstar Group khai thác đã và đang kết nối các cảng nội địa khu vực Hải Phòng, Hưng Yên, Bắc Ninh với các cảng biển tại Hải Phòng, góp phần giảm áp lực lên giao thông đường bộ, tiết kiệm nhiên liệu và chi phí vận hành. Kết quả sau thời gian triển khai cho thấy vận tải đường thuỷ ven biển có nhiều lợi thế vượt trội, thời gian vận chuyển rút ngắn từ 40 - 45% so với trước đây. Theo tính toán sơ bộ, lượng phát thải carbon cho mỗi container bằng đường thuỷ trên sông kết hợp biển cũng giảm hơn 75% so với vận tải đường bộ.

Không thể không nhắc tới vai trò của các cơ sở đào tạo và nghiên cứu trong việc thúc đẩy vận tải xanh. Các trường đại học, đặc biệt là các cơ sở đào tạo chuyên ngành logistics và hàng hải, đã và đang đóng góp quan trọng trong việc đào tạo nguồn

(*) *Trường Đại học Hàng hải Việt Nam*

Bảng 1. Sản lượng vận tải hàng hóa theo phương thức vận tải năm 2025 [2]

Loại hình vận tải	Vận chuyển (Triệu tấn)	Luân chuyển (Tỷ tấn.km)	Tốc độ tăng vận chuyển (%)	Tốc độ tăng luân chuyển (%)
Tổng số	3.027,7	612,3	14,1	13,1
Đường sắt	5,5	4,1	7,1	4,9
Đường biển	148,3	321,9	12,0	16,6
Đường thủy nội địa	598,0	132,6	12,8	10,9
Đường bộ	2.275,4	144,0	14,7	8,9
Hàng không	0,5	9,7	4,4	0,6

nhân lực chất lượng cao, đồng thời triển khai các nghiên cứu ứng dụng về logistics xanh, vận tải đa phương thức và chuyển đổi số trong vận tải. Sự gắn kết giữa nhà trường và doanh nghiệp trong nghiên cứu và chuyển giao công nghệ đang ngày càng được tăng cường, tạo nền tảng cho việc ứng dụng các giải pháp vận tải bền vững vào thực tiễn.

Trường Đại học Hàng hải Việt Nam là một trong những cơ sở đào tạo tiên phong trong việc tích hợp nội dung logistics xanh và vận tải thủy nội địa vào chương trình đào tạo và nghiên cứu khoa học, góp phần đáp ứng nhu cầu chuyển đổi của ngành. Với định hướng đào tạo gắn với thực tiễn và hội nhập quốc tế, nhà trường đã từng bước đổi mới nội dung và phương pháp giảng dạy theo hướng hiện đại. Các chương trình đào tạo thuộc lĩnh vực logistics, vận tải và kinh tế hàng hải đã đưa vào các học phần liên quan đến phát triển bền vững, cảng xanh, vận tải đa phương thức, tối ưu hóa năng lượng và giảm phát thải. Sinh viên không chỉ được trang bị kiến thức nền tảng mà còn được tiếp cận các phương pháp phân tích như đánh giá phát thải CO_2, tối ưu hóa mạng lưới vận tải và quản trị chuỗi cung ứng theo tiêu chí môi trường.

Trong lĩnh vực vận tải thủy nội địa, nhà trường đặc biệt chú trọng xây dựng nội dung đào tạo chuyên sâu nhằm nâng cao năng lực cho người học. Các học phần về khai thác vận tải thủy, tổ chức vận tải đa phương thức kết nối cảng biển với miền hậu phương, quy hoạch luồng tuyến và quản lý cảng được thiết kế theo hướng gắn với thực tiễn. Sinh viên được tham gia thực tập tại doanh nghiệp, cảng biển và trung tâm logistics, qua đó hiểu rõ vai trò của vận tải thủy nội địa trong hệ thống logistics quốc gia. Bên cạnh đào tạo, hoạt động nghiên cứu khoa học và chuyển giao công nghệ trong lĩnh vực logistics xanh cũng được đẩy mạnh. Nhiều đề tài tập trung vào tối ưu hóa vận tải đa phương thức, ứng dụng công nghệ số trong quản lý vận tải, nâng cao hiệu quả khai thác và giảm phát thải khí nhà kính. Các kết quả nghiên cứu có giá trị ứng dụng cao, góp phần hỗ trợ cơ quan quản lý và doanh nghiệp trong quá trình hoạch định chiến lược phát triển bền vững.

Ngày 31/3/2026 vừa qua, Công ty CP Tập đoàn Macstar cũng đã ký thỏa thuận hợp tác với Viện Nghiên cứu khoa học và Công nghệ hàng hải (Trường Đại học Hàng hải Việt Nam) trong việc nghiên cứu chính sách; đánh giá hạ tầng kỹ thuật, mô hình khai thác và kết nối logistics; thiết kế, đóng mới và thử nghiệm tàu container chạy điện, góp phần thúc đẩy phát triển vận tải thủy nội địa theo hướng xanh, hiện đại.

TÁI CẤU TRÚC HỆ THỐNG VẬN TẢI THEO HƯỚNG BỀN VỮNG

Mặc dù đã có những tín hiệu tích cực, nhưng để phát triển vận tải xanh một cách toàn diện và hiệu quả, Việt Nam cần có những giải pháp mang tính hệ thống và đồng bộ hơn. Trước hết, cần hoàn thiện khung chính sách và chiến lược phát triển vận tải theo hướng bền vững, trong đó xác định rõ lộ trình chuyển dịch cơ cấu vận tải, giảm dần tỷ trọng đường bộ và tăng cường vai trò của vận tải đường thủy và đường sắt. Các cơ chế ưu đãi về thuế, phí cần được thiết kế nhằm khuyến khích doanh nghiệp sử dụng các phương thức vận tải thân thiện với môi trường.

Đồng thời, việc đầu tư vào hạ tầng vận tải cần được ưu tiên, đặc biệt là hệ thống luồng tuyến đường thủy nội địa, cảng bến và các trung tâm logistics. Kết nối hiệu quả giữa cảng biển, cảng cạn và mạng lưới vận tải nội địa sẽ tạo điều kiện thuận lợi cho phát triển vận tải đa phương thức, qua đó nâng cao hiệu quả logistics tổng thể.

Ứng dụng công nghệ số cũng là một yếu tố then chốt trong quá trình chuyển đổi sang vận tải xanh. Việc triển khai các hệ thống quản lý vận tải thông minh, ứng dụng dữ liệu lớn và trí tuệ nhân tạo sẽ giúp tối ưu hóa hoạt động vận chuyển, giảm tiêu hao năng lượng và nâng cao hiệu quả vận hành.

Bên cạnh đó, phát triển nguồn nhân lực chất lượng cao cần được coi là một trong những ưu tiên hàng đầu. Các chương trình đào tạo cần được thiết kế theo hướng cập nhật với xu thế logistics xanh và chuyển đổi số, đồng thời tăng cường hợp tác giữa nhà trường và doanh nghiệp để đảm bảo tính thực tiễn.

Cuối cùng, hợp tác quốc tế đóng vai trò quan trọng trong việc tiếp cận các công nghệ tiên tiến và kinh nghiệm quản lý hiện đại. Việc tham gia các sáng kiến toàn cầu về logistics xanh, cũng như thu hút đầu tư nước ngoài vào hạ tầng và công nghệ, sẽ giúp Việt Nam rút ngắn khoảng cách với các quốc gia phát triển.

Có thể thấy rằng, vận tải xanh không chỉ là một yêu cầu về môi trường mà còn là một chiến lược phát triển dài hạn nhằm nâng cao năng lực cạnh tranh của nền kinh tế. Việc tái cấu trúc hệ thống vận tải theo hướng bền vững, giảm phát thải và tối ưu hóa chi phí sẽ tạo nền tảng vững chắc cho sự phát triển của ngành logistics Việt Nam trong giai đoạn tới. Trong bối cảnh hội nhập sâu rộng và cạnh tranh ngày càng gay gắt trong chuỗi cung ứng toàn cầu, vận tải xanh chính là chìa khóa để Việt Nam khẳng định vị thế và hướng tới một nền kinh tế phát triển bền vững.

Vai trò của hệ thống điện bờ trong chiến lược phát triển cảng xanh tại Việt Nam

> **VÕ TRÍ DŨNG***

Trong bối cảnh toàn cầu đang hướng tới phát triển bền vững và giảm phát thải khí nhà kính, khái niệm "cảng xanh" (Green Port) ngày càng trở nên phổ biến và đóng vai trò trung tâm trong chiến lược phát triển ngành Hàng hải.

CẢNG XANH VÀ BÀI TOÁN NĂNG LƯỢNG TẠI CẢNG

Theo định nghĩa quốc tế, cảng xanh là mô hình cảng "đầu tư và thúc đẩy các hoạt động thân thiện với môi trường, đảm bảo vận hành hiệu quả và bền vững trong dài hạn trên toàn bộ chuỗi hoạt động cảng và hàng hải".

Hiểu một cách cụ thể hơn, cảng xanh không chỉ đơn thuần là giảm ô nhiễm, mà còn là sự chuyển đổi toàn diện về công nghệ, năng lượng, quản lý và vận hành. Đây là quá trình tích hợp giữa tăng trưởng kinh tế với trách nhiệm môi trường, nhằm đảm bảo sự phát triển lâu dài của hệ thống logistics và thương mại quốc tế.

Tuy nhiên, để đạt được mục tiêu này, các cảng biển phải đối mặt với một bài toán lớn: tối ưu hóa năng lượng và kiểm soát nguồn phát thải. Trên thực tế, các nguồn gây ô nhiễm chính tại cảng bao gồm: Động cơ phụ của tàu khi neo đậu; Trang thiết bị vận hành trong cảng (cẩu, xe nâng, hệ thống bốc xếp); Phương tiện vận tải kết nối (xe tải, sà lan); Nguồn điện sử dụng (từ lưới điện hoặc máy phát diesel); Mức tiêu thụ điện năng chưa được tối ưu hóa.

Trong số đó, đáng chú ý nhất là động cơ phụ của tàu biển khi neo đậu. Các động cơ này thường chạy bằng dầu diesel để cung cấp điện cho hệ thống trên tàu, và có thể chiếm tới 60 - 85% lượng phát thải tại khu vực cảng. Đây chính là lý do khiến việc tìm kiếm giải pháp thay thế trở nên cấp thiết, trong đó hệ thống điện bờ (Shore Side Electricity - SSE) nổi lên như một giải pháp cốt lõi.

CÁC CÁCH TIẾP CẬN TRONG PHÁT TRIỂN CẢNG XANH

Để xây dựng cảng xanh, cần có cách tiếp cận tổng thể dựa trên nhiều trụ cột khác nhau. Những trụ cột này không hoạt động độc lập mà bổ trợ lẫn nhau, tạo thành một hệ sinh thái vận hành bền vững.

Chuyển đổi nhiên liệu hàng hải: Đây là hướng đi dài hạn nhằm thay thế nhiên liệu hóa thạch bằng các loại nhiên liệu sạch như LNG, hydrogen hoặc ammonia. Tuy nhiên, việc chuyển đổi này đòi hỏi một hệ sinh thái phức tạp bao gồm hạ tầng cung cấp nhiên liệu, công nghệ tàu và tiêu chuẩn quốc tế.

Điện hóa thiết bị và phương tiện cảng: Việc thay thế các thiết bị chạy diesel bằng thiết bị chạy điện giúp giảm đáng kể khí thải và tiếng ồn. Nhiều cảng hiện đại đã triển khai xe nâng điện, cần cẩu điện và phương tiện vận chuyển tự động.

Số hóa và tối ưu vận hành: Ứng dụng công nghệ số như IoT, AI và hệ thống quản lý thông minh giúp tối ưu hóa quy trình vận hành, giảm tiêu hao năng lượng và nâng cao hiệu suất khai thác.

Xây dựng hệ thống điện bờ: Đây là một trong những giải pháp trực tiếp và hiệu quả nhất để giảm phát thải tại cảng, bằng cách cung cấp điện từ bờ cho tàu thay vì sử dụng động cơ diesel.

Quản lý chất thải và tài nguyên nước: Bao gồm xử lý nước thải, chất thải rắn và bảo vệ hệ sinh thái biển, góp phần giảm thiểu tác động môi trường tổng thể.

Trong các trụ cột trên, hệ thống điện bờ được xem là giải pháp có khả năng triển khai nhanh và mang lại hiệu quả rõ rệt trong ngắn hạn.

VAI TRÒ CỦA HỆ THỐNG ĐIỆN BỜ TRONG CẢNG XANH

Hệ thống điện bờ (SSE) là hệ thống cung cấp điện từ đất liền cho tàu khi neo đậu tại cảng, cho phép tàu tắt các động cơ phụ chạy bằng nhiên liệu hóa thạch. Một trong những hình thức phổ biến nhất là OPS (Onshore Power Supply) - cấp điện trực tiếp từ lưới điện cảng.

(*) *Tổng giám đốc Công ty CP PortoNova*

Hệ thống OPS bao gồm các thành phần chính: Nguồn điện tổng tại cảng; Trạm điện trung tâm (Power House) với chức năng biến áp và chuyển đổi tần số; Hệ thống quản lý cáp (Cable Management System - CMS) kết nối từ bờ lên tàu; Hệ thống điều khiển và giám sát (SCADA).

Ngoài OPS, còn có các hình thái khác như: Cấp điện từ pin lưu trữ (SBC/BS/SPB); Hệ thống phát điện từ năng lượng tái tạo (PG)

Hiệu quả môi trường: Việc sử dụng điện bờ giúp giảm đáng kể khí thải CO_2, NOx, SOx và bụi mịn. Đặc biệt, đối với các tàu có trọng tải lớn (trên 5.000 tấn), hiệu quả môi trường càng rõ rệt. Ngoài ra, điện bờ còn giúp giảm tiếng ồn và rung động tại khu vực cảng, cải thiện điều kiện làm việc và môi trường sống xung quanh.

Mặc dù chi phí đầu tư ban đầu cao, hệ thống điện bờ mang lại lợi ích lâu dài, đó là: Giảm chi phí nhiên liệu cho tàu; Tăng hiệu quả vận hành cảng; Nâng cao hình ảnh và uy tín của cảng trong chuỗi cung ứng toàn cầu

Tiêu chuẩn kỹ thuật quốc tế: Việc triển khai điện bờ phải tuân thủ các tiêu chuẩn quốc tế như bộ tiêu chuẩn IEC/ISO/IEEE 80005, bao gồm:

• IEC 80005-1: Kết nối điện áp cao (HVSC)
• IEC 80005-3: Kết nối điện áp thấp (LVSC)
• IEC 80005-2: Giao diện dữ liệu và truyền thông

Các tiêu chuẩn này đảm bảo khả năng tương thích giữa tàu và cảng trên toàn cầu, cũng như an toàn trong vận hành.

THÁCH THỨC VÀ CƠ HỘI CHO DOANH NGHIỆP TIÊN PHONG

Mặc dù vậy, việc triển khai hệ thống điện bờ tại Việt Nam vẫn còn nhiều khó khăn:

- Chi phí đầu tư lớn: Bao gồm hạ tầng điện, thiết bị và hệ thống điều khiển.
- Yêu cầu kỹ thuật cao: Đòi hỏi thiết kế phù hợp với từng loại tàu và cảng.
- Cải tạo hạ tầng hiện hữu: Nhiều cảng chưa sẵn sàng về mặt kỹ thuật.
- Mô hình tài chính chưa rõ ràng: Cần cân đối giữa CAPEX và OPEX.

Tuy nhiên, đây cũng là cơ hội lớn cho các doanh nghiệp tiên phong: Tối ưu hóa đầu tư theo giai đoạn; Tiếp cận nguồn vốn xanh quốc tế từ các tổ chức như ADB hoặc EU Global Gateway; Hưởng ưu đãi chính sách về thuế và phí; Tham gia các dự án thí điểm, tạo lợi thế cạnh tranh sớm…

Việc đi đầu trong triển khai điện bờ không chỉ mang lại lợi ích kinh tế mà còn giúp doanh nghiệp định vị thương hiệu trong lĩnh vực logistics xanh.

Ví dụ thí điểm điện bờ cho cảng container nước sâu tại Việt Nam

Cấu trúc hệ thống:

Một hệ thống OPS cho cảng container nước sâu thường bao gồm:

1. Trạm biến áp (Substation)
2. Trạm điện trung tâm (Power House)
3. Hệ thống CMS kết nối điện

4. Hệ thống điều khiển tự động (SCADA)

Nhu cầu công suất:

Đối với tàu container lớn:

• 60.000 - 80.000 GT: khoảng 2.2 MW
• 80.000 - 100.000 GT: khoảng 3.2 MW
• 100.000 - 200.000 GT: từ 4 - 6 MW

Một hệ thống OPS tiêu chuẩn cần đạt công suất khoảng 4 - 6 MVA, thậm chí lên tới 7.5 MVA theo tiêu chuẩn quốc tế.

Đề xuất thí điểm (trường hợp Lạch Huyện)

Một phương án khả thi là triển khai theo giai đoạn:

Giai đoạn 1 (thí điểm):

• Hệ thống OPS công suất 4 - 6 MVA
• 8 điểm đấu nối cố định
• 1 hệ thống CMS di động

Giai đoạn 2 (mở rộng):

• Bổ sung thêm hệ thống OPS 4 - 8 MVA
• Tăng số lượng CMS

Tổng công suất dài hạn có thể đạt 8 - 12 MVA, đủ phục vụ đồng thời 2 - 3 tàu lớn.

Giải pháp tài chính và kỹ thuật

Các mô hình đầu tư có thể bao gồm:

• CAPEX (đầu tư trực tiếp)
• OPEX (thuê dịch vụ)
• Kết hợp nguồn vốn từ các quỹ đầu tư xanh châu Âu

Ngoài ra, việc hợp tác với các đơn vị tư vấn kỹ thuật giúp tối ưu thiết kế và giảm chi phí.

KẾT LUẬN

Hệ thống điện bờ đóng vai trò then chốt trong chiến lược phát triển cảng xanh tại Việt Nam. Không chỉ giúp giảm phát thải và bảo vệ môi trường, điện bờ còn góp phần nâng cao hiệu quả vận hành, tăng năng lực cạnh tranh và thúc đẩy hội nhập quốc tế.

Mặc dù còn nhiều thách thức, nhưng với sự hỗ trợ từ chính sách, công nghệ và nguồn vốn quốc tế, Việt Nam có cơ hội lớn để trở thành quốc gia tiên phong trong khu vực về phát triển cảng xanh. Trong đó, điện bờ sẽ là một trong những nền tảng quan trọng nhất để hiện thực hóa mục tiêu này.❖

Thị trường tài chính xanh và tài trợ cảng xanh trong bối cảnh biến động toàn cầu

> **ĐỖ THU LÝ***

Trong bối cảnh chuỗi cung ứng toàn cầu chịu nhiều cú sốc, nhu cầu chuyển đổi sang mô hình cảng xanh không chỉ mang ý nghĩa môi trường mà còn là yếu tố chiến lược nhằm tăng khả năng chống chịu.

CÚ SỐC TỪ EO BIỂN HORMUZ VÀ HỆ LỤY CHUỖI CUNG ỨNG

Tháng 4/2026 đánh dấu một giai đoạn đầy biến động đối với thị trường vận tải biển và năng lượng toàn cầu, khi căng thẳng địa chính trị tại Trung Đông leo thang nghiêm trọng. Tâm điểm của khủng hoảng là Eo biển Hormuz - một trong những tuyến hàng hải chiến lược quan trọng nhất thế giới - hiện đã bị đóng cửa đối với vận tải thương mại sau các hành động quân sự và trả đũa giữa Iran, Mỹ và Israel.

Diễn biến này không chỉ mang tính khu vực mà đã nhanh chóng tạo ra cú sốc lan tỏa trên quy mô toàn cầu, làm gián đoạn chuỗi cung ứng năng lượng, hàng hóa và gây ra sự bất ổn sâu sắc đối với hệ thống logistics quốc tế.

Eo biển Hormuz từ lâu được xem là "yết hầu năng lượng" của thế giới. Khoảng 20 - 30% tổng lượng dầu mỏ toàn cầu được vận chuyển qua tuyến đường này. Không chỉ vậy, eo biển còn đóng vai trò quan trọng đối với nhiều loại hàng hóa khác: Chiếm hơn 10% tổng thương mại đường biển toàn cầu; 34% xuất khẩu dầu mỏ đường biển; 30% xuất khẩu khí hóa lỏng LPG; 20% thương mại LNG; 18% hóa chất; 7% ôtô; khoảng 3% lưu lượng container toàn cầu…

Chính vì vậy, bất kỳ sự gián đoạn nào tại đây đều có khả năng gây ra hiệu ứng domino trên toàn bộ hệ thống thương mại quốc tế.

Ngay sau khi eo biển bị phong tỏa, các hãng vận tải container lớn trên thế giới đã buộc phải tạm dừng hoạt động qua khu vực này và nhanh chóng chuyển hướng sang các tuyến đường thay thế, đặc biệt là vòng qua Mũi Hảo Vọng. Điều này kéo dài đáng kể thời gian vận chuyển, đồng thời làm gia tăng chi phí nhiên liệu và chi phí vận hành.

Tình hình đặc biệt nghiêm trọng đối với tàu chở dầu. Khoảng 60 tàu chở dầu siêu lớn (VLCC) được báo cáo bị mắc kẹt tại Vịnh Ba Tư, trong khi chưa có hướng dẫn rõ ràng về hành lang di chuyển an toàn. Điều này khiến thị trường vận tải dầu rơi vào trạng thái căng thẳng chưa từng có.

Chi phí bảo hiểm rủi ro chiến tranh cũng tăng vọt, từ mức thông thường 0,2 - 0,3% giá trị tàu lên 1 - 2%, thậm chí không có trần cụ thể. Sự thiếu nhất quán trong định giá bảo hiểm càng làm gia tăng sự bất định của thị trường.

Đáng chú ý, giá thuê tàu chở dầu siêu lớn (VLCC) đã tăng mạnh, với mức TCE đạt gần 476.000 USD/ngày vào đầu tháng 3 - phản ánh rõ nét tình trạng thiếu hụt công suất vận tải.

Gián đoạn tại Hormuz nhanh chóng kéo theo hàng loạt hệ quả: Lưu thông tàu gần như đình trệ; Giá năng lượng tăng mạnh; Thị trường bảo hiểm thu hẹp và tái định giá; Các liên minh quốc tế chưa đạt được đồng thuận về giải pháp. Các hãng tàu buộc phải hủy chuyến hoặc dồn chuyến, với tỷ lệ hủy khoảng 5%. Độ tin cậy lịch trình giảm xuống còn 59%, gây khó khăn cho các doanh nghiệp phụ thuộc vào chuỗi cung ứng đúng hạn.

Tại các cảng, tình trạng dồn tàu dẫn đến tắc nghẽn nghiêm trọng. Container bị tồn đọng lâu hơn, mật độ bãi tăng cao, làm gia tăng chi phí xếp dỡ và giảm hiệu suất vận hành. Các phụ phí giờ cao điểm, phí ưu tiên ngày càng phổ biến, tạo thêm áp lực chi phí cho doanh nghiệp.

TÁC ĐỘNG ĐỐI VỚI KHU VỰC CHÂU Á - THÁI BÌNH DƯƠNG

Khu vực châu Á - Thái Bình Dương (APAC), vốn là trung tâm của thương mại toàn cầu, đang chịu ảnh hưởng rõ rệt từ cuộc khủng hoảng này.

Tắc nghẽn và biến động chi phí

Việc chuyển hướng tuyến vận tải và gia tăng hoạt động trung chuyển đã khiến nhiều cảng trong khu vực rơi vào tình trạng quá tải. Các cảng trung chuyển, đặc biệt là những nơi có không gian bãi hạn chế, phải đối mặt với biến động lớn về thời gian lưu container và chi phí xử lý. Chi phí nhiên liệu và bảo hiểm tăng cao cũng đẩy giá cước vận chuyển lên, làm suy yếu nhu cầu thương mại. Doanh nghiệp có xu hướng trì hoãn các quyết định vận chuyển, dẫn đến sụt giảm sản lượng.

Rủi ro tín dụng và vận hành

Theo dự báo, các nhà khai thác cảng và sân bay trong khu vực sẽ đối mặt với áp lực tín dụng gia tăng nếu tình trạng gián đoạn kéo dài. Những mô hình kinh doanh có chi phí cố định cao sẽ chịu ảnh hưởng nặng nề nhất do biên lợi nhuận bị thu hẹp.

Các nhà ga năng lượng phải xử lý nguồn cung thay thế từ các tuyến đường dài hơn, dẫn đến lệch pha trong lịch trình và phát

(*) *Trưởng đại diện Ngân hàng ING tại Việt Nam*

sinh chi phí lưu kho. Nhu cầu tài trợ hàng tồn kho cũng tăng lên.

Trong khi đó, Úc và Ấn Độ có mức độ ảnh hưởng khác nhau. Các nhà ga than của Úc được bảo vệ phần nào nhờ cơ chế hợp đồng "take-or-pay", trong khi Ấn Độ phải đối mặt với áp lực giảm sản lượng do chi phí logistics tăng cao.

TÀI TRỢ CẢNG XANH: XU HƯỚNG TẤT YẾU TRONG KỶ NGUYÊN NET ZERO

Trong bối cảnh chuỗi cung ứng toàn cầu chịu nhiều cú sốc, nhu cầu chuyển đổi sang mô hình cảng xanh không chỉ mang ý nghĩa môi trường mà còn là yếu tố chiến lược nhằm tăng khả năng chống chịu.

Khái niệm và vai trò của cảng xanh

Cảng xanh là mô hình cảng giảm thiểu tác động môi trường trong toàn bộ vòng đời - từ quy hoạch, xây dựng đến vận hành - đồng thời tăng cường khả năng thích ứng với biến đổi khí hậu. Điều này bao gồm: Nâng cao hiệu quả năng lượng; Sử dụng năng lượng sạch; Quản lý tài nguyên và chất thải; Tăng khả năng chống chịu trước thời tiết cực đoan…

Áp lực từ các mục tiêu toàn cầu

Chiến lược năm 2023 của Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO) đã đặt ra các mục tiêu đầy tham vọng: Giảm 20 - 30% phát thải vào năm 2030; Giảm 70 - 80% vào năm 2040; Đạt phát thải ròng bằng 0 vào khoảng năm 2050. Đồng thời, ít nhất 5 - 10% năng lượng sử dụng trong vận tải biển phải là năng lượng không phát thải vào năm 2030.

Nhu cầu vốn khổng lồ

Quá trình khử carbon trong ngành hàng hải đòi hỏi nguồn vốn cực kỳ lớn. Ước tính cần từ 800 tỷ đến 1.200 tỷ USD trong giai đoạn 2030 - 2050 để đạt mục tiêu giảm phát thải, và khoảng 400 tỷ USD để đạt Net Zero hoàn toàn. Đây chính là cơ hội lớn cho thị trường tài chính xanh phát triển mạnh mẽ.

CÁC CÔNG CỤ TÀI TRỢ CHO CẢNG XANH

Để hiện thực hóa các dự án cảng xanh, nhiều công cụ tài chính đã được triển khai:

1. Tài chính hỗn hợp (Blended Finance). Kết hợp giữa vốn ưu đãi và vốn thương mại nhằm giảm rủi ro cho các dự án có thời gian hoàn vốn dài hoặc doanh thu không ổn định.

2. Tài chính dự án. Áp dụng cho các dự án cụ thể như điện khí hóa cảng, năng lượng tái tạo, hoặc nâng cấp hạ tầng chống chịu khí hậu.

3. Khoản vay liên kết bền vững. Lãi suất được điều chỉnh dựa trên việc doanh nghiệp đạt được các chỉ số môi trường như giảm phát thải hoặc tăng tỷ lệ năng lượng tái tạo.

4. Trái phiếu xanh. Nguồn vốn huy động chỉ được sử dụng cho các dự án thân thiện môi trường, đảm bảo tính minh bạch và trách nhiệm.

CƠ HỘI LỚN ĐỂ VIỆT NAM PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG CẢNG XANH

Trong bối cảnh toàn cầu đang chuyển dịch mạnh mẽ, Việt Nam có cơ hội lớn để phát triển hệ thống cảng xanh.

Ba bước đi chiến lược

Thứ nhất, phát triển bến cảng xanh: Đầu tư vào giám sát năng lượng, chứng nhận công trình xanh và điện khí hóa thiết bị. Đây là những hạng mục có thể triển khai nhanh và mang lại hiệu quả rõ ràng.

Thứ hai, xây dựng lộ trình năng lượng sạch: Phát triển năng lượng tái tạo tại chỗ và chuẩn bị hạ tầng cho nhiên liệu thay thế như hydrogen hoặc ammonia.

Thứ ba, tạo dự án khả thi tài chính: Sử dụng vốn ưu đãi để giảm rủi ro ban đầu, sau đó mở rộng bằng nguồn vốn thương mại.

Vai trò của các định chế

Một ví dụ tiêu biểu là thương vụ phát hành trái phiếu xanh trị giá 300 triệu USD của Korea Ocean Business Corporation (KOBC). Nguồn vốn này được sử dụng để tài trợ cho các dự án hàng hải thân thiện môi trường, bao gồm tàu không phát thải và hạ tầng nhiên liệu sạch. Thương vụ này không chỉ phản ánh xu hướng chuyển dịch sang kinh tế đại dương bền vững mà còn cho thấy vai trò ngày càng lớn của các công cụ tài chính xanh trong việc định hình tương lai ngành hàng hải.

Thương vụ này có sự tham gia của ING Group với vai trò đồng thu xếp và tư vấn, cho thấy sự chuyển dịch mạnh mẽ sang tài chính đại dương bền vững (blue finance).

Trong bối cảnh Việt Nam đẩy mạnh chuyển đổi xanh, ING Group đang đóng vai trò ngày càng quan trọng như một cầu nối giữa dòng vốn quốc tế và nhu cầu phát triển trong nước.

ING đã có mặt tại Việt Nam từ những năm 1990, tập trung vào mảng ngân hàng bán buôn. Ngân hàng cung cấp các dịch vụ tài chính cho doanh nghiệp lớn, bao gồm tài trợ thương mại, tài trợ dự án và tài chính cấu trúc. Thông qua mạng lưới toàn cầu, ING giúp các doanh nghiệp Việt Nam tiếp cận nguồn vốn quốc tế với chi phí cạnh tranh.

ING đã tham gia nhiều dự án quy mô lớn tại Việt Nam, đặc biệt trong lĩnh vực năng lượng. Kinh nghiệm trong tài trợ các dự án điện và năng lượng tái tạo giúp ngân hàng này có lợi thế trong việc thúc đẩy chuyển đổi năng lượng.

ING hợp tác với các tổ chức tài chính Việt Nam để phát triển thị trường vốn và nâng cao năng lực tài chính doanh nghiệp. Vai trò tư vấn và chuyển giao kinh nghiệm quốc tế là một điểm nhấn quan trọng. Một dấu mốc đáng chú ý là thỏa thuận tài trợ lên tới 1,5 tỷ USD với Vietnam Airlines nhằm hỗ trợ các dự án chiến lược như mở rộng đội bay và nâng cao hiệu quả vận hành.

Đây là minh chứng cho khả năng của ING trong việc cấu trúc các khoản tài chính lớn, dài hạn và phức tạp.

Với kinh nghiệm toàn cầu trong trái phiếu xanh và tài chính bền vững, ING có thể đóng vai trò quan trọng trong: Tài trợ cảng xanh; Phát triển năng lượng tái tạo; Xây dựng khung tài chính bền vững; Thu hút nhà đầu tư quốc tế.

KẾT LUẬN

Năm 2026 đang chứng kiến sự giao thoa giữa khủng hoảng và cơ hội. Gián đoạn tại Eo biển Hormuz đã phơi bày mức độ mong manh của chuỗi cung ứng toàn cầu, đồng thời nhấn mạnh sự cần thiết của các hệ thống vận tải linh hoạt và bền vững hơn.

Trong bối cảnh đó, cảng xanh và tài chính xanh không còn là lựa chọn, mà đã trở thành yêu cầu bắt buộc. Các quốc gia, trong đó có Việt Nam, cần nhanh chóng nắm bắt xu hướng này để nâng cao năng lực cạnh tranh, đảm bảo an ninh logistics và đóng góp vào mục tiêu phát triển bền vững toàn cầu.

Xây dựng hệ sinh thái logistics bền vững

NGUYỄN XUÂN KỲ*

Với hơn 90% hàng hóa xuất khẩu được vận chuyển qua đường biển, đang cho thấy hệ thống cảng biển và logistics không chỉ là nền tảng của thương mại quốc tế mà còn là "điểm nóng phát thải". Nếu không được cải thiện theo hướng xanh hóa, đây sẽ trở thành nút thắt lớn cản trở khả năng cạnh tranh của hàng hóa Việt Nam.

TỪ BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU ĐẾN NET ZERO - CHUẨN MỰC MỚI CỦA THƯƠNG MẠI TOÀN CẦU

Biến đổi khí hậu không còn là một cảnh báo xa xôi mà đã trở thành hiện thực rõ ràng với các biểu hiện ngày càng cực đoan: nhiệt độ toàn cầu tăng cao, mực nước biển dâng, các hiện tượng thời tiết cực đoan như bão, lũ, hạn hán xảy ra với tần suất và cường độ lớn hơn. Những tác động này không chỉ ảnh hưởng đến môi trường sống mà còn làm gián đoạn chuỗi cung ứng, gia tăng chi phí sản xuất và vận tải, đe dọa trực tiếp đến thương mại toàn cầu.

Trong bối cảnh đó, mục tiêu Net Zero - đưa phát thải ròng khí nhà kính về "0" - đã trở thành cam kết chung của gần 150 quốc gia trên thế giới. Việt Nam cũng đã đưa ra cam kết mạnh mẽ tại COP26, đặt mục tiêu đạt phát thải ròng bằng 0 vào năm 2050. Tuy nhiên, Net Zero không còn đơn thuần là tuyên bố chính trị, mà đã trở thành một "tiêu chuẩn mới" trong chuỗi cung ứng toàn cầu. Các doanh nghiệp, đặc biệt là những đơn vị tham gia vào xuất khẩu, buộc phải đáp ứng các yêu cầu về phát thải nếu muốn duy trì vị thế trên thị trường quốc tế.

LOGISTICS - HÀNG HẢI - CẢNG BIỂN - GIAO ĐIỂM CỦA PHÁT THẢI VÀ THƯƠNG MẠI

Ngành logistics, vận tải và hàng hải đóng vai trò huyết mạch của nền kinh tế toàn cầu, nhưng đồng thời cũng là nguồn phát thải khí nhà kính đáng kể. Theo các thống kê gần đây, lĩnh vực này chiếm khoảng 22,96% tổng lượng phát thải toàn cầu, trong đó riêng vận tải biển chiếm khoảng 3%.

Đối với Việt Nam, hơn 90% hàng hóa xuất khẩu được vận chuyển qua đường biển. Điều này cho thấy hệ thống cảng biển và logistics không chỉ là nền tảng của thương mại quốc tế mà còn là "điểm nóng phát thải". Nếu không được cải thiện theo hướng xanh hóa, đây sẽ trở thành nút thắt lớn cản trở khả năng cạnh tranh của hàng hóa Việt Nam, tác động trực tiếp đến ngành vận tải biển và cảng biển.

Chiến lược giảm phát thải của ngành hàng hải toàn cầu buộc các hãng tàu phải chuyển sang sử dụng nhiên liệu sạch như LNG, methanol hoặc hydrogen. Điều này kéo theo yêu cầu các cảng biển phải nâng cấp hạ tầng: Hệ thống tiếp nhiên liệu sạch; Cung cấp điện bờ cho tàu; Xử lý nước thải và chất thải… Nếu không đáp ứng, các cảng có nguy cơ bị loại khỏi mạng lưới vận tải quốc tế.

Các quy định từ EU, Mỹ và các thị trường lớn sẽ khiến chi phí logistics tăng đáng kể nếu doanh nghiệp không kiểm soát được phát thải. Thậm chí, tàu hoặc cảng không đạt tiêu chuẩn có thể bị từ chối cập cảng.

Bên cạnh đó, cơ chế định giá carbon toàn cầu (như IMO Net Zero Fund) dù đang bị trì hoãn nhưng vẫn tạo ra sự bất định chính sách, khiến doanh nghiệp chần chừ trong đầu tư.

ÁP LỰC TỪ CÁC KHUÔN KHỔ QUỐC TẾ

Châu Âu - Tiêu chuẩn ESG và phát thải ngày càng khắt khe

Liên minh châu Âu (EU) đang dẫn đầu thế giới trong việc xây dựng các khuôn khổ pháp lý liên quan đến phát triển bền vững và giảm phát thải. Một loạt quy định mới đã và đang tác động trực tiếp đến ngành logistics và hàng hải:

Chỉ thị Báo cáo phát triển bền vững doanh nghiệp CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive): Yêu cầu các doanh nghiệp phải minh bạch thông tin ESG, bao gồm cả phát thải gián tiếp (Scope 3). Điều này khiến các doanh nghiệp logistics và cảng biển Việt Nam phải cung cấp dữ liệu phát thải cho đối tác EU.

EU Taxonomy: Phân loại các hoạt động kinh tế bền vững, tạo điều kiện tiếp cận nguồn tài chính xanh cho các dự án logistics sạch và cảng xanh.

CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism): Áp thuế carbon đối với hàng hóa nhập khẩu, khiến chi phí logistics tăng nếu không kiểm soát được dấu chân carbon.

FuelEU Maritime: Đặt giới hạn phát thải nhiên liệu tàu biển, tạo áp lực lớn lên cả hãng tàu và hạ tầng cảng.

Những quy định này không chỉ ảnh hưởng đến doanh nghiệp châu Âu mà còn lan tỏa đến toàn bộ chuỗi cung ứng toàn cầu, trong đó có Việt Nam.

(*) *Tổng thư ký Hiệp hội Cảng biển Việt Nam (VPA)*

EU là một trong những thị trường xuất khẩu quan trọng của Việt Nam. Dù Hiệp định EVFTA mang lại lợi thế về thuế quan, nhưng các tiêu chuẩn môi trường ngày càng khắt khe đang trở thành rào cản mới.

Áp lực từ các khuôn khổ quốc tế đang khiến logistics và cảng biển trở thành "điểm nghẽn phát thải". Nếu hệ thống này không đáp ứng tiêu chuẩn ESG, hàng hóa Việt Nam có nguy cơ mất lợi thế cạnh tranh.

Hoa Kỳ - Lộ trình giảm phát thải mạnh mẽ

Hoa Kỳ cũng đang tăng cường kiểm soát phát thải trong lĩnh vực hàng hải. Các tiêu chuẩn về cường độ carbon của nhiên liệu tàu biển đặt ra mục tiêu giảm dần theo thời gian: 2030: giảm ít nhất 30%; 2034: giảm 58%; 2040: giảm 83%; 2045: giảm 92%; 2050: đạt Net Zero

Ngoài ra, các quy định như SEC Climate Rules yêu cầu doanh nghiệp công bố phát thải Scope 3, khiến hoạt động vận tải biển từ Việt Nam trở thành một phần phải kiểm kê.

Nhu cầu vận tải xuyên Thái Bình Dương tăng mạnh tạo áp lực lên năng lực cảng biển Việt Nam, đặc biệt tại các cụm cảng lớn. Đồng thời, yêu cầu "green shipping" từ phía Mỹ buộc các doanh nghiệp phải giảm phát thải trong toàn bộ chuỗi vận tải.

Cạnh tranh trong khu vực châu Á

Việt Nam đang giữ vai trò quan trọng trong chuỗi cung ứng châu Á - Thái Bình Dương. Tuy nhiên, các quốc gia trong khu vực cũng đang đẩy mạnh đầu tư vào logistics xanh. Nếu chậm chuyển đổi, Việt Nam có nguy cơ tụt hậu và mất vị thế trung tâm trung chuyển.

KHUNG CHÍNH SÁCH VÀ CAM KẾT CỦA VIỆT NAM

Việt Nam đã thể hiện quyết tâm mạnh mẽ trong việc thực hiện mục tiêu Net Zero thông qua cả cam kết quốc tế và hệ thống pháp luật trong nước: Luật Bảo vệ môi trường 2020: Lần đầu tiên quy định rõ về kiểm kê khí nhà kính và thị trường carbon; Nghị định 06/2022/NĐ-CP hướng dẫn chi tiết về giảm phát thải và xây dựng thị trường carbon; Chiến lược quốc gia về biến đổi khí hậu đến 2050; Chương trình chuyển đổi năng lượng xanh ngành giao thông vận tải; Đề án phát triển thị trường carbon (2025 - 2029)…

Những chính sách này tạo nền tảng quan trọng để thúc đẩy chuyển đổi xanh trong lĩnh vực logistics và cảng biển.

RỦI RO, CƠ HỘI VÀ ĐỀ XUẤT CHÍNH SÁCH VÀ GIẢI PHÁP

Rủi ro nếu không chuyển đổi kịp thời: Mất đơn hàng xuất khẩu lớn; Bị từ chối tại các cảng quốc tế; Không tiếp cận được nguồn tài chính xanh; Bị loại khỏi chuỗi cung ứng toàn cầu

Cơ hội nếu chuyển đổi thành công: Trở thành trung tâm logistics xanh của khu vực; Thu hút đầu tư và quỹ ESG; Nâng cao uy tín thương hiệu quốc gia; Tham gia thị trường tín chỉ carbon

Để thúc đẩy xanh hóa logistics và cảng biển, cần sự phối hợp chặt chẽ giữa Nhà nước, doanh nghiệp và các hiệp hội.

Trước hết, cần tiếp tục hoàn thiện khung pháp lý: Xây dựng tiêu chuẩn quốc gia về cảng xanh và logistics phát thải thấp; Hướng dẫn kiểm kê khí nhà kính theo chuẩn quốc tế; Tích hợp ESG vào quy trình đầu tư và đấu thầu.

Phát triển hệ thống MRV & cơ sở dữ liệu quốc gia về phát thải logistics; Thiết lập hệ thống đo lường, báo cáo và thẩm định phát thải.

Hỗ trợ tài chính và nâng cao năng lực: Ưu đãi đầu tư cho dự án xanh; Thí điểm mô hình cảng xanh; Tăng cường hợp tác quốc tế.

NET ZERO - ĐIỀU KIỆN SỐNG CÒN CỦA CẠNH TRANH

Trong bối cảnh toàn cầu hóa và biến đổi khí hậu, Net Zero không còn là lựa chọn mà đã trở thành điều kiện bắt buộc để tham gia thương mại quốc tế. Ngành logistics và cảng biển - với vai trò trung tâm của chuỗi cung ứng - cần nhanh chóng chuyển đổi để thích ứng.

Việt Nam đứng trước một ngã rẽ quan trọng: Nếu chậm chuyển đổi sẽ đánh mất thị phần xuất khẩu; Nếu tận dụng cơ hội sẽ vươn lên trở thành trung tâm logistics xanh của khu vực.

Để đạt được điều đó, cần sự hợp lực của ba trụ cột: Nhà nước - Doanh nghiệp - Hiệp hội, cùng xây dựng một hệ sinh thái logistics bền vững, hiệu quả và cạnh tranh trong kỷ nguyên Net Zero.

Chiến lược phát triển và yếu tố tổ chức lãnh thổ của **đường sắt và đường sắt cao tốc ở LB Nga**

TS NGUYỄN TIẾN TĨNH*

TS LÊ ANH TUẤN**

LB Nga coi đường sắt là hạ tầng trụ cột để duy trì liên kết không gian quốc gia, củng cố các hành lang vận tải và phát triển có chọn lọc một số trục hành khách trọng điểm.

Bài báo phân tích đường sắt LB Nga từ hai góc nhìn gắn bó chặt chẽ: Chiến lược phát triển và tổ chức lãnh thổ của mạng lưới. Từ các văn bản của Chính phủ Nga, quy hoạch không gian liên bang, chương trình phát triển của Tổng công ty Đường sắt Nga (RZD) và một số nghiên cứu về đường sắt cao tốc, bài viết cho thấy đường sắt Nga hiện đảm nhiệm ba chức năng lớn: giữ liên kết không gian quốc gia, củng cố các hành lang vận tải xuyên lục địa và hình thành có chọn lọc các trục hành khách tốc độ cao. Luận điểm chính là đường sắt cao tốc chỉ có ý nghĩa khi được đặt trong cấu trúc lãnh thổ chung của quốc gia.

MỞ ĐẦU

Ở LB Nga, đường sắt không chỉ là một phương thức vận tải. Với lãnh thổ rất rộng, khoảng cách lớn giữa các trung tâm kinh tế và sự phân bố dân cư không đều, nó là kết cấu nền của không gian quốc gia. Đường sắt vừa chở hàng và hành khách, vừa nối các vùng xa với phần châu Âu của Nga, đồng thời gắn mạng nội địa với cảng biển, biên giới và các hành lang vận tải quốc tế [1], [2], [5].

Từ đầu những năm 2000, tư duy chiến lược của Nga đối với đường sắt thay đổi rõ rệt. Nếu giai đoạn đầu thiên về cải cách thể chế và điều tiết ngành, thì giai đoạn sau chuyển sang tăng năng lực hạ tầng, củng cố hành lang vận tải, xử lý nút thắt lãnh thổ và tìm mô hình phù hợp cho đường sắt cao tốc [1], [4], [6].

Bài báo tập trung vào hai vấn đề: Vai trò chiến lược của đường sắt trong liên kết lãnh thổ và hành lang vận tải; cùng những yếu tố tổ chức lãnh thổ chi phối việc lựa chọn trục tuyến, phân tầng mạng lưới và triển khai đường sắt cao tốc.

(,**) Học viện Kỹ thuật quân sự*

KHÁI QUÁT SỰ DỊCH CHUYỂN TRONG CHIẾN LƯỢC ĐƯỜNG SẮT NGA

Báo cáo của Hội nghị Bộ trưởng giao thông châu Âu thuộc Tổ chức Hợp tác và phát triển kinh tế (ECMT/OECD) năm 2004 cho thấy mối quan tâm của Nga trong giai đoạn đầu cải cách nằm ở cấu trúc ngành, cơ chế điều tiết, cạnh tranh và vị trí của RZD trong khung thể chế mới [1]. Trước khi nói tới các đại dự án, Nga phải xử lý bài toán quản trị và tài chính của chính hệ thống đường sắt.

Đến Chiến lược phát triển giao thông đường sắt đến năm 2030 ban hành năm 2008, tầm nhìn đã rộng hơn. Văn bản này xem mở rộng mạng đường sắt là công cụ giảm chi phí vận tải, đồng thời gắn hiện đại hóa hạ tầng với phát triển hành lang quốc tế, tiếp cận cảng biển và tăng sức cạnh tranh logistics của Nga [2].

Cách tiếp cận ấy tiếp tục được nhấn mạnh trong chương trình phát triển dài hạn của RZD đến năm 2025 và trong Chiến lược giao thông năm 2021. Trọng tâm được đặt vào nâng năng lực BAM và tuyến xuyên Siberia, cải thiện tiếp cận cảng biển, đẩy nhanh vận chuyển container và tăng tính gắn kết không gian của các lãnh thổ [5], [6].

YẾU TỐ TỔ CHỨC LÃNH THỔ CỦA MẠNG LƯỚI ĐƯỜNG SẮT

Yếu tố đầu tiên là sự chênh lệch rất lớn về dân cư và hoạt động kinh tế giữa phần châu Âu của Nga với Siberia và Viễn

Hình 1. Mạng lưới đường sắt cao tốc dự kiến trong không gian Liên bang Nga.

Đông. Điều này buộc mạng đường sắt vừa giữ vai trò xương sống Đông - Tây cho vận tải đường dài, vừa tạo các nhánh tiếp cận cảng, vùng tài nguyên, cửa khẩu và các trung tâm lớn [2], [5], [6].

Yếu tố thứ hai là vai trò nổi bật của các nút lãnh thổ, trước hết là Moskva. Sơ đồ quy hoạch lãnh thổ liên bang năm 2013 cho thấy nhiều hướng phát triển đường sắt tốc độ cao và tốc độ nhanh đều quy tụ về thủ đô hoặc đi qua vùng ảnh hưởng trực tiếp của nó [3].

Yếu tố thứ ba là sự gắn bó giữa đường sắt với các hành lang quốc tế và hệ thống logistics. Nhiều văn bản chiến lược đặt trọng tâm vào tiếp cận cảng biển, kết nối biên giới, năng lực container và lưu chuyển Đông - Tây [2], [4], [5]. Trong trường hợp này, mạng đường sắt còn là công cụ định vị Nga trong không gian Á - Âu.

Cuối cùng là sự phân tầng chức năng của mạng lưới. Mạng lưới đường sắt của Nga về cơ bản vẫn là mạng hỗn hợp, nơi vận tải hàng hóa nặng và hành khách cùng chia sẻ hạ tầng. Vì vậy, các dự án cao tốc chỉ được đặt ra ở những trục có thể tách luồng hành khách khỏi mạng hàng hóa và giải phóng năng lực cho toàn hệ thống [7].

ĐƯỜNG SẮT CAO TỐC TRONG QUY HOẠCH VÀ TRONG LỰA CHỌN KHÔNG GIAN

Ở Nga, đường sắt cao tốc chưa bao giờ được hình dung như một mạng phủ đều trên toàn quốc. Sơ đồ quy hoạch liên bang năm 2013 và các tài liệu chiến lược sau đó đều cho thấy các trục được ưu tiên tập trung ở phần lãnh thổ có mật độ dân cư, quy mô đô thị và nhu cầu đi lại cao hơn, trước hết là hành lang Moskva - Saint Petersburg [3], [4], [5].

Kế hoạch tổng hợp hạ tầng giai đoạn 2018 - 2024 cụ thể hóa tư duy đó bằng dự án liên bang về đường sắt cao tốc. Dù việc triển khai nhiều lần chậm lại hoặc điều chỉnh, định hướng cơ bản vẫn nhất quán: ưu tiên trước các đoạn có thể tạo hiệu quả lớn nhất về thời gian đi lại, tổ chức lại dòng hành khách và giải phóng năng lực trên mạng hiện hữu [4].

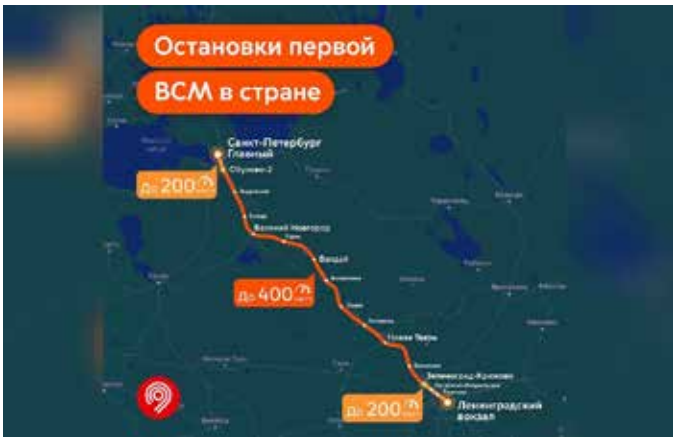
Trong giới nghiên cứu, vấn đề này được bàn theo hai hướng. Một hướng nhấn mạnh sự cần thiết của hạ tầng cao tốc chuyên biệt để tách tàu khách khỏi mạng hỗn hợp; hướng còn lại yêu cầu tính chặt hiệu quả xã hội và chi phí cơ hội của từng dự án [7], [9]. Điểm chung là đường sắt cao tốc chỉ hợp lý tại một số hành lang lãnh thổ chọn lọc.

Nghiên cứu của Romashina bổ sung góc nhìn địa lý xã hội: việc rút ngắn thời gian tiếp cận Moskva có thể làm thay đổi mô hình đi lại, quan hệ cư trú - việc làm và sức hút của các đô thị vệ tinh [8]. Vì vậy, đường sắt cao tốc không chỉ là bài toán kỹ thuật giao thông mà còn là công cụ tái cấu trúc không gian đô thị.

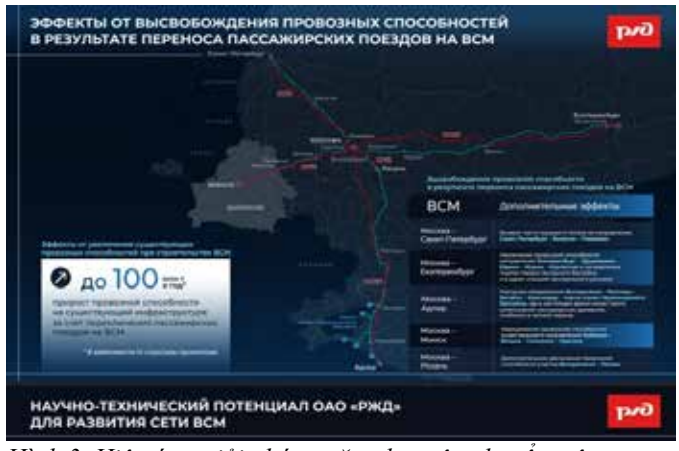
Từ năm 2024 - 2025, đường sắt cao tốc ở Nga có thêm bước tiến về pháp lý. Theo nghiên cứu của Koryakin và Nesterov, khái niệm đường sắt cao tốc lần đầu được xác lập rõ trong khuôn khổ luật liên bang, qua đó tạo cơ sở ổn định hơn cho quản lý, an toàn vận hành và chuẩn bị dự án [10].

NHỮNG TRỞ LỰC CHÍNH CỦA CHIẾN LƯỢC ĐƯỜNG SẮT VÀ CAO TỐC

Trở lực lớn nhất là sự phải tồn tại đồng thời của hai logic trong cùng một hệ thống: logic của mạng xương sống hàng



Hình 2. Các điểm dừng chính trên tuyến đường sắt cao tốc Moskva - Saint Petersburg.



Hình 3. Hiệu ứng giải phóng năng lực vận chuyển trên mạng hiện hữu khi chuyển tàu khách sang tuyến cao tốc.

hóa quy mô quốc gia và logic của các tuyến hành khách tốc độ cao cần hạ tầng riêng. Trong điều kiện nguồn lực không vô hạn, việc phân bổ ưu tiên đầu tư luôn là vấn đề khó [4], [6].

Trở lực thứ hai là tính không đồng đều của không gian Nga. Những gì hợp lý trên trục Moskva - Saint Petersburg chưa chắc hợp lý ở Siberia hay Viễn Đông. Chênh lệch về mật độ dân cư, cơ cấu kinh tế và khoảng cách làm cho mô hình cao tốc chỉ thích hợp ở một số hành lang rất chọn lọc [3], [5].

Trở lực thứ ba là yêu cầu chứng minh hiệu quả công cộng. Livshits và cộng sự lưu ý rằng với dự án cao tốc, không thể chỉ dựa vào doanh thu trực tiếp, nhưng cũng không thể phóng đại tùy ý các hiệu ứng lan tỏa [9]. Với Nga, đây là vấn đề đặc biệt quan trọng vì quy mô đầu tư lớn và thời gian hoàn vốn dài.

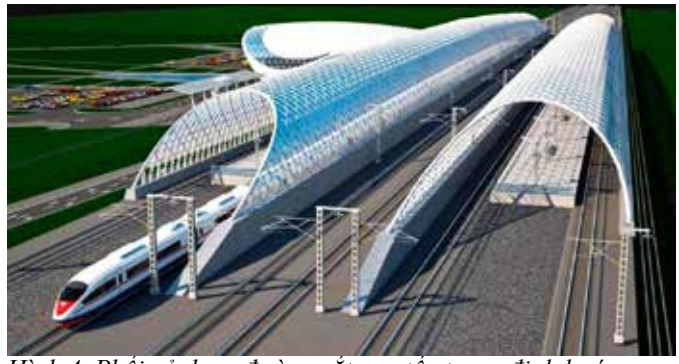
Cuối cùng là khuôn khổ thể chế và pháp lý. Việc khái niệm đường sắt cao tốc chỉ được xác lập rõ ở cấp luật từ năm 2024 cho thấy trong thời gian dài, quy hoạch đã đi trước pháp lý [10]. Khoảng trễ này phần nào giải thích vì sao nhiều dự án cao tốc được bàn sớm nhưng triển khai thực tế lại chậm.

KẾT LUẬN

Có thể thấy chiến lược đường sắt của LB Nga từ đầu thế kỷ 21 đến nay vận động theo một hướng khá rõ: từ cải cách thể chế của ngành chuyển sang tư duy coi đường sắt là hạ tầng trụ cột của liên kết không gian quốc gia, của hành lang vận tải và của một số trục hành khách trọng điểm [1], [2], [5], [6].

Về tổ chức lãnh thổ, mạng đường sắt Nga bị chi phối mạnh bởi quy mô lãnh thổ rất rộng, sự lệch tâm dân cư về phần châu Âu, vai trò nổi trội của Moskva như nút trung tâm và chức năng xuyên lục địa của các hành lang Đông - Tây. Chính các yếu tố đó quyết định vì sao mạng lưới phát triển theo logic phân tầng, chọn trục và xử lý nút thắt thay vì dàn trải đều [3], [4], [5].

Nói ngắn gọn, vấn đề cốt lõi của đường sắt và đường sắt cao tốc ở Nga không phải là xây thật nhiều, mà là đặt đúng loại hạ tầng vào đúng không gian. Ở nghĩa đó, chiến lược đường sắt của Nga luôn là một phần của chiến lược tổ chức lãnh thổ quốc gia.❖



Hình 4. Phối cảnh ga đường sắt cao tốc trong định hướng phát triển hạ tầng mới của Nga.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] ECMT/OECD (2004). Regulatory Reform of Railways in Russia. OECD Publishing.

[2] Chính phủ LB Nga (2008). Quyết định 877-p về Chiến lược phát triển giao thông đường sắt đến năm 2030.

[3] Chính phủ LB Nga (2013). Quyết định 384-p về Sơ đồ quy hoạch lãnh thổ LB Nga trong lĩnh vực giao thông đường sắt.

[4] Chính phủ LB Nga (2018). Quyết định 2101-p về Kế hoạch tổng hợp hiện đại hóa và mở rộng hạ tầng trục chính đến năm 2024.

[5] Chính phủ LB Nga (2021). Quyết định 3363-p về Chiến lược giao thông LB Nga đến năm 2030, tầm nhìn đến 2035.

[6] ОАО «РЖД» (2021). Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года.

[7] Agafonov, D.V. (2017). Анализ целесообразности отделения инфраструктуры высокоскоростных магистралей в РФ.

[8] Romashina, A.A. (2020). Влияние скоростного железнодорожного сообщения с Москвой на мобильность населения.

[9] Livshits, V.N. et al. (2022). Высокоскоростная магистраль как общественно значимый проект.

[10] Koryakin, V.M.; Nesterov, E.A. (2025). Законодательное регулирование высокоскоростного железнодорожного транспорта в РФ.

Mô hình quản lý và kinh tế vận tải của đường sắt và **đường sắt cao tốc LB Nga từ năm 2000 đến nay**

TS LÊ ANH TUẤN*

TS ĐÀM HỮU HƯNG**

Mô hình đường sắt LB Nga được tổ chức theo hướng Nhà nước điều phối mạnh, cạnh tranh có chọn lọc, giá cước vận tải đóng vai trò công cụ điều tiết vĩ mô, còn vận tải hành khách vận hành theo logic dịch vụ công.

Bài viết phân tích mô hình quản lý và kinh tế vận tải của đường sắt LB Nga từ đầu những năm 2000 đến nay, trong mối liên hệ với quá trình cải cách cơ cấu, chính sách giá cước, trợ giá vận tải hành khách và định hướng phát triển đường sắt cao tốc. Theo đó, Nga không đi theo hướng tự do hóa triệt để mà hình thành một mô hình nhà nước điều phối mạnh, cạnh tranh có chọn lọc và coi đường sắt là công cụ gắn kết không gian quốc gia. Trong mô hình ấy, đường sắt cao tốc (HSR) chỉ có thể được hiểu đúng khi đặt cùng bài toán hành lang, nguồn vốn, phương tiện và tổ chức lãnh thổ.

MỞ ĐẦU

Đường sắt Nga sau năm 2000 bước vào một giai đoạn chuyển đổi khá đặc biệt. Ngành này phải vận hành theo yêu cầu hiệu quả, giảm bao cấp chéo và nâng chất lượng dịch vụ; đồng thời, vẫn phải giữ vai trò xương sống của một quốc gia có lãnh thổ rộng, khoảng cách vận tải dài và sự chênh lệch rất lớn giữa các vùng. Vì vậy, vấn đề phát triển đường sắt Nga không chỉ là cải cách doanh nghiệp; đó còn là cách Nhà nước tổ chức một hệ thống độc quyền tự nhiên sao cho vừa mang tính kinh tế, vừa giữ được chức năng liên kết lãnh thổ. Trong bối cảnh ấy, đường sắt cao tốc không phải một lớp công nghệ đứng riêng, mà là phép thử tập trung nhất của toàn bộ mô hình quản lý và kinh tế vận tải.

(*) Học viện Kỹ thuật quân sự

(**) Công ty TNHH Tư vấn thiết kế kiến trúc và xây dựng Beaver Group Liên Bang Nga

MÔ HÌNH QUẢN LÝ SAU CẢI CÁCH

Điểm cốt lõi của cải cách là chuyển từ cơ chế quản lý hành chính thuần túy sang mô hình doanh nghiệp nhà nước có điều tiết. Nhà nước vẫn giữ vai trò hoạch định chiến lược, kiểm soát những nguyên tắc lớn về giá cước vận tải do Nhà nước điều tiết (tariff) và đầu tư, còn Tổng công ty Đường sắt Nga - OAO "RZD" (Open Joint Stock Company Russian Railways) trở thành trung tâm quản trị hạ tầng, điều độ, đầu tư và phần lớn hoạt động khai thác cốt lõi. Nga không đi theo hướng tách dọc triệt để như một số nước châu Âu, bởi với một mạng lưới kéo dài trên không gian rất lớn, điều độ và hạ tầng khó có thể phân mảnh mà vẫn bảo đảm hiệu quả hệ thống.

Điều quan trọng là mô hình này luôn mang dấu ấn lãnh thổ. Ở LB Nga, hiệu quả không được hiểu đơn giản là lợi nhuận của từng đoạn tuyến, mà là khả năng duy trì các hành lang vận tải hàng hóa, các mối nối liên vùng và dịch vụ hành khách thiết yếu. Vì thế, cạnh tranh chỉ được mở ra có chọn lọc, chủ yếu ở những khâu thị trường có thể hấp thụ rủi ro hơn, còn phần lõi của mạng lưới vẫn tập trung mạnh.

KINH TẾ VẬN TẢI: GIÁ CƯỚC, TRỢ GIÁ VÀ DỊCH VỤ CÔNG

Kinh tế vận tải đường sắt Nga cho thấy tariff không chỉ là giá dịch vụ mà còn là công cụ điều tiết không gian kinh tế. Với hàng hóa, nhà nước cố gắng duy trì một khung cước đủ ổn định để doanh nghiệp lập kế hoạch trung hạn, nhưng vẫn chừa chỗ cho các điều chỉnh theo loại

Hình 1. Định hướng phát triển mạng đường sắt cao tốc ở Nga theo các hành lang và cụm dân cư lớn.

Hình 2. Đề xuất các tuyến cao tốc trọng điểm trong cấu trúc hướng tâm lấy Moskva làm trung tâm.

hàng, tuyến và mục tiêu phát triển. Nếu cước tăng quá nhanh, các chuỗi cung ứng ở cự ly dài sẽ chịu tác động lớn; nếu cước bị ghìm quá lâu, hạ tầng và phương tiện lại thiếu nguồn lực đầu tư. Mô hình "hành lang tăng tariff" xuất hiện như một dạng thỏa hiệp giữa hai sức ép đó.

Ở vận tải hành khách, đặc biệt là ngoại ô, logic thị trường thuần túy càng khó áp dụng. Nhiều tuyến không thể tự cân bằng bằng doanh thu vé, nhưng vẫn có ý nghĩa xã hội rõ rệt đối với lao động, di chuyển hằng ngày và sự gắn kết vùng. Bởi vậy, phương pháp tính chi phí hợp lý, cơ chế đặt hàng công và trợ giá từ ngân sách trở thành một phần không tách rời của mô hình quản lý. Đây là lý do kinh tế vận tải hành khách ở Nga luôn gắn với quan hệ tài chính giữa trung ương, chủ thể liên bang và doanh nghiệp khai thác.

ĐƯỜNG SẮT CAO TỐC NHƯ MỘT BÀI TOÁN QUẢN TRỊ VÀ ĐẦU TƯ

Với Nga, HSR trước hết là bài toán hành lang. Hình 1 cho thấy các định hướng cao tốc được đặt vào những cụm dân cư và kinh tế lớn nhất, chứ không rải đều trên toàn lãnh thổ. Điều đó phản ánh một nguyên tắc khá thực tế: Chỉ những trục có khả năng gom dòng khách đủ mạnh, tạo ra lợi ích thời gian rõ rệt và kéo theo tác động vùng đáng kể mới có cơ sở kinh tế để ưu tiên đầu tư.

Nếu nhìn ở cấp mạng lưới, Hình 2 cho thấy tư duy quy hoạch hướng tâm với Moskva là hạt nhân và các nhánh tỏa đi: Saint Petersburg, Nizhny Novgorod, Kazan hay Rostov-na-Donu. Đây không chỉ là sơ đồ giao thông; nó phản ánh cách Nga liên kết bài toán HSR với tổ chức lãnh thổ, với phân bố dân cư và với vai trò của Thủ đô như trung tâm điều phối dòng hành khách liên vùng. Vì chi phí hạ tầng rất lớn, HSR ở Nga không thể sống bằng khẩu hiệu công nghệ. Nó đòi hỏi cơ chế tài chính dài hạn, cách chia sẻ rủi ro hợp lý giữa nhà nước và doanh nghiệp, cũng như tiêu chí đánh giá vượt ra ngoài doanh thu bán vé đơn thuần.

PHƯƠNG TIỆN, CÔNG NGHỆ VÀ MÔ HÌNH KINH TẾ MỞ RỘNG

Một điểm đáng chú ý là HSR không thể bền vững nếu chỉ có tuyến mà thiếu hệ sinh thái phương tiện. Hình 3 minh họa định hướng phát triển đầu kéo hoặc đoàn tàu tốc độ cao của Nga. Hình ảnh này nhắc rằng phần giá trị lớn của HSR nằm ở phương tiện, bảo trì, điều khiển, chuỗi phụ tùng và năng lực công nghiệp liên quan. Nếu các khâu ấy không được nội địa hóa hoặc ít nhất là làm chủ ở mức cao hơn, chi phí vận hành dài hạn sẽ tạo sức ép rất lớn lên toàn bộ dự án.

Trong khi đó, Hình 4 cho thấy, ngành đường sắt Nga đặt phương tiện cao tốc vào một phổ hiện đại hóa rộng hơn: Tàu ngoại ô nhanh, tàu cao tốc vùng, tàu đêm và cả phương tiện phục vụ vận tải container. Điều này rất quan trọng về mặt kinh tế vận tải. HSR ở Nga không thể được xem như một "ốc đảo tốc độ"; nó chỉ phát huy hiệu quả khi được gắn với một cấu trúc dịch vụ đa tầng, trong đó từng loại tàu giữ một chức năng thị trường khác nhau, còn toàn hệ thống chia sẻ hạ tầng, công nghệ và nguồn lực đầu tư.

TẦM NHÌN 2030, 2050 VÀ XA HƠN

Các tài liệu chiến lược đến 2030 khá rõ ở ba điểm: tăng năng lực hành lang xương sống, cải thiện cơ chế tariff và từng bước triển khai những dự án cao tốc có khả

Hình 3. Mô hình đầu kéo/đoàn tàu cho hệ thống đường sắt tốc độ cao của Nga.

Hình 4. Phân tầng phương tiện hiện đại của đường sắt Nga theo loại hình dịch vụ và dải tốc độ.

năng hiện thực hóa. Với mốc 2050 và xa hơn, trọng tâm chuyển sang chất lượng hệ thống: số hóa điều hành, đổi mới phương tiện, giảm phát thải và tổ chức lại quan hệ giữa vận tải hàng hóa, hành khách đường dài và dịch vụ cao tốc. Con số 2070, nếu xuất hiện trong các dự báo xa, nên được hiểu như chân trời công nghệ và tổ chức hơn là một kế hoạch cứng. Dù vậy, nó cho thấy một điều nhất quán: Nga nhìn đường sắt như kết cấu dài hạn của quốc gia, nên mô hình tương lai nhiều khả năng vẫn giữ hạt nhân điều phối mạnh của Nhà nước, nhưng buộc phải minh bạch hơn về hiệu quả đầu tư và về cơ chế bù đắp nghĩa vụ xã hội.

Ở tầm nhìn xa hơn, vấn đề không chỉ là xây thêm tuyến mới mà là đổi cách vận hành cả hệ thống. Nếu các tài liệu đến 2030 chủ yếu nói về hành lang, vốn đầu tư và cơ chế quản trị, thì các thảo luận xa hơn gợi ra ba hướng đáng chú ý: số hóa điều độ và quản trị dữ liệu, phát triển vận tải tích hợp, và chuẩn hóa đội tàu tốc độ cao để giảm chi phí vòng đời. Khi đó, hiệu quả vận tải sẽ không chỉ phụ thuộc vào chiều dài mạng lưới, mà còn phụ thuộc vào khả năng phối hợp giữa hạ tầng, doanh nghiệp vận tải, nhà sản xuất phương tiện và chính quyền vùng trong cùng một hệ.

KẾT LUẬN

Từ năm 2000 đến nay, Nga đã định hình một mô hình đường sắt khá đặc thù: nhà nước điều phối mạnh, cạnh tranh có chọn lọc, tariff được dùng như công cụ kinh tế vĩ mô, còn vận tải hành khách vẫn gắn chặt với logic dịch vụ công. Trong cấu trúc ấy, HSR không chỉ là câu chuyện tốc độ, nó là nơi hội tụ của quản trị, tài chính, công nghiệp phương tiện và tổ chức lãnh thổ. Chính vì vậy, tương lai của đường sắt cao tốc Nga sẽ phụ thuộc không chỉ vào số kilômét xây mới, mà vào việc toàn bộ hệ thống đường sắt có được tổ chức lại một cách nhất quán hay không.❖

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] OECD. Reforming Russian Infrastructure for Competition and Efficiency. Paris, 2001.

[2] OECD/ECMT. Regulatory Reform of Railways in Russia. Paris, 2004.

[3] Правительство Российской Федерации. Программа структурной реформы на железнодорожном транспорте. Москва, 2001.

[4] Правительство Российской Федерации. Постановление № 787 от 15.12.2004 «Об основах государственного регулирования тарифов на железнодорожном транспорте».

[5] Dementiev A. Reforming Russian Railways: Introduction of Competition and New Regulatory Challenges. 2005.

[6] Правительство Российской Федерации. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года. Москва, 2008.

[7] Правительство Российской Федерации. Концепция развития пригородных пассажирских перевозок железнодорожным транспортом до 2030 года. Москва, 2014.

[8] Agafonov V. Правовое регулирование услуг инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования. 2017.

[9] Мачерет Д.А. и др. Экономическая эффективность и риски на железнодорожном транспорте. Москва, 2018.

[10] Ivanova E., Flyagina T. Развитие высокоскоростных магистралей в России: проблемы и перспективы. 2020.

[11] ОАО «РЖД». Стратегия развития холдинга до 2030 года. Москва, 2021.

[12] Livshits V. и др. Высокоскоростные железнодорожные магистрали как общественно значимый проект: условия эффективности. 2022.

[13] Husainov F. Железнодорожные тарифы: очень краткое введение. Москва, 2023.

PHÁT TRIỂN ĐƯỜNG SẮT VÀ ĐƯỜNG SẮT TỐC ĐỘ CAO Ở VIỆT NAM:

Từ kinh nghiệm của LB Nga

TS ĐÀM HỮU HƯNG*

Vấn đề cốt lõi của đường sắt Việt Nam không nằm ở công nghệ hay tốc độ, mà ở cách tiếp cận. Nếu vẫn coi đây là một dự án giao thông đơn lẻ, thay vì hạ tầng tổ chức phát triển quốc gia, thì dù đầu tư lớn cũng khó đạt được hiệu quả tổng thể. Hạ tầng đường sắt chỉ thật sự mạnh khi tạo thành một cấu trúc lãnh thổ có trung tâm, có hành lang và có nhánh kết nối.

Bài báo phân tích tính cần thiết và cấp thiết của việc phát triển đường sắt và đường sắt cao tốc ở Việt Nam với tầm nhìn 100 năm. Từ kinh nghiệm của LB Nga về chiến lược, tổ chức lãnh thổ, mô hình quản lý và kinh tế vận tải, bài viết cho rằng Việt Nam phải nhìn đường sắt như hạ tầng nền của phát triển quốc gia, không phải một dự án giao thông đơn lẻ. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất định hướng chiến lược và một số hàm ý chính sách cho Việt Nam.

MỞ ĐẦU

Trong bối cảnh Việt Nam bước vào giai đoạn phát triển mới, yêu cầu đặt ra không còn là xử lý từng nút thắt giao thông riêng lẻ, mà là tổ chức lại không gian phát triển quốc gia theo tầm nhìn dài hạn. Ở cấp độ ấy, đường sắt và đường sắt cao tốc phải được nhìn như hạ tầng nền của phát triển, có vai trò định hình hành lang kinh tế, chuỗi logistics và năng lực liên kết vùng. Nếu phụ thuộc quá lớn vào đường bộ và hàng không trên các luồng trục, Việt Nam sẽ tiếp tục gánh chi phí logistics cao và sức ép lớn lên đất đai, đô thị và môi trường [1], [2].

Kinh nghiệm của LB Nga gợi ra một cách nhìn đáng tham khảo. Nga không xem đường sắt chỉ là một phương thức vận tải, mà đặt nó vào chiến lược phát triển quốc gia, tổ chức lãnh thổ, mô hình quản lý nhà nước và cơ chế kinh tế vận tải dài hạn [7]-[12]. Điều đó hữu ích cho Việt Nam hiện nay, khi vấn đề đường sắt tốc độ cao trên trục Bắc - Nam đã chuyển từ tranh luận sang chuẩn bị triển khai [3]-[6].

TỪ KINH NGHIỆM NGA NHÌN LẠI BÀI TOÁN VIỆT NAM

Điểm đáng chú ý trong tư duy đường sắt của Nga là sự nhất quán giữa chiến lược quốc gia, tổ chức lãnh thổ và mô hình quản lý. Mạng lưới không phát triển theo kiểu dàn đều, mà theo cách thức tổ chức hành lang, nút trung tâm và phân tầng chức năng [8]-[10]. Bài học quan trọng cho Việt Nam không phải là sao chép mô hình Nga, mà là học cách đặt đường sắt vào tư duy phát triển quốc gia.

Với Việt Nam, trục Bắc - Nam không chỉ là một tuyến vận tải mà là trục liên kết các vùng dân cư, công nghiệp, dịch vụ, cảng biển và trung tâm đô thị. Nếu chỉ nhấn vào tốc độ khai thác mà bỏ qua tổ chức lãnh thổ và mô hình quản trị, dự án sẽ khó tạo hiệu quả hệ thống.

TÍNH CẦN THIẾT VÀ CẤP THIẾT CỦA ĐƯỜNG SẮT, ĐƯỜNG SẮT CAO TỐC Ở VIỆT NAM

Tính cần thiết của đường sắt ở Việt Nam xuất phát từ cấu trúc vận tải hiện nay. Nền kinh tế đang phụ thuộc lớn vào đường bộ, trong khi đường sắt chưa phát huy đúng vai trò trên các tuyến trục. Điều đó làm chi phí vận tải cao, hao mòn hạ tầng đường bộ nhanh và giảm sức cạnh tranh của nhiều vùng sản xuất nằm xa cảng biển và trung tâm tiêu dùng. Với một quốc gia kéo dài theo trục Bắc - Nam, thiếu một trục đường sắt hiện đại là thiếu một cấu phần cốt lõi của kiến trúc phát triển quốc gia [1], [2]. Tuyến tốc độ cao có thể hình thành một hành lang tăng trưởng mới.

Tính cấp thiết lại đến từ bối cảnh chính sách hiện nay. Kết luận số 49-KL/TW, Nghị quyết số 178/NQ-CP, Nghị quyết số 172/2024/QH15 và Nghị quyết số 106/NQ-CP cho thấy vấn đề đường sắt đã chuyển từ chủ trương định hướng sang chương trình hành động có mốc triển khai cụ thể [3]-[6]. Nói cách khác, đây không còn là một ý tưởng dài hạn, mà là nhiệm vụ phải được chuẩn bị ngay trong thập kỷ tới.

Mức độ cấp thiết thể hiện ở việc các cơ quan quản lý đã đặt ra mục tiêu triển khai những đoạn ưu tiên trong khoảng thời gian gần. Hình 2 phản ánh tinh thần đó: dự án phải chuyển từ nghiên cứu sang chuẩn bị đồng bộ về thể chế, vốn, công nghệ, giải phóng mặt bằng và năng lực tổ chức thực hiện.

ĐỊNH HƯỚNG CHIẾN LƯỢC VÀ TỔ CHỨC LÃNH THỔ CHO 100 NĂM

Với tầm nhìn 100 năm, Việt Nam không nên phát triển

(*) Công ty TNHH Tư vấn thiết kế kiến trúc và xây dựng Beaver Group Liên Bang Nga

đường sắt theo tư duy "làm từng đoạn, giải quyết từng việc", mà cần một chiến lược nhiều tầng. Tầng thứ nhất là mạng xương sống quốc gia, trong đó trục Bắc - Nam phải được xác định là trục cốt lõi của tổ chức lãnh thổ hiện đại. Trên trục này cần phân định rõ chức năng: đường sắt tốc độ cao chủ yếu phục vụ hành khách liên vùng và kết nối đô thị lớn; mạng hiện hữu và mạng nâng cấp gánh vai trò hàng hóa, tàu khách thông thường và kết nối trung chuyển [1], [2], [5].

Nếu nhìn dài hạn, tuyến tốc độ cao không chỉ là một cặp đường ray nhanh hơn, mà là một hành lang phát triển mới của đất nước, có khả năng kết đô thị, công nghiệp, logistics và dịch vụ hiện đại trên suốt chiều dài lãnh thổ.

Tầng thứ hai của chiến lược là mạng nhánh và các hành lang ngang. Việt Nam không thể chỉ có một tuyến Bắc - Nam rồi để các vùng còn lại tự xoay xở kết nối. Cần tổ chức các tuyến nối cảng biển, khu kinh tế ven biển, Tây Nguyên, đồng bằng sông Cửu Long, các cửa khẩu quốc tế và các vùng công nghiệp trọng điểm vào mạng trục. Đây là điểm gần với kinh nghiệm Nga: Hạ tầng đường sắt chỉ thật sự mạnh khi tạo thành một cấu trúc lãnh thổ có trung tâm, có hành lang và có nhánh kết nối.

MÔ HÌNH QUẢN LÝ VÀ KINH TẾ VẬN TẢI

Kinh nghiệm Nga cho thấy với một hạ tầng có tính độc quyền tự nhiên như đường sắt, tự do hóa triệt để quá sớm dễ làm tăng rủi ro phân mảnh. Việt Nam nên lựa chọn mô hình Nhà nước điều phối mạnh ở tầng chiến lược, tiêu chuẩn, điều độ và đầu tư hạ tầng cốt lõi; đồng thời mở cạnh tranh có chọn lọc ở các khâu dịch vụ, khai thác thương mại và logistics.

Về kinh tế vận tải, cần xác lập nguyên tắc rằng giá cước đường sắt không chỉ là bài toán doanh thu của doanh nghiệp khai thác. Trên trục quốc gia, giá cước còn là công cụ tổ chức thị phần vận tải và định hướng chuyển dịch luồng khách, luồng hàng. Ở vận tải hành khách, nhất là các tuyến có nghĩa vụ công, cần chấp nhận cơ chế đặt hàng và trợ giá minh bạch.

Ở cấp đầu tư, bài toán còn lớn hơn. Hình 3 cho thấy phương án và quy mô vốn của dự án đường sắt tốc độ cao trên trục Bắc - Nam là rất lớn, phải được phân kỳ hợp lý và gắn với khả năng huy động nguồn lực quốc gia trong nhiều thập niên. Vì vậy, hiệu quả của dự án không thể chỉ tính bằng doanh thu vé, mà phải tính cả lợi ích về thời gian, giảm áp lực đường bộ và hàng không, giảm chi phí logistics và nâng chất lượng liên kết vùng.

LÀM CHỦ CÔNG NGHỆ, TIÊU CHUẨN VÀ QUY CHUẨN QUỐC GIA

Nếu chỉ xây tuyến mà không làm chủ công nghệ, Việt Nam sẽ có hạ tầng mới nhưng vẫn phụ thuộc dài hạn. Vì vậy, phát triển đường sắt và đường sắt cao tốc phải đi kèm chiến lược công nghiệp và công nghệ: nền đường, cầu hầm, điện khí hóa, thông tin tín hiệu, điều khiển chạy tàu, viễn thông vận tải, trung tâm điều độ, bảo trì, cũng như sản xuất đầu máy, toa xe và đoàn tàu. Về lâu dài, đây là vấn đề chủ quyền công nghệ và năng lực quốc gia.

Đặc biệt cấp thiết là việc xây dựng bộ tiêu chuẩn và quy chuẩn quốc gia đồng bộ cho đường sắt và đường sắt cao tốc. Việt Nam không thể triển khai các dự án lớn bằng cách chắp nối nhiều tiêu chuẩn rời rạc mà không có một bộ khung quốc gia thống nhất. Kinh nghiệm Nga cho thấy chính sự đồng bộ về tiêu chuẩn, quy chuẩn, mô hình quản lý và khung pháp lý đã giúp họ giữ được tính thống nhất của hệ thống khi triển khai các dự án hạ tầng lớn. Việt Nam cần sớm hình thành chính sách tương tự: tiếp thu quốc tế có chọn lọc, nhưng chuẩn hóa thành hệ thống tiêu chuẩn Việt Nam đủ sức chi phối toàn bộ vòng đời dự án.

KẾT LUẬN

Trong kỷ nguyên vươn mình của Việt Nam, đường sắt và đường sắt cao tốc không còn là câu chuyện của riêng ngành giao thông. Đó là vấn đề của chiến lược phát triển quốc gia, tổ chức lãnh thổ, năng lực công nghệ và mô hình nhà nước phát triển. Từ kinh nghiệm của Liên bang Nga có thể rút ra một bài học quan trọng: đường sắt chỉ phát huy đúng vai trò khi được đặt trong một cách thức tổ chức dài hạn, có phân tầng mạng lưới, có thể chế điều phối đủ mạnh và có hệ thống tiêu chuẩn, quy chuẩn thống nhất.

Đối với Việt Nam, điều cấp thiết nhất hiện nay là chấm dứt cách tiếp cận manh mún. Phải nhìn đường sắt như một hệ thống 100 năm, chuẩn bị hành lang phát triển ngay từ bây giờ, tổ chức mô hình quản lý minh bạch, xây cơ chế kinh tế vận tải khả thi và đầu tư nghiêm túc cho làm chủ công nghệ. Khi đó, đường sắt tốc độ cao trên trục Bắc - Nam mới thực sự trở thành một quyết định nền tảng cho tương lai phát triển của đất nước.❖

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Quốc hội (2017). Luật Đường sắt số 06/2017/QH14.

[2] Thủ tướng Chính phủ (2021). Quyết định số 1769/QĐ-TTg phê duyệt Quy hoạch mạng lưới đường sắt thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050.

[3] Bộ Chính trị (2023). 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.

[4] Chính phủ (2023). Nghị quyết số 178/NQ-CP ban hành Chương trình hành động của Chính phủ thực hiện Kết luận số 49-KL/TW.

[5] Quốc hội (2024). Nghị quyết số 172/2024/QH15 về chủ trương đầu tư Dự án đường sắt tốc độ cao trên trục Bắc - Nam.

[6] Chính phủ (2025). Nghị quyết số 106/NQ-CP về Kế hoạch triển khai Nghị quyết số 172/2024/QH15.

[7] OECD/ECMT (2004). Regulatory Reform of Railways in Russia. OECD Publishing.

[8] Chính phủ LB Nga (2008). Quyết định 877-p về Chiến lược phát triển giao thông đường sắt đến năm 2030.

[9] Chính phủ LB Nga (2013). Quyết định 384-p về Sơ đồ quy hoạch lãnh thổ LB Nga trong lĩnh vực giao thông đường sắt.

[10] Chính phủ LB Nga (2021). Quyết định 3363-p về Chiến lược giao thông LB Nga đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2035.

[11] Agafonov, D.V. (2017). Анализ целесообразности отделения инфраструктуры высокоскоростных магистралей в РФ.

[12] Livshits, V.N. và nnk. (2022). Высокоскоростная магистраль как общественно значимый проект.

QUY HOẠCH HÀ NỘI TẦM NHÌN 100 NĂM:

Từ bản vẽ đến hiện thực

KTS PHẠM THANH TÙNG*

1 Chưa bao giờ câu chuyện về Đồ án quy hoạch tổng thể Thủ đô với tầm nhìn 100 năm lại được xã hội quan tâm đến vậy. Từ sự quan tâm sâu sắc và chỉ đạo quyết liệt của lãnh đạo cấp cao nhất của Đảng, của Trung ương, Chính phủ thể hiện qua các chỉ đạo, nghị quyết như Nghị quyết 02-TW của Bộ Chính trị về xây dựng và phát triển Thủ đô Hà Nội trong kỷ nguyên mới, cho đến các ý kiến trao đổi, phản biện, đóng góp đầy sôi động, tâm huyết, trách nhiệm của các hội nghề nghiệp, KTS, chuyên gia đô thị, nhà báo… và của các tầng lớp nhân dân Thủ đô tại các hội nghị, tọa đàm, hội thảo; trên diễn đàn của mạng xã hội, báo in, báo điện tử, truyền hình. Hà Nội đã và đang tiếp thu với thái độ trọng thị và cẩn trọng, để chỉ đạo Liên danh tư vấn lập Đồ án này tiếp tục hoàn chỉnh với chất lượng cao nhất, hoàn thành Đồ án đúng mục tiêu, tiến độ mà Thành ủy Hà Nội đã đặt ra.

Tôi nói như vậy, để thấy tầm quan trọng và sức hấp dẫn của Đồ án quy hoạch có tính chiến lược nhằm định hình lại, tái cấu trúc lại không gian đô thị Hà Nội để Hà Nội trở thành một Thành phố "Văn hiến - Văn minh - Hiện đại - Hạnh phúc", là trung tâm đầu não chính trị - hành chính quốc gia, đồng thời là cực tăng trưởng, động lực lan tỏa của vùng Thủ đô, vùng đồng bằng sông Hồng, vùng Trung du và miền núi phía Bắc, các hành lang kinh tế quốc gia quốc tế. Rồi đến 100 năm, Thủ đô Hà Nội sẽ là Thành phố toàn cầu, đại đô thị Văn hiến - Thông minh - Sáng tạo - Sinh thái tiêu biểu trên thế giới.

Đây là lần đầu tiên trong lịch sử quy hoạch đô thị Việt Nam hiện đại, Thủ đô Hà Nội, trái tim của cả nước đã chủ động đề xuất và được Trung ương chấp thuận, giao quyền đặc biệt để lập đồ án quy hoạch tổng thể với tầm nhìn 100 năm, phù hợp với tổ chức lại địa giới hành chính các tỉnh, thành phố, thực hiện chính quyền địa phương 2 cấp, thay thế hai quy hoạch trước đó đã được phê duyệt là Quy hoạch Thủ đô thời kỳ 2021 - 2030 tầm nhìn đến 2050 và Điều chỉnh quy hoạch chung Thủ đô đến 2045 tầm nhìn đến 2065.

Đồ án quy hoạch tổng thể này rất quan trọng, không chỉ tích hợp quy hoạch trước đó, mà xác định mục tiêu chiến lược, tầm nhìn dài hạn 100 năm để Hà Nội phát triển ổn định theo không gian mở, chuyển từ quy hoạch "tĩnh" sang quy hoạch hiện đại "động và mở", chuyển từ "đơn cực tập trung" sang đô thị "đa cực - đa trung tâm", gắn với cấu trúc đô thị "đa tầng - đa lớp" nhằm phân bổ hợp lý dân cư, không gian sản xuất, dịch vụ hạ tầng, gắn với ứng dụng công nghệ số, trí tuệ nhân tạo AI, dữ liệu lớn Big Data và các nền tảng mô phỏng đô thị thông minh. Trong đó sông Hồng sẽ là trục cảnh quan sinh thái - văn hóa chủ đạo, định hình không gian phát triển đô thị Hà Nội, gắn chặt chẽ với vùng Thủ đô và các hành lang quốc gia quốc tế.

Quan điểm "đa cực - đa lớp - đa tầng - đa trung tâm" được thể hiện trong Đồ án phản ánh hệ tư duy không gian và quản trị đô thị hiện đại, nhằm thay thế quy hoạch đơn cực, dàn trải và quá tải lõi trung tâm của đô thị truyền thống vốn đã bộc lộ nhiều hạn chế, cản trở sự phát triển bền vững của Hà Nội nhiều thập kỷ qua. Như vậy, Hà Nội sắp tới đây sẽ không chỉ có một cực lõi là khu vực nội đô lịch sử, mà sẽ hình thành nhiều cực tăng trưởng ở các hướng khác nhau, như cực phía Tây (Mỹ Đình - Hòa Lạc); cực phía Bắc (Đông Anh - Sóc Sơn); cực phía Đông (Long Biên - Gia Lâm); cực phía Nam (Phú Xuyên…), giảm tải áp lực cho đô thị trung tâm (với khu phố cổ, khu phố cũ, khu vực Hồ Gươm, Ba Đình, Hoàng thành Thăng Long…), tạo động lực lan tỏa phát triển vùng Thủ đô, phù hợp xu thế phát triển của các đô thị lớn (siêu đô thị) trong khu vực châu Á như Seoul (Hàn Quốc), Tokyo (Nhật Bản). Đa trung tâm là khái niệm tổ chức lại cấu trúc chức năng đô thị. Mỗi trung tâm sẽ có chức năng chính như hành chính, tài chính, văn hóa, logistics, giáo dục hay khoa học công nghệ và đổi mới sáng tạo… Đa tầng - đa lớp là cấu trúc chiến lược tối ưu hóa không gian, giải quyết bài toán phát triển đô thị vốn có mật độ dân số rất cao, quỹ đất ngày càng khan hiếm nhưng không làm phá vỡ cấu trúc di sản hay lấn chiếm không gian mặt nước, không gian xanh để chuyển sang khai thác không gian tài nguyên theo chiều đứng (đa tầng) gồm không gian ngầm, không gian tầm thấp, không gian tầm cao, và tích hợp các giá trị cốt lõi tạo nên bản sắc đô thị Hà Nội, đó là giá trị văn hóa lịch sử ngàn năm Thăng Long - hệ sinh thái cảnh quan - hệ sinh thái kinh tế trên cao và số hóa trong cùng

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

một không gian (đa lớp).

Như vậy, theo tôi, nội dung cốt lõi của Đồ án là một hệ thống tích hợp hiện đại, giải quyết đồng thời 5 vấn đề lớn của Hà Nội, đó là: Quá tải lõi đô thị; Mất cân bằng phát triển không gian; Xung đột giữa bảo tồn và phát triển; Hạn chế phát triển hạ tầng và sử dụng hiệu quả tài nguyên đất đô thị, đất nông nghiệp; Bất bình đẳng xã hội.

2 Mặc dù Đồ án quy hoạch tổng hợp Thủ đô Hà Nội tầm nhìn 100 năm đã cho thấy đây là một quy hoạch chiến lược, có các phân kỳ, giai đoạn thực hiện nhưng không làm thay đổi mục tiêu tầm nhìn 100 năm đã đặt ra. Điều này thể hiện sự thay đổi về tư duy quản trị từ quản lý hành chính truyền thống sang chính quyền kiến tạo, chính quyền số. Nhưng Đồ án cũng sẽ đối mặt với những thách thức lớn.

Thứ nhất, việc xác định nhiều cực phát triển mới chỉ dừng ở định hướng không gian, trong khi chưa làm rõ cơ chế phân bổ nguồn lực, vai trò kinh tế đặc thù và mức độ tự chủ của từng cực. Nếu không có các chính sách tài chính - thể chế đủ mạnh, các "cực" này rất dễ rơi vào tình trạng phụ thuộc vào lõi trung tâm cũ, dẫn đến hiện tượng "đa cực hình thức nhưng đơn cực thực chất". Bài học từ một số đô thị châu Á cho thấy, chỉ khi các cực mới có đủ sức hút về việc làm, dịch vụ và hạ tầng, chúng mới thực sự trở thành trung tâm độc lập, như cách Seoul đã phát triển các đô thị vệ tinh, hay Tokyo tổ chức mạng lưới trung tâm theo tuyến đường sắt.

Thứ hai, quan điểm "đa lớp" - vốn là điểm mạnh của Hà Nội nhờ bề dày lịch sử nhưng lại đang đối mặt với nguy cơ bị diễn giải thiên về bảo tồn hình thức hơn là tích hợp động. Việc phân lớp di sản, đô thị hiện đại và sinh thái là cần thiết, nhưng nếu thiếu cơ chế "giao thoa lớp" thì đô thị có thể bị phân mảnh, thậm chí đóng băng các khu vực di sản. Thực tế cho thấy, nhiều không gian lịch sử ở Hà Nội đang bị "bảo tồn tĩnh", thiếu sức sống kinh tế và xã hội. Do đó, vấn đề không phải là giữ các lớp riêng biệt, mà là tạo ra các cơ chế chuyển hóa linh hoạt giữa chúng, để di sản trở thành nguồn lực phát triển chứ không chỉ là đối tượng bảo tồn, bảo vệ.

Thứ ba, "đa tầng" là một định hướng hợp lý trong bối cảnh quỹ đất hạn chế, song lại đặt ra thách thức lớn về công nghệ, tài chính và quản trị. Việc phát triển không gian ngầm, giao thông metro hay tổ chức đô thị theo chiều đứng đòi hỏi nguồn lực đầu tư cực kỳ lớn và năng lực vận hành phức tạp. Trong điều kiện hiện nay, khi hệ thống hạ tầng kỹ thuật của Hà Nội vẫn còn nhiều bất cập, nguy cơ là "đa tầng" sẽ bị triển khai không đồng bộ, dẫn đến xung đột giữa các tầng không gian, đặc biệt là giữa giao thông ngầm và hệ thống thoát nước, môi trường. Nếu không có một chiến lược tích hợp hạ tầng dài hạn, "đa tầng" rất dễ trở thành khẩu hiệu hơn là thực tiễn.

Thứ tư, đó là sự thiếu vắng khung quản trị tương thích, bởi bản chất của cấu trúc đa cực - đa trung tâm là một hệ thống mạng lưới phức hợp, đòi hỏi cơ chế điều phối vùng, liên kết liên ngành và phân quyền mạnh mẽ. Tuy nhiên, hệ thống quản lý đô thị hiện nay của Hà Nội vẫn mang nặng tính hành chính - phân cấp theo địa giới, chưa theo kịp yêu cầu quản trị theo không gian chức năng. Điều này có thể dẫn đến tình trạng mỗi cực phát triển theo một logic riêng, thiếu liên kết tổng thể, làm suy giảm hiệu quả của toàn hệ thống. Quy hoạch chưa lưu ý đến yếu tố thị trường và hành vi xã hội. Quy hoạch có thể định hình các cực và trung tâm, nhưng sự lựa chọn của người dân và doanh nghiệp mới là yếu tố quyết định. Nếu các khu vực mới không đủ hấp dẫn về chất lượng sống, việc làm và dịch vụ, dòng người và dòng vốn vẫn sẽ tiếp tục dồn vào khu vực lõi. Khi đó, mọi nỗ lực phân tán không gian sẽ khó đạt hiệu quả như kỳ vọng.

Thứ năm, Quy hoạch tầm nhìn 100 năm đã thể hiện một sự đột phá về tư duy chiến lược dài hạn, nhưng vẫn còn những giới hạn mang tính cấu trúc - không chỉ ở nội dung quy hoạch mà còn ở cách tiếp cận và khả năng hiện thực hóa. Quy hoạch đặt ra những mục tiêu rất tham vọng như phát triển đô thị đa cực, cân bằng sinh thái và trở thành trung tâm sáng tạo của khu vực. Tuy nhiên, các công cụ để chuyển hóa những mục tiêu này thành hành động cụ thể lại chưa rõ ràng (như vấn đề trị thủy, an ninh nguồn nước, tái cấu trúc dân cư ngoài đê… khi thực hiện trục cảnh quan - sinh thái - văn hóa sông Hồng). Thiếu các kịch bản phát triển theo từng giai đoạn, thiếu cơ chế phân bổ nguồn lực và đặc biệt là thiếu các "điểm kích hoạt" (trigger projects) có tính dẫn dắt khiến quy hoạch dễ rơi vào trạng thái định hướng chung chung, khó đo lường hiệu quả. Mô hình đô thị đa cực đúng về lý thuyết nhưng chưa đủ cơ sở thực tiễn. Các cực phát triển được xác định trong quy hoạch chưa có nền tảng kinh tế - xã hội đủ mạnh để vận hành độc lập. Trong bối cảnh hiện nay, lõi đô thị trung tâm vẫn giữ vai trò áp đảo về việc làm, dịch vụ và hạ tầng. Nếu không có cơ chế phân bổ lại nguồn lực một cách quyết liệt, mô hình đa cực có nguy cơ chỉ tồn tại trên bản vẽ, trong khi thực tế vẫn là một đô thị đơn cực mở rộng. Quy hoạch chưa giải quyết thấu đáo mối quan hệ giữa Hà Nội và vùng Thủ đô. Vai trò của các tỉnh lân cận trong chuỗi giá trị kinh tế, phân bố dân cư hay chia sẻ hạ tầng chưa được làm rõ. Điều này dẫn đến nguy cơ Hà Nội tiếp tục "hút" tài nguyên và dân số, trong khi vùng xung quanh không phát triển tương xứng, làm suy yếu chính mục tiêu phát triển bền vững của quy hoạch tầm nhìn 100 năm. Mâu thuẫn giữa phát triển và bảo tồn vẫn chưa được giải quyết một cách thuyết phục. Quy hoạch theo đuổi đô thị nén (TOD) và bảo vệ vành đai xanh, nhưng chưa đưa ra cơ chế đủ mạnh để kiểm soát áp lực chuyển đổi đất đai của thị trường bất động sản. Và khi đó, nếu thiếu công cụ quản lý hiệu quả, các không gian sinh thái rất dễ bị xâm lấn, dẫn đến mất cân bằng môi trường - điều mà quy hoạch dài hạn phải phòng ngừa từ sớm.

3 Để quy hoạch tầm nhìn 100 năm trở thành hiện thực, chứ không chỉ là các bản vẽ, đòi hỏi một mô hình quản trị tương ứng. Các vấn đề về phân quyền, tài chính đô thị, quản trị dữ liệu và sự tham gia của cộng đồng cần được cụ thể hóa. Trong khi đó, chính những yếu tố này sẽ quyết định việc quy hoạch có thể thích ứng linh hoạt trước những biến động khó lường của biến đổi khí hậu và địa chính trị thế giới tác động đến sự phát triển bền vững của nước ta nói chung và Hà Nội nói riêng trong thế kỷ 21.❖

Siêu đô thị thế hệ mới - Động lực tái cấu trúc hệ thống đô thị Việt Nam

PGS.TS.KTS NGUYỄN VŨ PHƯƠNG*

Quá trình đô thị hóa ở Việt Nam đang diễn ra nhanh cả về quy mô dân số, không gian phát triển và mức độ liên kết giữa các đô thị. Theo Nghị quyết số 06-NQ/TW, hệ thống đô thị quốc gia được xác định là động lực quan trọng thúc đẩy tăng trưởng kinh tế, chuyển dịch cơ cấu lao động và nâng cao năng lực cạnh tranh quốc gia. Cùng với đó, Nghị quyết số 76/2025/UBTVQH15 về việc sắp xếp đơn vị hành chính và triển khai tổ chức chính quyền địa phương 2 cấp; Nghị quyết 57-NQ/TW năm 2024 đột phá phát triển khoa học, công nghệ, đổi mới sáng tạo; Nghị quyết số 111/2025/UBTVQH15 về phân loại đô thị và Nghị định số 269/2025/NĐ-CP về phát triển đô thị thông minh đang tạo thêm cơ sở cho việc tổ chức lại hệ thống đô thị theo hướng hiện đại, đồng bộ và gắn với chuyển đổi số.

Trong bối cảnh đó, bài viết phân tích mô hình "siêu đô thị thế hệ mới" như một hướng tiếp cận quan trọng nhằm tái cấu trúc hệ thống đô thị quốc gia, gắn với vùng đô thị chức năng, quản trị tích hợp, hiện đại và phát triển bền vững. Bài viết cũng gợi mở định hướng phát triển không gian đô thị đa trung tâm, tăng cường liên kết vùng, đồng thời thúc đẩy hệ sinh thái đổi mới sáng tạo trong giai đoạn mới.

1. TÁI CẤU TRÚC HỆ THỐNG ĐÔ THỊ QUỐC GIA TRONG BỐI CẢNH ĐÔ THỊ HÓA VÀ CẢI CÁCH HÀNH CHÍNH

1.1. Bối cảnh cải cách hành chính

Cải cách tổ chức chính quyền địa phương theo mô hình chính quyền hai cấp (tỉnh và xã/phường), chính thức vận hành từ 01/7/2025, đánh dấu bước chuyển quan trọng trong tiến trình đổi mới thể chế và quản trị lãnh thổ ở Việt Nam [5]. Song song với cải cách bộ máy hành chính, hệ thống đô thị quốc gia cũng bước vào giai đoạn tái cấu trúc mạnh mẽ.

Theo Nghị quyết số 111/2025/UBTVQH15 về phân loại đô thị, hệ thống đô thị được tổ chức lại thành bốn cấp gồm đô thị đặc biệt, đô thị loại I, loại II và loại III. Trong đó, Hà Nội và TP.HCM tiếp tục được xác định là đô thị đặc biệt, còn Hải Phòng, Đà Nẵng, Cần Thơ và Huế là các đô thị loại I [4]. Theo tiêu chí quốc tế, TP.HCM hiện là đô thị duy nhất của Việt Nam có quy mô dân số vượt ngưỡng megacity (trên 10 triệu dân), trong khi Hà Nội với khoảng 8,7 triệu dân đang tiến gần ngưỡng này và giữ vai trò hạt nhân của vùng đô thị lớn phía Bắc.

Cùng với quá trình đô thị hóa và yêu cầu duy trì tăng trưởng GDP ở mức cao, sáu đô thị này không chỉ giữ vai trò trung tâm hành chính mà còn đang nổi lên như các cực phát triển chiến lược của vùng và quốc gia. Sự phát triển của các đô thị này góp phần định hình cấu trúc hệ thống đô thị quốc gia theo hướng đa trung tâm, tăng cường liên kết vùng và hội nhập quốc tế, đồng thời phản ánh xu hướng hình thành các vùng đô thị lớn có những đặc điểm tương đồng với một số hệ thống siêu đô thị trên thế giới [10], [11]. (Hình 1)

1.2. Tác động tới cấu trúc và quản trị đô thị

Cải cách tổ chức chính quyền địa phương theo mô hình 2 cấp không chỉ làm thay đổi cấu trúc hành chính mà còn tác động trực tiếp đến cách tiếp cận phát triển và quản trị đô thị ở Việt Nam. Trong khung phân loại trước đây, hệ thống đô thị quốc gia gồm hơn 900 đô thị các loại như thành phố, thị xã và thị trấn. Tuy nhiên, khi triển khai mô hình chính quyền địa phương 2 cấp, nhiều đô thị cấp trung gian không còn tồn tại như một cấp đơn vị hành chính độc lập mà chủ yếu được tổ chức dưới dạng phường hoặc xã trong hệ thống chính quyền cơ sở [5]. Tuy nhiên, việc sắp xếp từ 63 xuống 34 đơn vị hành chính cấp tỉnh không chỉ góp phần tinh gọn bộ máy mà còn tạo điều kiện tổ chức lại không gian phát triển theo hướng tăng cường liên kết vùng và hình thành cấu trúc đô thị đa trung tâm.

(*) PGĐ Học viện Chiến lược, bồi dưỡng cán bộ xây dựng (Bộ Xây dựng)

ĐÔ THỊ	QUY MÔ	VAI TRÒ CHỦ ĐẠO
Hà Nội (Đô thị đặc biệt)	~3.360 km²; ~8,7 triệu dân; GRDP 2025 (8,5%) ~63,5 tỷ USD; 126 cấp xã (51 phường, 75 xã)	Trung tâm chính trị, văn hóa, xã hội, tri thức và đào tạo R&D; Hạt nhân siêu đô thị phía Bắc
TP.HCM (Đô thị đặc biệt)	~6.773 km²; ~14,0 triệu dân; GRDP 2025 (8,3%) ~121 tỷ USD; 168 cấp xã (113 phường, 54 xã, 1 đặc khu)	Trung tâm kinh tế, tài chính, logistics và đổi mới sáng tạo; siêu đô thị phía Nam
Hải Phòng (Đô thị loại I)	~3.195 km²; ~4,66 triệu dân; GRDP 2025 (11,81%) ~29,3 tỷ USD; 114 cấp xã (67 xã, 45 phường, 2 đặc khu)	Trung tâm cảng biển và công nghiệp; logistics cực tăng trưởng vùng Bắc Bộ; Quy mô kinh tế đứng thứ 3 cả nước
Đà Nẵng (Đô thị loại I)	~11.860 km²; ~3,0 triệu dân; GRDP 2025 (9,18%) ~12,6 tỷ USD; 94 cấp xã (23 phường, 70 xã, 1 đặc khu)	Trung tâm dịch vụ, du lịch, công nghệ và kinh tế số miền Trung
Cần Thơ (Đô thị loại I)	~6.361 km²; ~4,2 triệu dân; GRDP 2025 (7,23%) ~12,3 tỷ USD; 104 cấp xã (31 phường, 73 xã)	Trung tâm điều phối kinh tế vùng Đồng bằng sông Cửu Long
Huế (Đô thị loại I)	4.947 km²; ~1,24 triệu dân; GRDP 2025 (8,5%) ~3,6 tỷ USD; 40 cấp xã (21 phường, 19 xã)	Đô thị di sản và công nghiệp văn hóa, du lịch đặc thù

Trước sắp xếp cả nước có 63 tỉnh/thành với hơn 900 đô thị (tính đến tháng 12/2024)
Sau sắp xếp từ 1/7/2025 có:
- 34 đơn vị hành chính cấp tỉnh, gồm 28 tỉnh và 6 thành phố.
- 3.321 đơn vị hành chính cấp xã (gồm 2.636 xã, 672 phường và 13 đặc khu)

Đô thị là trung tâm và là động lực phát triển kinh tế, vì vậy đặt ra yêu cầu phải tái cấu trúc lại hệ thống đô thị quốc gia theo hướng đa trung tâm tăng cường liên kết vùng, quản trị hiện đại.

Hình 1. Cấu trúc đơn vị hành chính và vai trò động lực của các đô thị (Nguồn: Tác giả).
Ghi chú: Hà Nội và TP.HCM có hiệu suất kinh tế cực cao (khoảng 19 triệu USD trên mỗi km²). Điều này khẳng định vai trò "siêu đô thị hạt nhân" nhưng cũng đặt ra áp lực khổng lồ lên hạ tầng và không gian sống.

Những thay đổi này đặt ra một cách tiếp cận mới đối với phát triển đô thị: đô thị không chỉ được nhìn nhận như một đơn vị hành chính mà ngày càng được tiếp cận như một không gian phát triển kinh tế - xã hội trong cấu trúc lãnh thổ rộng lớn hơn. Cách tiếp cận này tương đồng với xu hướng quản trị các vùng đô thị lớn trên thế giới, trong đó ranh giới hành chính không còn là yếu tố quyết định phạm vi phát triển đô thị [10], [11].

Mô hình chính quyền 2 cấp có thể tạo ra một số thay đổi quan trọng đối với cấu trúc và quản trị đô thị tại Việt Nam.

1) Tăng quyền chủ động của các đô thị lớn: Việc tinh gọn hệ thống hành chính giúp các đô thị như Hà Nội và TP.HCM chủ động hơn trong xây dựng chiến lược phát triển, quy hoạch không gian và phân bổ nguồn lực.

2) Thúc đẩy quản trị vùng đô thị: Các đô thị lớn ngày càng có phạm vi ảnh hưởng vượt ra ngoài ranh giới hành chính, do đó cần cơ chế điều phối và liên kết giữa các địa phương trong vùng.

3) Thúc đẩy chuyển đổi sang mô hình quản trị đô thị hiện đại: Ứng dụng dữ liệu đô thị, nền tảng số và trí tuệ nhân tạo đang là xu hướng quan trọng nhằm nâng cao hiệu quả cung cấp dịch vụ công và quản lý hạ tầng đô thị.

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh và cải cách hành chính theo mô hình chính quyền địa phương hai cấp, cách tiếp cận siêu đô thị thế hệ mới có ý nghĩa cả về lý luận và thực tiễn trong việc nhận diện lại cấu trúc phát triển và định hướng quản trị hệ thống đô thị Việt Nam.

2. KHÁI NIỆM SIÊU ĐÔ THỊ VÀ XU HƯỚNG TIẾP CẬN SIÊU ĐÔ THỊ THẾ HỆ MỚI

2.1. Từ megacity đến siêu đô thị thế hệ mới

Trong nghiên cứu đô thị quốc tế, megacity là đại đô thị theo nghĩa quy mô dân số trên 10 triệu dân trở lên (ESCAP), phản ánh mức độ tập trung dân cư và tốc độ mở rộng không gian đô thị trong quá trình đô thị hóa nhanh trên phạm vi toàn cầu. Tuy nhiên, trong bối cảnh chuyển dịch sang nền kinh tế tri thức, chuyển đổi số và gia tăng liên kết vùng, quy mô dân số không còn là tiêu chí duy nhất để đánh giá vai trò và vị thế của các vùng đô thị lớn. (Hình 2)

Khái niệm "siêu đô thị" (supercity) - là thuật ngữ được sử dụng trong bài viết theo nghĩa mở rộng, để phản ánh một cấp độ phát triển cao hơn của hệ thống đô thị (megacity), trong đó đô thị không chỉ lớn về quy mô mà còn giữ vai trò trung tâm liên kết vùng, đổi mới sáng tạo và kết nối với các mạng lưới kinh tế khu vực và toàn cầu.

Trên cơ sở đó, khái niệm "siêu đô thị thế hệ mới" (tạm dịch sang tiếng Anh là next-generation supercities) được hình thành nhằm phản ánh xu hướng phát triển đô thị theo cấu trúc đa trung tâm, tăng cường liên kết vùng và gắn với chuyển đổi số, đổi mới sáng tạo và phát triển bền vững, thay vì chỉ dựa trên tiêu chí quy mô dân số như trong mô hình megacity truyền thống. Siêu đô thị thế hệ mới được hình thành trên nền tảng vùng đô thị chức năng, hạ tầng liên kết vùng và hệ sinh thái đổi mới sáng tạo.

2.2. Siêu đô thị và cách tiếp cận "trí tuệ lãnh thổ"

Một hướng tiếp cận quan trọng trong nghiên cứu siêu đô thị hiện nay là khái niệm "Trí tuệ lãnh thổ" (Territorial Intelligence) do Alfonso Vegara và José Luis de las Rivas đề xuất trong công trình "Supercities - Territorial Intelligence". Theo cách tiếp cận này, siêu đô thị không chỉ là một đô thị quy mô lớn mà là một hệ sinh thái lãnh thổ thông minh, có khả năng huy động và tích hợp hiệu quả các nguồn lực phát triển trong phạm vi vùng đô thị mở rộng [16].

Trong mô hình này, "trí tuệ lãnh thổ" được hiểu là năng lực tổ chức và phối hợp các yếu tố như hạ tầng giao thông chiến lược, hạ tầng số, các trung tâm đổi mới sáng tạo, các hành

Hình 2. Tiến trình phát triển của siêu đô thị thế hệ mới (Nguồn: Tác giả).

Hình 3. Alfonso Vegara - Chủ tịch danh dự của Fundación Metropoli đến Quảng Ninh, 6/2024.

Hình 4. Cấu trúc vùng đô thị Hà Nội.

Hình 5. Cấu trúc vùng đô thị TP.HCM.

lang kinh tế và nguồn lực thể chế nhằm tạo động lực phát triển bền vững cho đô thị. Theo đó, siêu đô thị được hình thành như một cấu trúc lãnh thổ mở, vận hành theo mạng lưới liên kết giữa đô thị trung tâm và các cực phát triển mới như trung tâm đổi mới sáng tạo, tài chính, logistics và đào tạo - nghiên cứu. (Hình 3)

Cách tiếp cận "trí tuệ lãnh thổ" vì vậy cung cấp một khung lý luận quan trọng để nghiên cứu mô hình siêu đô thị thế hệ mới trong bối cảnh các đô thị lớn ngày càng mở rộng phạm vi ảnh hưởng và tăng cường liên kết vùng trong tiến trình toàn cầu hóa.

2.3. Kinh nghiệm và bài học quốc tế

Thực tiễn phát triển đô thị trên thế giới cho thấy nhiều quốc gia đã hình thành các vùng siêu đô thị theo cấu trúc đa trung tâm và liên kết vùng nhằm nâng cao hiệu quả tổ chức không gian phát triển và năng lực cạnh tranh quốc tế. Tokyo, Seoul, Singapore và Thượng Hải là những ví dụ tiêu biểu cho các mô hình "siêu đô thị" phát triển theo hướng tích hợp giữa quy hoạch không gian, hạ tầng giao thông, chuyển đổi số và quản trị đô thị hiệu quả [9] [13] [14]. (Bảng 1)

Kinh nghiệm quốc tế cho thấy sự phát triển của các siêu đô thị không chỉ dựa vào quy mô dân số mà chủ yếu phụ thuộc vào cấu trúc không gian đa trung tâm, hệ thống hạ tầng giao thông khối lượng lớn, hạ tầng số, năng lực và cơ chế quản trị vùng hiệu quả. Các siêu đô thị thường tập trung các chức năng đổi mới sáng tạo, tài chính, logistics và dịch vụ chất lượng cao, đồng thời vận dụng linh hoạt các mô hình phát triển bền vững như đô thị nén, TOD, đô thị thông minh, đô thị 15 phút, đô thị bọt biển và đô thị chống chịu. Những kinh nghiệm này là cơ sở tham khảo quan trọng cho quá trình nghiên cứu và định hình "siêu đô thị thế hệ mới" tại Việt Nam.

3. CẤU TRÚC VÙNG ĐÔ THỊ LỚN TẠI VIỆT NAM THEO TIẾP CẬN FUA

3.1. Vùng đô thị chức năng (FUA) - công cụ nhận diện cấu trúc siêu đô thị

Trong nghiên cứu đô thị quốc tế, "vùng đô thị chức năng" (Functional Urban Area - FUA) là khái niệm do OECD và Liên minh châu Âu (EU) phát triển nhằm xác định phạm vi ảnh hưởng thực tế của các đô thị lớn trên cơ sở các dòng di chuyển lao động và mức độ liên kết kinh tế - xã hội giữa đô thị trung tâm và khu vực phụ cận. [10].

Bảng 1. Kinh nghiệm quốc tế về phát triển siêu đô thị bền vững (Nguồn: Tác giả)

ĐÔ THỊ	QUY MÔ	ĐẶC ĐIỂM VÀ BÀI HỌC
Tokyo (Nhật Bản)	Diện tích 2.194 km^2; Dân số ~14,1 triệu dân; Vùng đô thị ~37 triệu; GRDP ~750 tỷ USD	Tokyo nổi bật về quản trị vùng và quy hoạch tích hợp; với cấu trúc vùng đô thị đa trung tâm gắn với hệ thống metro và mô hình đô thị nén, gắn kết hiệu quả giữa đô thị trung tâm và đô thị vệ tinh.
Seoul (Hàn Quốc)	Diện tích 605 km^2; Dân số ~10 triệu dân; Vùng thủ đô ~26 triệu; GRDP ~340 tỷ USD	Seoul điển hình về đổi mới sáng tạo, ứng dụng đô thị thông minh, và dữ liệu lớn trong quản lý đô thị; Nâng cao chất lượng sống theo hướng đô thị 15 phút.
Singapore (Quốc gia là siêu đô thị toàn cầu)	Diện tích ~744 km^2; Dân số ~6,1 triệu dân; GRDP ~590 tỷ USD	Singapore tiêu biểu về quản trị đô thị tích hợp, phát triển đô thị xanh, quản lý tài nguyên nước và nâng cao khả năng chống chịu
Thượng Hải (Trung Quốc)	Diện tích 6.340 km^2; Dân số ~25 triệu dân; GRDP ~750 tỷ USD	Thượng Hải phát triển mạnh theo cấu trúc đa trung tâm gắn với các trung tâm tài chính, logistics và các giải pháp đô thị bọt biển.

Theo phương pháp này, FUA được xác định dựa trên hai thành phần chính: (i) đô thị trung tâm (urban core), xác định theo mật độ dân cư và quy mô dân số; và (ii) vùng phụ cận (commuting zone), xác định theo tỷ lệ lao động di chuyển hằng ngày vào đô thị trung tâm để làm việc. Ranh giới vùng phụ cận thường được xác lập khi tỷ lệ này đạt một ngưỡng nhất định (khoảng 15%). Cách tiếp cận này cho phép phản ánh phạm vi hoạt động thực tế của đô thị vượt ra ngoài địa giới hành chính truyền thống. [11] (Hình 4,5)

Cách tiếp cận FUA cho phép nhận diện đô thị như một không gian phát triển theo mạng lưới liên kết vùng, thay vì giới hạn trong địa giới hành chính. Trong bối cảnh Việt Nam đang triển khai Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn năm và các định hướng phát triển đô thị theo Nghị quyết số 111/2025/UBTVQH15 theo hướng tích hợp và tăng cường liên kết vùng, FUA là công cụ quan trọng để nhận diện phạm vi phát triển thực chất của các vùng đô thị lớn như Hà Nội và TP. Hồ Chí Minh, đồng thời góp phần định hình mô hình "siêu đô thị thế hệ mới" phù hợp với điều kiện phát triển hiện nay.

3.2. Cấu trúc vùng đô thị Hà Nội và TP.HCM theo tiếp cận FUA trong hình thành các siêu đô thị tại Việt Nam

Theo cách tiếp cận vùng đô thị chức năng (FUA), phạm vi phát triển của các đô thị không chỉ giới hạn trong địa giới hành chính mà được xác định trên cơ sở các liên kết thực tế về lao động, hạ tầng và không gian kinh tế vùng [11]. Trong bối cảnh đó, Hà Nội và TP.HCM đang từng bước hình thành các vùng đô thị mở rộng với cấu trúc phát triển đa trung tâm, tiệm cận đặc điểm của các vùng siêu đô thị theo thông lệ quốc tế.

Ở phía Bắc, Hà Nội giữ vai trò trung tâm chính trị, hành chính và khoa học - đào tạo của cả nước, đồng thời là hạt nhân liên kết với các tỉnh công nghiệp và dịch vụ phát triển trong vùng trong quy hoạch tổng thể Thủ đô tầm nhìn 100 năm. Các dòng di chuyển lao động hằng ngày, mạng lưới giao thông hướng tâm và các hành lang kinh tế đang góp phần hình thành cấu trúc vùng đô thị chức năng mở rộng theo hướng đa trung tâm, trong đó các đô thị vệ tinh và các trung tâm công nghiệp giữ vai trò bổ trợ cho đô thị trung tâm.

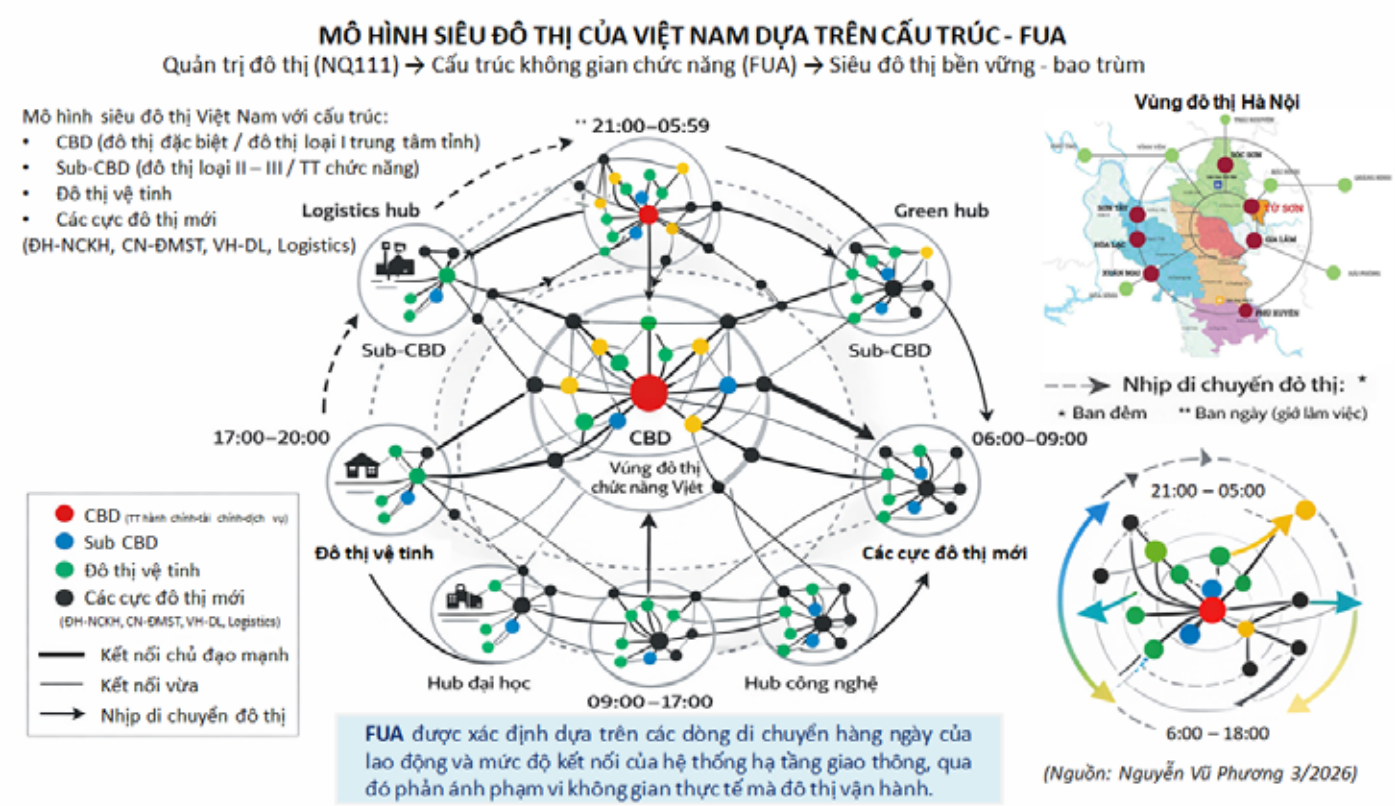
Phía Nam, TP.HCM giữ vai trò trung tâm kinh tế lớn nhất cả nước, là hạt nhân của vùng đô thị Đông Nam Bộ và hướng đến là siêu đô thị toàn cầu, trung tâm kinh tế - tài chính châu Á. Sự phát triển của các hành lang kinh tế chiến lược gắn với sân bay Long Thành, hệ thống cảng biển và mạng lưới logistics liên vùng đang từng bước hình thành cấu trúc đô thị mở rộng theo mô hình đa trung tâm và tăng cường liên kết vùng. (Hình 6)

So sánh theo tiếp cận FUA cho thấy vùng đô thị Hà Nội có cấu trúc liên kết vùng theo hướng hành chính - dịch vụ - công nghiệp công nghệ cao, trong khi vùng đô thị TP.HCM có cấu trúc liên kết theo hướng công nghiệp - logistics - dịch vụ tài chính - đổi mới sáng tạo. Hai cấu trúc này phản ánh hai cực phát triển quan trọng của hệ thống đô thị quốc gia, đồng thời tạo tiền đề cho việc hình thành các "siêu đô thị thế hệ mới" trong giai đoạn tới.

4. SIÊU ĐÔ THỊ THẾ HỆ MỚI - ĐỘNG LỰC TÁI CẤU TRÚC HỆ THỐNG ĐÔ THỊ QUỐC GIA VIỆT NAM

4.1. Vai trò của siêu đô thị thế hệ mới trong tái cấu trúc hệ thống đô thị quốc gia

Mô hình "siêu đô thị thế hệ mới" đang trở thành một cách tiếp cận quan trọng trong quá trình tái cấu trúc hệ thống đô thị quốc gia. Khác với mô hình megacity truyền thống, chủ yếu được nhận diện theo quy mô dân số và thường bộc lộ các hạn chế như quá tải hạ tầng, ùn tắc giao thông, ô nhiễm môi trường, bất bình đẳng trong tiếp cận nhà ở và dịch vụ công, cũng như gia tăng rủi ro trước biến đổi khí hậu. Siêu đô thị thế hệ mới được hình thành trên cơ sở vùng đô thị chức năng, hạ tầng liên kết vùng và hệ sinh thái đổi mới sáng tạo, qua đó góp phần khắc phục các bất cập của mô hình đô thị truyền thống.



Hình 6. Mô hình "Siêu đô thị thế hệ mới" của Việt Nam dựa trên FUA (Nguồn: Tác giả).
Ghi chú: Trong khung FUA, CBD đóng vai trò hạt nhân của hệ thống, thường là các đô thị trực thuộc trung ương hoặc đô thị loại I giữ chức năng trung tâm vùng. Các Sub-CBD tương ứng với các đô thị loại II, loại III hoặc các cực đô thị chức năng mới, được kết nối với trung tâm thông qua mạng lưới giao thông chiến lược, tạo thành cấu trúc đô thị đa trung tâm, liên kết và tích hợp. Nhịp di chuyển 24 giờ trong mô hình thể hiện các dòng di chuyển giữa nơi ở, nơi làm việc và các trung tâm dịch vụ trong vùng. Điều này cho thấy ranh giới của vùng siêu đô thị không chỉ được xác định theo ranh giới hành chính mà chủ yếu dựa trên dòng di chuyển và các liên kết chức năng trong toàn vùng đô thị.

Cách tiếp cận này đặt ra yêu cầu đổi mới phát triển và quản trị đô thị theo hướng coi trọng chất lượng, hiệu quả, tính bền vững, bao trùm và khả năng chống chịu, phù hợp với Mục tiêu phát triển bền vững SDG 11 và Chương trình nghị sự đô thị mới (New Urban Agenda) của UN-Habitat. (Hình 7)

Trên cơ sở đó, vai trò của siêu đô thị thế hệ mới trong tái cấu trúc hệ thống đô thị quốc gia có thể được nhìn nhận trên một số phương diện chủ yếu sau:

1. Tổ chức không gian đô thị theo cấu trúc đa trung tâm. Siêu đô thị thế hệ mới giúp hình thành cấu trúc đa trung tâm, kết nối đô thị trung tâm với các đô thị vệ tinh và các cực phát triển chức năng, qua đó giảm áp lực cho đô thị lõi và nâng cao hiệu quả sử dụng đất, hạ tầng.

2. Tăng cường liên kết vùng. Mô hình này thúc đẩy liên kết giữa các đô thị trong vùng, tạo điều kiện để các địa phương tham gia sâu hơn vào chuỗi giá trị sản xuất - dịch vụ và nâng cao năng lực cạnh tranh vùng.

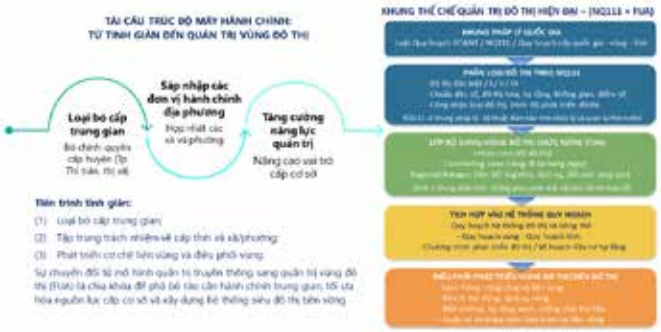
3. Thúc đẩy đổi mới sáng tạo và kinh tế tri thức. Siêu đô thị thế hệ mới tạo nền tảng phát triển các trung tâm đào tạo - nghiên cứu, công nghệ cao, tài chính và dịch vụ, góp phần chuyển dịch mô hình tăng trưởng theo hướng kinh tế số và kinh tế tri thức.

4. Đổi mới quản trị đô thị theo quy mô vùng. Cách tiếp cận này góp phần chuyển từ quản lý theo địa giới hành chính sang quản trị phát triển theo quy mô vùng, phù hợp với xu hướng mở rộng không gian đô thị và gia tăng liên kết vùng.

4.2. Một số định hướng phát triển siêu đô thị thế hệ mới tại Việt Nam

Từ vai trò của siêu đô thị thế hệ mới trong tái cấu trúc hệ thống đô thị quốc gia, việc nghiên cứu và từng bước hình thành mô hình này tại Việt Nam cần được tiếp cận đồng bộ giữa thể chế, quy hoạch không gian, phát triển hạ tầng và quản trị vùng đô thị. Một số định hướng chủ yếu gồm:

1. Vận dụng cách tiếp cận vùng đô thị chức năng (FUA) trong tổ chức không gian phát triển đô thị. Nghiên cứu áp dụng FUA để nhận diện phạm vi phát triển thực chất của các vùng đô thị lớn, đặc biệt đối với vùng Thủ đô Hà Nội và vùng đô thị TP.HCM. Đây là cơ sở quan trọng để định hướng tổ chức không gian phát triển đô thị theo liên kết vùng và tầm



Hình 7. Từ tái cấu trúc bộ máy hành chính đến quản trị vùng đô thị (Nguồn: Tác giả).

Hình 8. Khung chiến lược phát triển đô thị bền vững 4.0 cho Việt Nam (Nguồn: tác giả).

nhìn dài hạn.

2. Đổi mới quy hoạch theo cấu trúc đa trung tâm gắn với liên kết vùng. Công tác quy hoạch cần được tổ chức theo hướng gắn đô thị trung tâm với các đô thị vệ tinh và các cực phát triển chức năng thông qua các hành lang kinh tế và hệ thống giao thông liên vùng. Cách tiếp cận này góp phần nâng cao hiệu quả phân bố dân cư, phát triển nhà ở, sử dụng đất và tổ chức hệ thống hạ tầng kỹ thuật trong các vùng đô thị lớn.

3. Ưu tiên phát triển hạ tầng chiến lược và hạ tầng số liên vùng. Tập trung đầu tư các tuyến giao thông công cộng khối lượng lớn, hệ thống logistics, cảng biển, cảng hàng không và nền tảng dữ liệu đô thị phục vụ quản trị thông minh để tăng cường kết nối và nâng cao hiệu quả hoạt động của các vùng đô thị quy mô lớn.

4. Thúc đẩy hệ sinh thái đổi mới sáng tạo trong các vùng đô thị lớn. Gắn kết giữa các trung tâm đào tạo - nghiên cứu R&D, khu công nghệ cao và các trung tâm tài chính – dịch vụ nhằm tạo động lực chuyển dịch mô hình tăng trưởng theo hướng kinh tế số và kinh tế tri thức.

5. Xây dựng cơ chế phối hợp quản trị vùng đô thị quy mô lớn. Nghiên cứu hoàn thiện cơ chế phối hợp tăng và cường liên kết vùng. Đây là điều kiện quan trọng để phát huy vai trò của siêu đô thị như một động lực tái cấu trúc hệ thống đô thị quốc gia trong giai đoạn tới. (Hình 8)

5. KẾT LUẬN

"Siêu đô thị thế hệ mới" không còn được nhận diện chủ yếu bằng quy mô dân số như mô hình megacity truyền thống, mà bởi cấu trúc đa trung tâm, năng lực liên kết vùng và phương thức tổ chức không gian theo tiếp cận vùng đô thị chức năng (FUA).

Trong bối cảnh Việt Nam đang đẩy mạnh đô thị hóa, cải cách hành chính và tái cấu trúc hệ thống đô thị, đây là một hướng tiếp cận có ý nghĩa cả về lý luận và thực tiễn. Việc nghiên cứu, vận dụng mô hình này sẽ góp phần tổ chức lại không gian phát triển đô thị theo hướng hiện đại, tích hợp, bền vững và nâng cao năng lực cạnh tranh của hệ thống đô thị quốc gia trong giai đoạn mới.

Đây là nền tảng để hướng tới một mô hình quản trị đô thị hiện đại, bao trùm và bền vững cho Việt Nam trong quá trình hội nhập toàn cầu.❖

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Chính trị. (2022). Nghị quyết số 06-NQ/TW ngày 24/01/2022 về quy hoạch, xây dựng, quản lý và phát triển bền vững đô thị Việt Nam đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045.

[2] Bộ Chính trị. (2024). Nghị quyết số 57-NQ/TW ngày 22/12/2024 về đột phá phát triển khoa học, công nghệ, đổi mới sáng tạo và chuyển đổi số quốc gia.

[3] Quốc hội Việt Nam. (2024). Luật Quy hoạch đô thị và nông thôn. Luật số 47/2024/QH15.

[4] Uỷ ban Thường vụ Quốc hội (2025). Nghị quyết số 76/2025/UBTVQH15 về việc sắp xếp đơn vị hành chính

[5] Uỷ ban Thường vụ Quốc hội (2025). Nghị quyết số 111/2025/UBTVQH15 về phân loại đô thị.

[6] Chính phủ Việt Nam. (2025). Nghị định số 269/2025/NĐ-CP về Phát triển đô thị thông minh

[7] Nguyễn Vũ Phương, "Tích hợp quy hoạch đô thị bền vững gắn với cải cách chính quyền 2 cấp ở Việt Nam", Tạp chí Xây dựng, số 8, 2025.

[8] Nguyễn Vũ Phương, "Đổi mới phân loại đô thị - nông thôn ở Việt Nam: tiếp cận chức năng – không gian và kinh nghiệm quốc tế", Tạp chí Xây dựng, số 10, 2025.

[9] UN-Habitat. (2022). World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme.

[10] OECD & European Commission. (2020). Cities in the World: A New Perspective on Urbanisation. Paris: OECD Publishing.

[11] Lewis Dijkstra, Hugo Poelman, Paolo Veneri. The EU-OECD definition of a functional urban area. OECD Regional Development Working Papers (2019/11).

[12] World Bank. (2022). Thriving: Making Cities Green, Resilient, and Inclusive in a Changing Climate. Washington, DC: World Bank.

[13] Sassen, S. (2001). The Global City: New York, London, Tokyo (2nd ed.). Princeton, NJ: Princeton University Press.

[14] Florida, R., Gulden, T., & Mellander, C. (2008). "The Rise of the Mega-Region." Cambridge Journal of Regions, Economy and Society, 1(3), 459–476.

[15] UN-Habitat. (2016). New Urban Agenda. Quito/Nairobi: United Nations Human Settlements Programme.

[16] Vegara, A., & De las Rivas, J. L. (2020). Supercities: Territorial Intelligence. Kuala Lumpur: Think City / Fundación Metrópoli.

TS NGUYỄN HUY HOẠCH:

Kiến tạo một **hệ thống năng lượng tự chủ**, chống chịu tốt trước các cú sốc từ bên ngoài

NGUYỄN HOÀNG LINH (thực hiện)

Trong bối cảnh thế giới đang gia tăng sự bất ổn, đặc biệt là các xung đột tại những khu vực cung cấp năng lượng lớn như Trung Đông, vấn đề năng lượng không còn đơn thuần là kinh tế mà đã trở thành một yếu tố của an ninh quốc gia. Khi nguồn cung bị gián đoạn hoặc giá năng lượng biến động mạnh, tác động sẽ lan rộng tới toàn bộ nền kinh tế. BTV Tạp chí Xây dựng đã có cuộc trò chuyện sâu sắc và thú vị với chuyên gia năng lượng, TS Nguyễn Huy Hoạch - Hiệp hội Năng lượng Việt Nam xung quanh vấn đề này.

KHÔNG THIẾU TÀI NGUYÊN, MÀ THIẾU "HỆ SINH THÁI" ĐỂ KHAI THÁC

Thưa TS Nguyễn Huy Hoạch, tình hình xung đột quân sự tại khu vực Trung Đông đã ảnh hưởng nghiêm trọng đến chuỗi cung ứng năng lượng toàn cầu. Vậy trong chiến lược năng lượng quốc gia, Việt Nam đã hình thành các tầng dự trữ gồm dự trữ quốc gia, dự trữ thương mại của doanh nghiệp và dự trữ phục vụ sản xuất của các nhà máy lọc dầu như thế nào?

- Nếu chúng ta nhìn nền kinh tế thế giới hiện nay ví như một cỗ máy khổng lồ thì năng lượng chính là dầu bôi trơn của cỗ máy đó. Chỉ cần nguồn dầu này bị gián đoạn ở một bộ phận nào đó, toàn bộ hệ thống sẽ bị ảnh hưởng dây chuyền. Trung Đông chính là một van điều tiết lớn của hệ thống đó. Khi khu vực này có xung đột, giá dầu không chỉ tăng ở Trung Đông, mà lan ra toàn thế giới, giống như việc một mắt xích bị trục trặc thì cả dây chuyền đều rung lắc.

Việt Nam dù không phải là một nước phụ thuộc hoàn toàn vào dầu nhập khẩu nhưng vẫn nằm trong dòng chảy chung của thị trường năng lượng toàn cầu. Vì vậy, mỗi biến động lớn trên thế giới đều có thể tác động đến giá cả trong nước, từ xăng dầu đến việc cung cấp điện.

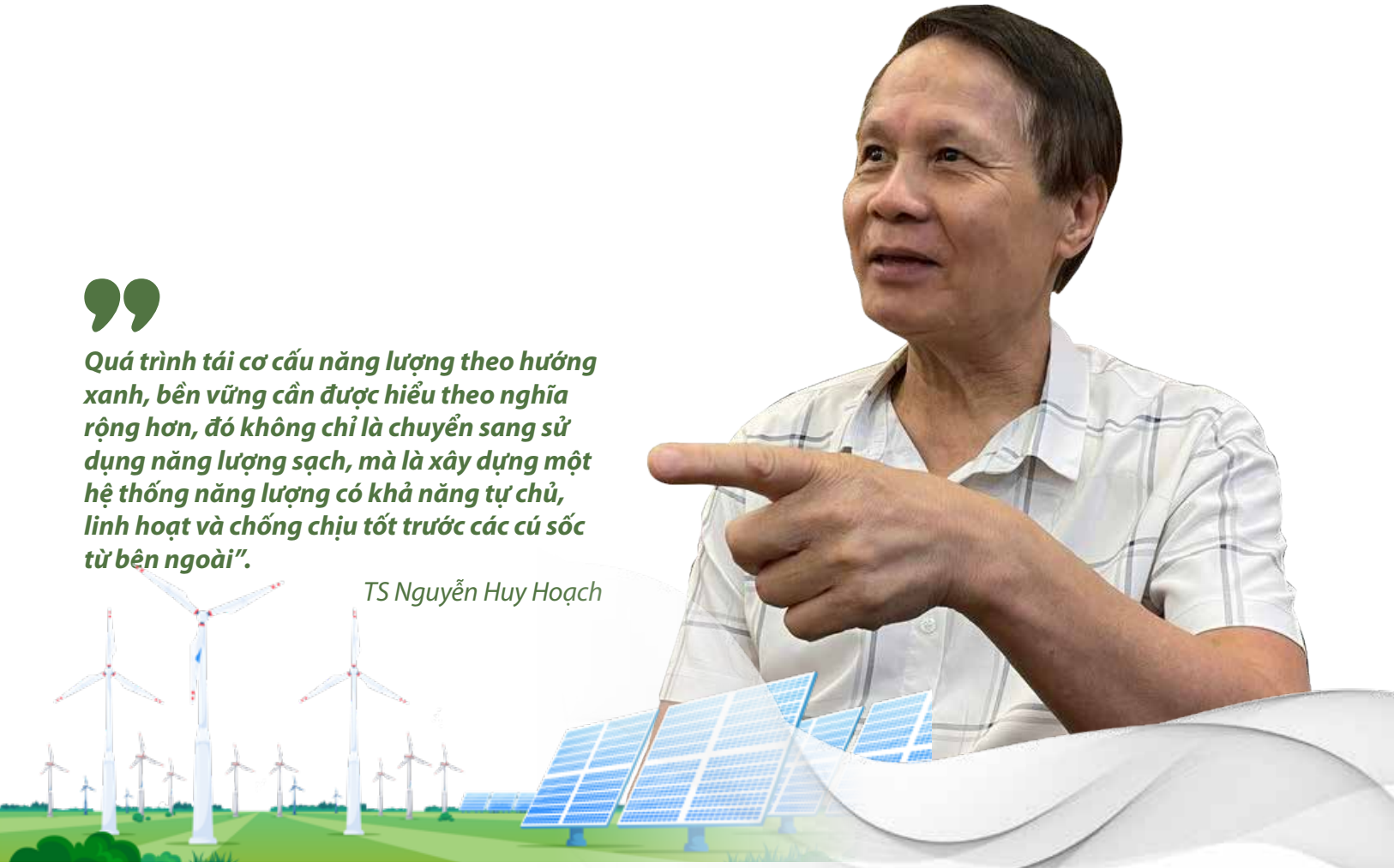
Để ứng phó với điều đó, Việt Nam đã xây dựng một hệ thống dự trữ năng lượng theo nhiều tầng. Có thể hình dung đơn giản như một gia đình biết lo xa, không chỉ có tiền trong ví mà còn có tiền gửi ngân hàng, và thậm chí có cả tài sản dự phòng.

Tầng thứ nhất là dự trữ quốc gia. Đây là phần "để dành" của Nhà nước, chỉ dùng khi thật sự cần thiết, giống như khoản tiền tiết kiệm không đụng đến nếu chưa có việc lớn. Tuy nhiên, do điều kiện kinh tế và hạ tầng, quy mô dự trữ này của Việt Nam vẫn chưa lớn như ở các nước phát triển.

Tầng thứ hai là dự trữ thương mại của doanh nghiệp. Các doanh nghiệp xăng dầu phải duy trì lượng tồn kho để đảm bảo không bị đứt hàng. Đây giống như việc các cửa hàng luôn phải có hàng trong kho để bán liên tục.

Tầng thứ ba là dự trữ trong sản xuất, đặc biệt tại các nhà máy lọc dầu như Dung Quất hay Nghi Sơn. Các nhà máy này giống như những "bếp ăn lớn", vừa sản xuất vừa giữ nguyên liệu, có thể điều chỉnh lượng cung khi cần. Tuy nhiên, cần nói thẳng rằng Việt Nam vẫn là nước phụ thuộc đáng kể vào nhập khẩu năng lượng, đặc biệt là dầu thô và LNG trong tương lai. Nhưng nói một cách thẳng thắn, các tầng dự trữ này chỉ giúp "cầm cự" trong ngắn hạn. Nếu phụ thuộc vào nhập khẩu thì về lâu dài vẫn bị động. Điều này giống như việc trong nhà có dự trữ gạo, nhưng nếu nguồn cung bên ngoài bị cắt lâu dài thì sớm muộn cũng gặp khó khăn.

Vì vậy, khi xung đột xảy ra ở Trung Đông, nơi cung cấp phần lớn dầu mỏ thế giới thì dù Việt Nam không trực tiếp tham gia, chúng ta vẫn bị ảnh hưởng thông qua giá cả và nguồn cung.



Quá trình tái cơ cấu năng lượng theo hướng xanh, bền vững cần được hiểu theo nghĩa rộng hơn, đó không chỉ là chuyển sang sử dụng năng lượng sạch, mà là xây dựng một hệ thống năng lượng có khả năng tự chủ, linh hoạt và chống chịu tốt trước các cú sốc từ bên ngoài".

TS Nguyễn Huy Hoạch

Nói một cách đơn giản, khi thế giới "sốt", Việt Nam cũng sẽ "bị lây", chỉ khác là nặng hay nhẹ. Vì vậy, bài toán lớn hơn của Việt Nam không chỉ là dự trữ, mà là giảm phụ thuộc và tăng tự chủ năng lượng.

Các chuyên gia đều cho rằng nguồn cung ứng năng lượng hóa thạch trên toàn cầu sẽ cạn dần. Vậy trong tương lai, khi nhu cầu năng lượng ngày càng lớn, các nguồn năng lượng nào sẽ giữ vai trò chủ đạo để thay thế?

- Nếu nhìn về tương lai, hệ thống năng lượng sẽ thay đổi giống như cách chúng ta chuyển từ điện thoại bàn sang điện thoại thông minh. Không phải thay đổi ngay lập tức, nhưng là một xu hướng không thể đảo ngược.

Trước đây, năng lượng hóa thạch như than, dầu, khí giống như "nguồn điện chính" của thế giới. Nhưng các nguồn này có hai vấn đề, một là hữu hạn, hai là gây ô nhiễm. Vì vậy, việc tìm nguồn thay thế là tất yếu.

Trong tương lai, năng lượng tái tạo như điện mặt trời và điện gió sẽ trở thành trụ cột. Điểm mạnh của các nguồn năng lượng này là tái tạo, có thể khai thác ngay tại chỗ. Không cần nhập khẩu, không phụ thuộc vào giá thế giới, và đặc biệt là "không sợ hết".

Nói một cách dễ hiểu thì năng lượng tái tạo giống như "tự trồng rau trong vườn nhà". Có thể không phải lúc nào cũng đủ, nhưng càng tự chủ thì càng ít phụ thuộc. Tuy nhiên, năng lượng tái tạo có một đặc điểm là nó không ổn định. Đối với điện mặt trời, khi trời có nắng thì có điện, không nắng thì không có điện, còn điện gió thì khi không có gió thì tuabin không thể quay để tạo ra điện. Vì vậy, hệ thống năng lượng tương lai sẽ không phải là "một nguồn thay thế một nguồn", mà là sự kết hợp.

Lúc này, vai trò của lưu trữ năng lượng và lưới điện thông minh trở nên cực kỳ quan trọng. Nếu điện mặt trời, điện gió là "nguồn nước" thì pin lưu trữ là "bể chứa", còn lưới điện là "đường dẫn". Không có bể chứa, nước sẽ tràn đi; không có đường dẫn, nước không đến được nơi cần.

Ngoài ra, LNG sẽ đóng vai trò "nguồn dự phòng linh hoạt" cho giai đoạn chuyển tiếp dần thay thế nhiệt điện. Nhưng điện khí cũng gây ô nhiễm môi trường, tuy mức độ gây ô nhiễm chỉ bằng một nửa so với nhiệt điện. Ngoài ra, đối với nước ta, LNG vẫn phải nhập khẩu, nên LNG không thể là nền tảng lâu dài.

Việt Nam vốn quanh năm nắng và gió nhưng dường như việc phát triển nguồn năng lượng này trong thời gian qua vẫn đầy chông gai. Vậy theo ông, nguyên do từ đâu?

- Đây là câu hỏi mà gần như ai cũng từng nghĩ: Thiên nhiên ưu đãi cho nước ta nhiều như vậy, tại sao chưa tận dụng được?

Theo tôi, có 3 nút thắt lớn.

Nút thắt thứ nhất là lưới điện. Có thể hình dung điện mặt trời giống như nước, còn lưới điện là đường ống. Nếu nước nhiều

mà ống nhỏ, nước cũng không thoát đi đâu được. Ở Việt Nam, có những khu vực điện mặt trời phát triển rất mạnh nhờ cường độ bức xạ lớn, đặc biệt là khu vực miền Trung và miền Nam, nhưng không truyền tải đi được, buộc phải cắt giảm. Điều này giống như việc bạn có rất nhiều nước nhưng lại không có hệ thống dẫn nước tới nơi cần dùng.

Nút thắt thứ hai là cơ chế giá. Chính phủ đã từng có cơ chế FIT 1 và FIT 2 trong giai đoạn 2019-2021, điện mặt trời và điện gió phát triển bùng nổ. Lý do rất đơn giản, đó là có giá mua ổn định, nhà đầu tư nhìn thấy lợi nhuận. Nhưng khi cơ chế này dừng lại và chưa có cơ chế thay thế rõ ràng, thị trường lập tức chững lại.

Điều này giống như việc mở một cửa hàng. Nếu bạn biết chắc mình bán được giá tốt trong 20 năm, bạn sẽ mạnh dạn đầu tư. Nhưng nếu không biết giá ngày mai ra sao, bạn sẽ do dự.

Nút thắt thứ ba là hệ thống lưu trữ điện năng. Điện mặt trời có ban ngày, nhưng nhu cầu phụ tải cao nhất lại vào buổi tối. Tương tự, điện gió cũng vậy, khi có gió mạnh nhưng nhu cầu phụ tải không cao thì năng lượng sản xuất từ điện gió cũng chẳng biết để làm gì. Nếu không có hệ thống lưu trữ điện năng, điện dư ban ngày sẽ bị lãng phí.

Dường như vấn đề lưu trữ năng lượng ở nước ta vẫn còn rất nhỏ lẻ?

- Theo Quy hoạch Điện VIII điều chỉnh, đến năm 2030 sẽ đưa vào vận hành 2.400 - 6.000 MW thủy điện tích năng và 10.000 - 16.300 MW pin lưu trữ (chiếm tỷ trọng 5,5 - 6,9% tổng công suất nguồn). Hiện tại, nhà máy thủy điện tích năng Bác Ái, công suất 1.200 MW, khởi công cuối năm 2020 và theo tiến độ thì cuối năm 2028 sẽ đưa vào vận hành. Tuy nhiên, do nhiều nguyên nhân, tiến độ thi công thực hiện gặp nhiều khó khăn nên dự kiến nhà máy sẽ đưa vào vận hành trong năm 2030. Các dự án thủy điện tích năng tiếp theo hiện nay vẫn chưa được xác nhận danh mục chuẩn bị đầu tư.

Hiện nay, Việt Nam đang dần hình thành nền công nghiệp sản xuất pin lưu trữ năng lượng (BESS) và pin Lithium-ion với các dự án như Nhà máy VinES (Hải Phòng) của VinFast, các nhà máy của LG Chem, Panasonic, ắc quy Tia Sáng (DGC), dự án nghiên cứu thí điểm ~50 MW/50 MWh EVN phê duyệt và một số nghiên cứu thí điểm khác do Công ty CP Tư vấn xây dựng Điện 2... Tuy nhiên, có thể nhận xét là vẫn ở giai đoạn sơ khai và còn xa so với nhu cầu.

Ngày 03/3/2025, Chính phủ đã ban hành Nghị định 58/CP-NĐ-CP quy định chi tiết một số điều của Luật Điện lực về phát triển điện năng lượng tái tạo, điện năng lượng mới nhằm tháo gỡ những khó khăn, vướng mắc trong việc phát triển năng lượng tái tạo. Tuy nhiên, tính đến nay Nghị định đã ban hành hơn 1 năm nhưng vẫn chưa có gì thay đổi đáng kể trong việc phát triển điện gió và điện mặt trời.

Tóm lại, Việt Nam không thiếu tài nguyên, mà thiếu "hệ sinh thái" để khai thác tài nguyên đó.

BIẾN HÀNG TRIỆU MÁI NHÀ THÀNH NHỮNG NHÀ MÁY ĐIỆN NHỎ

Tôi có đọc trong một bài viết mới đây, ông đã nêu quan điểm nếu Việt Nam tiếp tục xây thêm các nhà máy điện chạy đỉnh là một giải pháp tốn kém và kém hiệu quả. Trong khi đó, sự kết hợp giữa điện mặt trời mái nhà và pin lưu trữ đang mở ra một cách tiếp cận khác: Biến hàng triệu mái nhà thành những nhà máy điện nhỏ, có thể góp phần cắt giảm phụ tải giờ cao điểm và giúp hệ thống điện vận hành linh hoạt hơn. Tôi lại nhớ đến câu Bác Hồ nhắc nhở: "Dễ trăm lần không dân cũng chịu, khó vạn lần dân liệu cũng xong". Vậy ý tưởng biến hàng triệu mái nhà thành những nhà máy điện nhỏ kia liệu có khả thi?

- Đây không chỉ là một ý tưởng khả thi, mà còn có thể nói là một trong những hướng đi thông minh nhất để giải bài toán điện của Việt Nam trong giai đoạn tới. Nhưng để hiểu vì sao nó quan trọng, cần nhìn đúng vào vấn đề cốt lõi của hệ thống điện hiện nay: phụ tải đỉnh.

Nhiều người nghĩ rằng thiếu điện là vì không có đủ nguồn điện. Nhưng thực tế không hẳn như vậy. Phần lớn thời gian trong ngày, hệ thống điện vẫn đáp ứng được nhu cầu. Vấn đề nằm ở một vài giờ buổi tối, khi nhu cầu điện tăng vọt, đặc biệt vào mùa nóng.

Theo số liệu, công suất cực đại của hệ thống điện Việt Nam đã tăng từ khoảng 27.000 MW năm 2015 lên hơn 54.000 MW năm 2025, tức là gần gấp đôi chỉ sau 10 năm. Điều này cho thấy tốc độ tăng trưởng rất nhanh, nhưng lại tập trung vào một khoảng thời gian ngắn trong ngày.

Có thể hình dung hệ thống điện giống như một nhà hàng. Cả ngày khách đến vừa phải, nhưng đến giờ cao điểm buổi tối thì khách đổ vào rất đông. Nếu muốn phục vụ hết khách trong thời gian này, nhà hàng buộc phải mở rộng quy mô rất lớn. Nhưng sau giờ cao điểm, phần lớn bàn ghế lại bỏ trống. Đây chính là sự lãng phí.

Hệ thống điện cũng vậy. Để phục vụ vài giờ cao điểm, chúng ta phải xây thêm nhà máy điện. Nhưng những nhà máy này có thể chỉ chạy vài trăm giờ mỗi năm. Chi phí đầu tư rất lớn, nhưng hiệu quả sử dụng lại thấp. Trong bối cảnh đó, điện mặt trời mái nhà kết hợp pin lưu trữ đưa ra một cách tiếp cận hoàn toàn khác.

Cơ chế rất đơn giản, khi ban ngày có nắng, các tấm quang năng sẽ phát điện. Nếu điện không dùng hết thì chuyển sang lưu trữ vào pin và vào buổi tối sẽ sử dụng điện từ pin. Điều này giống như việc nấu ăn sẵn vào ban ngày để dùng vào buổi tối, thay vì phải nấu đúng vào giờ cao điểm.

Khi mô hình này được triển khai ở quy mô lớn, tức là hàng triệu mái nhà cùng tham gia, tác động sẽ rất đáng kể. Một phần nhu cầu điện buổi tối sẽ được "gánh" bởi nguồn điện đã lưu trữ từ ban ngày. Nhờ đó, phụ tải đỉnh của hệ thống sẽ giảm xuống.

Có thể hình dung hệ thống điện như một con đê, còn phụ tải đỉnh là đỉnh lũ. Nếu đỉnh lũ quá cao, con đê phải xây rất lớn và tốn kém. Nhưng nếu có thể "cắt bớt đỉnh lũ" từ trước, thì không cần xây đê quá lớn. Điện mặt trời mái nhà kết hợp pin lưu trữ chính là công cụ để "cắt đỉnh lũ" đó.

Theo Quy hoạch điện VIII điều chỉnh, mục tiêu đến năm 2030 là khoảng 50% mái nhà của hộ gia đình, cơ quan, trường học, nhà hàng, khách sạn sẽ lắp đặt điện mặt trời. Nếu mục tiêu này đạt được, quy mô nguồn điện phân tán sẽ rất lớn, tương đương với nhiều nhà máy điện lớn cộng lại. Điểm đặc biệt của mô hình này là điện được sản xuất ngay tại nơi tiêu thụ. Điều này giúp giảm tải cho lưới điện truyền tải và giảm tổn thất điện năng. Đồng thời, nó cũng giúp hệ thống điện trở nên linh hoạt hơn, bởi vì nguồn điện không còn tập trung ở một vài điểm lớn, mà phân bố rộng khắp.

> ***Trước đây, năng lượng hóa thạch như than, dầu, khí giống như "nguồn điện chính" của thế giới. Nhưng các nguồn này có hai vấn đề, một là hữu hạn, hai là gây ô nhiễm. Vì vậy, việc tìm nguồn thay thế là tất yếu".***
>
> *TS Nguyễn Huy Hoạch*

Ồ, nếu được triển khai đúng cách, đây có thể coi là một cuộc "cách mạng năng lượng từ người dân", nơi mỗi mái nhà không chỉ là nơi tiêu thụ điện, mà còn là một phần của hệ thống năng lượng quốc gia. Nhưng để biến chúng thành hiện thực thì cần phải như thế nào, thưa ông?

- Tôi cho rằng, để mô hình này phát huy hiệu quả, cần 3 điều kiện.

Thứ nhất là cơ chế giá điện theo thời gian sử dụng. Nếu giá điện buổi tối cao hơn ban ngày, người dân sẽ có động lực lưu trữ điện để dùng vào giờ cao điểm. Đây là cách mà nhiều quốc gia như Australia đã làm rất hiệu quả.

Thứ hai là hệ thống lưới điện thông minh, có khả năng điều phối hàng triệu nguồn điện nhỏ. Nếu không có điều phối, hệ thống sẽ giống như một dàn nhạc mà mỗi người chơi một nhịp khác nhau.

Thứ ba là chi phí pin lưu trữ phải tiếp tục giảm. Một thông tin tốt là giá pin đã giảm hơn 80% trong hơn một thập kỷ qua và xu hướng này vẫn tiếp tục.

Tóm lại, ý tưởng biến hàng triệu mái nhà thành những "nhà máy điện nhỏ" không chỉ khả thi mà còn là một hướng đi rất chiến lược. Nó giúp giải quyết đồng thời nhiều vấn đề: giảm phụ tải đỉnh, giảm đầu tư nhà máy điện lớn, giảm áp lực lưới điện và tăng tính tự chủ năng lượng cho từng hộ gia đình.

Có một vụ ồn ào cách đây không lâu, Tập đoàn Điện lực Việt Nam (EVN) có đề xuất bổ sung quy định: Tổ chức, cá nhân lắp đặt điện mặt trời mái nhà để tự dùng, nhưng không thông báo, hoặc đăng ký với cơ quan quản lý, sẽ bị xử lý theo pháp luật về xử phạt vi phạm hành chính trong lĩnh vực điện lực. Việc này đã dấy lên làn sóng dư luận trái chiều trên các trang báo thông tin điện tử và mạng xã hội, thậm chí có ý kiến cho rằng: "Mặt trời đâu phải của riêng EVN". Vậy nên hiểu vấn đề này như thế nào cho đúng?

- "Mặt trời đâu phải của riêng EVN". Câu nói này nghe rất hợp lý về mặt cảm xúc, bởi ai cũng thấy rằng ánh nắng mặt trời là tài nguyên chung, không ai có quyền sở hữu. Tuy nhiên, khi chuyển từ câu chuyện "ánh nắng" sang "điện năng" thì vấn đề không còn đơn giản như vậy nữa.

Cần phân biệt rất rõ hai khái niệm: Mặt trời là tài nguyên tự nhiên, nhưng hệ thống điện là một hệ thống kỹ thuật cực kỳ phức tạp.

Có thể hình dung hệ thống điện giống như một xa lộ cao tốc. Ai cũng có quyền tham gia giao thông, nhưng không phải muốn vào là vào, muốn chạy thế nào cũng được. Tất cả phải tuân thủ quy định: vào đúng làn, đúng tốc độ, có tín hiệu điều khiển. Nếu một vài xe tự ý nhập làn không báo trước, có thể chưa xảy ra chuyện lớn. Nhưng nếu hàng nghìn, hàng triệu xe cùng làm như vậy, hệ thống sẽ rối loạn ngay lập tức.

Hệ thống điện cũng tương tự. Khi một hộ gia đình lắp điện mặt trời để tự dùng, quy mô nhỏ thì không ảnh hưởng nhiều. Nhưng khi số lượng lên tới hàng trăm nghìn, thậm chí hàng triệu mái nhà, thì mỗi nguồn điện nhỏ đó đều trở thành một "yếu tố" trong bài toán vận hành hệ thống.

Theo quy định hiện nay, kể cả khi lắp đặt điện mặt trời theo hình thức tự sản, tự tiêu, người dân vẫn cần thông báo với đơn vị vận hành hệ thống. Điều này không phải là thủ tục hành chính cho có, mà là một yêu cầu kỹ thuật rất quan trọng.

Bởi vì hệ thống điện phải được vận hành dựa trên dự báo nhu cầu phụ tải. Nếu đơn vị điều độ không biết được có bao nhiêu nguồn điện đang phát lên lưới, vào thời điểm nào, thì việc cân bằng cung - cầu sẽ trở nên rất khó khăn.

Có thể hình dung như sau: nếu bạn lái xe trong điều kiện bình thường, bạn nhìn thấy đường, bạn điều chỉnh tốc độ được. Nhưng nếu bạn lái xe trong sương mù mà không biết phía trước có bao nhiêu xe, đang chạy nhanh hay chậm, thì nguy cơ tai nạn sẽ rất cao.

Trong hệ thống điện, "tai nạn" không phải là va chạm, mà là mất cân bằng tần số, điện áp. Khi điều này xảy ra ở quy mô lớn, có thể dẫn đến sự cố diện rộng, thậm chí mất điện hàng loạt.

Vì vậy, câu chuyện ở đây không phải là "ai sở hữu mặt trời", mà là "ai chịu trách nhiệm vận hành hệ thống điện một cách an toàn". Và để làm được điều đó, mọi nguồn điện, dù lớn hay nhỏ, đều cần được quản lý và tích hợp vào hệ thống chung. Có như vậy, hệ thống điện quốc gia mới vận hành an toàn, minh bạch, bền vững, đồng thời khai thác được hết tiềm năng của nguồn năng lượng tái tạo tại chỗ.

> ***Ý tưởng biến hàng triệu mái nhà thành những "nhà máy điện nhỏ" không chỉ khả thi mà còn là một hướng đi rất chiến lược. Nó giúp giải quyết đồng thời nhiều vấn đề: giảm phụ tải đỉnh, giảm đầu tư nhà máy điện lớn, giảm áp lực lưới điện và tăng tính tự chủ năng lượng cho từng hộ gia đình".***
>
> *TS Nguyễn Huy Hoạch*

NHỮNG BÀI HỌC TRONG CƠ CẤU NĂNG LƯỢNG XANH VÀ BỀN VỮNG

Hẳn chúng ta đều còn nhớ sự cố mất điện cấp quốc gia xảy ra tại Tây Ban Nha và Bồ Đào Nha vào mùa hè năm 2025 mà nguyên nhân được cho là từ... điện mặt trời. Khi đó, sân bay quốc tế Barajas của Madrid và Humberto Delgado của Lisbon đã đóng. Nhiều hành khách cũng bị mắc kẹt trong hệ thống tàu điện ngầm của thủ đô Tây Ban Nha và trong hệ thống tàu điện ngầm của Bồ Đào Nha. Nguy hiểm hơn, nhiều chuyến tàu bị kẹt trong đường hầm giữa các nhà ga… Sự cố mất điện cũng ảnh hưởng đến nhiều bệnh viện, bao gồm bệnh viện La Paz ở Madrid và nhiều cơ sở y tế ở Bồ Đào Nha, một số bệnh viện buộc phải hủy các ca phẫu thuật. Ngành viễn thông cũng dừng hoạt động, người dân ở hai quốc gia này không thể truy cập vào mạng di động… Sau 13 giờ, sự cố mới được khắc phục! Vậy đây có phải là "gót chân Asin" của điện mặt trời?

- Theo tôi, không nên nhìn nhận sự cố này theo hướng quy kết rằng điện mặt trời là "gót chân Asin" của hệ thống năng lượng. Nếu hiểu như vậy là đơn giản hóa một vấn đề rất phức tạp.

Thực chất, điện mặt trời không phải là nguyên nhân gây ra sự cố, mà chỉ là một yếu tố "bộc lộ" những điểm yếu vốn đã tồn tại trong hệ thống điện. Khi tỷ trọng năng lượng tái tạo còn thấp, hệ thống có thể "che giấu" những điểm yếu này. Nhưng khi tỷ trọng tăng lên, các điểm yếu đó sẽ lộ rõ hơn.

Ta có thể hình dung một cách rất đời thường: hệ thống điện giống như một thành phố, còn năng lượng tái tạo giống như lượng xe máy tăng nhanh. Khi số lượng xe còn ít, đường phố vẫn vận hành bình thường. Nhưng khi xe tăng lên nhanh chóng mà đường sá, đèn tín hiệu, hệ thống điều phối không được nâng cấp tương ứng, thì ùn tắc sẽ xảy ra. Trong trường hợp này, không thể nói "lỗi do xe máy", mà phải nói là hệ thống hạ tầng chưa theo kịp.

Điện mặt trời cũng tương tự. Đây là nguồn điện có đặc điểm là phụ thuộc vào thời tiết và biến động theo thời gian trong ngày. Khi trời nắng mạnh, công suất tăng rất nhanh; khi trời tắt nắng, công suất giảm đột ngột. Điều này tạo ra yêu cầu rất cao đối với hệ thống điều độ và cân bằng cung - cầu.

Nếu hệ thống điện không có đủ các "công cụ linh hoạt", như hệ thống lưu trữ năng lượng, nguồn điện dự phòng linh hoạt, lưới điện đủ mạnh, hệ thống điều độ thông minh… thì sẽ rất khó giữ ổn định.

Một cách ví dụ dễ hiểu hơn khi coi điện mặt trời giống như dòng nước từ một con sông lớn. Nếu có hồ chứa, đập điều tiết và hệ thống kênh dẫn tốt, dòng nước này sẽ trở thành nguồn tài nguyên quý giá. Nhưng nếu không có các công trình điều tiết, khi nước dâng cao hoặc hạ thấp đột ngột, hệ thống sẽ bị quá tải hoặc thiếu hụt.

Sự cố tại Tây Ban Nha và Bồ Đào Nha cho thấy một bài học rất rõ. Vấn đề không nằm ở năng lượng tái tạo, mà nằm ở việc hệ thống điện chưa được thiết kế để thích ứng với tỷ trọng cao của năng lượng tái tạo.

Đối với Việt Nam, bài học này rất quan trọng. Nếu chúng ta phát triển nhanh điện mặt trời và điện gió mà không đầu tư tương ứng vào lưới điện, hệ thống lưu trữ điện năng và điều độ, thì những rủi ro tương tự hoàn toàn có thể xảy ra.

Ta trở lại câu chuyện thời sự gần đây, hôm 17/3/2026, Thủ tướng Chính phủ Phạm Minh Chính làm việc với Tổ công tác về an ninh năng lượng nhằm đánh giá tình hình, đề ra các giải pháp tiếp tục bảo đảm an ninh năng lượng quốc gia trước tác động của xung đột tại Trung Đông tới chuỗi cung ứng năng lượng toàn cầu. Trong đó có định hướng đẩy mạnh quy hoạch, xây dựng hệ thống dự trữ năng lượng chiến lược; đa dạng hóa nguồn cung; nâng cao khả năng tự chủ năng lượng; thúc đẩy sử dụng năng lượng tiết kiệm, hiệu quả và tái cơ cấu năng lượng theo hướng xanh, bền vững. Vậy theo ông, trong quá trình tái cơ cấu năng lượng theo hướng xanh, bền vững trong thời gian tới, Việt Nam nên đi theo hướng nào?

- Nhìn vào những chỉ đạo gần đây của Chính phủ, có thể thấy rất rõ một điều: Việt Nam đang bước vào một giai đoạn chuyển đổi năng lượng mang tính chiến lược, trong đó yêu cầu không chỉ là "đủ điện", mà còn là "điện phải an toàn, bền vững và tự chủ hơn".

Trong bối cảnh thế giới ngày càng bất ổn, đặc biệt là các xung đột tại những khu vực cung cấp năng lượng lớn như Trung Đông, vấn đề năng lượng không còn đơn thuần là kinh tế mà đã trở thành một yếu tố của an ninh quốc gia. Khi nguồn cung bị gián đoạn hoặc giá năng lượng biến động mạnh, tác động sẽ lan rộng tới toàn bộ nền kinh tế.

Trước hết, cần xác định rõ rằng phát triển các nguồn năng lượng trong nước phải trở thành trụ cột của an ninh năng lượng. Trong nhiều năm, việc nhập khẩu năng lượng có thể giúp tối ưu chi phí trong ngắn hạn. Tuy nhiên, khi thị trường thế giới biến động mạnh, sự phụ thuộc này có thể trở thành rủi ro. Có thể hình dung điều này giống như một gia đình phụ thuộc hoàn toàn vào nguồn thực phẩm bên ngoài. Khi nguồn cung ổn định thì không có vấn đề, nhưng khi có gián đoạn, gia đình đó sẽ rơi vào thế bị động.

Trong bối cảnh đó, năng lượng tái tạo như điện mặt trời và điện gió có ý nghĩa đặc biệt quan trọng, bởi đây là những nguồn năng lượng có thể khai thác ngay trong nước, không phụ thuộc vào nhập khẩu nhiên liệu. Việc phát triển các nguồn năng lượng này không chỉ giúp giảm phát thải mà còn góp phần nâng cao tính tự chủ của hệ thống năng lượng quốc gia.

Thứ hai, chỉ phát triển nguồn điện là chưa đủ. Một trong những hạn chế đã thấy rõ trong thời gian qua là việc phát triển

TS Nguyễn Huy Hoạch tốt nghiệp đại học và tiến sĩ chuyên ngành kỹ thuật xây dựng công trình thủy điện tại Trường Đại học Bách khoa Lêningrat, Liên Xô (nay là Trường Tổng hợp kỹ thuật Quốc gia Sankt-Peterburg, LB Nga).

Là chuyên gia thủy điện và môi trường với gần 40 năm kinh nghiệm trong quy hoạch, thiết kế, quản lý dự án thủy điện và đánh giá tác động môi trường. Có nhiều kinh nghiệm tư vấn cho các tổ chức quốc tế như JICA, GIZ và IUCN.

Ông là tác giả hàng trăm bài viết về thủy điện, năng lượng tái tạo và vận hành hệ thống điện đăng trên Tạp chí Năng lượng Việt Nam và các báo, tạp chí khác. Ngoài ra, ông còn tham gia nghiên cứu khoa học, đào tạo sinh viên ngành thủy điện thuộc Trường Đại học Thủy lợi, sinh viên và học viên cao học ngành kỹ thuật xây dựng công trình dân dụng và công nghiệp thuộc Trường Đại học Thành Tây (nay là Đại học Phenikaa).

nguồn năng lượng tái tạo chưa đi kèm với đầu tư tương xứng vào hạ tầng hệ thống. Điều này giống như việc xây rất nhiều nhà nhưng không có đường giao thông hoặc hệ thống cấp nước, khiến việc sử dụng không hiệu quả.

Do đó, trong thời gian tới, cần đầu tư đồng bộ vào lưới điện, đặc biệt là lưới truyền tải và lưới phân phối. Lưới điện không chỉ là hệ thống "dây dẫn điện", mà phải trở thành một hệ thống thông minh, có khả năng điều phối linh hoạt giữa nhiều nguồn điện khác nhau.

Thứ ba, hệ thống lưu trữ năng lượng cần được coi là một cấu phần không thể thiếu. Điện mặt trời và điện gió có đặc điểm là phụ thuộc vào thời tiết, nên công suất phát điện không ổn định theo thời gian. Nếu không có hệ thống lưu trữ điện năng, phần điện dư vào ban ngày sẽ không thể sử dụng vào buổi tối - thời điểm nhu cầu điện thường cao nhất.

Điện mặt trời giống như việc "thu hoạch năng lượng vào ban ngày", còn pin lưu trữ giống như "kho chứa". Nếu không có kho chứa, phần năng lượng dư sẽ bị lãng phí. Vì vậy, phát triển hệ thống lưu trữ điện năng không còn là lựa chọn, mà là yêu cầu tất yếu nếu muốn nâng cao tỷ trọng năng lượng tái tạo trong hệ thống điện.

Thứ tư, một xu hướng quan trọng khác là sự chuyển dịch từ hệ thống điện tập trung sang hệ thống điện phân tán. Trước đây, điện chủ yếu được sản xuất từ các nhà máy lớn rồi truyền đi khắp nơi. Nhưng trong tương lai, với sự phát triển của điện mặt trời mái nhà và các nguồn điện phân tán, hệ thống sẽ có thêm hàng triệu điểm phát điện nhỏ.

Có thể hình dung sự thay đổi này giống như chuyển từ mô hình một siêu thị lớn sang mạng lưới nhiều cửa hàng nhỏ. Mô hình sau có thể phức tạp hơn trong quản lý, nhưng lại linh hoạt và có khả năng thích ứng tốt hơn. Khi một khu vực gặp sự cố, các khu vực khác có thể hỗ trợ, giúp hệ thống ổn định hơn.

Trong bối cảnh đó, việc thúc đẩy điện mặt trời mái nhà không chỉ là phát triển một nguồn năng lượng mới, mà còn là cách để tái cấu trúc hệ thống điện theo hướng linh hoạt hơn. Khi mỗi hộ gia đình hoặc cơ sở sản xuất có thể tự sản xuất một phần điện, áp lực lên hệ thống điện quốc gia sẽ giảm đi đáng kể.

Thứ năm, một yếu tố quan trọng không kém là vai trò của người dân và doanh nghiệp. Trong hệ thống năng lượng truyền thống, người dân chỉ là người tiêu dùng điện. Nhưng trong tương lai, họ có thể vừa tiêu thụ vừa sản xuất điện. Điều này tạo ra một nguồn lực rất lớn cho hệ thống.

Mỗi mái nhà như một "nguồn điện nhỏ". Một nguồn thì không đáng kể, nhưng khi hàng triệu nguồn cùng tham gia, tổng công suất sẽ rất lớn. Đây chính là sức mạnh của mô hình năng lượng phân tán.

Tuy nhiên, để mô hình này phát triển hiệu quả, cần có cơ chế chính sách phù hợp. Một trong những bài học quan trọng trong thời gian qua là vai trò của chính sách giá điện. Khi có cơ chế giá rõ ràng và ổn định, thị trường phát triển rất nhanh. Ngược lại, khi chính sách thay đổi hoặc thiếu rõ ràng, nhà đầu tư sẽ e ngại.

Do đó, trong giai đoạn tới, cần xây dựng cơ chế chính sách ổn định, minh bạch và có thể dự đoán được. Đặc biệt, cần hoàn thiện cơ chế giá điện theo thời gian sử dụng. Khi giá điện phản ánh đúng chi phí vào giờ cao điểm, người tiêu dùng sẽ có động lực điều chỉnh hành vi, ví dụ như sử dụng điện vào giờ thấp điểm hoặc đầu tư hệ thống lưu trữ điện năng.

Thứ sáu, sử dụng năng lượng tiết kiệm và hiệu quả cũng là một yếu tố rất quan trọng. Đây có thể coi là "nguồn năng lượng rẻ nhất", bởi vì điện tiết kiệm được chính là điện không cần sản xuất. Trong nhiều trường hợp, việc tiết kiệm một đơn vị điện có chi phí thấp hơn nhiều so với việc đầu tư để sản xuất thêm một đơn vị điện.

Tóm lại, quá trình tái cơ cấu năng lượng của Việt Nam trong thời gian tới cần được triển khai theo hướng đồng bộ, trong đó kết hợp giữa phát triển nguồn năng lượng trong nước, đầu tư hạ tầng hệ thống, thúc đẩy công nghệ lưu trữ năng lượng, hoàn thiện cơ chế chính sách và huy động sự tham gia của toàn xã hội.❖

Trân trọng cảm ơn ông về cuộc trò chuyện!

Những kỳ vọng về điện hạt nhân quy mô nhỏ - SMR

> NGUYỄN MINH VÂN

Trong Danh mục công nghệ chiến lược và sản phẩm công nghệ chiến lược theo Quyết định số 1131/QĐ-TTg được Thủ tướng Chính phủ ký ban hành ngày 12/6/2025, lò phản ứng hạt nhân nhỏ (Small Modular Reactor - SMR) đã được đề cập như một mắt xích quan trọng trong chiến lược an ninh năng lượng quốc gia.

NHỮNG GỢI MỞ TỪ QUỐC HỘI

Không phải chỉ đến khi xảy ra xung đột tại Trung Đông khiến thị trường năng lượng toàn cầu bị chao đảo mà đã từ nhiều năm trước, Việt Nam đã đặt ra chiến lược phát triển điện hạt nhân trong đảm bảo an ninh năng lượng quốc gia.

Gần đây, thực hiện Nghị quyết số 57-NQ/TW ngày 22/12/2024 của Bộ Chính trị về đột phá phát triển khoa học, công nghệ, đổi mới sáng tạo và chuyển đổi số quốc gia, Thủ tướng Chính phủ đã ký ban hành Danh mục công nghệ chiến lược và sản phẩm công nghệ chiến lược ngày 12/6/2025, trong đó có lò phản ứng hạt nhân nhỏ - SMR.

Để tạo nền tảng pháp lý bền vững, ngày 27/6/2025, Quốc hội đã chính thức thông qua Luật Năng lượng nguyên tử (sửa đổi), có hiệu lực từ 01/01/2026, tập trung thúc đẩy ứng dụng năng lượng nguyên tử, bảo đảm an toàn hạt nhân và tạo hành lang pháp lý cho các dự án điện hạt nhân tương lai.

Tiếp theo, ngày 08/12/2025, Quốc hội đã thảo luận tại hội trường về dự thảo nghị quyết về cơ chế, chính sách phát triển năng lượng quốc gia 2026 - 2030, với nội dung được đại biểu quan tâm trong dự thảo là Chính phủ đề xuất bổ sung quy định về khuyến khích doanh nghiệp và tư nhân tham gia nghiên cứu, đầu tư phát triển điện hạt nhân mô đun nhỏ - SMR.

Tại diễn đàn Quốc hội, đại biểu Trịnh Thị Tú Anh - Ủy viên Ủy ban KHCN&MT đánh giá phát triển SMR là một hướng đi đáng cân nhắc, phù hợp với điều kiện Việt Nam trong bối cảnh đất nước đang bước vào giai đoạn chuyển đổi năng lượng sâu rộng. Thực tế trên thế giới, nhiều quốc gia đã thương mại hóa hoặc đang đi rất nhanh về SMR. Đặc biệt là cơ chế khuyến khích doanh nghiệp khu vực nhà nước và tư nhân tham gia nghiên cứu, đầu tư phát triển điện hạt nhân mô-đun nhỏ, mở ra cơ chế cho tư nhân tham gia.

Có 3 trụ cột được lưu ý để phát triển SMR, một là có khung pháp lý riêng liên quan đến cấp phép thiết kế, thẩm định công nghệ, giám sát vận hành và kiểm soát chất thải phóng xạ; hai là yêu cầu năng lực tài chính, công nghệ và trách nhiệm môi trường; ba là triển khai SMR thận trọng, có lộ trình. Mục tiêu là khuyến khích nhưng không phải là buông lỏng, Nhà nước giữ vai trò điều tiết và giám sát tối cao.

Đại biểu Nguyễn Thị Lan (Hà Nội) cũng cho rằng việc lựa chọn hình thức đầu tư SMR là phù hợp, nhưng chưa thể kỳ vọng SMR mang lại hiệu quả kinh tế cao trong ngắn hạn bởi chủ yếu phục vụ nghiên cứu, đào tạo nhân lực và từng bước làm chủ công nghệ hạt nhân. Sẽ khó thu hút tư nhân đầu tư khi suất đầu tư lớn, thời gian thu hồi vốn dài và rủi ro cao. Vì vậy, đại biểu đề nghị giai đoạn đầu phát triển loại hình năng lượng này cần có vai trò dẫn dắt của Nhà nước…

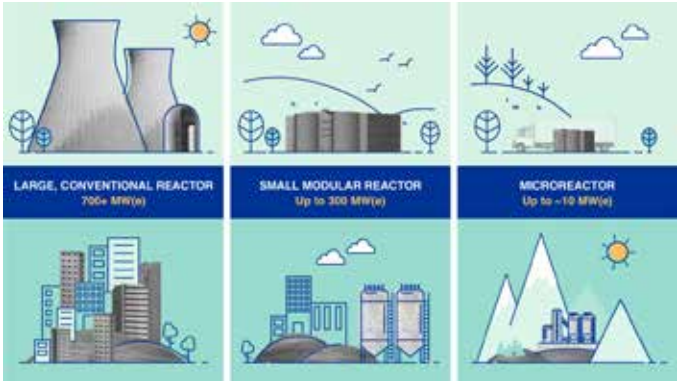
VẬY SMR CÓ NHỮNG ƯU THẾ GÌ?

Theo các chuyên gia, với một quốc gia mới phát triển năng lượng hạt nhân như Việt Nam, SMR mang lại nhiều lợi thế vượt trội so với lò hạt nhân truyền thống: An toàn cao hơn, thiết kế đơn giản, dễ tiếp cận và làm chủ công nghệ, chi phí đầu tư thấp, thời gian triển khai nhanh.

SMR phát triển trên nền tảng các lò nước áp lực đã vận hành lâu dài, nhưng khác biệt ở quy mô nhỏ và tính mô-đun. Thay vì tổ máy có công suất trên 1.000 MW như thường thấy, SMR chỉ có công suất từ 50 - 300 MW mỗi mô-đun, cho phép đầu tư từng bước, giảm rủi ro tài chính và phù hợp hơn với tăng trưởng phụ tải.

Nhờ diện tích nhỏ gọn, có kích cỡ chỉ từ 1/10 đến 1/4 những lò truyền thống thế hệ thứ 2, thứ 3, SMR có thể được đặt ở những vị trí không phù hợp cho các nhà máy điện hạt nhân lớn hơn. Các lò SMR đúc sẵn có thể được sản xuất và kiểm tra chất lượng các thiết bị được tốt hơn, sau đó vận chuyển và lắp đặt tại chỗ, từ đó giúp tiết kiệm chi phí và thời gian xây dựng.

Một ưu điểm nổi bật của SMR là hệ thống an toàn thụ động, được tối ưu hóa nhờ công suất nhỏ gọn. Trong trường hợp xảy ra sự cố, lò phản ứng sẽ tự động chuyển về trạng thái an toàn mà không cần sự can thiệp của con người hay các nguồn lực bên ngoài như điện và nước làm mát.



Lò phản ứng mô-đun nhỏ (SMR) có công suất 300 MW(e) mỗi đơn vị - Ảnh: A. Vargas/IAEA

Quá trình này hoạt động hoàn toàn dựa trên các nguyên lý vật lý tự nhiên như đối lưu, trọng lực và chênh lệch nhiệt độ. Nhờ đặc tính này, các SMR có thể được xây dựng ở nhiều vị trí khác nhau mà không nhất thiết phải gần nguồn nước lớn như sông hay biển. Thiết kế này cũng giúp ngăn ngừa các thảm họa tương tự như sự cố Fukushima - nơi sóng thần đã gây ngập lụt và làm mất nguồn điện cung cấp cho hệ thống làm mát khẩn cấp.

Ưu thế nữa không kém phần quan trọng là lò phản ứng SMR có nhu cầu nhiên liệu thấp hơn. Các nhà máy điện sử dụng lò phản ứng SMR có thể cần nạp nhiên liệu ít thường xuyên hơn, từ 3 - 7 năm một lần, so với 1 - 2 năm đối với các nhà máy điện hạt nhân thông thường. Một số lò phản ứng SMR được thiết kế để hoạt động tới 30 năm mà không cần nạp nhiên liệu.

Bộ Công Thương cho biết, do SMR có kích thước chỉ bằng 1/10 lò phản ứng tiêu chuẩn, nên dễ xây dựng và suất đầu tư phù hợp. Trong khi chi phí xây dựng một nhà máy điện hạt nhân tiêu chuẩn cần khoảng 6 - 9 tỷ USD, thời gian trên dưới 5 năm, thậm chí có dự án hơn 10 năm thì các nhà máy sử dụng công nghệ SMR chỉ tốn 2,1 - 3,6 tỷ USD với thời gian xây dựng 2 - 3 năm.

MỘT ƯỚC VỌNG TÁO BẠO

"Nếu tận dụng tốt cơ hội, Việt Nam không chỉ làm chủ công nghệ SMR mà còn có thể trở thành trung tâm sản xuất và xuất khẩu các mô-đun hạt nhân trong tương lai", đó là nhận xét của TS Lê Minh Bảo - chuyên gia an toàn hạt nhân, làm việc tại Cơ quan An toàn Hạt nhân và Bảo vệ bức xạ (ASNR) của Pháp.

Quả là một ước vọng táo bạo của một quốc gia mới "chân ướt chân ráo" bước vào phát triển năng lượng hạt nhân như Việt Nam, nhưng cũng không phải không có căn cứ. Hẳn nhiều người còn nhớ mới đây, giàn khoan tự nâng PV DRILLING VI của Petrovietnam xuất khẩu sang Malaysia đã vinh dự được Cơ quan quản lý các hoạt động dầu khí Malaysia trao tặng giải thưởng "Best Rig" - Giàn khoan tốt nhất năm 2025.

Thực tiễn trong hơn 3 thập kỷ phát triển cho thấy, Petrovietnam đã từng bước làm chủ nhiều khâu trong chuỗi giá trị dầu khí, từ khảo sát, thiết kế đến chế tạo và lắp đặt công trình biển. Các đơn vị như PTSC đã phát triển năng lực chế tạo chân đế giàn khoan, mô-đun công nghệ và thực hiện tổng thầu EPC cho nhiều dự án lớn. Tỷ lệ nội địa hóa trong một số dự án dầu khí ngoài khơi đã đạt mức 30 - 50%, thậm chí cao hơn ở các hạng mục xây lắp và cơ khí.

Đây có thể coi là bước đột phá trong cả tư duy và hành động của Chính phủ Việt Nam trong phát triển năng lượng nguyên tử nước nhà khi đặt niềm tin vào kinh tế tư nhân trong vai trò tham gia chiến lược an ninh năng lượng quốc gia trong cả hiện tại và tương lai dài.

PTSC hiện tại đã có khả năng thực hiện thiết kế chi tiết bởi 100% các kỹ sư Việt Nam cho các công trình dầu khí biển trong và ngoài nước. Với năng lực và kinh nghiệm hiện tại, PTSC đang tiếp tục phát triển và phấn đấu để trở thành nhà thầu EPC/EPCIC hàng đầu trong khu vực.

Công nghiệp năng lượng dầu khí thì như vậy, liệu công nghiệp năng lượng nguyên tử của Việt Nam có thể noi theo để "trở thành trung tâm sản xuất và xuất khẩu các mô-đun hạt nhân trong tương lai"?

NHỮNG BƯỚC ĐI TRUNG VÀ DÀI HẠN

Thông tin cho hay, tính đến thời điểm hiện tại, trên thế giới có 416 nhà máy điện hạt nhân đang vận hành với tổng công suất đạt 376,2 GW. Còn với SMR hiện đã thiết kế 69 nhà máy, nhưng mới chỉ có 2 nhà máy SMR đưa vào vận hành, chiếm tỷ trọng 0,07% tổng công suất điện hạt nhân toàn cầu. Trong đó, Liên bang Nga có 2 lò SMR công suất 2x35 MW và Trung Quốc với SMR công suất 210 MW vận hành năm 2023.

Như vậy, thị trường SMR đang còn rất mới, đầy triển vọng nhưng cũng không ít thách thức.

Ngày 03/02/2026, tại Hà Nội, Viện Năng lượng nguyên tử Việt Nam đã phối hợp với Star Energy Vietnam tổ chức hội thảo quốc tế về "Triển khai, an toàn và cấp phép lò phản ứng mô-đun nhỏ tại Việt Nam".

Tại đây, Viện trưởng - TS Trần Chí Thành nhấn mạnh rằng, Việt Nam đang đứng trước bài toán kép: Nhu cầu điện tăng rất nhanh cho công nghiệp hóa, trong khi dư địa nhiệt điện than bị thu hẹp, LNG phụ thuộc nhập khẩu và năng lượng tái tạo biến động theo thời tiết. Trong bối cảnh đó, SMR không phải là "sự quay lại điện hạt nhân cũ", mà là hướng tiếp cận công nghệ mới nhỏ gọn hơn, linh hoạt hơn và an toàn hơn.

Sau cuộc hội thảo, các chuyên gia năng lượng hy vọng rằng Việt Nam sẽ từng bước hình thành môi trường phù hợp cho nghiên cứu, thử nghiệm và ra quyết định đối với SMR trong tương lai - theo hướng thận trọng, minh bạch, an toàn, hiệu quả. Đó là những bước cần thiết để SMR có thể trở thành một cấu phần hợp lý trong chiến lược bảo đảm an ninh năng lượng và phát triển bền vững dài hạn của Việt Nam.

BIM và ngôn từ...

THS LÊ TÙNG LÂM*

Một câu sai trong văn học có thể vẫn hiểu được. Nhưng một "câu sai" trong công trình có thể dẫn đến lỗi thi công, chi phí phát sinh, thậm chí rủi ro an toàn. Vì vậy, BIM không cho phép "viết gần đúng". Nó buộc phải "viết chính xác".

Một công trình cũng giống như một bài văn. Nhưng nếu chỉ dừng ở đó, ta mới nhìn thấy phần nổi. Phần sâu hơn nằm ở chỗ: cả công trình đó thực chất là một hệ ngôn ngữ. Ngôn ngữ để con người diễn đạt ý tưởng xây dựng. Ngôn ngữ để các bên hiểu nhau. Và ngày nay, còn là ngôn ngữ để máy móc có thể "đọc" và "làm việc thay". Trong hệ ngôn ngữ đó, mỗi object BIM là một "từ". Không phải là một hình vẽ, mà là một đơn vị mang nghĩa. Một bức tường không chỉ là một khối hộp. Nó là "tường chịu lực hay không", "dày bao nhiêu", "vật liệu gì", "thuộc không gian nào", "liên kết với cái gì". Giống như một từ không chỉ là âm thanh, mà là nghĩa, là sắc thái, là cách nó đứng trong câu. Và điều quan trọng nhất: một từ chỉ có giá trị khi nó được hiểu giống nhau bởi nhiều người. Nếu mỗi người hiểu "tường" theo một kiểu, thì không còn ngôn ngữ nữa, chỉ còn là ký hiệu cá nhân.

Đây chính là nơi rất nhiều dự án BIM bắt đầu "lệch ray" mà không ai nhận ra. Người ta vẫn vẽ, vẫn dựng model, vẫn phối hợp, nhưng thực chất là mỗi người đang nói một thứ tiếng khác nhau. Nhìn bên ngoài, mọi thứ vẫn chạy. Nhưng bên trong, sự hiểu lầm đang tích tụ. Giống như một nhóm người cùng viết một bài văn, mỗi người viết một đoạn, nhưng không thống nhất từ vựng, không thống nhất cách dùng từ. Đến khi ghép lại, bài văn vẫn có đủ chữ, đủ câu, nhưng đọc lên… không thành một câu chuyện.

Khi các object kết nối với nhau, chúng tạo thành "câu". Nhưng câu trong BIM không phải là thứ để đọc, mà là thứ để kiểm chứng. Một cánh cửa phải nằm trong một bức tường. Một dầm phải có điểm tựa. Một hệ thống kỹ thuật phải đi trong không gian hợp lý. Đó là ngữ pháp. Không phải ngữ pháp của ngôn ngữ nói, mà là ngữ pháp của thực tại. Một câu sai trong văn học có thể vẫn hiểu được. Nhưng một "câu sai" trong công trình có thể dẫn đến lỗi thi công, chi phí phát sinh, thậm chí rủi ro an toàn. Vì vậy, BIM không cho phép "viết gần đúng". Nó buộc phải "viết chính xác".

Khi đi lên một tầng nữa, ta thấy rằng mỗi bộ môn không chỉ là một đoạn văn, mà là một "giọng văn". Kiến trúc nói bằng không gian. Kết cấu nói bằng lực. MEP nói bằng dòng chảy và vận hành. Mỗi "giọng" đều đúng theo cách của mình. Nhưng nếu không có một nền tảng chung, mỗi bên sẽ trở thành một "tác giả độc lập". Và công trình, thay vì là một bản giao hưởng, sẽ trở thành một tập hợp những bản nhạc riêng lẻ. Clash trong BIM không chỉ là va chạm hình học. Nó là va chạm của ngôn ngữ. Là khi hai hệ logic không hiểu nhau. Đó là lý do vì sao cần có một "ngữ pháp chung". Không phải để làm khó, mà để giúp mọi người có thể viết cùng một thứ. CDE, ISO 19650… nếu nhìn bằng mắt kỹ thuật, đó là quy trình. Nhưng nếu nhìn bằng tư duy ngôn ngữ, đó là kỷ luật của việc viết. Có bản nháp để sai. Có bước kiểm tra để sửa. Có phê duyệt để chịu trách nhiệm. Có phát hành để sử dụng chính thức. Đó không phải là thủ tục. Đó là cách để một "bài văn công trình" được viết ra một cách nghiêm túc.

(*) Trưởng Ban Đô thị HĐND TP Đà Nẵng

Nhưng có một điều còn sâu hơn nữa. Dù bạn có từ đúng, câu đúng, đoạn đúng, ngữ pháp chuẩn, nếu không có "ý định ban đầu", tất cả vẫn trở nên vô nghĩa. EIR không phải là một tài liệu. Nó là câu hỏi cốt lõi: Công trình này cần cung cấp thông tin gì, để phục vụ ai, và phục vụ cho việc gì? Nếu không trả lời được câu hỏi đó, mọi thứ phía sau chỉ là sự bận rộn có tổ chức. Người ta sẽ làm rất nhiều, rất chăm chỉ, rất bài bản… nhưng không đi đúng hướng. Giống như viết một bài văn rất dài, rất hay, nhưng không trả lời câu hỏi.

Và rồi, khi nhìn lại toàn bộ hành trình của một object BIM, ta sẽ thấy một điều rất con người. Nó được sinh ra. Được kiểm tra. Được chấp nhận. Được đưa vào hệ thống. Và cuối cùng được lưu lại như một phần của lịch sử công trình. Một "từ" cũng có cuộc đời của nó. Nếu nó được tạo ra cẩu thả, nó sẽ kéo theo những sai lệch phía sau. Nếu nó được chăm chút ngay từ đầu, nó sẽ góp phần tạo nên một hệ thống vững chắc. Và khi hàng nghìn, hàng triệu "từ" như vậy kết nối lại, ta không chỉ có một mô hình. Ta có một "bản ghi" của công trình. Một thứ có thể đọc, hiểu, phân tích, vận hành, và thậm chí học hỏi. Đó là lúc BIM thực sự trở thành nền tảng cho AI. Bởi vì AI không nhìn thấy hình ảnh. Nó đọc ngôn ngữ. Nếu ngôn ngữ đó rõ ràng, có cấu trúc, có logic, AI sẽ trở thành một "người đọc cực giỏi". Nếu không, AI cũng chỉ là một người đọc… bối rối.

Và cuối cùng, khi bỏ hết tất cả những khái niệm lớn, những thuật ngữ phức tạp, ta quay lại một điều rất giản dị:

CDE, ISO 19650… nếu nhìn bằng mắt kỹ thuật, đó là quy trình. Nhưng nếu nhìn bằng tư duy ngôn ngữ, đó là kỷ luật của việc viết. Có bản nháp để sai. Có bước kiểm tra để sửa. Có phê duyệt để chịu trách nhiệm. Có phát hành để sử dụng chính thức. Đó không phải là thủ tục. Đó là cách để một "bài văn công trình" được viết ra một cách nghiêm túc.

Một công trình tốt không phải vì nó được dựng bằng công nghệ cao, mà vì nó được diễn đạt rõ ràng, từ những thứ nhỏ nhất. Một người làm BIM giỏi không phải là người dựng model nhanh nhất, mà là người hiểu mình đang "viết" cái gì, và viết cho ai. Bởi vì sau tất cả, xây dựng không chỉ là tạo ra vật thể, mà là tạo ra sự hiểu biết chung giữa con người. BIM, ở tầng sâu nhất, chính là ngôn ngữ của sự hiểu biết đó. Nếu ngôn ngữ đúng, mọi thứ sẽ thông. Nếu ngôn ngữ sai, mọi thứ sẽ tắc. Và khi đó, câu nói ban đầu không còn là một ẩn dụ nữa, mà trở thành một nguyên lý: Nếu từng "từ BIM" không được kiểm soát, thì dù mô hình đẹp đến đâu, công trình vẫn chỉ là một bài viết dở.❖

70 NĂM TRƯỜNG ĐẠI HỌC HÀNG HẢI VIỆT NAM:

Khát vọng vươn ra biển lớn

HOÀNG THẠCH

Trải qua 70 năm xây dựng và trưởng thành, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam đã đi từ một cơ sở đào tạo sơ khai trong khói lửa chiến tranh trở thành trung tâm đào tạo, nghiên cứu hàng đầu của đất nước trong lĩnh vực hàng hải và kinh tế biển. Với nền tảng truyền thống vẻ vang, chất lượng đào tạo ngày càng được khẳng định và định hướng phát triển rõ ràng, Nhà trường đang vững bước trên hành trình hội nhập, đóng góp thiết thực cho phát triển bền vững kinh tế biển gắn với bảo vệ chủ quyền Tổ quốc.

VƯƠN MÌNH TỪ GIAN KHÓ

Ngày 01/4/1956, Trường Sơ cấp Lái tàu - tiền thân của Trường Đại học Hàng hải Việt Nam được thành lập tại Hải Phòng, đặt nền móng cho sự hình thành một cơ sở đào tạo nhân lực hàng hải của đất nước. Trong những năm tiếp theo, các đơn vị đào tạo lần lượt được xây dựng và phát triển, từng bước nâng cấp thành Trường Trung cấp Hàng hải (1959), Trường Hàng hải (1961) và đến năm 1976 chính thức trở thành Trường Đại học Hàng hải.

Trải qua nhiều giai đoạn đổi tên và phát triển, đến năm 2013, Trường chính thức mang tên Trường Đại học Hàng hải Việt Nam. Đặc biệt, năm 2025, Nhà trường được Thủ tướng Chính phủ phê duyệt Đề án xây dựng trở thành trường đại học trọng điểm quốc gia trong lĩnh vực đào tạo, nghiên cứu phục vụ phát triển bền vững kinh tế biển - dấu mốc quan trọng mở ra giai đoạn phát triển mới.

Từ những lớp học tranh tre, vách đất trong điều kiện chiến tranh ác liệt, Nhà trường đã không ngừng vượt qua khó khăn, từng bước khẳng định vị thế, trở thành "mái trường đại dương" - cái nôi đào tạo nguồn nhân lực cho ngành Hàng hải Việt Nam.

PHÁT HUY TRUYỀN THỐNG, ĐỊNH HÌNH VỊ THẾ

Không chỉ thực hiện nhiệm vụ đào tạo, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam còn ghi dấu ấn sâu sắc trong lịch sử đấu tranh bảo vệ Tổ quốc.

Trong giai đoạn từ 1964 - 1979, gần 600 cán bộ, giảng viên và sinh viên của Nhà trường đã lên đường tham gia chiến đấu; gần 50 người đã anh dũng hy sinh, gần 100 người để lại một phần thân thể nơi chiến trường. Nhiều thầy cô, cựu sinh viên trực tiếp tham gia thiết kế, chế tạo và vận hành những "con tàu không số", góp phần làm nên huyền thoại đường Hồ Chí Minh trên biển; tham gia rà phá thủy lôi, bom mìn, bảo vệ các tuyến luồng hàng hải trong những năm tháng chiến tranh ác liệt. Những đóng góp và hy sinh to lớn ấy đã hun đúc nên một truyền thống đặc biệt của Nhà trường - nơi tri thức luôn gắn liền với lòng yêu nước, tinh thần trách nhiệm và khát vọng cống hiến.

Bước vào thời kỳ đổi mới và hội nhập, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam tiếp tục khẳng định vai trò là trung tâm đào tạo, nghiên cứu hàng đầu trong lĩnh vực hàng hải và kinh tế biển.

PGS.TS Phạm Xuân Dương - Hiệu trưởng Trường Đại học Hàng hải Việt Nam cho biết, hiện nay Nhà trường đang đào tạo 9 chương trình tiến sĩ, 19 chương trình thạc sĩ và 55 chương trình đại học. Đội ngũ giảng viên gồm 578 người, trong đó có 51 giáo sư, phó giáo sư và 238 tiến sĩ. Chất lượng sinh viên tốt nghiệp ngày càng được các cơ quan quản lý nhà nước, doanh nghiệp trong và ngoài nước cũng như cộng đồng xã hội đánh giá cao. Nhà trường đã đào tạo hàng vạn cán bộ, kỹ sư, thuyền viên và chuyên gia, nhiều người giữ vị trí quan trọng trong các cơ quan Đảng, Nhà nước và doanh nghiệp trong nước và quốc tế.

Hoạt động nghiên cứu khoa học, chuyển giao công nghệ không ngừng được đẩy mạnh, nhiều công trình được ứng dụng hiệu quả trong thực tiễn; số lượng, chất lượng công bố quốc tế tăng rõ rệt, góp phần nâng cao vị thế trên trường quốc tế. Đồng thời, Nhà trường tiên phong trong hội nhập, góp phần đưa Việt Nam vào "Danh sách Trắng" của Tổ chức Hàng hải Quốc tế từ năm 2000, trở thành thành viên của Hiệp hội các Trường Đại học Hàng hải Quốc tế từ năm 2004 và mở rộng hợp tác với nhiều đối tác uy tín trên thế giới.

Bộ trưởng Trần Hồng Minh trao tặng bức trướng của Bộ Xây dựng cho Trường Đại học Hàng hải Việt Nam nhân dịp kỷ niệm 70 năm ngày thành lập.

VỮNG BƯỚC TƯƠNG LAI

Khi đất nước đang đẩy mạnh phát triển kinh tế biển, hệ thống logistics hiện đại và hội nhập quốc tế sâu rộng, yêu cầu về nguồn nhân lực chất lượng cao ngày càng đặt ra cấp thiết. Trong bối cảnh đó, việc Thủ tướng Chính phủ phê duyệt Đề án xây dựng Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trở thành trường đại học trọng điểm quốc gia theo Quyết định số 1901/QĐ-TTg năm 2025 có ý nghĩa như một dấu mốc chiến lược, tạo động lực mạnh mẽ cho Nhà trường bứt phá trong giai đoạn mới.

Để hiện thực hóa mục tiêu này, Nhà trường xác định tiếp tục đổi mới mạnh mẽ, toàn diện công tác đào tạo, lấy chất lượng làm trung tâm, gắn đào tạo với nhu cầu thực tiễn và chiến lược phát triển kinh tế biển; đẩy mạnh nghiên cứu khoa học, đổi mới sáng tạo, chuyển giao công nghệ; nâng cao năng lực quản trị đại học; phát triển đội ngũ giảng viên chất lượng cao; thúc đẩy chuyển đổi số và tăng cường hợp tác quốc tế.

Qua 70 năm xây dựng và trưởng thành, với những đóng góp to lớn của các thế hệ thầy cô giáo và sinh viên, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam đã được Đảng, Nhà nước trao tặng nhiều phần thưởng cao quý như: Danh hiệu Anh hùng Lao động (2006), Huân chương Độc lập hạng Nhất (2006), Huân chương Hồ Chí Minh (2011), Danh hiệu Anh hùng Lực lượng vũ trang nhân dân (2014), cùng nhiều huân chương, danh hiệu cao quý khác.

Phát biểu tại Lễ kỷ niệm 70 năm thành lập, Bộ trưởng Bộ Xây dựng Trần Hồng Minh nhấn mạnh, trong suốt 70 năm qua, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam đã khẳng định vai trò là trung tâm đào tạo nguồn nhân lực chất lượng cao, nghiên cứu khoa học và chuyển giao công nghệ, góp phần triển khai hiệu quả Chiến lược phát triển bền vững kinh tế biển, gắn với bảo đảm quốc phòng - an ninh và bảo vệ chủ quyền biển đảo thiêng liêng của Tổ quốc.

Bộ trưởng Trần Hồng Minh thăm khu triển lãm thành tựu KHCN của Nhà trường.

Bước sang chặng đường phát triển mới, tập thể cán bộ, giảng viên và sinh viên Nhà trường xác định tiếp tục phát huy truyền thống 70 năm đã được hun đúc, kiên định theo đuổi các giá trị cốt lõi "Trí tuệ - Sáng tạo - Trách nhiệm - Nhân văn", đồng thời đổi mới tư duy, nâng cao chất lượng đào tạo, nghiên cứu và hội nhập quốc tế.

Bảy thập kỷ là một hành trình đầy tự hào, nhưng cũng là điểm khởi đầu cho những khát vọng lớn hơn. Với nền tảng vững chắc và định hướng chiến lược rõ ràng, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam đang vững bước trên hành trình vươn ra biển lớn, hội nhập sâu rộng và đóng góp ngày càng to lớn cho sự phát triển bền vững của đất nước.

Quảng Ngãi đổi mới tuyên truyền, nâng cao kỹ năng giao thông cho học sinh

> HUY THẮNG

Trong bối cảnh tai nạn giao thông vẫn tiềm ẩn nhiều rủi ro, đặc biệt ở lứa tuổi học sinh - nhóm đối tượng đang dần tham gia giao thông độc lập, Ban ATGT tỉnh Quảng Ngãi đã và đang triển khai đồng bộ nhiều giải pháp nhằm nâng cao nhận thức, trang bị kỹ năng và xây dựng văn hóa giao thông ngay từ ghế nhà trường. Trong đó, công tác tuyên truyền, phổ biến pháp luật về trật tự an toàn giao thông (TTATGT) của lực lượng Cảnh sát giao thông (CSGT) giữ vai trò then chốt.

ĐƯA PHÁP LUẬT "ĐẾN TẬN LỚP HỌC"

Thực hiện chủ trương của Ban ATGT tỉnh Quảng Ngãi và Công an tỉnh, lực lượng CSGT đã chủ động phối hợp với các trường THPT, trung tâm giáo dục nghề nghiệp - giáo dục thường xuyên trên địa bàn tổ chức hàng loạt buổi tuyên truyền chuyên đề.

Chỉ trong những ngày đầu tháng 4/2026, nhiều chương trình quy mô lớn đã được triển khai như tại Trường THPT Võ Nguyên Giáp với hơn 1.700 học sinh tham gia; Trường THPT Sơn Hà, THPT Quang Trung, THPT Lý Sơn… mỗi chương trình thu hút từ 900 đến hơn 1.000 học sinh, giáo viên và phụ huynh. Nội dung tuyên truyền không chỉ dừng lại ở việc phổ biến quy định pháp luật mà còn đi sâu vào kỹ năng thực hành như tư thế điều khiển xe, xử lý tình huống bất ngờ, kỹ năng phanh an toàn, lái xe trong điều kiện thời tiết xấu hay trên đường đèo dốc.

Đặc biệt, tại các địa bàn miền núi như Sơn Hà - nơi điều kiện giao thông phức tạp, đường sá quanh co - việc lồng ghép thực hành kỹ năng lái xe an toàn đã giúp học sinh dễ dàng tiếp thu và áp dụng vào thực tế.

Em Nguyễn Thị H., học sinh Trường THPT Sơn Hà chia sẻ: Trước đây em chỉ biết đi xe theo thói quen, nhưng sau buổi tuyên truyền, em hiểu rõ hơn về cách quan sát, giữ khoảng cách và xử lý tình huống. Em thấy tự tin hơn khi tham gia giao thông.

Điểm nổi bật trong công tác tuyên truyền của lực lượng CSGT Quảng Ngãi là phương pháp truyền đạt linh hoạt, đổi mới. Thay vì chỉ giảng giải lý thuyết, các buổi tuyên truyền đều kết hợp hình ảnh trực quan, video tình huống thực tế, giao lưu hỏi - đáp và thực hành lái xe.

Tại Trường THPT Lương Thế Vinh hay Trung tâm GDNN-GDTX Mộ Đức, học sinh không chỉ được nghe phổ biến quy định mà còn trực tiếp thực hành đội mũ bảo hiểm đúng cách, kiểm tra phương tiện trước khi vận hành, thực hành xử lý tình huống nguy hiểm.

Một cán bộ tuyên truyền của Phòng CSGT cho biết: Chúng tôi xác định học sinh là đối tượng cần được 'cầm tay chỉ việc'. Khi các em được trực tiếp trải nghiệm, hiệu quả tiếp thu cao hơn rất nhiều so với chỉ nghe lý thuyết. Kết quả kiểm tra nhanh sau các buổi tuyên truyền tại một số trường cho thấy tỷ lệ học sinh nắm vững kiến thức đạt tới 100%, cho thấy hiệu quả rõ rệt của mô hình "học đi đôi với hành".

HƯỚNG TỚI XÂY DỰNG VĂN HÓA GIAO THÔNG BỀN VỮNG

Thượng tá Lê Minh Hoàng - Phó trưởng Phòng CSGT, Công an tỉnh Quảng Ngãi nhìn nhận: Công tác tuyên truyền trong học sinh được xác định là giải pháp căn cơ, bền vững: Chúng tôi không chỉ tuyên truyền theo đợt mà sẽ duy trì thường xuyên, liên tục, gắn với từng địa bàn, từng nhóm đối tượng. Mục tiêu là hình thành ý thức tự giác chấp hành pháp luật giao thông cho các em ngay từ sớm.

Thượng tá Hoàng cũng nhấn mạnh việc phối hợp giữa lực lượng công an, nhà trường và doanh nghiệp là yếu tố quan trọng để nâng cao chất lượng tuyên truyền.

Ở góc độ quản lý nhà nước, ông Nguyễn Phúc Nhân - Giám

Lực lượng CSGT Quảng Ngãi đưa pháp luật TTATGT đến từng trường học.

đốc Sở Xây dựng, Phó trưởng Ban thường trực Ban ATGT tỉnh Quảng Ngãi cho rằng: Giáo dục pháp luật về TTATGT trong trường học không chỉ là nhiệm vụ trước mắt mà là chiến lược lâu dài. Khi học sinh có ý thức tốt, các em sẽ trở thành những công dân có trách nhiệm, góp phần kéo giảm TNGT một cách bền vững. Các hoạt động tuyên truyền nói trên được triển khai đồng bộ với các chương trình lớn của tỉnh như Năm An toàn giao thông 2026 và định hướng xây dựng hạ tầng giao thông an toàn, thân thiện.

Theo Chủ tịch UBND tỉnh Nguyễn Hoàng Giang - Trưởng Ban ATGT tỉnh Quảng Ngãi, bên cạnh đầu tư hạ tầng, việc nâng cao ý thức người tham gia giao thông, đặc biệt là thế hệ trẻ, có ý nghĩa quyết định. Tuyên truyền trong học sinh chính là đầu tư cho tương lai an toàn của xã hội.

Có thể thấy, với cách làm bài bản, sáng tạo và sự vào cuộc đồng bộ của nhiều lực lượng, công tác tuyên truyền pháp luật TTATGT tại Quảng Ngãi đang chuyển biến rõ nét. Không chỉ dừng lại ở việc cung cấp kiến thức, các chương trình đã góp phần hình thành thói quen, kỹ năng và ý thức tự giác cho học sinh khi tham gia giao thông.

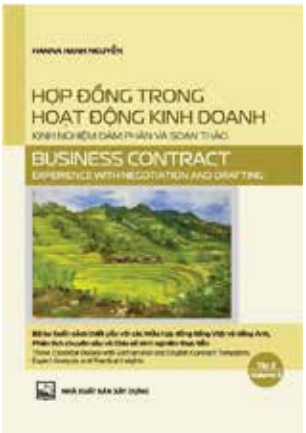
Trong thời gian tới, lực lượng CSGT tỉnh sẽ tiếp tục nhân rộng mô hình, tăng cường phối hợp với các cơ sở giáo dục, hướng tới mục tiêu xây dựng "văn hóa giao thông học đường" - nền tảng quan trọng để kéo giảm tai nạn giao thông một cách bền vững. "Ý thức hôm nay - an toàn ngày mai" không chỉ là khẩu hiệu, mà đang dần trở thành hành động cụ thể trong từng học sinh trên địa bàn tỉnh.

Học sinh được trang bị kỹ năng lái xe, tham gia giao thông an toàn.

Hợp đồng trong hoạt động kinh doanh

> AN NHIÊN

Bộ sách "Hợp đồng trong hoạt động kinh doanh - Kinh nghiệm đàm phán và soạn thảo" tổng hợp các kinh nghiệm thực tiễn trong đàm phán, soạn thảo và thực hiện hợp đồng trong môi trường kinh doanh hiện đại.



Bộ sách "Hợp đồng trong hoạt động kinh doanh - Kinh nghiệm đàm phán và soạn thảo" của tác giả Hanna Hạnh Nguyễn, do NXB Xây dựng phát hành dưới dạng bản in, là tài liệu tổng hợp các kinh nghiệm thực tiễn trong đàm phán, soạn thảo và thực hiện hợp đồng trong môi trường kinh doanh hiện đại.

Trong bối cảnh hoạt động đầu tư, kinh doanh ngày càng phức tạp, hợp đồng không chỉ là văn bản pháp lý ghi nhận thỏa thuận giữa các bên mà còn là công cụ quan trọng để quản lý rủi ro, bảo vệ quyền lợi và duy trì quan hệ hợp tác bền vững. Tuy nhiên, thực tế cho thấy, nhiều doanh nghiệp, đặc biệt là doanh nghiệp vừa và nhỏ, vẫn chưa thực sự coi trọng đúng mức giai đoạn đàm phán và soạn thảo hợp đồng, dẫn đến các tranh chấp, tổn thất và rủi ro pháp lý trong quá trình thực hiện giao dịch.

Xuất phát từ thực tiễn hành nghề luật, đặc biệt trong lĩnh vực bất động sản, tác giả Hanna Hạnh Nguyễn đã hệ thống hóa những kinh nghiệm thực tế, các tình huống phát sinh và cách thức xử lý trong quá trình giao kết và thực hiện hợp đồng. Không tiếp cận hợp đồng như một văn bản tĩnh, mà đặt trong toàn bộ vòng đời của một giao dịch, từ chuẩn bị, đàm phán đến triển khai và vận hành.

Một điểm đáng chú ý, bộ sách được xây dựng theo cấu trúc gồm 3 tập, gắn với các giai đoạn cơ bản của một dự án. Trong đó, tác giả tập trung phân tích các giao dịch và hợp đồng trong giai đoạn triển khai và vận hành dự án, nơi phát sinh nhiều quan hệ pháp lý phức tạp giữa các chủ thể trong khu vực tư, giúp người đọc hình dung rõ vai trò của từng loại hợp đồng trong chuỗi hoạt động đầu tư, kinh doanh, từ hợp đồng dịch vụ, hợp đồng tư vấn thiết kế, hợp đồng quản lý dự án đến các hợp đồng khai thác, vận hành.

Cuốn sách đồng thời đi sâu phân tích các nguyên tắc cốt lõi trong đàm phán và soạn thảo. Theo đó, một hợp đồng hiệu quả cần được xây dựng trên cơ sở chuẩn bị kỹ lưỡng, hiểu rõ mục tiêu và nhu cầu của các bên, bảo đảm sự cân bằng giữa tính linh hoạt trong thương lượng và việc giữ vững các nguyên tắc lợi ích cốt lõi. Các yêu cầu về tuân thủ pháp luật, tính rõ ràng của ngôn ngữ hợp đồng, dự phòng rủi ro và cơ chế giải quyết tranh chấp được nhấn mạnh như những yếu tố thiết yếu.

Một điểm nổi bật khác của bộ sách là việc cung cấp các mẫu hợp đồng song ngữ Việt - Anh, xây dựng trên cơ sở các giao dịch thực tế, kèm theo phân tích, bình luận cụ thể theo từng điều khoản, giúp người đọc hiểu rõ cấu trúc và nội dung của hợp đồng, có thể tham khảo, áp dụng trực tiếp vào thực tiễn công việc, đặc biệt trong bối cảnh hội nhập kinh tế quốc tế ngày càng sâu rộng.

Bên cạnh giá trị thực hành, cuốn sách cũng gợi mở cho người đọc các vấn đề liên quan đến thông lệ quốc tế trong hợp đồng như Incoterms trong thương mại quốc tế hay các mẫu hợp đồng theo tiêu chuẩn FIDIC trong lĩnh vực tư vấn xây dựng, góp phần nâng cao nhận thức và năng lực tiếp cận các chuẩn mực quốc tế trong hoạt động kinh doanh và đầu tư.

Có thể thấy, bộ sách hướng tới hình thành tư duy về hợp đồng như một công cụ quản trị trong hoạt động kinh doanh. Đối với lĩnh vực xây dựng, cách tiếp cận này có ý nghĩa thiết thực, góp phần nâng cao năng lực quản lý hợp đồng của các chủ thể tham gia thị trường.

Cầu Vân Phúc

TÊN DỰ ÁN:

Đầu tư xây dựng cầu Vân Phúc qua Sông Hồng và tuyến đường kết nối ra Quốc lộ 32, huyện Phúc Thọ.

CHỦ ĐẦU TƯ:

Ban Quản lý dự án Đầu tư xây dựng Thành phố Hà Nội.

ĐỊA ĐIỂM DỰ ÁN:

Xã Phúc Thọ và xã Phúc Lộc, Thành phố Hà Nội.

TRUNG TÂM QUẢN LÝ, BẢO TRÌ CÁC CÔNG TRÌNH

Kỷ niệm 51năm

NGÀY THỐNG NHẤT ĐẤT NƯỚC

30/4/1975 - 30/4/2026

và Ngày quốc tế Lao động 1/5

CÔNG TY CỔ PHẦN
CÔNG TRÌNH GIAO THÔNG 2 HÀ NỘI

ĐỊA CHỈ: SỐ 125 NGUYỄN HUY TƯỞNG, PHƯỜNG THANH XUÂN, TP. HÀ NỘI

Kỷ niệm 51năm

NGÀY THỐNG NHẤT ĐẤT NƯỚC

30/4/1975 - 30/4/2026

và Ngày quốc tế Lao động 1/5

TECCO5
ISO 9001-2015

CÔNG TY CỔ PHẦN TƯ VẤN XÂY DỰNG GIAO THÔNG 5

Địa chỉ: 229 đường Trường Chinh, phường An Khê, TP. Đà Nẵng
Điện thoại: 0236.3721808 Fax: 0236.3842415
Email: kehoachtecco5@gmail.com Website: Tecco5.com.vn

NGÀNH NGHỀ KINH DOANH CHÍNH:
Tư vấn khảo sát thiết kế, tư vấn giám sát, thí nghiệm, kiểm định, quản lý dự án, lập hồ sơ mời thầu, đánh giá hồ sơ dự thầu... các công trình xây dựng.

VIMAWA

CỤC HÀNG HẢI VÀ ĐƯỜNG THỦY VIỆT NAM

CẢNG VỤ HÀNG HẢI CẦN THƠ

Địa chỉ: 14/11 Lê Hồng Phong, phường Bình Thủy, Thành phố Cần Thơ
Điện thoại: 0292.3841696 Fax: 0292.3841049

AZReal

Xác định vị thế là nhà phân phối bất động sản chuyên nghiệp

Công ty TNHH Đầu Tư và Phát Triển AZReal được thành lập vào tháng 10/2024, trong bối cảnh thị trường bất động sản Việt Nam bắt đầu bước vào giai đoạn phục hồi và tăng trưởng trở lại. Với đội ngũ lãnh đạo có nền tảng hơn 12 năm kinh nghiệm triển khai và phân phối nhiều dự án tại khu vực trung tâm TP.HCM và các tỉnh thành trọng điểm, AZReal định vị thương hiệu tập trung vào phân khúc bất động sản cao cấp, hạng sang và bất động sản nghỉ dưỡng.

Không đi theo mô hình phân phối truyền thống, AZReal xây dựng hệ thống vận hành dựa trên nền tảng Marketing hiện đại kết hợp quản trị dữ liệu và quy trình bán hàng chuẩn hóa. Doanh nghiệp tập trung vào ba trụ cột cốt lõi: Data – Quy trình bán hàng – Làm việc nhóm, nhằm tối ưu hiệu quả chuyển đổi khách hàng và nâng cao năng suất kinh doanh.

Nhờ định hướng chiến lược rõ ràng, AZReal từng bước mở rộng tệp khách hàng và tích lũy kinh nghiệm triển khai đa dạng các dự án quy mô lớn. Doanh nghiệp chú trọng vai trò đồng hành cùng khách hàng xuyên suốt hành trình giao dịch – từ giai đoạn tìm hiểu, lựa chọn sản phẩm đến khi hoàn tất đầu tư và khai thác. Đúng với tinh thần tên gọi, AZReal hướng đến việc mang lại giải pháp toàn diện cho khách hàng, đối tác và chủ đầu tư, theo triết lý "từ A đến Z".

Trong định hướng phát triển dài hạn, AZReal lựa chọn hợp tác và phân phối các sản phẩm đến từ Masterise Homes làm nền tảng chiến lược. Đây được xem là bước đi nhằm đảm bảo chất lượng sản phẩm, gia tăng giá trị đầu tư và củng cố uy tín thương hiệu trên thị trường.

The Global City Ho Chi Minh

CÔNG TY TNHH ĐẦU TƯ VÀ PHÁT TRIỂN AZREAL

Hotline: 0901377389 **Email:** info@azreal.vn

Website:azreal.vn **Địa chỉ:** 63 Nguyễn Quý Đức, Phường Bình Trưng,TP Hồ Chí Minh

VƯƠN TẦM VỊ THẾ

XỨNG DANH THƯƠNG HIỆU QUỐC GIA

NGƯỜI DƯỚI 18 TUỔI KHÔNG ĐƯỢC UỐNG RƯỢU, BIA

■Ngày nhận bài: 04/3/2026 ■Ngày sửa bài: 10/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 24/3/2026

Chuyển đổi số trong quản lý hạ tầng kỹ thuật khu công nghiệp sinh thái: Từ khung lý thuyết đến mô hình thực tiễn tại Việt Nam

Digital transformation in technical infrastructure management of eco-industrial parks: From theoretical framework to practical model in Vietnam

> THS.KS BẠCH NGỌC TÙNG
Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng AIST
Email: bachngoctung@acudgroup.vn

TÓM TẮT

Quá trình phát triển Khu công nghiệp sinh thái (KCNST) tại Việt Nam đang gặp rào cản lớn về sự biệt lập dữ liệu[1] (Data Silos). Qua phân tích điểm nghẽn thực tiễn tại các KCN thí điểm (Deep C, Amata), bài báo đề xuất Khung kiến trúc G-DTF[2] tích hợp dữ liệu GIS, BIM và IoT. Giải pháp này giúp đồng bộ dữ liệu không gian và ngữ nghĩa, tạo lập Bản sao số (Digital Twin) phục vụ nền tảng cộng sinh công nghiệp, đồng thời đáp ứng các tiêu chuẩn hạ tầng số quốc gia theo Nghị định số 269/2025/NĐ-CP [5] và Thông tư 05/2025/TT-BKHĐT [3].

Từ khóa: Khu công nghiệp sinh thái; chuyển đổi số; bản sao số (Digital Twin); GIS; BIM; quản lý hạ tầng kỹ thuật; G-DTF; quản lý quy hoạch; đô thị thông minh.

ABSTRACT

The development of Eco-Industrial Parks (EIPs) in Vietnam faces a major barrier of Data Silos. By analyzing practical bottlenecks at pilot IPs (Deep C, Amata), this paper proposes the G-DTF architectural framework integrating GIS, BIM, and IoT data. This solution synchronizes spatial and semantic data to establish a Digital Twin for industrial symbiosis platforms, meeting national digital infrastructure standards under Decree No. 269/2025/ND-CP and Circular 05/2025/TT-BKHĐT.

Keywords: Eco-industrial park; digital transformation; digital twin; GIS; BIM; infrastructure management; G-DTF; planning management; smart City.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống KCN tại Việt Nam đóng vai trò then chốt trong tăng trưởng kinh tế, nhưng mô hình phát triển KCN tuyến tính hiện tại đã bộc lộ những giới hạn về môi trường và thâm dụng tài nguyên. Để đáp ứng cam kết Net Zero (COP26) [10], sức ép từ các cơ chế điều chỉnh biên giới carbon (CBAM[3]) và xu hướng xanh hóa chuỗi cung ứng toàn cầu, việc chuyển đổi sang mô hình KCNST là yêu cầu mang tính hệ thống. Quá trình chuyển đổi này được cụ thể hóa bằng Nghị định số 35/2022/NĐ-CP [4], Thông tư 05/2025/TT-BKHĐT [3], đồng thời phải đáp ứng tiêu chuẩn hạ tầng số cho các khu chức năng theo quy định tại Nghị định số 269/2025/NĐ-CP [5].

Khác với KCN truyền thống, KCNST yêu cầu sự tương tác phức tạp giữa các doanh nghiệp để thực hiện Cộng sinh công nghiệp[4] dựa trên việc đo lường, trao đổi dòng vật chất liên tục và minh bạch. Tuy nhiên, công tác quản lý hiện nay đang đối mặt với tồn tại kỹ thuật cốt lõi là tình trạng biệt lập dữ liệu (Data Silos), phân mảnh trên ba chiều không gian:

Hình 1. Thách thức trong quản lý hạ tầng kỹ thuật các Khu công nghiệp sinh thái

(i) Phân mảnh theo không gian và chức năng: Dữ liệu quy hoạch (CAD/GIS), xây dựng (BIM/PDF) và vận hành (SCADA) tồn tại rời rạc, khiến nhà quản lý mất đi bức tranh toàn cảnh về tài sản hạ tầng.

(ii) Phân mảnh theo thời gian: Việc ra quyết định chủ yếu dựa

[1] Trong bài viết này, 'Biệt lập dữ liệu' (Data Silos) được hiểu là sự chia cắt về mặt vật lý và logic của các cơ sở dữ liệu hạ tầng. Tình trạng này phát sinh khi dữ liệu quy hoạch, xây dựng và vận hành được lưu trữ trên các nền tảng công nghệ không đồng nhất (ví dụ: GIS so với CAD, SCADA so với Excel), thiếu các giao thức kết nối tiêu chuẩn, dẫn đến việc thông tin bị 'khóa' cục bộ tại từng phòng ban chức năng.

[2] G-DTF là giải pháp khắc phục tình trạng phân mảnh dữ liệu bằng cách kết hợp thế mạnh của hai nền tảng: (GIS): Cung cấp hệ tọa độ chuẩn và bối cảnh không gian thực tế (Context) cho toàn khu công nghiệp. (Digital Twin): Cung cấp dữ liệu vận hành thời gian thực và trạng thái chi tiết của từng công trình. Sự tích hợp này cho phép nhà quản lý đồng thời cả bức tranh quy hoạch tổng thể lẫn chi tiết vận hành của từng nhà máy trên một nền tảng duy nhất.

[3] CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism - Cơ chế điều chỉnh biên giới carbon) là công cụ của EU buộc hàng hóa nhập khẩu phải chịu chi phí phát thải ngang bằng với hàng hóa nội khối EU (ví dụ trong năm 2023-2024 dao động trung bình khoảng 60-100 EUR/tấn CO2), làm giảm mạnh lợi thế cạnh tranh của các sản phẩm giá rẻ nhưng gây ô nhiễm.

[4] Cộng sinh Công nghiệp: Là hoạt động hợp tác giữa các doanh nghiệp để tối ưu hóa việc sử dụng hoặc tái sử dụng yếu tố đầu vào, đầu ra như nguyên liệu, vật liệu, nước, năng lượng, chất thải, phế liệu trong quá trình sản xuất, kinh doanh.

trên dữ liệu quá khứ thay vì dữ liệu thời gian thực, gây chậm trễ trong việc xử lý sự cố kỹ thuật và hạn chế khả năng định lượng dòng trao đổi năng lượng.

(iii) Phân mảnh về tiêu chuẩn: Sự thiếu thống nhất về hệ quy chiếu và định dạng (Môi trường dữ liệu chung - CDE[5] theo ISO 19650) khiến việc tích hợp nền tảng trở nên tốn kém và gia tăng rủi ro sai lệch.

2. CƠ SỞ LÝ LUẬN VÀ THỰC TIỄN VỀ DÒNG DỮ LIỆU QUẢN LÝ KHU CÔNG NGHIỆP THÍ ĐIỂM TẠI VIỆT NAM

2.1. Cơ sở lý luận và phương pháp tiếp cận

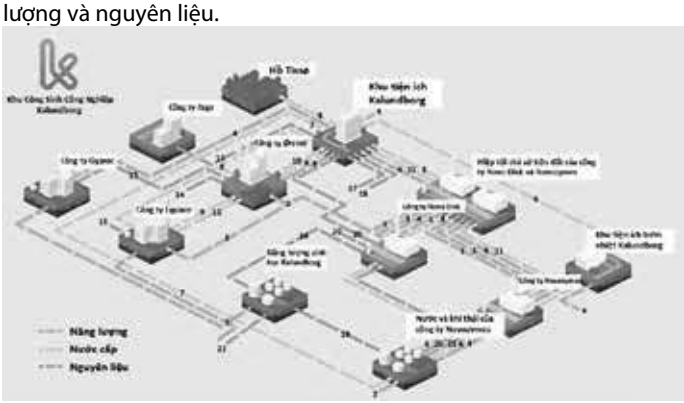
Dựa trên Khung tiêu chuẩn quốc tế của UNIDO [11] và Nghị định 35/2022/NĐ-CP [4], KCNST không phải tập hợp cơ học của các nhà máy mà là một Hệ thống của các hệ thống (System of Systems) với các dòng tương tác phi tuyến tính, đòi hỏi tư duy quản trị chỉnh thể. Quá trình Chuyển đổi kép mang tính tương hỗ nội tại: chuyển đổi số cung cấp công cụ tối ưu hóa, trong khi chuyển đổi xanh là động lực dẫn dắt.

Để hiện thực hóa điều này, Bản sao số (Digital Twin - tham chiếu ISO 23247[6]) là giải pháp công nghệ cốt lõi giúp giải quyết phân mảnh dữ liệu phân tán. Digital Twin mang lại ba năng lực quản trị then chốt: (i) Mô phỏng kịch bản để đánh giá rủi ro; (ii) Bảo trì dự báo thông qua AI; và (iii) Tối ưu hóa tài nguyên thời gian thực.

2.2. Bài học kinh nghiệm quốc tế và thực tiễn Việt Nam

2.2.1. Bài học kinh nghiệm quốc tế về kiến trúc dữ liệu cộng sinh

+ Kinh nghiệm quốc tế (kinh nghiệm về kiến trúc dữ liệu cộng sinh): Thành công của mô hình KCNST tại Kalundborg (Đan Mạch), Eco-Town Kitakyushu (Nhật Bản) và Ulsan (Hàn Quốc) khẳng định cộng sinh công nghiệp phụ thuộc cốt lõi vào sự minh bạch và liên thông dữ liệu. Thay vì kiểm tra định kỳ, các hệ thống tiên tiến này thiết lập quan trắc tự động liên tục, đưa thông số chi tiết của các dòng vật chất về trung tâm để hình thành một cơ sở dữ liệu tập trung. Nhờ đó, cơ quan quản lý và nền tảng số có thể phân tích, ghép nối tự động các cặp doanh nghiệp phù hợp để trao đổi năng lượng và nguyên liệu.



Hình 2. Sơ đồ minh họa mạng lưới cộng sinh tại Khu công nghiệp Kalundborg-Đan Mạch

Nguồn: https://www.symbiosis.dk

+ Thực tiễn Việt Nam (KCN DEEP C[6] và Amata[1]): Trong số 475 KCN hiện nay, số lượng thí điểm KCNST còn rất hạn chế. Tại các đơn vị tiên phong như DEEP C và Amata, việc chuyển đổi đã mang lại kết quả lớn về giảm phát thải CO_2 và tiết kiệm tài nguyên. Về ứng dụng số hóa, DEEP C đã thay thế phương pháp thủ công bằng mạng diện rộng (LPWAN) và đồng hồ thông minh (Smart Metering); trong khi Amata hợp tác xây dựng Trung tâm điều hành thông minh (IOC). Mặc dù vậy, thách thức lớn nhất của cả hai KCN vẫn là rào cản dữ liệu cục bộ (Data Silos). Dòng dữ liệu từ nhà máy thứ cấp chưa thể kết nối đồng bộ vào nền tảng của chủ đầu tư do thiếu API chuẩn và tâm lý e ngại bảo mật. Thực tiễn chỉ ra rằng, hạ tầng số cần được thiết kế và đầu tư đồng bộ cùng hạ tầng vật lý ngay từ giai đoạn đầu để tránh việc cải tạo, nâng cấp manh mún phát sinh chi phí lớn.

3. ĐỀ XUẤT KHUNG TÍCH HỢP G-DTF (GIS & DIGITAL TWIN FRAMEWORK) TRONG QUẢN LÝ HẠ TẦNG KỸ THUẬT KCNST TẠI VIỆT NAM

Để giải quyết các thách thức phân mảnh dữ liệu và đáp ứng yêu cầu chuẩn hóa CSDL của Nghị định 269/2025/NĐ-CP [5], trong khuôn khổ nghiên cứu của bài báo đề xuất Khung tích hợp G-DTF. Đây là một kiến trúc tham chiếu mở, linh hoạt, cho phép tích hợp dữ liệu đa nguồn (Không gian - Vật lý - Thời gian thực) để tạo lập Bản sao số (Digital Twin) của KCNST.

3.1. Tiêu chuẩn dữ liệu và khả năng tương thích của khung tích hợp G-DTF theo Nghị định 269/2025/NĐ-CP

Nhằm bảo đảm tính khả thi kỹ thuật và tuân thủ các yêu cầu về kết nối hạ tầng số được quy định tại khoản 1 Điều 25 Nghị định số 269/2025/NĐ-CP, kiến trúc Khung G-DTF được xây dựng dựa trên sự đồng bộ hóa các chuẩn mở quốc tế nhằm tối ưu khả năng tương tác, cụ thể như sau:

(i) Về chuẩn hóa dữ liệu, hệ thống tuân thủ nguyên tắc tích hợp toàn diện, triển khai linh hoạt và thích ứng (được khuyến khích tại khoản 5 Điều 4 Nghị định 269) thông qua việc áp dụng định dạng IFC (ISO 16739) cho dữ liệu Mô hình thông tin công trình (BIM - quy trình tạo lập và sử dụng mô hình 3D để quản lý vòng đời công trình). Đồng thời, dữ liệu địa không gian (GIS) được chuẩn hóa theo CityGML 3.0 của OGC, cho phép mô tả chính xác cấu trúc tô pô (mối quan hệ không gian giữa các đối tượng) và ngữ nghĩa của hạ tầng KCN ở đa dạng mức độ chi tiết (LOD), tạo nền tảng cơ sở cho việc xây dựng Bản sao số đô thị (Digital Twin) theo định hướng tại Điều 22 Nghị định 269.

(ii) Về khả năng liên thông, hệ thống thiết lập cơ chế giao diện lập trình ứng dụng mở (Open API - phương thức cho phép các phần mềm khác nhau giao tiếp và trao đổi dữ liệu) chuẩn RESTful[7]. Cơ chế này đáp ứng yêu cầu bắt buộc tại khoản 1 Điều 14 Nghị định 269, cho phép chia sẻ dữ liệu thời gian thực (Real-time data) về quan trắc môi trường và năng lượng với Trung tâm giám sát, điều hành đô thị thông minh (IOC) của địa phương. Đồng thời, hệ thống bảo đảm khả năng tích hợp vào Hệ thống thông tin quốc gia về khu công nghiệp theo quy định tại khoản 3 Điều 3 Thông tư số 05/2025/TT-BKHĐT [3], phục vụ công tác quản lý nhà nước về hiệu quả tài nguyên và sản xuất sạch hơn.

(iii) Về độ tin cậy của dữ liệu, quy trình kiểm soát chất lượng kép (QA/QC - Quality Assurance - Đảm bảo chất lượng và Quality Control - Kiểm soát chất lượng) được thực hiện tự động ngay tại thiết bị biên (Edge Computing - xử lý dữ liệu tại nguồn phát sinh thay vì gửi về máy chủ trung tâm) nhằm loại bỏ nhiễu thông tin; đồng thời các dữ liệu trọng yếu như chỉ số phát thải được lưu trữ kèm mã định danh trên nền tảng chuỗi khối (Blockchain), đáp ứng yêu cầu về khả năng

[5] Môi trường dữ liệu chung (CDE): Thay vì lưu trữ phân tán, hệ thống thiết lập CDE tuân thủ tiêu chuẩn ISO 19650. Đây là bộ chuẩn tắc quốc tế về quản lý thông tin xuyên suốt vòng đời dự án, quy định chặt chẽ quy trình luân chuyển dữ liệu qua các trạng thái (từ Đang làm việc đến Đã công bố). Việc áp dụng ISO 19650 giúp tạo ra nguồn thông tin tin cậy duy nhất (Single Source of Truth), đảm bảo tất cả các bên liên quan (Quy hoạch, Xây dựng, Vận hành) luôn truy xuất được phiên bản dữ liệu chính xác và mới nhất.

[6] ISO 23247 là khung tiêu chuẩn quốc tế về Bản sao số trong sản xuất, được nghiên cứu áp dụng làm kiến trúc tham chiếu để chuẩn hóa quy trình tích hợp dữ liệu từ mạng lưới IoT phân tán. Trong bối cảnh KCNST, tiêu chuẩn này giúp thiết lập ngôn ngữ kỹ thuật chung, giải quyết triệt để sự phân mảnh dữ liệu và đồng bộ hóa vận hành hệ thống hạ tầng tương tự như dây chuyền sản xuất.

[7] RESTful (Representational State Transfer) là chuẩn thiết kế kết nối phổ biến nhất toàn cầu nhờ tính linh hoạt và độc lập ngôn ngữ; đây là giải pháp kỹ thuật chủ chốt giúp hệ thống đáp ứng yêu cầu về cung cấp giao diện lập trình ứng dụng (API) mở và khả năng tương tác được quy định tại khoản 1 Điều 13 và Điều 14 Nghị định số 269/2025/NĐ-CP.

truy xuất nguồn gốc trong Khung kiến trúc ICT tại khoản 2 Điều 13 Nghị định 269, tạo cơ sở minh bạch pháp lý phục vụ cho công tác kiểm toán xanh.

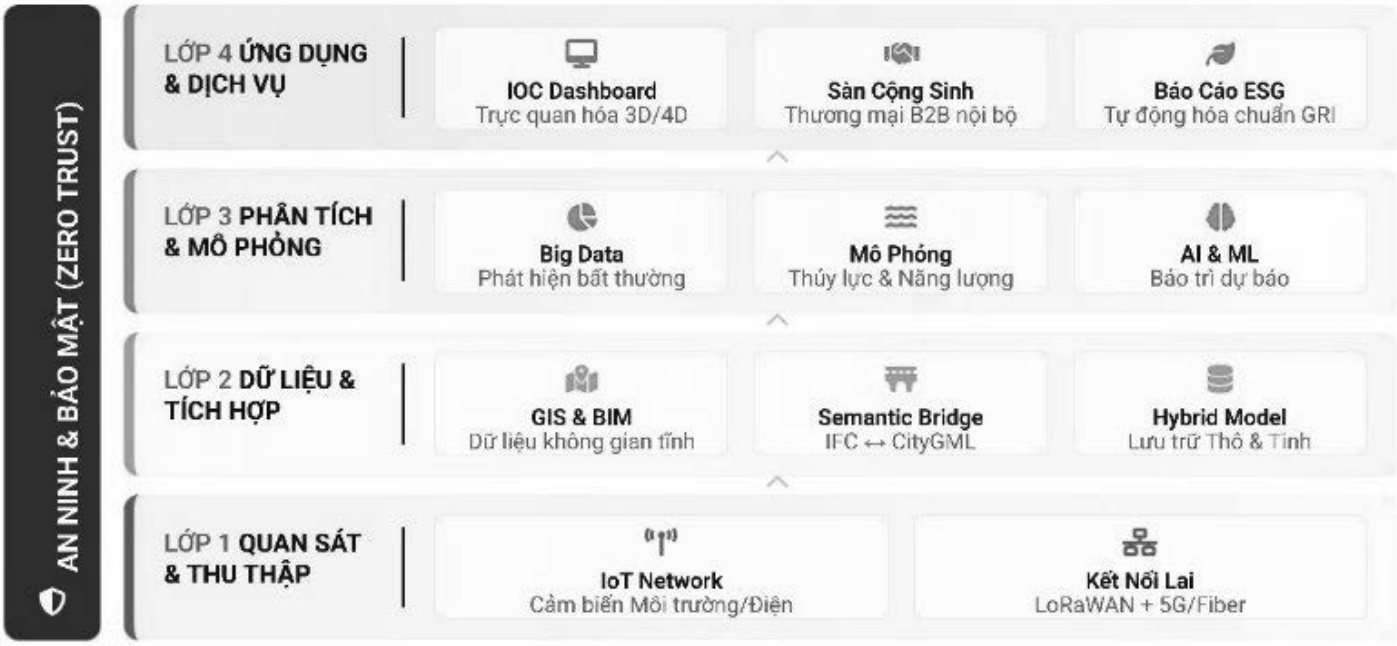
3.2. Các lớp chức năng và cấu trúc dữ liệu của Khung tích hợp G-DTF

Để hiện cụ thể hóa các tiêu chuẩn về dữ liệu, khả năng tương thích và độ tin cậy đã nêu trên, Khung G-DTF được cấu trúc thành 4 lớp chức năng chính. Mỗi lớp đóng vai trò cụ thể trong việc đáp ứng các yêu cầu của Nghị định số 269/2025/NĐ-CP và các mô hình tham chiếu quốc tế, phục vụ tối ưu cho công tác quản lý hạ tầng kỹ thuật cho các KCNST tại Việt Nam, cụ thể quy định các lớp như sau:

Lớp 1: Lớp Quan sát và Thu thập (Đáp ứng yêu cầu về Độ tin cậy dữ liệu và Kết nối hạ tầng) Lớp này chịu trách nhiệm thu thập dữ liệu từ thế giới thực và là nơi triển khai quy trình QA/QC tự động tại biên (theo **mục iii** đã đề xuất):

✓ Mạng lưới cảm biến (IoT Network): Thiết lập hệ thống quan trắc thời gian thực toàn diện. Bao gồm các cảm biến môi trường (đo chất lượng không khí, nước thải: COD, BOD, TSS) có khả năng tự làm sạch; cảm biến lưu lượng, áp suất trên mạng lưới đường ống cấp thoát nước; và hạ tầng đo đếm tiên tiến cho hệ thống điện.

✓ Kết nối lai[8] (Hybrid Connectivity): Để giải quyết bài toán cân bằng giữa chi phí và hiệu năng, nghiên cứu đề xuất mô hình kết nối hỗn hợp: Sử dụng mạng LoRaWAN/NB-IoT cho các thiết bị đo xa, băng thông thấp (đồng hồ nước, cảm biến môi trường) để tối ưu chi phí năng lượng và vùng phủ sóng; sử dụng mạng Fiber quang hoặc 5G riêng (Private 5G) cho các ứng dụng băng thông cao, độ trễ thấp như Camera AI giám sát an ninh và điều khiển SCADA thời gian thực.



Hình 3. Sơ đồ minh họa kiến trúc tổng thể Khung tích hợp G-DTF (GIS & Digital Twin Framework) quản lý hạ tầng KCNST

Lớp 2: Lớp Dữ liệu và Tích hợp (Đáp ứng yêu cầu về Chuẩn hóa dữ liệu và Bản sao số) Đây là trung tâm của hệ thống, giải quyết bài toán Biệt lập dữ liệu bằng cách tuân thủ nghiêm ngặt nguyên tắc chuẩn hóa (theo mục i đã đề xuất và Điều 22 Nghị định 269):

✓ Dữ liệu không gian tĩnh (GIS & BIM): Thực hiện số hóa toàn bộ dữ liệu nền: Tích hợp bản đồ nền GIS (thông tin địa lý, quy hoạch sử dụng đất, mạng lưới hạ tầng diện rộng) và mô hình BIM (thông tin chi tiết về cấu trúc, vật liệu, thiết bị của các nhà máy, trạm xử lý).

✓ Cầu nối ngữ nghĩa (Semantic Bridge): Đây là điểm đột phá công nghệ. Ứng dụng các thuật toán trích xuất - chuyển đổi - tải và công nghệ Web Semantic để ánh xạ và đồng nhất dữ liệu từ định dạng BIM (IFC[9]) sang định dạng GIS (CityGML[10]/3D Tiles). Việc này giúp máy tính hiểu được ngữ nghĩa tương đương của các đối tượng trong hai môi trường khác nhau (ví dụ: đồng nhất khái niệm máy bơm P-01 trong bản vẽ BIM kỹ thuật với đối tượng phụ tải điện P-01 trong bản đồ GIS quản lý năng lượng).

✓ Mô hình dữ liệu lai (Hybrid Data Model): Để tối ưu hóa việc quản lý tài nguyên số, hệ thống áp dụng mô hình lưu trữ hai cấp độ tương tự như quy trình lưu trữ hồ sơ đô thị: Cấp độ 1- Lưu trữ thô, đóng vai trò như một trung tâm lưu trữ lớn, nơi tiếp nhận toàn bộ dữ liệu nguyên bản từ hàng nghìn cảm biến IoT chuyển về. Tại đây, dữ liệu chưa cần sắp xếp hay lọc bỏ nhằm giữ nguyên vẹn thông tin phục vụ cho việc nghiên cứu chuyên sâu hoặc truy vết sự cố sau này. Tiếp theo là Cấp độ 2 - Lưu trữ tinh (Sắp xếp theo từng kho dữ liệu), chỉ những dữ liệu quan trọng đã được xử lý, làm sạch và cấu trúc hóa (thành các bảng biểu, số liệu thống kê) mới được đưa vào đây để phục vụ trực tiếp cho công tác báo cáo quản trị và hỗ trợ lãnh đạo ra quyết định nhanh.

Lớp 3: Lớp Phân tích và Mô phỏng (Đáp ứng yêu cầu về Truy xuất nguồn gốc và Kiểm toán xanh) Lớp này tạo ra giá trị gia tăng từ dữ liệu đã được chuẩn hóa, hỗ trợ minh bạch hóa các chỉ số môi trường:

✓ Phân tích dữ liệu lớn (Big Data Analytics): Xử lý dữ liệu lịch sử và thời gian thực để phát hiện các bất thường, nhận diện xu hướng tiêu thụ và đánh giá hiệu quả vận hành.

✓ Mô hình hóa và Mô phỏng (Modeling & Simulation): Sử dụng các thuật toán mô phỏng thủy lực (cho mạng lưới nước), mô phỏng

[8] Kết nối lai (Hybrid Connectivity): Là kiến trúc hạ tầng mạng phối hợp linh hoạt giữa kết nối có dây (Cáp quang - đảm bảo tốc độ và độ ổn định cho các máy chủ/trung tâm điều hành) và kết nối không dây (5G, LoRaWAN - đảm bảo phạm vi phủ sóng rộng cho các cảm biến phân tán), giúp tối ưu hóa chi phí đầu tư và duy trì dòng dữ liệu liền mạch toàn khu vực.

[9] IFC (Industry Foundation Classes): là chuẩn dữ liệu mở quốc tế (được quản lý bởi tổ chức buildingSMART) dùng để mô tả, lưu trữ và trao đổi thông tin trong mô hình BIM. IFC là định dạng trung lập, không phụ thuộc vào bất kỳ nhà cung cấp phần mềm nào (như Revit, Tekla, hay ArchiCAD).

[10] CityGML (City Geography Markup Language): là chuẩn dữ liệu mở (được phát triển bởi OGC - Open Geospatial Consortium) dùng để lưu trữ và trao đổi các mô hình thành phố 3D ảo. CityGML không chỉ mô tả hình học mà còn chứa đựng thông tin ngữ nghĩa và cấu trúc liên kết (topology) của các đối tượng đô thị. Đặc biệt, CityGML hỗ trợ phân cấp Mức độ chi tiết (LOD - Level of Detail) từ LOD0 (địa hình phẳng) đến LOD4 (chi tiết nội thất).

năng lượng để dự báo nhu cầu và tối ưu hóa vận hành. Mô phỏng các kịch bản sự cố để xây dựng phương án ứng phó.

✓ Trí tuệ nhân tạo (AI): Ứng dụng các thuật toán Học máy (Machine Learning[11]) để hỗ trợ bảo trì dự báo (Predictive Maintenance) và gợi ý các kịch bản cộng sinh công nghiệp tối ưu dựa trên dữ liệu cung-cầu của các doanh nghiệp.

Lớp 4: Lớp Ứng dụng và Dịch vụ (Đáp ứng yêu cầu về Khả năng liên thông và Open API) Lớp giao diện người dùng, được thiết kế để đảm bảo tương tác đa chiều (theo mục ii đã đề xuất và Điều 14 Nghị định 269):

✓ Trung tâm điều hành thông minh (IOC): Dashboard trực quan hóa trạng thái hoạt động của toàn bộ hạ tầng trên nền bản đồ số 3D/4D. Cung cấp cái nhìn toàn cảnh cho Ban quản lý KCN.

✓ Nền tảng giao dịch cộng sinh: Hoạt động như một sàn thương mại điện tử B2B nội bộ, cho phép doanh nghiệp đăng tải nhu cầu (ví dụ: cần mua hơi nước, cần xử lý phế liệu nhựa) và chào bán tài nguyên thừa. Hệ thống sẽ tự động gợi ý các kết nối phù hợp dựa trên vị trí địa lý và đặc tính kỹ thuật.

✓ Báo cáo ESG tự động: Tích hợp công cụ tính toán dấu chân Carbon (Carbon Footprint) thời gian thực, hỗ trợ xuất báo cáo tuân thủ các tiêu chuẩn phát triển bền vững quốc tế (GRI, SDGs) và yêu cầu của các nhãn hàng toàn cầu, giúp doanh nghiệp giảm chi phí tuân thủ.

Ngoài các lớp chức năng đã đề xuất nêu trên, trong môi trường kết nối vạn vật, an ninh dữ liệu là yếu tố chủ chốt để xây dựng niềm tin cho cộng sinh công nghiệp. Khung G-DTF đề xuất xây dựng lớp Bảo mật và An toàn thông tin (Lớp xuyên suốt) Bao trùm lên cả 4 lớp chức năng là cơ chế bảo mật tuân thủ nguyên tắc An toàn từ thiết kế (Security by Design) và mô hình Zero Trust (Không tin cậy, luôn xác minh). Các biện pháp bao gồm mã hóa dữ liệu đầu cuối và phân quyền truy cập nghiêm ngặt, đảm bảo an toàn tuyệt đối cho dữ liệu doanh nghiệp và an ninh quốc gia trên không gian mạng theo quy định tại Nghị định 269/2025/NĐ-CP.

4. HIỆU QUẢ TRIỂN KHAI VÀ ĐỀ XUẤT CHÍNH SÁCH, LỘ TRÌNH THỰC HIỆN

4.1. Hiệu quả kinh tế - xã hội và môi trường

- Về hiệu quả Kinh tế: Khung G-DTF mang lại lợi ích kép bằng cách giảm 10-20% chi phí điện năng vận hành (OPEX[12]) nhờ điều khiển tự động và giảm thời gian ngừng thiết bị (downtime) thông qua bảo trì dự báo. Bên cạnh đó, nền tảng giao dịch cộng sinh giúp biến chất thải thành tài nguyên, vừa giảm chi phí xử lý vừa tạo nguồn thu mới cho doanh nghiệp.

- Về hiệu quả Môi trường và Xã hội: Giải pháp đóng góp trực tiếp vào mục tiêu Net Zero và kinh tế tuần hoàn nhờ giảm phát thải và rác thải chôn lấp. Việc giám sát liên tục giúp phát hiện sớm rủi ro sự cố sinh thái; đồng thời sự minh bạch dữ liệu giúp nâng cao uy tín KCN, thu hút nhân sự chất lượng cao và các nhà đầu tư quốc tế có yêu cầu khắt khe về tiêu chuẩn ESG.

- Về phân tích Chi phí - Lợi ích (ROI[13]): Mặc dù chi phí đầu tư vốn (CAPEX[14] cho phần cứng, nền tảng số hóa) và chi phí vận hành (OPEX) ban đầu là đáng kể, những lợi ích tiết kiệm năng lượng và tối ưu rủi ro sẽ giúp dự án hoàn vốn trong trung hạn (3-5 năm). Hơn thế, giải pháp còn mang lại giá trị vô hình dài hạn về thương hiệu và tính tuân thủ pháp luật.

4.2. Một số kiến nghị chính sách và lộ trình thực hiện

- Đối với Cơ quan quản lý nhà nước: Cần ban hành thông tư hướng dẫn chi tiết Nghị định 269/2025/NĐ-CP về chuẩn dữ liệu mở (IFC, CityGML) nhằm đảm bảo liên thông hệ thống. Đồng thời, hoàn thiện khung pháp lý về quyền sở hữu và bảo mật dữ liệu công nghiệp để khuyến khích doanh nghiệp tự tin chia sẻ thông tin cộng sinh. Cần thiết lập các gói tín dụng xanh, xem hạ tầng số KCNST là hạ tầng thiết yếu quốc gia.

- Đối với Chủ đầu tư hạ tầng KCN: Cần lồng ghép thiết kế hạ tầng số (cáp ngầm, cảm biến) đồng bộ với hạ tầng vật lý ngay từ khâu quy hoạch để tối ưu chi phí cải tạo, kết hợp đào tạo năng lực quản trị dữ liệu cho nhân sự vận hành. Lộ trình chuyển đổi KCN hiện hữu nên áp dụng 4 giai đoạn: (1) Số hóa bản đồ nền GIS; (2) Kết nối cảm biến IoT thời gian thực; (3) Thông minh hóa bằng AI và trung tâm IOC; (4) Mô phỏng bằng Digital Twin hoàn chỉnh.

5. KẾT LUẬN

Chuyển đổi số trong quản lý hạ tầng kỹ thuật KCNST đòi hỏi sự thay đổi căn bản về quy trình vận hành và phương pháp tiếp cận hệ thống. Vì vậy, khung tích hợp G-DTF được đề xuất trong nghiên cứu này cung cấp thêm một giải pháp phù hợp với thực tiễn và khoa học cho bài toán phân mảnh dữ liệu, tạo nền tảng vững chắc cho việc triển khai các mô hình kinh tế tuần hoàn và cộng sinh công nghiệp tại Việt Nam.

Việc hiện thực hóa mô hình này đòi hỏi sự cam kết mạnh mẽ và sự đồng hành chặt chẽ giữa ba nhà: (1)Chính phủ (kiến tạo thể chế, chính sách), (2)Doanh nghiệp (đầu tư hạ tầng, công nghệ) và (3)Cộng đồng khoa học công nghệ (cung cấp giải pháp, tư vấn). Đây là tiền đề quan trọng để Việt Nam không chỉ đạt được các mục tiêu cam kết quốc tế về môi trường mà còn nâng cao năng lực cạnh tranh quốc gia, thu hút dòng vốn đầu tư xanh thế hệ mới và phát triển bền vững trong kỷ nguyên số.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Amata (Việt Nam) Public Company Limited. Tổng quan về Khu công nghiệp Amata (Chi tiết). Internet: https://amatavn.com/, (truy cập năm 2025).

[2] Ban Chấp hành Trung ương Đảng Cộng sản Việt Nam. Nghị quyết số 29 - NQ/TW về tiếp tục đẩy mạnh công nghiệp hóa, hiện đại hóa đất nước đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045, 2022.

[3] Bộ Kế hoạch và Đầu tư. Thông tư số 05/2025/TT-BKHĐT hướng dẫn xây dựng khu công nghiệp sinh thái, 2025.

[4] Chính phủ. Nghị định số 35/2022/NĐ-CP quy định về quản lý khu công nghiệp và khu kinh tế, 2022.

[5] Chính phủ. Nghị định số 269/2025/NĐ-CP quy định về phát triển đô thị thông minh, 2025.

[6] DEEP C Industrial Zones. DEEP C. Internet: https://deepc.vn/, (truy cập năm 2025).

[7] GEIPP. Global Eco-Industrial Park Programme. Internet: https://geipp.org/, (truy cập năm 2025).

[8] Bộ Tài chính, UNIDO. Tài liệu hội thảo "Hướng dẫn thực hiện Thông tư 05/2025/TT-BKHĐT: Lộ trình chứng nhận khu công nghiệp sinh thái tại Việt Nam", 2025.

[9] Shinec. SUSTAINABILITY REPORT. Internet: https://shinec.com.vn/wp-content/uploads/2025/03/202408-Bao-cao-PTBV-Shinec-ENG.pdf, (truy cập năm 2025).

[10] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 1658/QĐ-TTg phê duyệt Chiến lược quốc gia về tăng trưởng xanh giai đoạn 2021 - 2030, tầm nhìn 2050, 2021.

[11] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). An international framework for eco-industrial parks v2.0, 2021.

[12] United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). Annual Report 2024, 2024.

[11] Là một nhánh của Trí tuệ nhân tạo (AI), cho phép máy tính tự học hỏi các quy luật từ dữ liệu lịch sử thay vì phải được con người lập trình các quy tắc cố định. Giúp chuyển đổi mô hình vận hành từ Thụ động ứng phó (hỏng mới sửa) sang Chủ động dự báo (biết trước để ngăn chặn).

[12] OPEX (Operational Expenditure): Chi phí vận hành thường xuyên. Mục tiêu của G-DTF là tăng CAPEX một lần để giảm OPEX mãi mãi.

[13] ROI (Return on Investment): Tỷ suất hoàn vốn. Với các dự án hạ tầng thông thường, ROI có thể kéo dài 10-15 năm, nhưng với hạ tầng số (Digital Infrastructure), ROI thường ngắn hơn (3-5 năm) do hiệu quả tiết kiệm năng lượng mang lại tức thì.

[14] CAPEX (Capital Expenditure): Chi phí đầu tư tài sản cố định ban đầu (mua phần mềm, lắp cảm biến). Đây là rào cản lớn nhất của G-DTF.

■Ngày nhận bài: 26/02/2026 ■Ngày sửa bài: 05/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 12/3/2026

Quản lý kỹ thuật cấp nước đô thị trong kỷ nguyên chuyển đổi số tại Việt Nam

Urban water supply technical management in the era of digital transformation in Vietnam

> TS NGUYỄN VĂN NAM[1,*], THS NGUYỄN BÍCH NGỌC[1], THS NGÔ DUY DƯƠNG[2]
[1]GV Khoa Đô thị, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội; [*]Email: namnv@hau.edu.vn
[2]Công ty Cổ phần nước mặt Sông Đuống

TÓM TẮT

Tại Việt Nam, quản lý cấp nước đô thị đang đứng trước những thách thức lớn do quá trình đô thị hóa nhanh, biến đổi khí hậu, suy giảm nguồn nước và yêu cầu ngày càng cao của người dân về chất lượng dịch vụ. Kỷ nguyên chuyển đổi số với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ thông tin, dữ liệu lớn (Big Data), Internet vạn vật (IoT), trí tuệ nhân tạo (AI) đã mở ra những cơ hội mới nhằm nâng cao hiệu quả, tính bền vững và khả năng thích ứng của hệ thống cấp nước đô thị. Bài báo này phân tích vai trò của công nghệ số trong quản lý cấp nước đô thị, đánh giá các mô hình và giải pháp số hóa đang được áp dụng trên thế giới và tại Việt Nam, đồng thời đề xuất một số định hướng phát triển trong kỷ nguyên chuyển đổi số tại Việt Nam.

Từ khóa: Cấp nước đô thị; chuyển đổi số; IoT; quản lý thông minh; phát triển bền vững.

ABSTRACT

In Vietnam, urban water supply management is facing significant challenges arising from rapid urbanization, climate change, the degradation of water resources, and the increasingly high expectations of citizens regarding service quality. The era of digital transformation, driven by the rapid advancement of information technology, big data, the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), and digitalization processes, has created new opportunities to improve the efficiency, sustainability, and adaptive capacity of urban water supply systems. This paper examines the role of digital technologies in urban water supply management, evaluates digitalized models and solutions currently implemented worldwide and in Vietnam, and proposes several development orientations for urban water supply management in Vietnam in the era of digital transformation.

Keywords: Urban water supply; digital transformation; Internet of Things (IoT); smart management; sustainable development.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cấp nước đô thị là một trong những lĩnh vực hạ tầng kỹ thuật thiết yếu, giữ vai trò đặc biệt quan trọng đối với phát triển kinh tế - xã hội, bảo đảm an sinh và nâng cao chất lượng sống của người dân đô thị. Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh, gia tăng dân số và tác động ngày càng rõ nét của biến đổi khí hậu, hệ thống cấp nước đô thị tại Việt Nam đang phải đối mặt với nhiều áp lực như nhu cầu sử dụng nước tăng cao, nguồn nước suy giảm về chất lượng và trữ lượng, ô nhiễm môi trường, thất thoát - thất thu nước sạch và yêu cầu ngày càng khắt khe về chất lượng dịch vụ [1], [2], [3].

Thực tiễn cho thấy, mặc dù mạng lưới cấp nước đô thị tại Việt Nam đã có những bước phát triển đáng kể về quy mô và phạm vi phục vụ, song công tác quản lý vẫn chủ yếu dựa trên các phương thức truyền thống, phân tán và thiếu tính liên thông. Dữ liệu về mạng lưới, vận hành, chất lượng nước và khách hàng chưa được số hóa đồng bộ, gây khó khăn cho công tác giám sát, dự báo và ra quyết định. Tình trạng thất thoát nước sạch ở nhiều đô thị vẫn ở mức cao; việc phát hiện sự cố, rò rỉ và xử lý phản ánh của người dân còn chậm, ảnh hưởng đến hiệu quả vận hành và niềm tin của xã hội đối với dịch vụ cấp nước.

Trong khi đó, cuộc Cách mạng công nghiệp lần thứ tư và tiến trình chuyển đổi số quốc gia đang tạo ra những cơ hội mới cho ngành nước đô thị. Các công nghệ như hệ thống thông tin địa lý (GIS), điều khiển giám sát và thu thập dữ liệu (SCADA), Internet vạn vật (IoT), dữ liệu lớn (Big Data) và trí tuệ nhân tạo (AI) cho phép quản lý hệ thống cấp nước theo thời gian thực, nâng cao khả năng kiểm soát thất thoát, thất thu, bảo đảm an toàn cấp nước và tối ưu hóa chi phí vận hành [4], [5]. Nhiều quốc gia và đô thị trên thế giới đã chuyển sang mô hình cấp nước thông minh, coi dữ liệu số là nền tảng cho quản trị hạ tầng đô thị hiện đại và bền vững. Chẳng hạn, tại Singapore được coi là mô hình tiêu biểu trong quản lý cấp nước số hóa với chương trình SMART Water Grid do PUB (Public Utilities Board) triển khai. Các thành phần chính gồm: Đồng hồ nước thông minh (Smart Water Meters) được lắp đặt trên toàn thành phố, tự động truyền dữ liệu tiêu thụ đến hệ thống dữ liệu trung tâm nhiều lần mỗi ngày; hệ thống SCADA và GIS tích hợp, cho phép giám sát lưu lượng, áp lực và chất lượng nước theo thời gian thực trên bản đồ số; hệ thống phân tích dữ liệu lớn (Big Data Analytics) hỗ trợ dự báo nhu cầu tiêu thụ, phân tích hành vi sử dụng nước và tối ưu hóa kế hoạch vận hành. Kết quả cho thấy, Singapore đã giảm đáng kể thất thoát nước, nâng cao độ tin cậy cung cấp và tối ưu hóa sử dụng tài nguyên nước; việc cung cấp dữ liệu minh bạch còn giúp người dân chủ động theo dõi mức tiêu thụ và quản lý chi phí sử dụng nước [6], [7]. Tại Tây Ban Nha, thành phố Gandia là một trong những đô thị đầu tiên áp dụng mô hình District Metered Area (DMA) và digital

twin (mô hình số song sinh) trên toàn bộ hệ thống cấp nước. Các đặc điểm chính của hệ thống là: Mạng lưới cấp nước được chia theo từng vùng DMA có ranh giới rõ ràng, mỗi vùng có bộ đo lưu lượng riêng; sử dụng digital twin để mô phỏng biến động áp lực, lưu lượng và dự báo rò rỉ trên mạng lưới, từ đó tối ưu hóa vận hành theo từng khu vực. Kết quả là tỷ lệ thất thoát nước giảm rõ rệt, thời gian phát hiện rò rỉ được rút ngắn, và hiệu quả sử dụng năng lượng trong vận hành tăng lên đáng kể [8], [9].

Bảng 1. Chuyển đổi số trong quản lý cấp nước ở một số đô thị trên thế giới và Việt Nam [6], [7], [8], [9], [12]

STT	Đô thị / Đơn vị cấp nước	Quốc gia	Giải pháp chuyển đổi số chủ đạo	Quy mô triển khai
11	Singapore (PUB)	Singapore	Đồng hồ nước thông minh, nền tảng quản lý dữ liệu tập trung, ứng dụng khách hàng	>300.000 smart meters
22	Gandia	Tây Ban Nha	Phân vùng DMA, cảm biến IoT, phân tích dữ liệu lớn, digital twin	Toàn mạng lưới đô thị
33	Brabant Water (Bắc Brabant)	Hà Lan	Đồng hồ siêu âm thông minh, mô hình song sinh số	>120.000 đồng hồ
44	Chennai (Metrowater)	Ấn Độ	Đồng hồ nước thông minh cho khách hàng lớn, hệ thống billing số	~100.000 khách hàng
55	TP.HCM (SAWACO)	Việt Nam	SCADA, GIS, quản lý chất lượng nước số hóa	Toàn hệ thống chính
66	Paris (Eau de Paris)	Pháp	Giám sát mạng nước theo thời gian thực, dữ liệu mở	Mạng cấp nước đô thị

Tại Việt Nam, chủ trương chuyển đổi số trong lĩnh vực hạ tầng kỹ thuật nói chung và cấp nước đô thị nói riêng đã được xác định trong các chiến lược phát triển đô thị thông minh và chương trình chuyển đổi số quốc gia ơ. Một số đô thị lớn như TP.HCM, Hà Nội, Đà Nẵng đã bước đầu triển khai các ứng dụng số trong quản lý cấp nước và đạt được những kết quả tích cực [10,11]. Tổng Công ty Cấp nước Sài Gòn (SAWACO) là đơn vị tiên phong triển khai quản lý cấp nước số hóa tại Việt Nam, các bước ứng dụng bao gồm: Xây dựng Trung tâm Cấp nước Thông minh (Smart Water Operation Center - SWOC) và Trung tâm dữ liệu (Data Center) để thu thập dữ liệu từ mạng lưới đường ống, trạm bơm, nhà máy xử lý nước và đồng hồ khách hàng; tích hợp SCADA, GIS và các hệ thống quản lý tài sản kỹ thuật, cho phép giám sát, cảnh báo và điều hành vận hành theo thời gian thực; thử nghiệm và triển khai đồng hồ nước thông minh IoT tại các khu vực mẫu, giúp giám sát tiêu thụ, phát hiện rò rỉ và tự động cập nhật dữ liệu. Kết quả bước đầu cho thấy SAWACO đã giảm tỷ lệ thất thoát nước, nâng cao độ tin cậy cung cấp và cải thiện hiệu quả vận hành tổng thể; việc số hóa dữ liệu còn góp phần minh bạch hóa dịch vụ và tăng cường tương tác với khách hàng [12]. Tại Hà Nội, các đơn vị cấp nước đã ứng dụng GIS trong quản lý tài sản hạ tầng cấp nước và SCADA trong giám sát vận hành tại nhiều trạm xử lý nước và các trạm bơm. Các ứng dụng này tạo lên bản đồ số toàn bộ mạng lưới cấp nước, hỗ trợ quy hoạch sửa chữa và mở rộng hệ thống; tối ưu hóa lịch trình bảo trì, giảm thời gian ngừng cấp nước ngoài kế hoạch và nâng cao an toàn vận hành [10], [11].

Tuy nhiên, quá trình chuyển đổi số vẫn còn thiếu tính hệ thống, chưa đồng đều giữa các địa phương và đang gặp nhiều rào cản về hạ tầng kỹ thuật, nguồn lực tài chính, nhân lực và cơ chế chính sách.

Trong bối cảnh đó, việc nghiên cứu một cách có hệ thống về quản lý cấp nước đô thị trong kỷ nguyên số, làm rõ các vấn đề đặt ra, thách thức, cơ hội cũng như định hướng và giải pháp phù hợp với điều kiện Việt Nam là hết sức cần thiết. Nghiên cứu không chỉ có ý nghĩa về mặt khoa học mà còn mang giá trị thực tiễn cao, góp phần hỗ trợ các cơ quan quản lý, doanh nghiệp cấp nước và chính quyền đô thị trong quá trình hoạch định chính sách và tổ chức triển khai chuyển đổi số hướng tới phát triển bền vững ngành cấp nước đô thị và đảm bảo thực hiện kế hoạch cấp nước an toàn đã đề ra.

2. MỘT SỐ CÔNG NGHỆ SỐ CHỦ ĐẠO TRONG QUẢN LÝ CẤP NƯỚC ĐÔ THỊ

- Internet vạn vật (IoT): IoT cho phép lắp đặt các cảm biến tại nhà máy nước, mạng lưới đường ống và điểm tiêu thụ để giám sát lưu lượng, áp lực, chất lượng nước theo thời gian thực. Nhờ đó, các đơn vị cấp nước có thể nhanh chóng phát hiện rò rỉ, sự cố và giảm tỷ lệ thất thoát nước [4], [5], [13].

- Dữ liệu lớn và phân tích dữ liệu: Big Data hỗ trợ lưu trữ và xử lý khối lượng lớn dữ liệu vận hành. Thông qua phân tích dữ liệu, các nhà quản lý có thể nhận diện xu hướng tiêu thụ, tối ưu hóa kế hoạch sản xuất nước và phân phối, cũng như nâng cao hiệu quả đầu tư.

- Trí tuệ nhân tạo (AI): AI được ứng dụng trong dự báo nhu cầu nước, tối ưu hóa vận hành trạm bơm, kiểm soát chất lượng nước và hỗ trợ bảo trì dự báo (predictive maintenance). Điều này giúp giảm chi phí vận hành và nâng cao độ tin cậy của hệ thống.

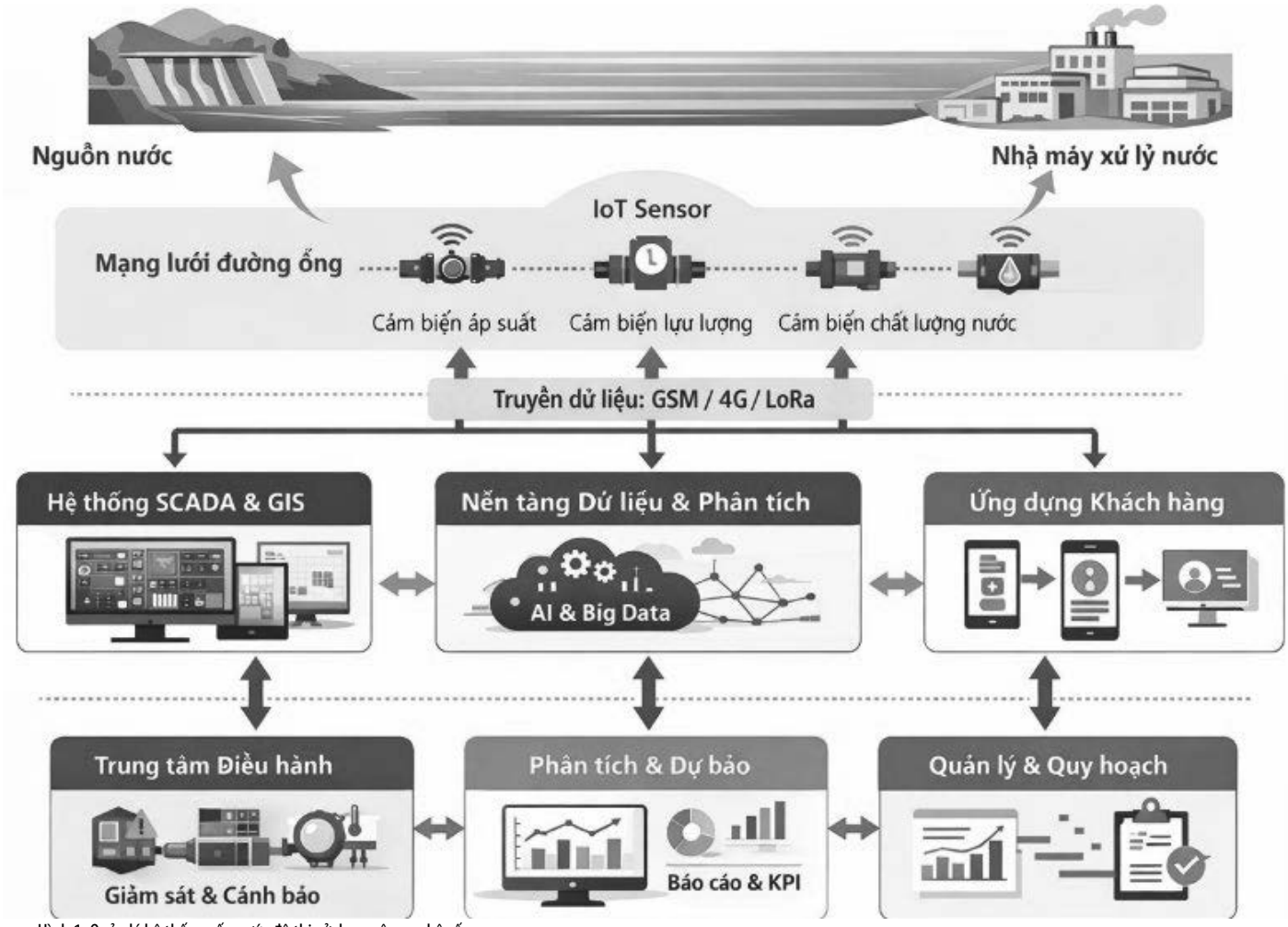
- Hệ thống thông tin địa lý (GIS): GIS đóng vai trò quan trọng trong quản lý tài sản hạ tầng cấp nước, cho phép trực quan hóa mạng lưới đường ống, van, đồng hồ và hỗ trợ lập kế hoạch sửa chữa, nâng cấp một cách hiệu quả.

Bảng 2. Mức độ chuyển đổi số trong quản lý cấp nước tại một số đô thị trên thế giới và Việt Nam [6], [7], [8], [9], [14]

Mức độ chuyển đổi số	Công nghệ áp dụng	Đặc trưng quản lý	Quốc gia/Đô thị
Cơ bản	GIS, SCADA	Giám sát vận hành, thu thập dữ liệu cục bộ	Hà Nội, TP.HCM
Trung bình	DMA, IoT, billing số	Quản lý thất thoát, rò rỉ dữ liệu bán thời gian thực	Chennai, Gandia
Nâng cao	Smart meters, Big Data	Quản lý nhu cầu, dự báo tiêu thụ	Singapore
Toàn diện	Digital twin, AI	Ra quyết định thông minh, tối ưu toàn hệ thống	Hà Lan, Pháp

3. ĐẶC TRƯNG CƠ BẢN CỦA QUẢN LÝ CẤP NƯỚC ĐÔ THỊ TRONG KỶ NGUYÊN SỐ

Quản lý cấp nước đô thị trong kỷ nguyên số không chỉ là việc ứng dụng công nghệ thông tin vào các khâu vận hành truyền thống, mà là sự chuyển đổi toàn diện mô hình quản lý dựa trên dữ liệu, công nghệ số và tư duy quản trị hiện đại. So với mô hình quản lý truyền thống, quản lý cấp nước đô thị trong kỷ nguyên số có những đặc trưng cơ bản sau:



Hình 1. Quản lý hệ thống cấp nước đô thị sử dụng công nghệ số

3.1. Quản lý dựa trên dữ liệu số và thông tin thời gian thực

Đặc trưng nổi bật nhất của quản lý cấp nước đô thị trong kỷ nguyên số là việc lấy dữ liệu số làm nền tảng cho mọi hoạt động quản lý và ra quyết định. Dữ liệu về mạng lưới đường ống, trạm bơm, nhà máy nước, chất lượng nước, lưu lượng, áp lực và các điểm tiêu thụ của khách hàng được thu thập, lưu trữ và phân tích liên tục thông qua các hệ thống như GIS, SCADA, IoT và cơ sở dữ liệu tập trung. Nhờ đó, công tác giám sát và điều hành hệ thống cấp nước được thực hiện theo thời gian thực, thay vì dựa chủ yếu vào báo cáo định kỳ và kinh nghiệm chủ quan như trước đây.

3.2. Tích hợp và liên thông các hệ thống quản lý

Trong kỷ nguyên số, quản lý cấp nước đô thị được thực hiện trên nền tảng tích hợp và liên thông đa hệ thống, bao gồm quản lý kỹ thuật, quản lý tài sản, quản lý chất lượng nước, quản lý khách hàng và quản lý tài chính. Các hệ thống thông tin không còn hoạt động độc lập mà được kết nối trên một nền tảng số thống nhất, cho phép chia sẻ dữ liệu và hỗ trợ ra quyết định tổng hợp. Đặc trưng này giúp khắc phục tình trạng quản lý phân tán, thiếu đồng bộ vốn tồn tại phổ biến trong các doanh nghiệp cấp nước đô thị truyền thống.

3.3. Tự động hóa và thông minh hóa quá trình vận hành

Quản lý cấp nước đô thị trong kỷ nguyên số hướng tới tự động hóa và thông minh hóa các khâu vận hành hệ thống. Các thuật toán phân tích dữ liệu, mô hình thủy lực và trí tuệ nhân tạo được sử dụng để dự báo nhu cầu sử dụng nước, tối ưu hóa chế độ vận hành trạm bơm, điều tiết áp lực mạng lưới và phát hiện sớm rò rỉ, sự cố. Nhờ đó, hiệu quả vận hành được nâng cao, chi phí năng lượng giảm và mức độ an toàn cấp nước được cải thiện rõ rệt.

3.4. Chuyển đổi từ quản lý kỹ thuật sang quản trị dịch vụ

Một đặc trưng quan trọng khác là sự chuyển đổi từ mô hình quản lý thiên về kỹ thuật - vận hành sang quản trị dịch vụ công lấy người dùng làm trung tâm. Các nền tảng số cho phép doanh nghiệp cấp nước cung cấp dịch vụ trực tuyến, tiếp nhận và xử lý phản ánh của người dân, minh bạch hóa thông tin về chất lượng nước, hóa đơn và tiến độ xử lý sự cố. Điều này góp phần nâng cao chất lượng dịch vụ, tăng mức độ hài lòng của người sử dụng và củng cố niềm tin xã hội đối với hệ thống cấp nước đô thị.

3.5. Hỗ trợ ra quyết định chiến lược và quản lý dài hạn

Quản lý cấp nước đô thị trong kỷ nguyên số không chỉ phục vụ vận hành hàng ngày mà còn hỗ trợ ra quyết định chiến lược và quản lý dài hạn. Thông qua phân tích dữ liệu lớn và mô hình hóa, nhà quản lý có thể đánh giá hiệu quả đầu tư, lập kế hoạch cải tạo - nâng cấp mạng lưới, dự báo tác động của đô thị hóa và biến đổi khí hậu đối với nhu cầu và an toàn cấp nước. Đây là cơ sở quan trọng để xây dựng các chiến lược phát triển bền vững cho hệ thống cấp nước đô thị.

3.6. Gắn kết với quản lý đô thị thông minh và phát triển bền vững

Trong kỷ nguyên số, quản lý cấp nước đô thị trở thành một hợp phần không thể tách rời của đô thị thông minh. Hệ thống cấp nước được kết nối với các lĩnh vực khác như thoát nước, năng lượng, giao

thông và môi trường, tạo nên nền tảng quản lý đô thị tích hợp. Đặc trưng này giúp nâng cao năng lực quản trị tổng thể của chính quyền đô thị, đồng thời góp phần thực hiện các mục tiêu phát triển bền vững, sử dụng hiệu quả tài nguyên nước và thích ứng với biến đổi khí hậu.

4. THÁCH THỨC VÀ CƠ HỘI TRONG CHUYỂN ĐỔI SỐ QUẢN LÝ CẤP NƯỚC ĐÔ THỊ

4.1. Cơ hội từ chuyển đổi số quản lý cấp nước đô thị

Song song với các thách thức, chuyển đổi số cũng mở ra nhiều cơ hội quan trọng để nâng cao hiệu quả quản lý, phát triển bền vững và hiện đại hóa ngành cấp nước đô thị tại Việt Nam như:

- Thứ nhất, nâng cao hiệu quả vận hành và giảm thất thoát nước: Việc ứng dụng các công nghệ số như GIS, SCADA, IoT và phân tích dữ liệu lớn cho phép giám sát mạng lưới cấp nước theo thời gian thực, phát hiện sớm rò rỉ và sự cố, từ đó giảm tỷ lệ thất thoát, thất thu nước sạch. Đây là cơ hội quan trọng để tiết kiệm tài nguyên nước, giảm chi phí sản xuất và nâng cao hiệu quả kinh tế của hệ thống cấp nước đô thị [1], [15].

- Thứ hai, cải thiện chất lượng dịch vụ: Chuyển đổi số giúp doanh nghiệp cấp nước chuyển từ mô hình quản lý hành chính sang mô hình cung cấp dịch vụ lấy khách hàng làm trung tâm. Các nền tảng số như cổng dịch vụ công trực tuyến, ứng dụng di động, hóa đơn điện tử và hệ thống phản ánh hiện trường giúp nâng cao tính minh bạch, rút ngắn thời gian xử lý yêu cầu và tăng mức độ hài lòng của người dân [15].

- Thứ ba, hỗ trợ công tác quy hoạch và ra quyết định dựa trên dữ liệu: Dữ liệu số hóa về mạng lưới, nhu cầu sử dụng nước, chất lượng nước và điều kiện hạ tầng cho phép các nhà quản lý phân tích xu hướng, dự báo nhu cầu và đánh giá hiệu quả đầu tư. Đây là cơ sở quan trọng để xây dựng quy hoạch cấp nước đô thị thích ứng với biến đổi khí hậu, đô thị hóa nhanh và yêu cầu phát triển bền vững.

- Thứ tư, thúc đẩy mô hình cấp nước thông minh và xu hướng đô thị thông minh: Chuyển đổi số trong quản lý cấp nước là một hợp phần quan trọng của đô thị thông minh. Việc kết nối hệ thống cấp nước với các lĩnh vực khác như thoát nước, giao thông, năng lượng và môi trường sẽ tạo điều kiện hình thành hệ sinh thái quản lý đô thị tích hợp, nâng cao năng lực quản trị tổng thể của chính quyền đô thị [15].

- Thứ năm, tạo điều kiện thu hút đầu tư và hợp tác công - tư (PPP): Việc ứng dụng công nghệ số, chuẩn hóa dữ liệu và minh bạch hóa hoạt động quản lý giúp tăng tính hấp dẫn của ngành cấp nước đối với các nhà đầu tư, doanh nghiệp công nghệ và đối tác quốc tế. Đây là cơ hội để huy động nguồn lực xã hội, thúc đẩy hợp tác công - tư và chuyển giao công nghệ trong phát triển hạ tầng cấp nước hiện đại [15].

- Thứ sáu, tạo điều kiện và tăng cường công tác đào tạo: các cơ sở đào tạo phải tự nâng cao chất lượng đào tạo, đầu tư cơ sở vật chất, phát triển đội ngũ giảng viên, chuyên gia, các nhà khoa học trong lĩnh vực cấp nước thích ứng với đòi hỏi của xã hội về chất lượng nguồn nhân lực trong kỷ nguyên chuyển đổi số.

4.2. Thách thức trong chuyển đổi số quản lý cấp nước đô thị

Mặc dù chuyển đổi số mang lại nhiều lợi ích rõ rệt, quá trình triển khai trong lĩnh vực cấp nước đô thị tại Việt Nam hiện nay vẫn đang đối mặt với nhiều thách thức mang tính hệ thống, kỹ thuật và quản trị, bao gồm:

- Thứ nhất, hạn chế về hạ tầng kỹ thuật và dữ liệu nền tảng: Phần lớn hệ thống cấp nước đô thị ở Việt Nam được xây dựng từ nhiều giai đoạn khác nhau, thiếu đồng bộ về công nghệ và tiêu chuẩn kỹ thuật. Dữ liệu mạng lưới (bản đồ đường ống, van, trạm bơm, đồng hồ) còn phân tán, thiếu cập nhật hoặc chưa được số hóa đầy đủ, gây khó khăn cho việc tích hợp vào các nền tảng số như GIS, SCADA hay hệ thống quản lý tài sản (Asset Management). Điều này làm giảm hiệu quả của các ứng dụng phân tích dữ liệu và ra quyết định thông minh [2], [3].

- Thứ hai, chi phí đầu tư ban đầu lớn, khó khăn về tài chính: Chuyển đổi số trong quản lý cấp nước đòi hỏi nguồn vốn đáng kể cho việc đầu tư hạ tầng CNTT, thiết bị IoT, trung tâm dữ liệu, phần mềm chuyên ngành và đào tạo nhân lực. Đối với nhiều doanh nghiệp cấp nước địa phương, đặc biệt tại các đô thị vừa và nhỏ, khả năng cân đối tài chính còn hạn chế, trong khi cơ chế giá nước chưa phản ánh đầy đủ chi phí đầu tư cho công nghệ hiện đại [4].

- Thứ ba, khó khăn về nguồn nhân lực: Nguồn nhân lực trong ngành cấp nước truyền thống chủ yếu có thế mạnh về kỹ thuật công trình và vận hành cơ học, trong khi chuyển đổi số đòi hỏi kiến thức liên ngành về công nghệ thông tin, khoa học dữ liệu, tự động hóa và an ninh mạng. Việc thiếu đội ngũ cán bộ có khả năng phân tích dữ liệu, vận hành hệ thống số và khai thác công nghệ mới là một rào cản lớn trong quá trình triển khai.

- Thứ tư, thách thức về quản trị, thể chế và an toàn thông tin: Khung pháp lý và tiêu chuẩn kỹ thuật cho cấp nước thông minh, quản lý dữ liệu lớn và chia sẻ dữ liệu liên ngành hiện vẫn đang trong quá trình hoàn thiện. Bên cạnh đó, việc thu thập và lưu trữ dữ liệu số quy mô lớn cũng đặt ra yêu cầu cao về bảo mật, an toàn thông tin và quyền riêng tư của người sử dụng dịch vụ, trong khi năng lực quản trị rủi ro an ninh mạng của nhiều đơn vị cấp nước còn hạn chế [1].

5. ĐỊNH HƯỚNG VÀ GIẢI PHÁP QUẢN LÝ CẤP NƯỚC ĐÔ THỊ TRONG KỶ NGUYÊN CHUYỂN ĐỔI SỐ TẠI VIỆT NAM

Trong bối cảnh chuyển đổi số quốc gia và phát triển đô thị thông minh, quản lý cấp nước đô thị cần được định hướng theo hướng hiện đại, tích hợp và bền vững. Các định hướng và giải pháp chủ yếu bao gồm:

5.1. Định hướng chiến lược phát triển quản lý cấp nước số

- Phát triển hệ thống cấp nước thông minh: Chuyển từ mô hình quản lý truyền thống sang mô hình quản lý thông minh, trong đó toàn bộ chuỗi giá trị cấp nước được số hóa và kết nối đồng bộ.

- Quản lý tổng hợp và liên ngành: Kết nối quản lý cấp nước với các lĩnh vực liên quan như thoát nước, môi trường, năng lượng và quy hoạch đô thị nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên.

- Lấy dữ liệu làm nền tảng ra quyết định: Xây dựng văn hóa quản lý dựa trên dữ liệu (data-driven management), giảm phụ thuộc vào kinh nghiệm chủ quan.

- Hướng tới phát triển bền vững và thích ứng biến đổi khí hậu: Ứng dụng công nghệ số để tăng khả năng dự báo, chủ động ứng phó với hạn hán, xâm nhập mặn và các sự cố môi trường.

5.2. Hoàn thiện thể chế, chính sách và tiêu chuẩn kỹ thuật [15]

- Ban hành khung pháp lý cho cấp nước thông minh và chuyển đổi số ngành nước, bao gồm tiêu chuẩn dữ liệu, an toàn thông tin và chia sẻ dữ liệu.

- Cập nhật, bổ sung các quy chuẩn - tiêu chuẩn kỹ thuật liên quan đến đồng hồ nước thông minh, cảm biến chất lượng nước, SCADA, GIS và nền tảng quản lý số.

- Xây dựng cơ chế khuyến khích đầu tư xã hội hóa và hợp tác công - tư (PPP) trong lĩnh vực cấp nước số.

5.3. Đầu tư hạ tầng công nghệ và nền tảng dữ liệu

- Xây dựng nền tảng dữ liệu tập trung ngành cấp nước, tích hợp dữ liệu từ sản xuất, truyền tải, phân phối đến tiêu thụ nước.

- Triển khai đồng bộ các hệ thống SCADA, GIS, CMIS và tiến tới tích hợp trên một nền tảng quản lý thống nhất.

- Ứng dụng điện toán đám mây nhằm nâng cao khả năng lưu trữ, chia sẻ và bảo mật dữ liệu.

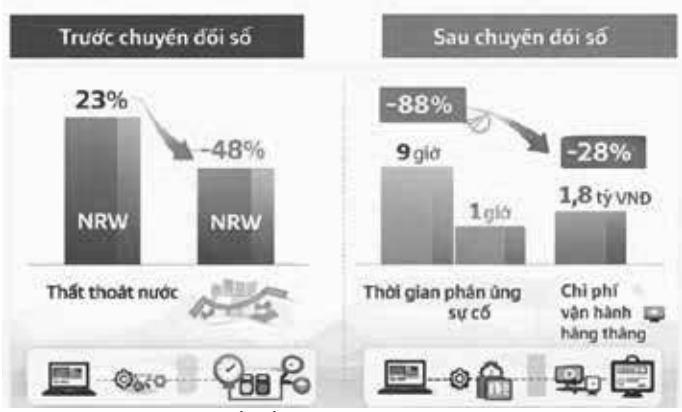
5.4. Ứng dụng công nghệ số trong vận hành và quản lý

- Áp dụng IoT và cảm biến thông minh để giám sát áp lực, lưu lượng, chất lượng nước theo thời gian thực.
- Sử dụng AI và mô hình dự báo để tối ưu hóa vận hành trạm bơm, giảm tiêu thụ năng lượng và chi phí vận hành.
- Phát triển các mô hình bảo trì dự báo, thay thế bảo trì phản ứng truyền thống nhằm nâng cao độ tin cậy của hệ thống.

5.5. Giảm thất thoát, thất thu nước bằng giải pháp số

Thất thoát - thất thu nước (Non-Revenue Water - NRW) là một trong những thách thức lớn nhất đối với các hệ thống cấp nước đô thị, đặc biệt tại các quốc gia đang phát triển như Việt Nam [8], [14]. NRW không chỉ gây tổn thất tài chính cho doanh nghiệp cấp nước mà còn làm suy giảm hiệu quả sử dụng tài nguyên nước, tăng chi phí sản xuất và tác động tiêu cực đến tính bền vững của hệ thống. Trong bối cảnh chuyển đổi số, việc ứng dụng các giải pháp công nghệ số đang trở thành xu hướng chủ đạo nhằm kiểm soát, giảm thiểu và tiến tới quản lý hiệu quả thất thoát, thất thu nước:

- Thiết lập DMA (District Metered Area) kết hợp phân tích dữ liệu để khoanh vùng và xử lý rò rỉ hiệu quả.
- Ứng dụng đồng hồ nước thông minh và phân tích hành vi tiêu thụ nhằm phát hiện gian lận và thất thu.
- Xây dựng hệ thống cảnh báo sớm rò rỉ và sự cố trên mạng lưới phân phối.



Hình 2. Tác động của chuyển đổi số tới tỷ lệ thất thoát nước và hiệu quả quản lý, vận hành [8], [9], [12]

5.6. Phát triển nguồn nhân lực và năng lực quản trị số

- Đào tạo, bồi dưỡng đội ngũ cán bộ kỹ thuật và quản lý về công nghệ số, phân tích dữ liệu và an ninh mạng.
- Khuyến khích hình thành đội ngũ chuyên gia liên ngành (nước - CNTT - dữ liệu - môi trường).
- Đổi mới mô hình quản trị doanh nghiệp cấp nước theo hướng linh hoạt, minh bạch và số hóa.
- Điều chỉnh chương trình đào tạo kỹ sư Cấp thoát nước, đầu tư cơ sở vật chất (các phòng thí nghiệm, mô hình, phần mềm, phần cứng phù hợp) tại các cơ sở đào tạo.

5.7. Tăng cường dịch vụ khách hàng và sự tham gia của cộng đồng

- Phát triển dịch vụ khách hàng số như hóa đơn điện tử, ứng dụng di động, cổng thông tin trực tuyến.
- Nâng cao tính minh bạch thông tin về chất lượng nước, giá nước và dịch vụ.
- Khuyến khích người dân tham gia giám sát và sử dụng nước tiết kiệm thông qua các nền tảng số.

5.8. Hợp tác quốc tế và nghiên cứu - đổi mới sáng tạo

- Tăng cường hợp tác với các tổ chức quốc tế, doanh nghiệp công nghệ và các đô thị tiên tiến.
- Thúc đẩy nghiên cứu, thử nghiệm và nhân rộng các mô hình Digital Water phù hợp với điều kiện Việt Nam.
- Khuyến khích đổi mới sáng tạo và ứng dụng các công nghệ mới như digital twin trong quản lý cấp nước.

6. KẾT LUẬN

Quản lý cấp nước đô thị trong kỷ nguyên chuyển đổi số là xu hướng tất yếu nhằm đáp ứng yêu cầu phát triển bền vững và nâng cao chất lượng cuộc sống đô thị. Việc ứng dụng công nghệ số không chỉ giúp tối ưu hóa vận hành mà còn tạo nền tảng cho hệ thống cấp nước thông minh, linh hoạt và thích ứng với các thách thức trong tương lai. Đối với Việt Nam, đây vừa là thách thức, vừa là cơ hội để hiện đại hóa ngành cấp nước và hội nhập với xu thế phát triển toàn cầu. Các định hướng chiến lược và giải pháp đề xuất sẽ giúp các cơ quan quản lý nhà nước từ Trung ương đến địa phương, doanh nghiệp và các đơn vị áp dụng nhằm nâng cao hiệu quả quản lý cấp nước đô thị trong thời gian tới, đồng thời đặt nền móng cho các nghiên cứu tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Xây dựng, Định hướng phát triển cấp nước đô thị và khu công nghiệp Việt Nam đến năm 2030, tầm nhìn 2050, Hà Nội, 2021.

[2] World Bank, Vietnam Urban Water Supply: Challenges and Opportunities, Washington D.C., 2019.

[3] International Water Association (IWA), Reducing Non-Revenue Water in Developing Countries, London, 2018.

[4] Xu, X., Chen, Y., "Smart Water Systems and Digital Transformation", Water Research, Vol. 184, pp. 1-12, 2020.

[5] OECD, Digital Transformation in the Water Sector, OECD Publishing, Paris, 2021.

[6] PUB Singapore, Smart Water Grid Programme Overview, Singapore, 2020.

[7] Tortajada, C., "Water management in Singapore", International Journal of Water Resources Development, 37(2), pp. 1-15, 2021.

[8] Alegre, H., Baptista, J.M., Performance Indicators for Water Supply Services, IWA Publishing, 2017.

[9] Pedrozo-Acuña, A. et al., "Digital twins in water distribution systems", Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 2020.

[10] Thủ tướng Chính phủ, Quyết định số 749/QĐ-TTg phê duyệt Chương trình Chuyển đổi số quốc gia, Hà Nội, 2020.

[11] Bộ Thông tin và Truyền thông, Chiến lược phát triển đô thị thông minh Việt Nam, Hà Nội, 2022.

[12] Tổng Công ty Cấp nước Sài Gòn (SAWACO), Báo cáo chuyển đổi số và quản lý cấp nước thông minh, TP.HCM, 2023.

[13] Menapace, A., Righetti, M., "AI-based optimization for urban water supply", Water, MDPI, 14(3), 2022.

[14] Lambert, A., "International Best Practices in NRW Management", Water Science & Technology: Water Supply, IWA, 2019.

[15] Hội Cấp thoát nước Việt Nam (VWSA), Hội thảo chuyên đề "Ngành Nước Việt Nam trong kỷ nguyên mới: Thách thức và cơ hội", 2025.

■Ngày nhận bài: 25/02/2026 ■Ngày sửa bài: 04/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 12/3/2026

Định hướng chuyển đổi số trong đánh giá chất lượng vận hành giao thông công cộng tại TP Hà Nội

Directions for Digital Transformation in the Assessment of public transport service quality in Hanoi city

> **THS NGUYỄN MẠNH HÙNG*, THS LÊ VĂN CHÈ**
Khoa KTHT&MTĐT, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
*Email: hungnm@hau.edu.vn

TÓM TẮT

Chuyển đổi số trong đánh giá chất lượng vận hành giao thông công cộng (GTCC) là xu hướng tất yếu nhằm nâng cao hiệu quả quản lý và chất lượng dịch vụ trong bối cảnh đô thị hóa nhanh. Tại Hà Nội, công tác đánh giá chất lượng vận hành còn nhiều hạn chế do dữ liệu phân tán, thiếu chuẩn hóa và chưa theo thời gian thực. Bài báo phân tích thực trạng và công tác đánh giá chất lượng dịch vụ GTCC tại Hà Nội, đồng thời làm rõ những tồn tại trong ứng dụng công nghệ số. Trên cơ sở tổng quan và kinh nghiệm quốc tế, nghiên cứu làm rõ vai trò của dữ liệu thời gian thực, hệ thống vé điện tử và trí tuệ nhân tạo (AI) trong nâng cao chất lượng vận hành, từ đó đề xuất khung quản lý và đánh giá chất lượng GTCC theo hướng chuyển đổi số, gồm các nội dung chính: xây dựng hạ tầng dữ liệu tập trung; ứng dụng phân tích thông minh và AI; hiện đại hóa hệ thống vé; và chuyển đổi sang mô hình quản trị dựa trên hiệu suất. Kết quả nghiên cứu góp phần cung cấp cơ sở khoa học cho việc định hướng chuyển đổi số trong GTCC tại Hà Nội.

Từ khóa: Chuyển đổi số; giao thông công cộng; đánh giá chất lượng dịch vụ; dữ liệu lớn; hệ thống giao thông thông minh.

ABSTRACT

Digital transformation in the evaluation of public transport (PT) operational quality is an inevitable trend aimed at enhancing management efficiency and service quality in the context of rapid urbanization. In Hanoi, the assessment of operational quality remains constrained by fragmented data, a lack of standardization, and the absence of real-time information. This paper analyzes the current state of PT service quality evaluation in Hanoi and identifies existing limitations in the application of digital technologies. Based on a review of theoretical frameworks and international practices, the study clarifies the role of real-time data, electronic ticketing systems, and artificial intelligence (AI) in improving operational quality. Accordingly, it proposes a digitally oriented framework for PT quality management and evaluation, including key components such as the development of a centralized data infrastructure, the application of intelligent analytics and AI, the modernization of ticketing systems, and the transition toward performance-based governance. The research findings provide a scientific basis for guiding digital transformation in public transport in Hanoi.

Keywords: Digital transformation; public transport; service quality assessment; big data; smart transport systems (STS).

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

GTCC đóng vai trò quan trọng trong việc phát triển đô thị bền vững. Trong bối cảnh các đô thị lớn phải đối mặt với sự gia tăng nhanh chóng của phương tiện cá nhân, GTCC không chỉ là giải pháp kỹ thuật mà còn là công cụ chính sách mang tính chiến lược nhằm định hướng hành vi đi lại của người dân và tổ chức lại không gian đô thị theo hướng hiệu quả hơn [1].

Hà Nội là một đô thị đặc biệt với mật độ dân cư cao, cấu trúc không gian phức tạp và quỹ đất dành cho giao thông hạn chế. Trong nhiều năm qua, hệ thống GTCC, đặc biệt là xe buýt, đã đóng vai trò quan trọng trong việc đáp ứng nhu cầu đi lại của người dân. Tuy nhiên, thị phần GTCC vẫn ở mức thấp, trong khi tình trạng ùn tắc, ô nhiễm môi trường ngày càng gia tăng [2]. Một trong những nguyên nhân cốt lõi là chất lượng dịch vụ GTCC chưa đủ hấp dẫn để cạnh tranh với phương tiện cá nhân, đặc biệt dưới góc nhìn và trải nghiệm thực tế của hành khách.

Những năm gần đây, Hà Nội đã từng bước hoàn thiện khung thể chế nhằm quản lý và nâng cao chất lượng dịch vụ vận tải hành khách công cộng (VTHKCC) bằng xe buýt. Đáng chú ý, Quyết định số 5241/QĐ-UBND ngày 14/12/2021 của UBND TP Hà Nội đã ban

hành Bộ tiêu chí quản lý chất lượng dịch vụ VTHKCC bằng xe buýt, tạo cơ sở pháp lý quan trọng cho việc đánh giá chất lượng dịch vụ dựa trên các chỉ tiêu cụ thể và có tính định lượng [3]. Bộ tiêu chí này yêu cầu cơ quan quản lý và doanh nghiệp vận tải thực hiện đánh giá chất lượng mạng lưới tuyến, tuyến và lượt vận chuyển, đồng thời sử dụng dữ liệu và các thiết bị công nghệ hỗ trợ trong quá trình đánh giá.

Mặc dù vậy, trên thực tế, việc triển khai đánh giá chất lượng dịch vụ GTCC tại Hà Nội vẫn chủ yếu dựa trên báo cáo định kỳ, điều tra bảng hỏi và các chỉ tiêu mang tính hậu kiểm. Dữ liệu vận hành theo thời gian thực chưa được thu thập và khai thác một cách hệ thống, trong khi các công nghệ phân tích dữ liệu lớn và AI hầu như chưa được áp dụng trong quản lý và đánh giá chất lượng. Điều này dẫn đến khoảng cách đáng kể giữa khung pháp lý và thực tiễn quản lý vận hành GTCC.

Trong bối cảnh chuyển đổi số, nhiều đô thị trên thế giới đã chuyển từ mô hình quản lý truyền thống sang mô hình GTCC thông minh, trong đó dữ liệu thời gian thực, các nền tảng số và AI đóng vai trò trung tâm trong giám sát, điều hành và nâng cao chất lượng dịch vụ [4], [5]. So với xu hướng này, hệ thống GTCC tại Hà Nội vẫn đang ở giai đoạn khởi đầu của quá trình chuyển đổi số.

Xuất phát từ thực tiễn đó, bài báo nhằm (i) phân tích chất lượng dịch vụ GTCC tại Hà Nội dưới góc độ hành khách và thực trạng chuyển đổi số trong GTCC; (ii) tổng hợp các bài học kinh nghiệm thành công trên thế giới về chuyển đổi số trong GTCC; và (iii) đề xuất khung quản lý và đánh giá chất lượng GTCC theo hướng chuyển đổi số làm nền tảng cho phát triển hệ thống GTCC thông minh tại Hà Nội.

2. THỰC TRẠNG ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG VẬN HÀNH GTCC TẠI HÀ NỘI

Hệ thống GTCC tại Hà Nội hiện có 2 tuyến đường sắt đô thị và 153 tuyến xe buýt, bao gồm các tuyến buýt thường, buýt trợ giá và tuyến buýt nhanh BRT. Mạng lưới xe buýt đã tiếp cận 513 trong tổng số 579 xã, phường, (đạt 88,6%) và cung cấp khả năng tiếp cận tốt tại khu vực nội đô. Mật độ mạng lưới đạt khoảng 5,6 km/km^2 trong khu vực nội thành và khoảng 0,6 km/km^2 cho toàn địa bàn thành phố [13].

Trong cơ cấu phương tiện, toàn mạng GTCC có 2.174 xe đang hoạt động. Tỷ lệ phương tiện sử dụng năng lượng sạch đạt 18,5%, gồm 139 xe buýt CNG và 209 xe buýt điện, đây là tín hiệu tích cực góp phần thực hiện mục tiêu giảm phát thải. Tuyến BRT vẫn là tuyến buýt có năng lực vận chuyển cao, nhưng hiệu quả chưa tương xứng do hạn chế về làn ưu tiên và tổ chức giao thông trên toàn tuyến [13].

Về ứng dụng công nghệ, Hà Nội đã triển khai nhiều giải pháp hỗ trợ vận hành và quản lý GTCC. Tất cả phương tiện được trang bị thiết bị GPS phục vụ giám sát lộ trình, tốc độ, thời gian dừng đỗ và mức độ chấp hành biểu đồ chạy xe. Các ứng dụng như BusMap Hà Nội, Timbuyt và nền tảng VinBus cung cấp thông tin thời gian thực cho hành khách, góp phần tăng tính minh bạch của hệ thống. Dù vậy, hệ thống vé điện tử mới chỉ ở mức thí điểm, chưa liên thông giữa buýt - BRT - đường sắt đô thị, dẫn đến dữ liệu hành trình bị phân mảnh và khó khai thác để mô phỏng nhu cầu, tối ưu mạng lưới hoặc phân tích luồng hành khách theo chuỗi chuyến đi.

Hình 1. Sơ đồ các tuyến buýt Hà Nội [14]

Công tác đánh giá chất lượng dịch vụ xe buýt đã được chuẩn hóa bằng "Bộ tiêu chí quản lý chất lượng dịch vụ VTHKCC bằng xe buýt" do UBND TP Hà Nội ban hành [3]. Bộ tiêu chí bao phủ các nội dung về mạng lưới tuyến, tuyến vận tải, lượt vận chuyển và doanh nghiệp cung cấp dịch vụ; mỗi tiêu chí đều được lượng hóa bằng các chỉ số cụ thể và yêu cầu kỹ thuật rõ ràng (Bảng 1). Tuy nhiên, việc ứng dụng công nghệ trong quản lý, điều hành phương tiện GTCC chỉ được coi là 1 chỉ số trong nhóm chỉ tiêu đánh giá chất lượng phương tiện vận hành [3].

Bảng 1. Chỉ tiêu đánh giá chất lượng dịch vụ VTHKCC bằng xe buýt [3]

TT	Tiêu chí	Chỉ tiêu
1	Chất lượng dịch vụ mạng lưới tuyến	Hệ số tuyến Mức độ tiếp cận dịch vụ buýt Khoảng cách bình quân giữa các điểm dừng trong nội thành Khoảng cách bình quân giữa các điểm dừng ở ngoại thành Chất lượng điểm dừng, nhà chờ, điểm đầu cuối Khả năng tiếp cận của người khuyết tật Tỷ lệ điểm dừng có nhà chờ / tổng số điểm dừng Tỷ lệ đáp ứng nhu cầu đi lại Chất lượng dịch vụ tuyến Tỷ lệ hành khách sử dụng vé tháng
2	Chất lượng dịch vụ tuyến	Nhóm chỉ tiêu chất lượng phương tiện vận hành Nhóm chỉ tiêu chất lượng lao động vận hành

		Nhóm chỉ tiêu hiệu quả khai thác tuyến Nhóm chỉ tiêu chất lượng dịch vụ lượt vận chuyển
3	Chất lượng dịch vụ lượt vận chuyển	Chất lượng phương tiện vận hành của lượt xe Chất lượng lao động vận hành của lượt xe Chất lượng vận hành theo lộ trình và điểm dừng đỗ Chất lượng vận hành theo thời gian biểu chạy xe
4	Xếp hạng doanh nghiệp	Chất lượng vận hành tuyến của doanh nghiệp Số lượng tuyến vận hành của doanh nghiệp

Bảng 2. Các yếu tố liên quan đến chất lượng dịch vụ GTCC mà hành khách quan tâm

TT	Nhóm yếu tố	Yếu tố cụ thể
1	Thời gian đi lại	- Thời gian đi lại bằng GTCC - Thời gian chuyển tuyến
2	Hiệu suất hoạt động	- Khoảng cách tiếp cận GTCC - Tần suất phục vụ của GTCC - Thời gian phục vụ của GTCC
3	Cách thức phục vụ	- Độ tin cậy của GTCC - Tiện nghi của GTCC - Điều kiện tiếp cận GTCC - Sự thân thiện của lái xe
4	An toàn và an ninh	- Tỷ lệ tai nạn của phương tiện GTCC - Tỷ lệ tội phạm - Tỷ lệ tai nạn của hành khách - Các thiết bị đảm bảo an toàn
5	Bảo trì GTCC	- Điều kiện hạ tầng GTCC - Mức độ sạch sẽ của phương tiện

Các nghiên cứu và khảo sát cho thấy chất lượng dịch vụ chịu ảnh hưởng bởi nhiều yếu tố thuộc nhóm kỹ thuật và nhóm trải nghiệm người dùng. Dưới góc nhìn hành khách, các yếu tố như thời gian chờ, độ tin cậy, an toàn, tiện nghi, vệ sinh và tiếp cận thông tin đóng vai trò đặc biệt quan trọng [6], [7]. Bảng 2 trình bày các nhóm yếu tố được hành khách ưu tiên khi đánh giá chất lượng GTCC [8], [9].

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này đã sử dụng phương pháp tiếp cận hỗn hợp, kết hợp phân tích tài liệu, văn bản pháp lý, tổng hợp cơ sở lý thuyết và kinh nghiệm quốc tế, cùng với phỏng vấn cán bộ quản lý GTCC và lái xe buýt để làm rõ thực trạng vận hành và mức độ ứng dụng công nghệ số (Hình 2). Nghiên cứu sử dụng hai bộ phiếu khảo sát dành cho lái xe buýt và nhà quản lý nhằm thu thập thông tin về mức độ trang bị công nghệ, thực trạng vận hành và mức độ trưởng thành số của hệ thống GTCC. Nội dung khảo sát tập trung vào việc sử dụng các thiết bị giám sát, chất lượng vận hành, mức độ tự động hóa điều hành, khả năng khai thác dữ liệu và các rào cản đối với chuyển đổi số.

a) Không gian trên tuyến xe buýt BRT

b) Nhân viên lái xe buýt đang trả lời phỏng vấn

Hình 2. Khảo sát không gian trên xe buýt và phỏng vấn lái xe buýt về chuyển đổi số trong GTCC tại Hà Nội

Nghiên cứu đã phỏng vấn độc lập 30 lái xe buýt và 5 người quản lý. Kết quả khảo sát cho thấy chất lượng dịch vụ GTCC tại Hà Nội còn nhiều hạn chế. Về độ tin cậy và thời gian chuyến đi, các nghiên cứu gần đây cho thấy độ tin cậy của xe buýt ở Hà Nội là thấp. Hành khách thường xuyên phải đối mặt với tình trạng chậm xe vào giờ cao điểm do ùn tắc giao thông. Vì vậy, thời gian của một chuyến đi bằng GTCC hiện chưa được sử dụng như chỉ tiêu đánh giá hiệu quả lái xe và đơn vị vận hành, do thiếu công cụ phân tích nguyên nhân.

Về chỉ tiêu an toàn và an ninh, mặc dù phần lớn xe buýt đã được trang bị camera hành trình và camera trong xe, song dữ liệu chủ yếu

được sử dụng cho xử lý sau sự cố, chưa hỗ trợ cho việc quản lý và can thiệp theo thời gian thực.

Độ ồn trên xe, đặc biệt đối với các xe đời cũ chạy dầu, thường vượt quá ngưỡng gây mệt mỏi cho lái xe và hành khách, đồng thời ảnh hưởng tiêu cực đến chất lượng trải nghiệm. Tuy nhiên, hiện nay độ ồn chưa được cụ thể hóa thành tiêu chí đánh giá chất lượng dịch vụ.

Về bảo trì GTCC, điều kiện hạ tầng phục vụ, đặc biệt tại các điểm dừng còn nhiều hạn chế. Công tác vệ sinh và việc duy trì chất lượng vệ sinh trên xe chủ yếu phụ thuộc vào ý thức và trách nhiệm của phụ xe, trong khi chưa có hệ thống giám sát độc lập hoặc tự động. Điều này dẫn đến sự không đồng đều về chất lượng dịch vụ giữa các tuyến và thời điểm khác nhau.

Ngoài ra, nhiều phương tiện, đặc biệt các phương tiện cũ, chưa được trang bị đầy đủ thiết bị hỗ trợ người khuyết tật, làm giảm khả năng tiếp cận của một bộ phận hành khách. Hệ thống thu phí hiện nay vẫn chủ yếu dựa trên vé giấy hoặc vé lượt, chưa áp dụng rộng rãi vé điện tử và chưa tính cước theo khoảng cách, dẫn đến việc thiếu dữ liệu chi tiết về hành vi và nhu cầu đi lại của hành khách.

Tổng hợp các phân tích cho thấy Hà Nội đã xây dựng được nền tảng quan trọng cho chuyển đổi số trong GTCC, nhưng mức độ ứng dụng dữ liệu và công nghệ trong đánh giá chất lượng vẫn còn hạn chế. Các hệ thống công nghệ đã có nhưng chưa liên kết; dữ liệu thu thập nhiều nhưng phân tán giữa các đơn vị; quy trình đánh giá còn thiên về hậu kiểm, thiếu các công cụ phân tích dữ liệu lớn, trực quan hóa thông tin hoặc dự báo dựa trên AI. Do vậy, yêu cầu đặt ra là cần chuyển từ mô hình đánh giá truyền thống sang mô hình đánh giá động dựa trên dữ liệu thời gian thực. Đây là xu hướng tất yếu nhằm nâng cao tính minh bạch, độ tin cậy và hiệu quả vận hành của GTCC, góp phần xây dựng một hệ thống giao thông công cộng thông minh, hiện đại và bền vững trong giai đoạn tới.

3. NHỮNG BÀI HỌC QUỐC TẾ

Trong hai thập kỷ gần đây, chuyển đổi số đã trở thành xu hướng chủ đạo trong quản lý và phát triển hệ thống GTCC tại nhiều đô thị trên thế giới. Thực tiễn cho thấy, chuyển đổi số không chỉ dừng lại ở việc ứng dụng công nghệ mà còn là quá trình tái cấu trúc phương thức quản lý dựa trên dữ liệu, hướng tới nâng cao hiệu quả vận hành và trải nghiệm hành khách. Đáng chú ý, không chỉ các quốc gia phát triển mà nhiều đô thị tại các nước đang phát triển cũng đã đạt được những kết quả tích cực, qua đó cung cấp các bài học có giá trị tham khảo cho Hà Nội.

Tại Mexico, chuyển đổi số được triển khai theo hướng tích hợp hệ thống và chuẩn hóa dữ liệu. Thành phố Mexico đã xây dựng hệ thống thẻ thanh toán thống nhất (Tarjeta MI) cho nhiều loại hình vận tải, tạo nền tảng dữ liệu liên thông và thuận tiện cho người sử dụng. Đồng thời, việc hợp nhất trung tâm điều hành và áp dụng tiêu chuẩn dữ liệu mở đã nâng cao khả năng chia sẻ thông tin và quản lý tập trung. Nhờ ứng dụng phân tích dữ liệu trong quá trình hiện đại hóa tuyến Metro Line 1, thành phố đã giảm khoảng 40% tổng số km vận hành của xe buýt nhưng vẫn duy trì chất lượng dịch vụ, phản ánh hiệu quả của quản lý dựa trên dữ liệu [12]. Tại Mérida, hệ thống GTCC được số hóa toàn diện thông qua nền tảng Va y Ven, trong đó các phương tiện được kết nối và vận hành dựa trên dữ liệu thời gian thực. Mô hình thanh toán theo km kết hợp với ứng dụng di động và chatbot giúp nâng cao hiệu quả quản lý và trải nghiệm hành khách. Kết quả cho thấy lượng phát thải giảm khoảng 29,3% trên mỗi hành khách, trong khi lượng hành khách tăng gần 19%.

Ở chiều ngược lại, Monterrey đang ở giai đoạn đầu của quá trình chuyển đổi số với việc triển khai trung tâm quản lý và các hình thức thanh toán điện tử như vé QR. Mặc dù còn hạn chế về phối hợp thể chế, các chính sách như Luật di chuyển bền vững năm 2020 đã tạo nền tảng quan trọng cho quá trình chuyển đổi số dài hạn [12].

Hình 3. Thẻ Tarjeta MI cho hệ thống thanh toán vé thống nhất ở Mexico

Tại Vương quốc Anh, chuyển đổi số GTCC tập trung vào nâng cao trải nghiệm người dùng và tích hợp dịch vụ trên nền tảng số. Một trong những cải tiến quan trọng là việc hợp nhất chức năng lập kế hoạch hành trình và thanh toán vé vào một ứng dụng duy nhất, thay thế cho mô hình sử dụng nhiều ứng dụng riêng biệt trước đây. Các ứng dụng hiện đại còn cung cấp thông tin thời gian thực, hiển thị tình trạng chỗ trống và hỗ trợ người khuyết tật. Đặc biệt, hệ thống thanh toán không tiếp xúc (contactless) do Transport for London triển khai cho phép tự động tính toán mức cước tối ưu theo hành trình, góp phần nâng cao tính tiện lợi và minh bạch trong dịch vụ [15].

Hình 4. Ứng dụng di động The First Bus tại Vương Quốc Anh [17]

Tại Ấn Độ, chuyển đổi số trong GTCC gắn liền với mục tiêu giảm ùn tắc và nâng cao an toàn giao thông. Trước áp lực gia tăng phương tiện cá nhân và tình trạng ùn tắc nghiêm trọng, quốc gia này đã đẩy mạnh triển khai các hệ thống giao thông thông minh (ITS), đặc biệt tại các nút giao quan trọng. Các công nghệ giám sát và phân tích video được sử dụng để phát hiện vi phạm và cảnh báo sự cố theo thời gian thực. Dự án "Safe and Secure Gujarat" là một ví dụ tiêu biểu, với việc xây dựng 35 trung tâm điều hành và kiểm soát tích hợp, cho phép kết nối dữ liệu giữa các cơ quan chức năng và hỗ trợ ra quyết định nhanh chóng, góp phần nâng cao hiệu quả quản lý và an toàn giao thông [16].

Tại Singapore, chuyển đổi số GTCC gắn với chiến lược Smart Mobility 2030, trong đó dữ liệu lớn và kết nối phương tiện đóng vai trò trung tâm. Các giải pháp như hệ thống cảnh báo video thời gian thực cho phép truyền dữ liệu trực tiếp từ phương tiện về trung tâm điều hành khi xảy ra sự cố, hỗ trợ xử lý nhanh và nâng cao an toàn vận hành. Cách tiếp cận này thể hiện rõ xu hướng quản lý GTCC dựa trên dữ liệu và công nghệ thông minh [16].

Tổng hợp các kinh nghiệm quốc tế cho thấy, chuyển đổi số trong GTCC cần được triển khai theo lộ trình phù hợp, với các yếu tố cốt lõi gồm: xây dựng hạ tầng dữ liệu thống nhất, tích hợp hệ thống thanh toán và điều hành, ứng dụng phân tích dữ liệu và AI, đồng thời chuyển đổi mô hình quản lý sang tiếp cận dựa trên hiệu suất. Những bài học này là cơ sở quan trọng để đề xuất các giải pháp

chuyển đổi số phù hợp với điều kiện thực tiễn của Hà Nội trong giai đoạn tới.

4. ĐỀ XUẤT KHUNG QUẢN LÝ VÀ ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG GTCC THEO HƯỚNG CHUYỂN ĐỔI SỐ

Trên cơ sở phân tích thực trạng và các bài học quốc tế về chuyển đổi số trong GTCC, bài báo đề xuất lộ trình chuyển đổi số trong đánh giá chất lượng vận hành GTCC theo 4 bước, bảo đảm tính khả thi, phù hợp với điều kiện của Hà Nội.

Bước 1: Xây dựng hạ tầng dữ liệu tập trung

Trọng tâm của giai đoạn đầu là hình thành hạ tầng dữ liệu thống nhất cho toàn mạng lưới GTCC. Theo đó, cần xây dựng hệ thống thu thập và tích hợp dữ liệu tập trung từ các nguồn hiện có và sẽ triển khai trong tương lai, bao gồm thiết bị định vị GPS trên phương tiện, hệ thống camera hành trình và camera trong xe, các cảm biến môi trường (độ ồn, chất lượng không khí, rung lắc) cũng như dữ liệu vận hành từ trung tâm điều hành. Dữ liệu cần được chuẩn hóa theo một cấu trúc thống nhất, liên thông giữa các đơn vị vận hành và cơ quan quản lý nhà nước, làm cơ sở cho việc giám sát chất lượng dịch vụ theo thời gian thực. Đây là điều kiện nền tảng để chuyển từ đánh giá mang tính hậu kiểm sang quản lý chủ động dựa trên dữ liệu.

Bước 2: Ứng dụng phân tích thông minh và AI

Trên nền tảng hạ tầng dữ liệu đã được thiết lập, bước tiếp theo là ứng dụng các công cụ phân tích dữ liệu lớn và AI nhằm nâng cao năng lực đánh giá và quản lý chất lượng vận hành. AI có thể được sử dụng để phân tích hành vi lái xe, phát hiện các tình huống rủi ro về an toàn, đánh giá mức độ tuân thủ quy trình vận hành, đồng thời hỗ trợ dự báo ùn tắc và nguy cơ chậm xe trên các tuyến. Việc này cho phép cơ quan quản lý làm rõ các nguyên nhân khách quan và chủ quan ảnh hưởng đến chất lượng dịch vụ, qua đó xây dựng các chỉ số đánh giá công bằng và thực tế hơn so với phương thức đánh giá truyền thống.

Bước 3: Hiện đại hóa hệ thống thanh toán và thu thập dữ liệu hành khách

Hiện đại hóa hệ thống thu phí là một cấu phần quan trọng trong lộ trình chuyển đổi số GTCC. Bài báo đề xuất chuyển đổi hoàn toàn sang vé điện tử, tích hợp đa phương thức và áp dụng cơ chế tính cước theo khoảng cách đi lại. Giải pháp này không chỉ nâng cao tính tiện lợi và công bằng cho hành khách, mà còn tạo ra nguồn dữ liệu chi tiết về hành vi đi lại, nhu cầu sử dụng dịch vụ và mức độ hài lòng của người dùng. Dữ liệu từ hệ thống vé điện tử kết nối với dữ liệu vận hành, sẽ trở thành cơ sở quan trọng cho cá nhân hóa dịch vụ, điều chỉnh mạng lưới và nâng cao chất lượng phục vụ hành khách.

Bước 4: Chuyển đổi sang mô hình quản trị dựa trên hiệu suất

Bước cuối cùng trong lộ trình là chuyển dịch mô hình quản lý GTCC từ cách tiếp cận dựa trên đầu vào (số chuyến, số km vận hành) sang quản trị dựa trên đầu ra và hiệu suất thực tế của dịch vụ. Các chỉ tiêu chất lượng như độ tin cậy, an toàn, tiện nghi và mức độ hài lòng của hành khách cần được đo lường liên tục thông qua hệ thống dữ liệu số và sử dụng làm căn cứ cho đánh giá, xếp hạng dịch vụ.

5. KẾT LUẬN

Chuyển đổi số trong đánh giá chất lượng dịch vụ GTCC là yêu cầu tất yếu trong bối cảnh phát triển đô thị bền vững và hiện đại. Nghiên cứu cho thấy mặc dù Hà Nội đã có khung pháp lý tương đối đầy đủ, song việc triển khai trên thực tế vẫn còn hạn chế do thiếu dữ liệu thời gian thực và chưa ứng dụng AI trong quản lý.

Việc xây dựng hệ thống quản lý và đánh giá chất lượng GTCC dựa trên dữ liệu thời gian thực và công nghệ thông minh không chỉ giúp nâng cao hiệu quả vận hành, mà còn góp phần cải thiện trải nghiệm hành khách và tăng sức hấp dẫn của GTCC, tạo nền tảng cho phát triển hệ thống GTCC thông minh tại Hà Nội trong tương lai. Tuy nhiên, chuyển đổi số trong GTCC cần được triển khai theo lộ trình phù hợp với điều kiện kinh tế - xã hội của Hà Nội, bằng cách ưu tiên xây dựng nền tảng dữ liệu cơ bản, chuẩn hóa hệ thống vé và thông tin, sau đó từng bước ứng dụng các công cụ phân tích và AI trong quản lý và đánh giá chất lượng dịch vụ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Vũ Hồng Trường. Quản lý và phát triển vận tải hành khách công cộng đô thị. NXB Giao thông vận tải, 2013.

[2] Nguyễn Thị Hồng Mai. Nâng cao hiệu quả hoạt động của hệ thống vận tải hành khách công cộng trong đô thị. Luận án Tiến sĩ Kinh tế, Trường Đại học Kinh tế quốc dân, 2014.

[3] UBND TP Hà Nội. Quyết định số 5241/QĐ-UBND về Bộ tiêu chí quản lý chất lượng dịch vụ vận tải hành khách công cộng bằng xe buýt, 2021.

[4] European Committee for Standardization. EN 13816: Public passenger transport - service quality definition, targeting and measurement. CEN, 2002.

[5] UITP. Digitalisation in public transport: implementing predictive asset maintenance. International Association of Public Transport, 2020.

[6] A. Parasuraman, V. A. Zeithaml and L. Berry. A multiple-item scale for measuring consumer perceptions of service quality. SERVQUAL, no. 1, pp. 12-40, 1988.

[7] C. Grönroos. Service management and marketing: customer management in service competition. John Wiley & Sons, 2007.

[8] Nguyễn Mạnh Hùng. Nâng cao chất lượng phục vụ của hệ thống giao thông công cộng trên địa bàn Thành phố Hà Nội. Hội thảo Tăng cường quản lý phương tiện giao thông cá nhân Hà Nội, Sở Giao thông vận tải Hà Nội, 2016.

[9] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Transit capacity and quality of service manual. Transportation Research Board, 2013.

[10] Hoàng Thị Hồng Lê. Giải pháp nâng cao chất lượng dịch vụ vận tải HKCC bằng xe buýt tại Hà Nội. Tạp chí Xây dựng, 2015.

[11] European Committee for Standardization. EN 15140: public passenger transport - basic requirements and recommendations for systems that measure delivered service quality. CEN, 2006.

[12] Institute for Transportation and Development Policy. Digitalization in public transport: lessons from Mexico's cities. Internet: https://itdp.org/2025/07/11/digitalization-in-public-transport-lessons-from-mexicos-cities/, truy cập ngày 28/12/2025.

[13] Sở Xây dựng Hà Nội. Báo cáo tổng hợp đề án tổng thể giảm thiểu ùn tắc giao thông trên địa bàn TP Hà Nội giai đoạn 2025-2030 và những năm tiếp theo, 2025.

[14] Xe Buýt Hà Nội. Bản đồ mạng lưới tuyến xe buýt Hà Nội. Internet: https://xe-buyt.com/ban-do-xe-bus-ha-noi, truy cập ngày 28/12/2025.

[15] K. Mistry. Top 5 cases of digital transformation in transportation. Internet: https://www.futureplatforms.com/insights/top-5-cases-of-digital-transformation-in-transportation/, truy cập ngày 28/12/2025.

[16] Orange Business Services. Moving with the times: 4 countries digitally transforming their public transport. Internet: https://www.orange-business.com/en/magazine/moving-times-4-countries-digitally-transforming-their-public-transport, truy cập ngày 28/12/2025.

[17] K. Mistry. How First Bus' revolutionary app is keeping key workers and the UK moving. Internet: https://www.futureplatforms.com/insights/how-first-bus-revolutionary-app-is-keeping-key-workers-and-the-uk-moving, truy cập ngày 28/12/2025.

■Ngày nhận bài: 16/3/2026 ■Ngày sửa bài: 23/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 02/4/2026

Ứng dụng khung 3V của Ngân hàng Thế giới trong đánh giá tiềm năng TOD quanh các ga thuộc tuyến đường sắt đô thị số 2A Hà Nội

Assessing TOD development potential around Hanoi metro line 2A stations using the World Bank's 3V framework

> TS THÂN ĐÌNH VINH[1,*], THS ĐẶNG THỊ NGA[2], THS LÊ VĂN CHÈ[2]
[1]Trưởng Bộ môn, Khoa Đô thị, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
[2]Bộ môn Giao thông, Khoa Đô thị, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
[*]Email: thandinhvinh08@gmail.com

TÓM TẮT

Phát triển đô thị theo định hướng giao thông công cộng (TOD) đang trở thành ưu tiên tại Hà Nội. Nghiên cứu này ứng dụng khung 3V của Ngân hàng Thế giới gồm Giá trị Nút (Node), Giá trị Nơi chốn (Place) và Giá trị Tiềm năng Thị trường (Market) để đánh giá và phân hạng tiềm năng TOD quanh các ga tuyến đường sắt đô thị tuyến số 2A (Cát Linh - Hà Đông). Dữ liệu sử dụng gồm: (i) khảo sát 371 mẫu tại 12 ga về lựa chọn phương thức, tần suất sử dụng GTCC, khoảng cách tiếp cận và mức độ hài lòng/nhu cầu cải thiện; (ii) bộ dữ liệu đặc điểm không gian quanh ga (mật độ, hệ số sử dụng đất (FAR), điểm tiện ích (Points of Interest - POI), tương quan việc làm, dân cư) tổng hợp từ nguồn mở và tài liệu chuyên môn [3], [16]. Nghiên cứu áp dụng vùng ảnh hưởng dựa trên mạng lưới với tham số 400 m và 15 phút, sau đó chuẩn hóa min-max và tổng hợp chỉ số theo 3 trụ cột. Kết quả cho thấy điểm 3V giữa các ga khác biệt đáng kể; nhóm ga ưu tiên thường có Place và/hoặc Market nổi trội nhưng Node còn lệch pha và cần các chiến lược tái thiết, tăng cường kết nối và tăng mật độ để đồng bộ hóa 3V và hỗ trợ LVC [2]. Phân tích độ nhạy cho thấy thứ hạng tương đối ổn định khi thay đổi trọng số và phương pháp chuẩn hóa (Spearman $\rho \approx 0{,}93$-$1{,}00$). Nghiên cứu đề xuất quy trình đánh giá định lượng có khả năng tái lập, hỗ trợ ưu tiên can thiệp TOD quanh ga tuyến 2A trong bối cảnh pháp lý mới [26], [29].

Phát triển đô thị theo định hướng giao thông công cộng (TOD) đang trở thành ưu tiên tại Hà Nội. Nghiên cứu này ứng dụng khung 3V của Ngân hàng Thế giới, bao gồm Giá trị Nút (Node), Giá trị Nơi chốn (Place) và Giá trị Tiềm năng Thị trường (Market), để đánh giá và phân hạng tiềm năng TOD quanh các ga tuyến đường sắt đô thị số 2A (Cát Linh - Hà Đông). Dữ liệu sử dụng gồm: (i) khảo sát 371 mẫu tại 12 ga về lựa chọn phương thức di chuyển, tần suất sử dụng GTCC, khoảng cách tiếp cận và mức độ hài lòng/nhu cầu cải thiện; (ii) bộ dữ liệu đặc điểm không gian quanh ga (mật độ, hệ số sử dụng đất (FAR), các điểm tiện ích (Points of Interest - POI), tương quan giữa việc làm và dân cư) tổng hợp từ nguồn mở và tài liệu chuyên môn [3], [16].

Nghiên cứu áp dụng vùng ảnh hưởng dựa trên mạng lưới với bán kính 400 m và ngưỡng tiếp cận 15 phút, sau đó chuẩn hóa min-max và tổng hợp chỉ số theo ba trụ cột. Kết quả cho thấy điểm 3V giữa các ga khác biệt đáng kể; nhóm ga ưu tiên thường có Place và/hoặc Market nổi trội nhưng Node còn lệch pha và cần các chiến lược tái thiết, tăng cường kết nối và tăng mật độ để đồng bộ hóa 3V và hỗ trợ LVC [2]. Phân tích độ nhạy cho thấy thứ hạng tương đối ổn định khi thay đổi trọng số và phương pháp chuẩn hóa (Spearman $\rho \approx 0{,}93$-$1{,}00$). Nghiên cứu đề xuất quy trình đánh giá định lượng có khả năng tái lập, hỗ trợ ưu tiên can thiệp TOD quanh ga tuyến 2A trong bối cảnh pháp lý mới [26], [29].

Từ khóa: TOD; hệ số sử dụng đất; khung 3V; đường sắt đô thị; vùng ảnh hưởng dựa trên mạng lưới; xếp hạng; Hà Nội.

ABSTRACT

Transit-oriented development (TOD) is increasingly emerging as a policy priority in Hanoi. This study applies the World Bank's 3V framework-comprising Node Value, Place Value, and Market Potential Value-to assess and rank TOD potential around stations along Hanoi Metro Line 2A (Cat Linh-Ha Dong). The analysis is based on two sources of data: (i) a survey of 371 respondents conducted across 12 stations, covering mode choice,

frequency of public transport use, access distance, and levels of satisfaction as well as perceived needs for improvement; and (ii) a station-area spatial dataset compiled from open-access sources and technical documents [3], [16], including density, floor area ratio (FAR), points of interest (POIs), and the jobs-residents balance. Station catchment areas were delineated using a network-based approach with distance- and time-based thresholds of 400 m and 15 minutes, respectively. Indicators were then normalized using the min-max method and aggregated across the three 3V dimensions. The results indicate substantial variation in composite 3V scores across stations. Priority stations tend to exhibit relatively strong Place and/or Market performance, while Node performance remains comparatively misaligned, suggesting the need for redevelopment, enhanced connectivity, and density intensification to better align the three dimensions and support land value capture (LVC) [2]. Sensitivity analysis shows that station rankings remain relatively robust under alternative weighting and normalization schemes (Spearman's $\rho \approx 0.93$-1.00). The study proposes a replicable quantitative assessment framework to support the prioritization of TOD interventions around Line 2A stations within Hanoi's evolving legal and policy context [26], [29].

Keywords: TOD; FAR; 3V framework; metro; network-based catchment; station ranking; Hanoi.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh chóng tại các siêu đô thị châu Á, việc chuyển đổi từ phát triển dựa trên phương tiện cá nhân sang mô hình Phát triển đô thị theo định hướng giao thông công cộng (TOD) được xem là giải pháp then chốt để giải quyết ùn tắc và ô nhiễm môi trường. Tại Hà Nội, chiến lược này không chỉ dừng lại ở việc nghiên cứu mà đã trở thành nhiệm vụ chính trị trọng tâm, được nhấn mạnh trong Kết luận số 49-KL/TW của Bộ Chính trị [26], với mục tiêu hoàn thiện mạng lưới đường sắt đô thị (ĐSĐT) vào năm 2035. Tuy nhiên, thách thức lớn trong thập kỷ qua không chỉ nằm ở công nghệ, thi công, mà ở sự thiếu đồng bộ giữa quy hoạch giao thông và quy hoạch sử dụng đất, đặc biệt là các rào cản trong kiểm soát hệ số sử dụng đất (FAR) và cơ chế tạo nguồn lực tài chính cho hạ tầng.

Bước ngoặt về thể chế diễn ra giai đoạn 2024 - 2025 khi hệ thống pháp lý mới dần hoàn thiện. Luật Thủ đô số 39/2024/QH15 [27] cho phép áp dụng cơ chế đặc thù điều chỉnh quy hoạch cục bộ, gia tăng mật độ xây dựng và hệ số FAR trong vùng phụ cận các ga ĐSĐT. Cùng với Luật Đất đai số 31/2024/QH15 [28] và Điều chỉnh Quy hoạch chung Thủ đô đến năm 2045, tầm nhìn 2065 [29], đây là khuôn khổ quan trọng để triển khai TOD gắn với cơ chế thu lại giá trị gia tăng từ đất (LVC). Trong bối cảnh đó, khung 3V là công cụ hỗ trợ ra quyết định giúp sàng lọc và xác định thứ tự ưu tiên can thiệp quanh ga trên cơ sở dữ liệu định lượng.

Tuyến 2A (Cát Linh - Hà Đông) là tuyến ĐSĐT đầu tiên tại Hà Nội đi vào khai thác thương mại [25]. Trong bối cảnh đó, việc lựa chọn ga ưu tiên và tái thiết các TOD cần dựa trên đánh giá định lượng để hướng tới tính khả thi của dự án. Các bằng chứng thực nghiệm chỉ ra rằng các đặc trưng hình thái đô thị như mật độ, đa dạng chức năng và thiết kế (nhóm 3Ds/5Ds) liên quan chặt chẽ đến lựa chọn phương thức và nhu cầu sử dụng vận tải công cộng [1], [20]. Trong các khung đánh giá quanh ga, mô hình node-place nhấn mạnh sự cân bằng giữa vai trò nút giao thông và chất lượng nơi chốn đô thị [19], trong khi khung 3V của WB bổ sung trụ cột tiềm năng thị trường nhằm hỗ trợ phân loại/ưu tiên can thiệp TOD theo từng ga và hành lang [2], [22].

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này đặt mục tiêu ứng dụng khung 3V để đánh giá và phân hạng tiềm năng TOD quanh 12 ga tuyến 2A. Các mục tiêu cụ thể gồm: (i) xây dựng bộ chỉ báo 3V thí điểm tận dụng dữ liệu khảo sát và dữ liệu không gian; (ii) chuẩn hóa, tổng hợp chỉ số và xếp hạng ga; (iii) nhận diện trạng thái "lệch pha" để đưa chiến lược can thiệp và (iv) kiểm tra độ nhạy của thứ hạng đối với lựa chọn chuẩn hóa/trọng số. Nghiên cứu đóng góp: (1) đề xuất quy trình 3V có khả năng tái lập trong điều kiện dữ liệu hạn chế; (2) cung cấp số liệu định lượng hỗ trợ ưu tiên can thiệp TOD tuyến 2A gắn với bối cảnh pháp lý mới tại Hà Nội.

Về vận hành, tuyến 2A khai thác đoàn tàu 4 toa, khoảng 232 lượt/ngày; sản lượng hành khách trung bình khoảng 35.000-40.000 lượt/ngày; giãn cách khoảng 6 phút giờ cao điểm và 10 phút giờ bình thường [25]. Các thông số này cho thấy năng lực hiện tại của tuyến và là cơ sở để thảo luận yêu cầu đồng bộ hóa Node, Place và Market trong vùng phụ cận ga.

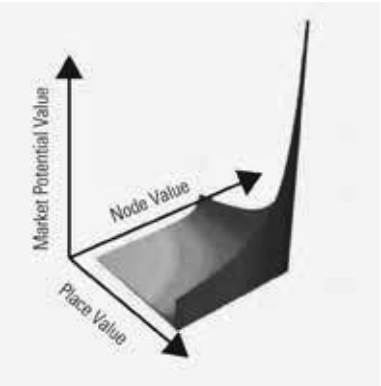
2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ KHUNG ĐÁNH GIÁ 3V

TOD thường được hiểu là mô hình phát triển đô thị nén, đa chức năng quanh các điểm trung chuyển giao thông công cộng khối lượng lớn, ưu tiên đi bộ, xe đạp và giảm phụ thuộc vào xe cá nhân; từ đó nâng hiệu quả khai thác vận tải công cộng và định hướng tăng trưởng đô thị theo các hành lang vận tải [17], [19], [21]. Nhiều nghiên cứu đã hệ thống hóa các nguyên lý mật độ - đa dạng - thiết kế (3Ds) và mở rộng thành 5Ds, cho thấy mối liên hệ với lưu lượng đi lại, lựa chọn phương thức và nhu cầu sử dụng PTCC [1], [20].

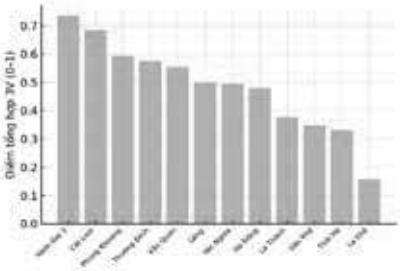
Mô hình node-place mô tả sự cân bằng giữa vai trò nút giao thông (mức độ kết nối, năng lực dịch vụ) và chất lượng khu vực (mật độ, đa dạng chức năng, tiện nghi công cộng) như điều kiện cần của TOD [19]. Khung 3V do WB đề xuất mở rộng node-place bằng cách bổ sung "Giá trị tiềm năng thị trường", nhấn mạnh tính sẵn sàng của thị trường bất động sản và dư địa tạo giá trị để hỗ trợ LVC [2], [22]. Ba trụ cột 3V được diễn giải như sau:

- Giá trị Nút (Node Value): phản ánh tầm quan trọng của nhà ga trong cấu trúc mạng lưới giao thông, thường đo bằng lưu lượng, mức độ kết nối đa phương thức và chỉ số trung tâm [2].
- Giá trị Nơi chốn (Place Value): phản ánh chất lượng đô thị trong vùng đi bộ quanh ga, bao gồm mật độ, đa dạng sử dụng đất, chất lượng không gian công cộng và khả năng tiếp cận phi cơ giới [2], [21].
- Giá trị Tiềm năng Thị trường (Market Potential Value): phản ánh động lực cung-cầu và năng lực gia tăng diện tích sàn/giá trị đất thông qua chính sách quy hoạch (ví dụ nới FAR) và cơ hội tái phát triển [2].

Khung 3V cho phép các nhà hoạch định chính sách nhận diện và trực quan hóa các trạng thái "lệch pha" giữa ba trụ cột giá trị tại từng nhà ga, từ đó xác định dư địa để kiến tạo giá trị kinh tế thông qua việc đồng bộ hóa giữa năng lực kết nối (Giá trị Nút) và chất lượng không gian (Giá trị địa điểm). Việc lượng hóa các chỉ số giúp thiết lập nền tảng đối thoại liên ngành giữa các cơ quan quy hoạch, giao thông, kinh tế và người dân nhằm đồng bộ hóa các đầu mối giao thông lớn với các không gian đô thị chất lượng cao. Từ đó, sự kết hợp này sẽ thúc đẩy "Giá trị Tiềm năng Thị trường", biến các nhà ga thành động lực tăng trưởng thực sự (Hình 1).



Hình 1. Đồng bộ hóa giá trị tiềm năng của nút, địa điểm và thị trường [2]



Hình 2. Điểm tổng hợp 3V theo các ga

Tổng quan nghiên cứu về ứng dụng 3V/Node-Place trong phân hạng nhà ga TOD

Trong hai thập kỷ qua, mô hình Node-Place được dùng rộng rãi để mô tả trạng thái cân bằng giữa vai trò nút giao thông và vai trò nơi chốn của khu vực ga. Từ khoảng 2019, hướng nghiên cứu chuyển dần sang các khung đa chiều nhằm phản ánh tốt hơn vị thế ga trong toàn mạng lưới, chất lượng môi trường cấp vi mô và các kết quả đầu ra như tiếp cận, lượng hành khách và chất lượng phát triển đô thị. Một nhánh mở rộng quan trọng là bổ sung chiều "mạng lưới/hệ thống". Các nghiên cứu gần đây tích hợp các chỉ số network criticality, centrality hoặc "system support" vào mô hình Node-Place để phản ánh vai trò ga ở cả cấp địa phương và cấp hệ thống, qua đó hỗ trợ phân loại và ưu tiên đầu tư [30], [32]. Zheng và Wei tiếp tục mở rộng thành khung Node-Place-Network-City, cho phép phân nhóm ga theo kiểu hình phát triển và gợi ý chiến lược theo từng nhóm [36].

Song song, các nghiên cứu giai đoạn 2023 - 2025 tăng cường tích hợp biến xã hội-môi trường và biến kết quả. Các công trình gần đây liên hệ Node-Place với khả năng tiếp cận và lượng hành khách, đồng thời bổ sung các chiều như "social contacts", không gian xanh và "vitality" để phản ánh đầy đủ hơn chất lượng phát triển quanh ga [33], [35], [38]. Dữ liệu lớn và AI cũng mở ra các công cụ phân hạng có khả năng diễn giải. Một số nghiên cứu kết hợp mô hình học máy diễn giải với khung Node-Place mở rộng để nhận dạng loại hình ga; ở cấp vi mô, dữ liệu Street View được dùng để lượng hóa trải nghiệm thị giác và chất lượng không gian đi bộ quanh ga [37], [39].

Đối với Việt Nam, báo cáo TOD tại Hà Nội của GCIEP đã vận dụng cách tiếp cận ba giá trị để sàng lọc khu vực ưu tiên và liên hệ với công cụ LVC, đồng thời nhấn mạnh nhu cầu hoàn thiện dữ liệu và cơ chế phối hợp thể chế khi triển khai TOD [40]. Tổng hợp các hướng nghiên cứu cho thấy khung 3V phù hợp với xu thế đánh giá đa chiều khu vực ga, đồng thời chỉ ra nhu cầu bổ sung thước đo mạng lưới, chỉ số xanh-xã hội và dữ liệu vi mô trong các nghiên cứu tiếp theo.

3. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

3.1. Dữ liệu

Nghiên cứu sử dụng hai nhóm dữ liệu:

(i) Khảo sát tại 12 ga tuyến 2A với 371 mẫu hợp lệ (thời điểm khảo sát: năm 2024 - 2025). Các biến chính gồm phương thức đi lại hiện nay, tần suất sử dụng GTCC/tuần (0-5), khoảng cách từ nơi ở đến bến GTCC gần nhất (m), chi phí đi lại, thời gian đi làm, mức độ hài lòng về các thuộc tính dịch vụ GTCC (thang 1-4; 1 = rất kém, 4 = rất tốt) và nhu cầu cải thiện (thang 1-3; 1 = không cần, 3 = rất cần; giá trị 0 được coi là không trả lời).

(ii) Dữ liệu đặc điểm không gian quanh ga (mật độ, FAR ước lượng, POI, tương quan việc làm, dân cư, cơ hội tái phát triển) tổng hợp từ nguồn mở và tài liệu chuyên môn (OSM và các nguồn liên quan [3],[16]).

3.2. Xác định vùng phục vụ đi bộ (catchment)

Theo hướng tiếp cận khả tiếp cận trong quy hoạch giao thông [24], nghiên cứu ưu tiên vùng phục vụ đi bộ theo mạng đường (network-based catchment) thay vì bán kính. Tham số áp dụng gồm 400 m mạng đi bộ và thời gian 15 phút. Do hạn chế dữ liệu GIS trong giai đoạn thí điểm, các biến POI/mật độ trong bộ dữ liệu không gian hiện được tổng hợp ở phạm vi 800 m quanh ga; khác biệt về phạm vi là một hạn chế nghiên cứu.

3.3. Xây dựng chỉ báo 3V và chuẩn hóa

Trong điều kiện dữ liệu chưa có lưu lượng hành khách theo từng ga và kết nối GTFS/centrality đầy đủ, nghiên cứu xây dựng bộ chỉ báo 3V thí điểm (Bảng 1), ưu tiên các biến có thể truy xuất từ dữ liệu khảo sát và tài liệu không gian quanh ga. Các chỉ báo được chuẩn hóa bằng min-max về thang (0-1). Với chỉ báo hướng tốt (càng lớn càng tốt): $x'=(x-min)/(max-min)$. Với chỉ báo hướng xấu (càng nhỏ càng tốt, ví dụ khoảng cách tiếp cận): $x'=(ma-x)/(max-min)$. Điểm Node/Place/Market là trung bình của các chỉ báo thành phần; điểm 3V tổng hợp là trung bình của ba trụ cột.

3.4. Phân hạng và nhận diện "lệch pha"

Sau khi tính điểm 3V, các ga được xếp hạng theo điểm tổng hợp. Đồng thời, nghiên cứu phân loại mức Node/Place/Market thành 3 mức (Thấp-Trung bình-Cao) dựa trên ngưỡng 0,4 và 0,6 để nhận diện trạng thái lệch pha và đề xuất chiến lược can thiệp theo khung 3V [2].

3.5. Kiểm định độ nhạy

Độ nhạy được kiểm tra bằng (i) thay đổi trọng số ba trụ cột (trường hợp cơ sở 1/3; 1/3; 1/3 so với kịch bản 0,4; 0,4; 0,2); và (ii) so sánh chuẩn hóa min-max với chuẩn hóa dựa trên thang "độ lệch chuẩn" so với trung bình (sau đó quy đổi về 0-1). Độ ổn định thứ hạng được đánh giá bằng thước đo thống kê dùng để đánh giá mức độ liên hệ giữa hai tập thứ hạng (Spearman).

Bảng 1. Bộ chỉ báo 3V thí điểm và nguồn dữ liệu

Trụ cột	Mã	Chỉ báo (mô tả)	Đơn vị/Thang	Chiều tác động	Nguồn
Node	N1	Tần suất sử dụng GTCC/tuần	lần/tuần	+	Khảo sát nhóm tác giả
Node	N2	Tỷ lệ người có phương thức hiện nay là PTCC (bus/tàu điện/BRT)	%	+	
Node	N3	Cờ "đầu mối/kết nối" (từ mô tả ga: bến xe/nút giao/trung chuyển)	0/1	+	
Place	P1	Khoảng cách nhà → bến GTCC gần nhất	m	–	
Place	P2	Tỷ lệ đi bộ/xe đạp trong phương thức hiện nay	%	+	

Place	P3	Điểm mật độ/FAR định tính (quy đổi 1-5 từ mô tả)	điểm	+
Market	M1	FAR hiện trạng ước lượng (giá trị giữa khoảng)	FAR	+
Market	M2	Điểm tương quan việc làm-dân cư (1-4)	điểm	+
Market	M3	Cờ cơ hội tái phát triển/quỹ đất (từ từ khóa mô tả)	0/1	+

4. KẾT QUẢ

4.1. Thông số khai thác tuyến 2A

Với công suất thiết kế 1 đoàn tàu 1.360 người, biểu đồ chạy tàu 232 chuyến-lượt/ngày và sản lượng hành khách bình quân hiện tại khoảng 35.000-40.000 lượt/ngày, năng lực chuyên chở lý thuyết đạt 232 × 1.360 = 315.520 lượt/ngày. Hệ số sử dụng công suất ước tính đạt khoảng 11,1-12,7%, cho thấy dư địa tăng trưởng còn lớn. Tốc độ kỹ thuật tuyến đạt 80 km/h và tốc độ khai thác khoảng 35 km/h [14], [16], [25].

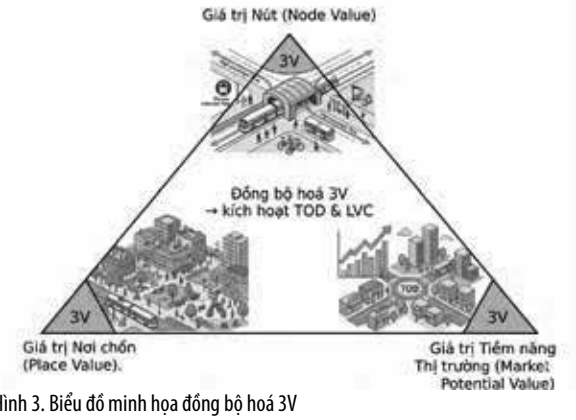
4.2. Mô tả mẫu khảo sát

Tổng cộng 371 phiếu hợp lệ được thu thập tại 12 ga. Khoảng cách trung bình từ nơi ở đến bến GTCC gần nhất là 624,7 m. Tần suất sử dụng GTCC trung bình đạt 2,23 lần/tuần; tỷ lệ người khai báo phương thức hiện nay là PTCC khoảng 35,6%, đi bộ/xe đạp 15,4% và phương tiện cá nhân 48,5%. Mức hài lòng trung bình về chất lượng GTCC (thang 1-4) đạt 2,23 điểm; trong các thuộc tính dịch vụ, "giá vé" có điểm cao nhất, trong khi "sự thoải mái trên xe" thấp nhất. Về nhu cầu cải thiện (thang 1-3), các nội dung được đánh giá cần thiết nhất gồm "nâng cao ý thức người tham gia giao thông", "phương tiện sạch sẽ/tiện nghi" và "bến GTCC gần nhà hơn"; trong khi "giá vé rẻ hơn" có mức ưu tiên thấp hơn.

Sau chuẩn hóa và tổng hợp, điểm Node-Place-Market và điểm 3V tổng hợp được tính cho từng ga. Hình 3 trực quan hóa tương quan Node-Place với kích thước theo Market, cho phép nhận diện nhanh các trạng thái lệch pha. Bảng 4 trình bày điểm 3V và thứ hạng thí điểm.

Bảng 2. Thông số khai thác tuyến ĐSĐT 2A

Chỉ tiêu	Giá trị
Công suất thiết kế 1 đoàn tàu	1.360 người/tàu (thiết kế)
Số chuyến/ngày (hiện vận hành)	232 chuyến-lượt/ngày
Năng lực chuyên chở lý thuyết/ngày	315.520 lượt khách/ngày
Hành khách bình quân/ngày	35.000-40.000 lượt/ngày
Hệ số sử dụng năng lực (load factor)	11,1-12,7% (ước tính)
Tăng trưởng hành khách	8-12%/năm
Tốc độ kỹ thuật	80 km/h
Tốc độ khai thác	35 km/h



Hình 3. Biểu đồ minh họa đồng bộ hoá 3V

Bảng 3. Thống kê mẫu khảo sát theo ga (n = 371)

Ga	n	KC nhà→bến GTCC (m)	Tần suất dùng GTCC/tuần	Tỷ lệ PTCC (%)	Tỷ lệ đi bộ/xe đạp (%)	Hài lòng (1–4)	Nhu cầu cải thiện (1–3)
Cát Linh	26	626,9	3,00	26,9	19,2	2,05	2,13
Hà Đông	40	531,8	3,92	72,5	0,0	2,65	2,17
La Khê	35	842,9	2,06	40,0	14,3	2,28	1,89
La Thành	12	691,7	1,75	8,3	25,0	1,90	1,93
Láng	17	635,3	1,06	17,6	23,5	1,92	1,90
Phùng Khoang	38	697,9	2,42	34,2	21,1	2,39	2,13
Thái Hà	19	605,3	1,26	21,1	15,8	1,91	1,93
Thượng Đình	45	537,8	1,56	35,6	15,6	2,00	2,00
Vành Đai 3	37	568,9	2,08	27,0	13,5	2,20	2,00
Văn Khê	31	664,5	2,29	48,4	12,9	2,33	1,90
Văn Quán	41	524,4	2,07	24,4	22,0	2,30	2,05
Yên Nghĩa	30	674,4	2,03	33,3	13,3	2,34	1,90

Bảng 4. Điểm 3V thí điểm, mức độ và đề xuất giải pháp

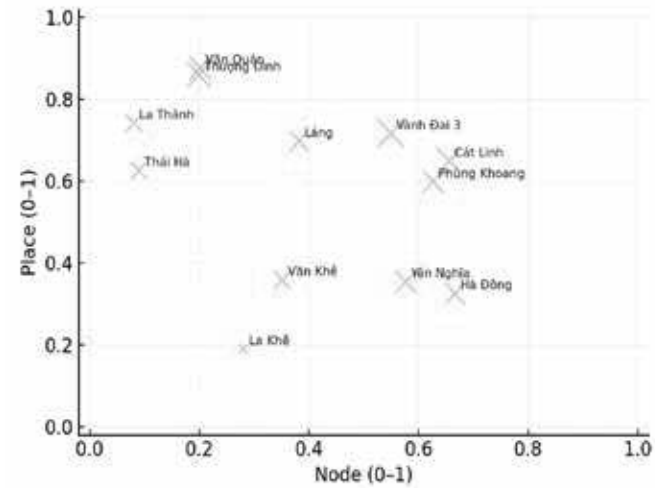
Ga	Node (0-1)	Place (0-1)	Market (0-1)	Điểm tổng hợp (0-1)	Xếp hạng	Đề xuất giải pháp	Mức Node	Mức Place	Mức Market
Vành Đai 3	0,292	0,731	0,725	0,583	2	Infill (tăng Node: kết nối trung chuyển, dịch vụ)	Thấp	Cao	Cao
Cát Linh	0,435	0,727	0,425	0,529	4	Can thiệp có chọn lọc (cân bằng 3V)	Trung bình	Cao	Trung bình

Phùng Khoang	0,395	0,660	0,200	0,418	7	Can thiệp có chọn lọc (cân bằng 3V)	Trung bình	Trung bình	Thấp
Thượng Đình	0,269	0,870	0,900	0,680	1	(tái thiết/tái phát triển theo lộ trình)	Thấp	Cao	Cao
Văn Quán	0,272	0,888	0,475	0,545	3	Infill (tăng Node: kết nối trung chuyển, dịch vụ)	Thấp	Cao	Trung bình
Láng	0,065	0,768	0,225	0,353	11	Infill (tăng Node: kết nối trung chuyển, dịch vụ)	Thấp	Cao	Thấp
Yên Nghĩa	0,428	0,372	0,400	0,400	9	Can thiệp có chọn lọc (cân bằng 3V)	Trung bình	Trung bình	Trung bình
Hà Đông	0,900	0,466	0,200	0,522	5	Can thiệp có chọn lọc (cân bằng 3V)	Cao	Trung bình	Thấp
La Thành	0,109	0,715	0,325	0,383	10	Infill (tăng Node: kết nối trung chuyển, dịch vụ)	Thấp	Cao	Thấp
Văn Khê	0,474	0,529	0,200	0,401	8	Can thiệp có chọn lọc (cân bằng 3V)	Trung bình	Trung bình	Thấp
Thái Hà	0,121	0,713	0,450	0,428	6	Infill (tăng Node: kết nối trung chuyển, dịch vụ)	Thấp	Cao	Trung bình
La Khê	0,379	0,321	0,100	0,267	12	Can thiệp có chọn lọc (cân bằng 3V)	Trung bình	Thấp	Thấp

Bảng 5. Tóm tắt kiểm tra độ nhạy thứ hạng (Spearman)

Kịch bản so sánh	ρ Spearman	Nhận xét
Chuẩn hóa z-score (quy đổi về 0-1) so với cơ sở	ρ=1,00	Thứ hạng không đổi/ít biến động
Thay trọng số tổng hợp (N=0,40; P=0,40; M=0,20)	ρ=0,93	Ổn định cao
Trọng số đều trong từng trụ cột (N1=N2=N3; P1=P2=P3; M1=M2=M3)	ρ=0,82	Nhạy hơn với lựa chọn trọng số

4.3. Điểm 3V và xếp hạng tiềm năng TOD



Hình 4. Xếp hạng điểm 3V tổng hợp theo ga

4.4. Phân tích độ nhạy

Kết quả độ nhạy cho thấy thứ hạng tương đối ổn định. Khi thay đổi trọng số từ (1/3; 1/3; 1/3) sang (0,4; 0,4; 0,2), tương quan thứ hạng Spearman đạt ρ = 0,93. Khi thay đổi chuẩn hóa từ min-max sang z-score (quy đổi về [0; 1]), tương quan thứ hạng đạt ρ = 1,00. Điều này cho thấy kết quả phân hạng thí điểm không nhạy cảm mạnh với các lựa chọn kỹ thuật cơ bản trong phạm vi kiểm tra.

5. THẢO LUẬN

Kết quả thí điểm cho thấy các ga tuyến 2A có điểm 3V không đồng đều; trạng thái "lệch pha" giữa Node-Place-Market là cơ sở định hướng lựa chọn giải pháp quy hoạch và tái thiết. Theo khung 3V [2], các ga có Place và/hoặc Market cao nhưng Node chưa tương xứng nên ưu tiên các giải pháp infill để tăng kết nối trung chuyển, cải thiện tiếp cận đi bộ/xe đạp và nâng chất lượng phục vụ GTCC. Ngược lại, các ga có Node cao nhưng Place thấp cần tăng mật độ đi kèm nâng FAR, mật độ dân cư, việc làm và chất lượng không gian công cộng quanh ga.

Kết quả nghiên cứu này bước đầu tạo cơ sở định lượng lựa chọn các khu vực quanh ga để triển khai TOD/LVC trong bối cảnh Luật Thủ đô 2024 [27], Luật Đất đai 2024 [28] và định hướng không gian của Quy hoạch chung điều chỉnh [29]. Tuy vậy, do nghiên cứu còn ở giai đoạn thí điểm và dữ liệu Node/Place chưa đầy đủ, các kết quả nên được xem như công cụ sàng lọc ban đầu để phục vụ khảo sát sâu và nghiên cứu khả thi TOD.

Các hạn chế chính gồm: (i) chỉ báo Node thí điểm chưa thay thế được các chỉ số mạng lưới và lưu lượng hành khách; (ii) phạm vi dữ liệu không gian hiện là 800 m/15 phút; và (iii) dữ liệu mạng lưới, không gian, điểm đến có thể có sai lệch theo khu vực và thời điểm cập nhật [3], [5]. Nghiên cứu tiếp theo cần tích hợp dữ liệu chính xác hơn, số liệu hành khách theo ga và phân tích GIS để tính toán các chỉ số node/place đầy đủ hơn [23], [24].

6. KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ

Nghiên cứu đã ứng dụng khung 3V [2] để xây dựng quy trình đánh giá và phân hạng tiềm năng TOD quanh 12 ga tuyến ĐSĐT 2A Hà Nội trên cơ sở dữ liệu khảo sát (n = 371) và hồ sơ không gian quanh ga. Các kết quả chính và khuyến nghị gồm:

(1) Thiết lập bộ chỉ báo 3V dựa trên dữ liệu sẵn có, cho phép xếp hạng tương đối các ga và nhận diện trạng thái lệch pha Node-Place-Market.

(2) Nhóm ga có điểm 3V cao cần được ưu tiên nghiên cứu khả thi TOD/LVC và lựa chọn chiến lược phù hợp để đồng bộ hóa 3V.

(3) Khảo sát cho thấy cần ưu tiên nâng chất lượng dịch vụ và điều kiện tiếp cận GTCC (điểm dừng gần hơn, tiện nghi, an toàn, trung chuyển), bên cạnh các giải pháp quản lý nhu cầu.

(4) Thứ hạng 3V tương đối ổn định dưới các kiểm tra độ nhạy cơ bản, cho thấy khả năng sử dụng như công cụ sàng lọc ban đầu.

(5) Để tăng độ tin cậy của khung 3V, cần bổ sung dữ liệu mạng lưới, số liệu hành khách theo ga và phân tích GIS trong nghiên cứu tiếp theo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] R. Cervero and K. Kockelman. Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. Transportation Research Part D: Transport and Environment, vol. 2, no. 3, pp. 199-219, 1997.

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

[3] Open Data Commons. Open Database License (ODbL) v1.0. 2009 (truy cập 06/12/2025).

[4] Geofabrik GmbH. OpenStreetMap Data Extracts: Vietnam (truy cập 08/12/2025).

[5] OpenStreetMap Wiki. Overpass API (truy cập 07/01/2026).

[6] WorldPop. Vietnam 100m Population (dataset). University of Southampton (truy cập 07/01/2026).

[7] European Commission, Joint Research Centre (JRC). Global Human Settlement Layer (GHSL) (truy cập 07/01/2026).

[8] Tổng công ty Vận tải Hà Nội (Transerco). Thông tin tuyến xe buýt/BRT Hà Nội (truy cập 07/01/2026).

[9] Transformative Urban Mobility Initiative (TUMI). Mobility Data Hub: GTFS Hanoi (dataset) (truy cập 07/01/2026).

[10] Transformative Urban Mobility Initiative (TUMI). GTFS Analyzer (documentation) (truy cập 07/01/2026).

[11] UBND TP Hà Nội. Cổng thông tin điện tử - Chuyên mục Quy hoạch đô thị/Quy hoạch phân khu (truy cập 07/01/2026).

[12] Sở Quy hoạch - Kiến trúc Hà Nội. Công bố đồ án quy hoạch phân khu đô thị (1/2000) (truy cập 07/01/2026).

[13] Quy hoạch Hà Nội. Hệ thống thông tin quy hoạch. Internet: https://quyhoach.hanoi.vn (truy cập 07/01/2026).

[14] Công ty TNHH MTV Đường sắt Hà Nội (Hanoi Metro). Thông tin tuyến 2A Cát Linh - Hà Đông (thông số kỹ thuật, khai thác) (truy cập 07/01/2026).

[15] Công ty TNHH MTV Đường sắt Hà Nội (Hanoi Metro). Thông tin/Thống kê sản lượng hành khách tuyến 2A (truy cập 07/01/2026).

[16] Nhóm tác giả. Bộ dữ liệu khảo sát hành vi tiếp cận, đánh giá chất lượng dịch vụ và ưu tiên cải thiện quanh các vị trí ga tuyến 2A Hà Nội (Bảng 2). Tài liệu nội bộ, 2025-2026.

[17] P. Calthorpe. The Next American Metropolis: Ecology, Community, and the American Dream. Princeton Architectural Press, 1993.

[18] H. Dittmar and G. Ohland (eds.). The New Transit Town: Best Practices in Transit-Oriented Development. Island Press, 2004.

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

[20] R. Ewing and R. Cervero. Travel and the Built Environment: A Meta-Analysis. Journal of the American Planning Association, vol. 76, no. 3, pp. 265-294, 2010.

[21] Institute for Transportation and Development Policy (ITDP). The TOD Standard, Version 3.0. New York, 2017.

[22] H. Suzuki, R. Cervero, and K. Iuchi. Transforming Cities with Transit: Transit and Land-Use Integration for Sustainable Urban Development. World Bank, Washington, DC, 2013.

[23] G. Boeing. OSMnx: New Methods for Acquiring, Constructing, Analyzing, and Visualizing Complex Street Networks. Computers, Environment and Urban Systems, vol. 65, pp. 126-139, 2017.

[24] W. G. Hansen. How Accessibility Shapes Land Use. Journal of the American Institute of Planners, vol. 25, no. 2, pp. 73-76, 1959.

[25] Nhóm tác giả. Tổng hợp thông số khai thác tuyến 2A (công suất đoàn tàu, số chuyến/ngày, sản lượng, tăng trưởng) từ trao đổi với đơn vị vận hành và tài liệu kỹ thuật nội bộ. Tài liệu nội bộ, 2025-2026.

[26] 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. Hà Nội, 2023.

[27] Quốc hội nước CHXHCN Việt Nam. Luật Thủ đô số 39/2024/QH15. Hà Nội, 2024.

[28] Quốc hội nước CHXHCN Việt Nam. Luật Đất đai số 31/2024/QH15. Hà Nội, 2024.

[29] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định phê duyệt Điều chỉnh Quy hoạch chung Thủ đô Hà Nội đến năm 2045, tầm nhìn đến năm 2065. Hà Nội, 2024.

[30] Y. Zhang, S. Marshall, and E. Manley. Network criticality and the node-place-design model: Classifying metro station areas in Greater London. Journal of Transport Geography, vol. 79, article 102485, 2019, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2019.102485.

[31] M. Dou, Y. Wang, and S. Dong. Integrating Network Centrality and Node-Place Model to Evaluate and Classify Station Areas in Shanghai. ISPRS International Journal of Geo-Information, vol. 10, no. 6, article 414, 2021, doi: 10.3390/ijgi10060414.

[32] J. Ma, Z. Shen, Y. Xie, P. Liang, B. Yu, and L. Chen. Node-place model extended by system support: Evaluation and classification of metro station areas in Tianfu new area of Chengdu. Frontiers in Environmental Science, vol. 10, article 990416, 2022, doi: 10.3389/fenvs.2022.990416.

[33] H. Wu, J. Lee, and D. Levinson. The node-place model, accessibility, and station level transit ridership. Journal of Transport Geography, vol. 113, article 103739, 2023, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2023.103739.

[34] M. Zhou, J. Zhou, J. Zhou, S. Lei, and Z. Zhao. Introducing social contacts into the node-place model: A case study of Hong Kong. Journal of Transport Geography, vol. 107, article 103532, 2023, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2023.103532.

[35] L. Zheng and M. Z. Austwick. Classifying station areas in greater Manchester using the node-place-design model: A comparative analysis with system centrality and green space coverage. Journal of Transport Geography, vol. 112, article 103713, 2023, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2023.103713.

[36] W. Zheng and S. Wei. A 'node-place-network-city' framework to examine HSR station area development dynamics: Station typologies and development strategies. Journal of Transport Geography, vol. 120, article 103993, 2024, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2024.103993.

[37] H. Pan and Y. Huang. TOD typology and station area vibrancy: An interpretable machine learning approach. Transportation Research Part A: Policy and Practice, vol. 186, article 104150, 2024, doi: 10.1016/j.tra.2024.104150.

[38] T. Wu, M. Li, L. Gao, and Y. Zhou. Integrating spatial vitality and node-place model to evaluate and classify metro station areas in Wuhan. Frontiers of Architectural Research, vol. 13, no. 6, pp. 1363-1376, 2024, doi: 10.1016/j.foar.2024.04.005.

[39] J. Liu, X. Yang, X. Huang, J. Li, J. Li, H. Chen, R. An, and Y. Song. Introducing street view into node-place model for evaluating transit-oriented development. Journal of Transport Geography, vol. 128, article 104334, 2025, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2025.104334.

[40] Green Cities, Infrastructure & Energy Programme (GCIEP). Diagnostic Report on TOD Development in Hanoi: Comprehensive Assessment of Opportunities and Barriers to TOD in Hanoi City. 2025 (truy cập 13/01/2026).

■Ngày nhận bài: 13/3/2026 ■Ngày sửa bài: 20/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 02/4/2026

Tổng quan về một số giải pháp điều khiển hệ thống BESS trong hỗ trợ điều chỉnh tần số

Overview of some control methods of BESS in supporting frequency regulation

> THS NGUYỄN XUÂN HỒNG
Khoa KTHT&MTĐT, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
Email: hong.nguyenxuanbn@outlook.com

TÓM TẮT

Cùng với sự gia tăng tỷ trọng các nguồn năng lượng tái tạo trong hệ thống điện thì thách thức đối với vấn đề ổn định tần số của hệ thống điện cũng tăng lên. Một trong các phương pháp hỗ trợ ổn định tần số đối với hệ thống điện có các nguồn năng lượng tái tạo là sử dụng hệ thống lưu trữ năng lượng bằng ác quy BESS (Battery Energy Storage System). Bài báo này tổng hợp một số phương pháp điều khiển hệ thống BESS đã được các nhà nghiên cứu đề xuất để hỗ trợ điều chỉnh tần số ở các giai đoạn điều chỉnh khác nhau bao gồm: đáp ứng quán tính; điều chỉnh tần số sơ cấp.

Từ khóa: Phương pháp điều khiển; BESS; điều chỉnh tần số; điều khiển tần số.

ABSTRACT

Along with the increasing penetration of renewable energy sources in the power system, the challenge of frequency stability also increases. One of the methods to support frequency stability for power systems with renewable energy sources is to use battery energy storage systems (BESS). This paper summarizes a number of BESS system control methods that researchers have proposed to support frequency regulation at different stages, including inertial response; primary frequency regulation.

Keywords: Control method; BESS; frequency regulation; frequency control.

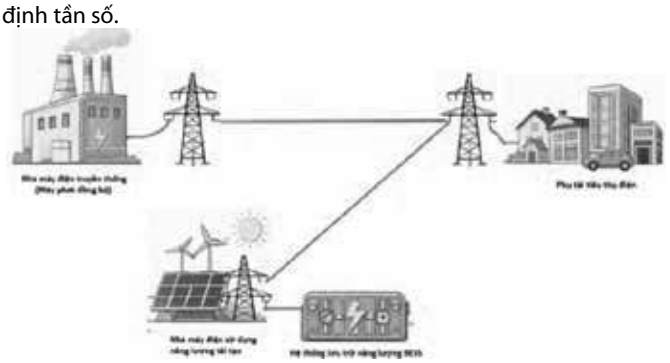
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống điện luôn luôn vận hành ở trạng thái cân bằng giữa công suất của các nguồn phát ra và công suất tiêu thụ của các phụ tải. Trạng thái cân bằng này được đặc trưng bởi thông số tần số. Khi công suất phát lớn hơn hoặc nhỏ hơn công suất tiêu thụ thì tần số của hệ thống sẽ tăng hoặc giảm tương ứng so với giá trị định mức là 50Hz (đối với hệ thống điện Việt nam).

Trong những năm gần đây, Việt Nam có chính sách khuyến khích phát triển các nguồn điện sử dụng năng lượng tái tạo (điện gió, điện mặt trời) nên tỷ trọng các nhà máy sử dụng nguồn năng lượng tái tạo trong hệ thống điện tăng đáng kể và tương lai sẽ thay thế phần lớn các nhà máy phát điện truyền thống sử dụng máy phát điện đồng bộ. Tuy nhiên, khi hệ thống điện có tỷ trọng các máy phát sử dụng nguồn năng lượng tái tạo lớn sẽ có thách thức trong vấn đề điều chỉnh ổn định tần số trong hệ thống bởi lý do chính như sau: (i) Các nguồn điện năng lượng tái tạo có năng lượng sơ cấp (năng lượng gió, năng lượng mặt trời) hoàn toàn dựa vào điều kiện tự nhiên (bức xạ mặt trời, tốc độ gió), tức là công suất phát của các nguồn năng lượng tái tạo luôn luôn thay đổi và tạo ra sự mất cân bằng giữa công suất phát và công suất tiêu thụ làm tần số hệ thống luôn luôn biến động; (ii) Các nguồn điện năng lượng tái tạo như điện gió và điện mặt trời không có mô-men quay nối trực tiếp với hệ thống mà phải qua các bộ chuyển đổi năng lượng. Tức là, các nguồn năng lượng tái tạo sẽ không có đáp ứng quán tính giống như các nguồn năng lượng truyền thống máy phát đồng bộ để có thể đóng góp vào phản ứng điều chỉnh tần số tức thời ngay khi có sự dao động tần số vượt quá ngưỡng cho phép. Bởi vậy, hệ thống điện có thành phần nguồn năng lượng tái tạo càng lớn thì đáp ứng quán tính trong hệ thống càng giảm, dẫn tới dễ mất ổn định tần số.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Để hạn chế các vấn đề mất ổn định trong hệ thống điện có các nguồn năng lượng tái tạo là trang bị cho hệ thống điện các hệ thống dự trữ năng lượng BESS (Battery Energy Storage System) có tốc độ phản ứng nhanh để có thể bù lại sự biến động công suất do điều kiện tự nhiên và cũng có thể tham gia vào quá trình điều chỉnh ổn định tần số.



Hình 1. Đấu nối hệ thống BESS trong hệ thống điện

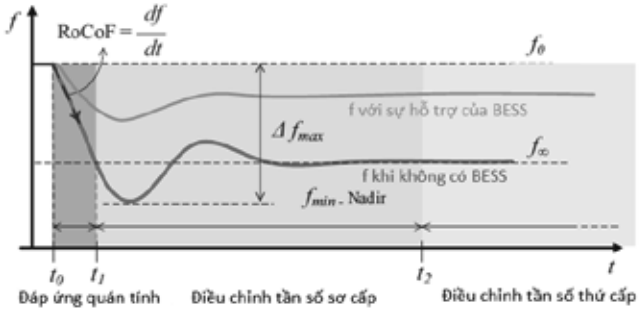
Hệ thống BESS tích hợp vào hệ thống điện có vai trò chính như sau [1]: (i) Điều chỉnh tần số nhanh FFR (Fast Frequency response): BESS có khả năng nạp và giải phóng điện năng chỉ trong vòng vài giây nhờ ứng dụng công nghệ điện tử công suất, giúp ổn định sự dao động tần số nhanh; (ii) Tăng khả năng linh hoạt của hệ thống:

BESS đóng vai trò như một bộ đệm, đặc biệt đối với các hệ thống có các nhà máy năng lượng tái tạo. Khi có đủ điều kiện tự nhiên (như bức xạ mặt trời, tốc độ gió…) thì các nhà máy năng lượng tái tạo này sẽ phát ra công suất dư thừa được nạp lưu trữ vào BESS, khi điều kiện tự nhiên không đảm bảo trong thời gian ngắn hạn tạm thời hoặc lâu dài thì năng lượng dự trữ trong BESS này sẽ phát trả vào hệ thống bù lại công suất phát thiếu hụt của các nhà máy năng lượng tái tạo này.

3. GIẢI PHÁP ĐIỀU CHỈNH ỔN ĐỊNH TẦN SỐ BẰNG HỆ THỐNG BESS

Bài báo này tổng hợp mội số đề xuất của một số nhà nguyên cứu về giải pháp kỹ thuật trong vấn đề điều chỉnh hệ thống BESS để tăng cường sự ổn định tần số trong hệ thống điện có nguồn năng lượng tái tạo.

Hai thông số là tốc độ thay đổi tần số RoCoF (Rate of Change of Frequency) và tần số thấp nhất FN (Frequency Nadir) là các thông số quan trọng nhất trong việc đánh giá tính ổn định tần số của hệ thống. Với sự tham gia của BESS trong hệ thống điện, nó sẽ hỗ trợ cải thiện hai thông số này tốt hơn như thể hiện trên Hình 2.



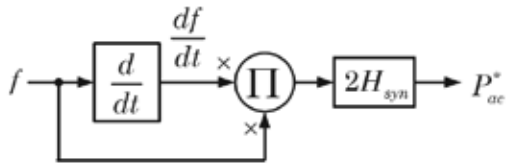
Hình 2. Đáp ứng tần số của hệ thống với sự hỗ trợ của BESS [2]

Với tốc độ đáp ứng nhanh của công nghệ điện tử công suất, thì hệ thống BESS sẽ ưu tiên hỗ trợ ở giai đoạn đầu của sự biến động tần số, tương ứng với giai đoạn đáp ứng quán tính và giai đoạn điều chỉnh tần số sơ cấp như máy phát điện truyền thống.

3.1. Điều chỉnh đáp ứng quán tính

Bài báo [3], [4] đưa ra đề xuất bộ điều khiển có khả năng xả/nạp năng lượng bộ BESS để cung cấp thêm hoặc tiêu thụ bớt công suất của hệ thống giống với đáp ứng quán tính của máy phát điện truyền thống. Công suất của bộ BESS trao đổi với hệ thống điện trong giai đoạn này gọi là công suất quán tính (Inertial Power). Biểu thức xác định công suất và sơ đồ khối của quá trình điều khiển quán tính của bộ BESS giống như phương trình dao động của máy điện đồng bộ như sau.

$$\Delta P = 2fH_{sys}.\frac{df}{dt} \quad (1)$$



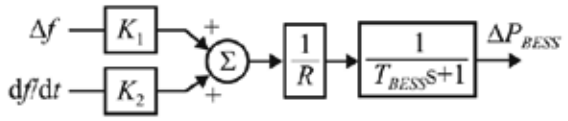
Hình 3. Sơ đồ khối của quá trình điều khiển quán tính bộ BESS [4]

Với f là tần số thực tế (real-time) của hệ thống. $\Delta P = P_{ac}^{*}$ chính là công suất trao đổi (phát ra hoặc lấy vào) của bộ BESS với hệ thống để đáp ứng tốc độ thay đổi tần số $\frac{df}{dt}$. H_{sys}<0 là hằng số quán tính ảo, nó chính là hệ số khuếch đại trong bộ điều khiển của BESS.

Bằng mô phỏng, bài báo đã chứng minh được phương pháp điều khiển đáp ứng quán tính ảo theo tốc độ thay đổi tần số của BESS, giúp cải thiện tính ổn định của tần số hệ thống trong giai đoạn quá độ của sự biến động sụt giảm tần số. Ở giai đoạn đầu tần số sụt giảm thì phương pháp điều khiển này làm cho BESS xả năng lượng cung cấp công suất cho hệ thống làm giảm sự mất cân bằng công suất dẫn đến tốc độ thay đổi tần số RoCoF giảm, giá trị tần số thấp nhất FN cao hơn trường hợp không có BESS và sau đó tần số bắt đầu phục hồi. Nhược điểm của phương pháp này là ở giai đoạn phục hồi tần số thì nó làm cho BESS tiêu thụ nạp lại năng lượng từ hệ thống, điều này có thể làm cho sự mất cân bằng công suất gia tăng dần, dẫn đến tần số sụt giảm lần thứ 2 ngay sau đó và có thể dẫn tới gây mất ổn định hệ thống.

Giá trị đại số của H_{sys} càng lớn thì hiệu quả của phương pháp điều khiển này càng cao. Tuy nhiên, khi lựa chọn giá trị H_{sys} phải xem xét đến giới hạn nạp/xả của hệ thống BESS, đồng thời cũng cần xem xét tới sự phối hợp với các phương pháp và đối tượng khác cùng được sử dụng trong hệ thống để điều chỉnh ổn định tần số (ví dụ máy phát điện truyền thống, máy phát điện sử dụng nguồn năng lượng tái tạo).

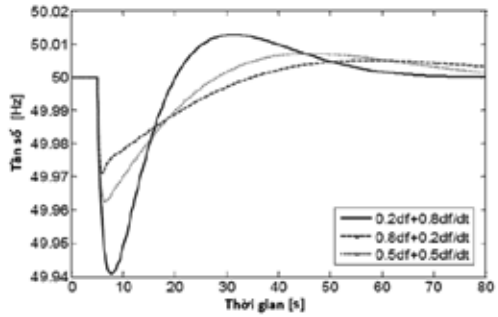
Để khắc phục nhược điểm của phương pháp đáp ứng quán tính ảo theo tốc độ thay đổi tần số, bài báo [5] đề xuất phương pháp điều khiển gọi là phương pháp đáp ứng quán tính ảo VIR (Virtual Inertial Response) theo cả tốc độ thay đổi và độ lệch tần số, để BESS có thể phản ứng giống như đáp ứng quán tính của máy phát điện truyền thống, hỗ trợ trong việc ổn định tần số hệ thống ở giai đoạn đầu của quá trình biến động. Phương pháp này sử dụng tín hiệu đầu vào là tốc độ thay đổi tần số RoCoF (Rated of Change of Frequency) $\frac{df}{dt}$ (giống như đáp ứng quán tính của máy phát điện truyền thống) và độ lệch tần số thực tế so với tần số làm việc định mức FD (Frequency Deviation) Δf (giống như điều chỉnh tần số sơ cấp theo phương pháp Droop Control của máy phát điện truyền thống). Các tín hiệu này được khuếch đại với các hệ số K_2, K_1 tương ứng.



Hình 4. Mô hình của bộ BESS dùng phương pháp điều khiển VIR [5]

R là hệ số độ dốc. T_{BESS} là hằng số thời gian của bộ BESS, nó phản ánh tốc độ chuyển đổi năng lượng của bộ BESS thành năng lượng điện.

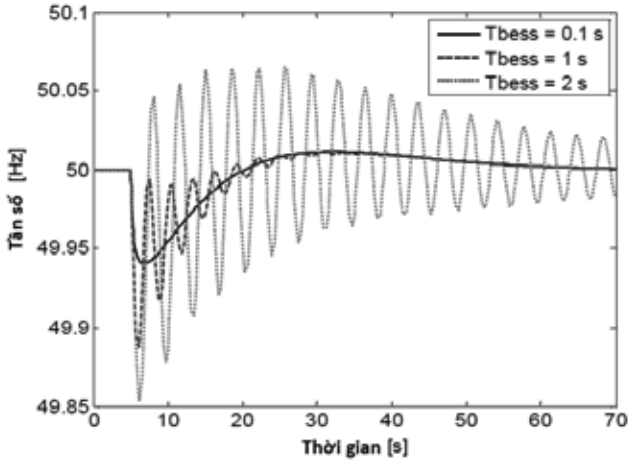
Thông thường K_1, K_2 nằm trong khoảng từ 0.2 tới 0.8. Khi hệ số K_1 lớn thì sẽ hỗ trợ tránh tần số giảm quá sâu Frequency Sag. Khi hệ số K_2 lớn thì phản ứng đáp ứng tần số sẽ mượt hơn, và tần số sớm đạt giá trị ổn định hơn. Hình 5 thể hiện đặc tính đáp ứng tần số của BESS theo phương pháp điều khiển VIR với các hệ số K_1, K_2 khác nhau, trong trường hợp BESS không bị giới hạn về công suất xả nạp.



Hình 5. Đặc tính đáp ứng tần số của BESS theo phương pháp điều khiển VIR với các hệ số khác nhau [5]

Khi BESS bị giới hạn công suất xả, nạp thì đặc tính đáp ứng tần số của BESS sẽ thay đổi, tần số sẽ bị giảm sâu hơn, tuy nhiên diễn biến hỗ trợ ổn định tần số vẫn không thay đổi.

T_{BESS} phụ thuộc nhiều vào công nghệ của bộ chuyển đổi điện tử công suất. Bài báo cũng mô phỏng để chứng minh được hằng số T_{BESS} càng nhỏ thì khả năng hỗ trợ ổn định tần số của BESS càng tốt.



Hình 6. Đặc tính đáp ứng tần số của BESS theo T_{BESS} khác nhau [5]

Với phương pháp VIR đề xuất, bài báo [5] đã mô phỏng chứng minh được BESS với hệ số đáp ứng nhanh T_{BESS} có thể cung cấp lượng công suất trao đổi với hệ thống với tốc độ nhanh giống như đáp ứng quán tính của máy điện truyền thống. Nói cách khác với phương pháp VIR BESS có thể bù lại hằng số quán tính của hệ thống giảm khi máy phát điện truyền thống bị thay thế bởi các máy phát điện sử dụng năng lượng tái tạo kết nối với hệ thống thông qua bộ chuyển đổi điện tử công suất.

3.2. Điều chỉnh tần số sơ cấp

Bài báo [6] đưa ra phương pháp điều khiển theo đặc tính độ dốc Droop Control của bộ BESS hỗ trợ việc ổn định tần số ở giai đoạn điều chỉnh tần số sơ cấp có sơ đồ khối như Hình 7.

Hình 7. Sơ đồ khối điều khiển theo phương pháp Droop Control của BESS

Δf_k là độ lệch tần số của hệ thống so với tần số định mức tại thời điểm k, K là hệ số độ dốc điều khiển, P_k là công suất nạp hoặc xả của BESS. Phương trình điều khiển như sau

$$P_k = K.\Delta f_k \quad (2)$$

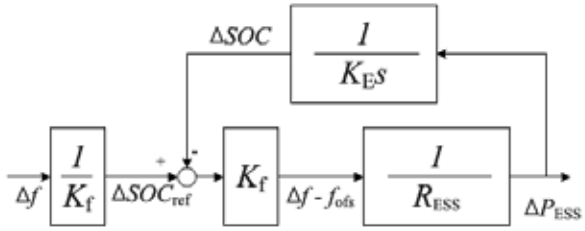
P_k phải nằm trong khoảng công suất giới hạn nạp/xả của bộ BESS

$$P_{\min} \le P_k \le P_{\max} \quad (3)$$

Nguyên tắc điều khiển theo phương pháp Droop control là khi Δf_k mang dấu "-", lúc này công suất phát nhỏ hơn công suất tiêu thụ của hệ thống thì P_k sẽ mang dấu "-" BESS sẽ xả năng lượng để cung cấp công suất cho hệ thống. Khi Δf_k mang dấu "+" , lúc này công suất phát lớn hơn công suất tiêu thụ của hệ thống thì P_k sẽ mang dấu "+" BESS sẽ nạp năng lượng để tiêu thụ một phần công suất cho hệ thống. Công suất nạp/xả của BESS phụ thuộc vào hệ số độ dốc K và độ lệch tần số Δf_k .

Nhược điểm của phương pháp điều chỉnh theo đặc tính độ dốc là giá trị công suất nạp/xả không được kiểm soát theo dung lượng nạp của bộ BESS. Nếu độ lệch tần số lớn có thể dẫn tới bộ BESS bị nạp hoặc xả quá dung lượng cho phép, ảnh hưởng tới tuổi thọ của ác quy. Để khắc phục nhược điểm này, các nhà nghiên cứu đã đưa ra các phương pháp kết hợp như trình bày ở phần tiếp theo.

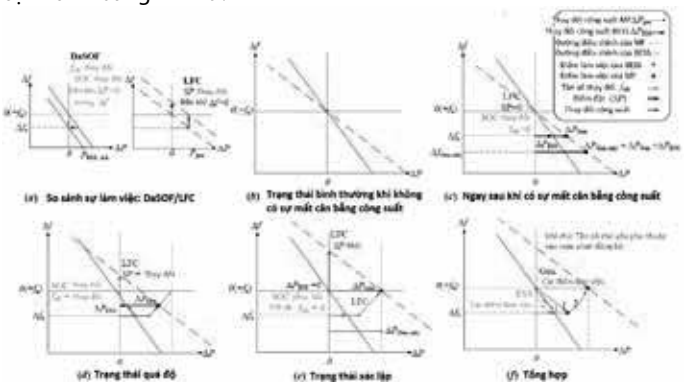
Bài báo [7], [8] đề xuất phương pháp điều khiển theo đặc tính độ dốc có tín hiệu dung lượng nạp SOC phản hồi DaSOF (Droop adaptive control with SOC Feedback) từ BESS để hỗ trợ ổn định tần số hệ thống như Hình 8.



Hình 8. Sơ đồ khối của phương pháp Droop control with SOC feedback

Nguyên lý điều khiển DaSOF được giải thích như sau: Khi có độ lệch Δf giữa tần số thực tế với tần số làm việc định mức, sẽ tạo ra mức dung lượng nạp tham chiếu cho BESS là $\Delta SOC_{ref} = SOC_{ref} - SOC_o = \Delta f / K_f$. Bộ điều khiển sẽ dựa trên sự sai khác giữa dung lượng nạp tham chiếu ΔSOC_{ref} và dung lương nạp thực tế đo được ΔSOC là tín hiệu phản hồi. Từ đó, sẽ tạo ra lượng công suất ΔP_{ESS} nạp hoặc xả bởi BESS để kéo dung lượng nạp của ác quy bằng dung lượng tham chiếu lúc đó, tức là $\Delta SOC_{ref} - \Delta SOC = 0$.

Bài báo [7], [8] mô phỏng phương pháp điều khiển DaSOF kết hợp với nguồn máy phát điện truyền thống trong việc hỗ trợ điều chỉnh tần số phụ tải LFC (Load Frequency Control) và được giải thích định tính bằng Hình 9.



Hình 9. Phối hợp hoạt động giữa BESS sử dụng DaSOF và máy phát điện truyền thống trong điều chỉnh tần số phụ tải

Hình 9a mô tả phản ứng riêng biệt của bộ BESS và máy phát điện truyền thống khi có sự thay đổi tần số hệ thống. Khi tần số của hệ thống giảm một lượng Δf_a so với giá trị định mức, thì ngay lập tức BESS sẽ xả và phát ra lượng công suất ΔP_{ESS} bơm vào hệ thống, làm cho dung lượng SOC giảm dần cùng với f_{osf} thay đổi, lại làm cho đường đặc tính DaSOF dịch chuyển theo chiều dọc một đoạn đến khi công suất phát ra $\Delta P_{ESS} = 0$. Trong khi đó máy phát truyền thống theo đặc tính điều khiển cũng ngay lập tức phát thêm lượng công suất ΔP_{GEN} đồng thời bộ điều khiển của nó cũng thay đổi giá trị đặt SP (Set point) để dịch chuyển đường đặc tính điều khiển của nó theo chiều dọc đến khi độ lệch tần số $\Delta f = 0$.

Hình 9 c, d, e, f mô tả hoạt động của bộ BESS và máy phát điện truyền thống khi có sự phối hợp trong cùng một hệ thống điện. Khi công suất phát đột ngột nhỏ hơn công suất tiêu thụ, làm cho tần số hệ thống bị sụt giảm đột ngột. Tại thời điểm ngay sau khi tần số sụt

giảm Hình 9c các giá trị f_{osf} và SP vẫn chưa kịp thay đổi, bộ BESS sẽ được kích hoạt xả phát thêm vào hệ thống công suất ΔP_{ESS}, bộ điều tốc của máy phát truyền thống cũng được kích hoạt và tăng công suất phát thêm ΔP_{Gen}. Nếu không có BESS thì tần số hệ thống có thể giảm sâu hơn và máy phát sẽ phải tăng thêm công suất nhiều hơn $\Delta P_{Gen,only} = \Delta P_{Gen} + \Delta P_{ESS}$. Điều đó có nghĩa là BESS tránh làm tần số giảm sâu hơn, hỗ trợ khôi phục tần số nhanh hơn.

Hình 9d, mô tả quá trình quá độ sau khi tần số sụt giảm, khi đó BESS do xả phát một lượng công suất vào hệ thống, làm dung lượng SOC giảm, dẫn tới giá trị f_{osf} thay đổi và đường đặc tính DaSOF cũng dịch chuyển xuống dưới một đoạn tương ứng với giá trị f_{osf} thay đổi. Đồng thời với quá trình của BESS, bộ điều khiển tần số của máy phát truyền thống sẽ thay đổi giá trị SP, làm đường đặc tính điều khiển của nó dịch chuyển một đoạn tới khi độ lệch tần số $\Delta f = 0$. Cuối cùng thì BESS và máy phát truyền thống sẽ làm việc, vận hành ở điểm xác lập mới như Hình 9e, máy phát sẽ phát thêm một lượng công suất để bù lại toàn bộ độ lệch giữa công suất phát và công suất tiêu thụ trước đó, bộ BESS cũng được khôi phục lại dung lượng nạp cân bằng ban đầu SOC_{cen}. Điều đó có nghĩa là máy phát sẽ cung cấp năng lượng để BESS có thể được dần dần nạp lại đúng bằng dung lượng xả ra trong quá trình điều chỉnh tần số sơ cấp. Toàn bộ diễn biến quá trình hoạt động của BESS và máy phát điện khi có sự mất cân bằng công suất trong hệ thống được tổng hợp ở Hình 9f. Như vậy phương pháp DaSOF góp phần hỗ trợ ổn định tần số sơ cấp nhờ tốc độ phản ứng nhanh, bổ sung cho bộ điều tốc với tốc độ thấp ở giai đoạn đầu của sự biến động tần số. Tuy nhiên phương pháp DaSOF không phù hợp trong hệ thống điện thiếu sự hoạt động của bộ điều chỉnh công suất phát tự động AGC (Automatic Grid Controller) vì khi đó bộ BESS không được nạp/xả bù lại dung lượng đã trao đổi với hệ thống ở giai đoạn điều chỉnh tần số sơ cấp.

Theo dòng thời gian, sự phối hợp làm việc giữa BESS và máy phát truyền thống trong việc điều chỉnh ổn định tần số được chia làm 3 giai đoạn: (i) Giai đoạn đầu: Đáp ứng quán tính của máy phát truyền thống và đáp ứng tần số nhanh FFR (Fast Frequency Response) của BESS cùng được kích hoạt để hỗ trợ một phần cho tần số không bị biến động nhiều thêm; (ii) Giai đoạn hai: Bộ điều tốc của máy phát và BESS cùng được kích hoạt để bù lại sự mất cân bằng công suất trong hệ thống, và dung lượng nạp SOC của bộ BESS sẽ bị thay đổi; (iii) Giai đoạn ba: Khi hệ thống có AGC, tần số của hệ thống sẽ được khôi phục về giá trị làm việc định mức (50Hz), và dung lượng nạp của bộ BESS cũng được khôi phục về giá trị giữa SOC_o. BESS sẽ đảm nhận trách nhiệm đối với sự biến động ở dải tần số lớn, còn máy phát điện truyền thống sẽ đảm nhận trách nhiệm đối với sự biến động ở dài tần số nhỏ.

4. KẾT LUẬN

Bài báo này đã tổng hợp các giải pháp kỹ thuật điều khiển hệ thống BESS tham gia vào quá trình điều chỉnh tần số trong hệ thống điện, bao gồm cả giai đoạn đáp ứng quán tính và điều chỉnh tần số sơ cấp. Nghiên cứu cung cấp cái nhìn tổng quan nhằm đánh giá hiệu quả kỹ thuật của từng giải pháp, đồng thời xem xét khả năng áp dụng các giải pháp này vào lưới điện Việt Nam trong giai đoạn tới.

Với các lợi ích của hệ thống BESS như đã phân tích, tác giả kiến nghị Việt Nam cần sớm xây dựng các chính sách và lộ trình phù hợp nhằm khuyến khích đầu tư hệ thống BESS đấu nối vào lưới điện, góp phần nâng cao độ ổn định hệ thống trong bối cảnh tỷ trọng năng lượng tái tạo ngày càng gia tăng, từng bước thay thế các nguồn năng lượng truyền thống, hướng tới mục tiêu phát thải ròng bằng không (Net Zero) vào năm 2050.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] F. Arrigo, E. Bompard, M. Merlo, and F. Milano, "Assessment of primary frequency control through battery energy storage systems," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 115, p. 105428, 2020, https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105428.

[2] M. Eskandari, A. Rajabi, A. V Savkin, M. H. Moradi, and Z. Y. Dong, "Battery energy storage systems (BESSs) and the economy-dynamics of microgrids: Review, analysis, and classification for standardization of BESSs applications," J. Energy Storage, vol. 55, p. 105627, 2022, https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105627.

[3] S. M. Alhejaj and F. M. Gonzalez-Longatt, "Investigation on grid-scale BESS providing inertial response support," in 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), IEEE, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/POWERCON.2016.7754049.

[4] F. M. Gonzalez-Longatt and S. M. Alhejaj, "Enabling inertial response in utility-scale battery energy storage system," in 2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT-Asia), IEEE, 2016, pp. 605-610, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2016.7796453.

[5] L. Toma et al., "On the virtual inertia provision by BESS in low inertia power systems," in 2018 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON), IEEE, 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/ENERGYCON.2018.8398755.

[6] H. Liu, Z. Hu, Y. Song, and J. Lin, "Decentralized vehicle-to-grid control for primary frequency regulation considering charging demands," IEEE Trans. Power Syst., vol. 28, no. 3, pp. 3480–3489, 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2013.2252029.

[7] J. W. Shim, G. Verbič, H. Kim, and K. Hur, "On droop control of energy-constrained battery energy storage systems for grid frequency regulation," IEEE Access, vol. 7, pp. 166353–166364, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953479.

[8] J. W. Shim, G. Verbič, N. Zhang, and K. Hur, "Harmonious integration of faster-acting energy storage systems into frequency control reserves in power grid with high renewable generation," IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 6, pp. 6193–6205, 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2836157.

■Ngày nhận bài: 16/3/2026 ■Ngày sửa bài: 23/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 02/4/2026

Đánh giá ảnh hưởng của các đặc trưng khí tượng đến độ chính xác của mô hình dự báo công suất điện mặt trời

Assessment of the Influence of Meteorological features on the Accuracy of a Solar power forecasting model

> THS HOÀNG THUYÊN
Khoa KTHT&MTĐT, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
Email: thuyen.htd.hau@gmail.com

TÓM TẮT

Dự báo công suất điện mặt trời đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo tính ổn định của điều độ hệ thống điện và tối ưu hóa tích hợp năng lượng tái tạo. Nghiên cứu này thực hiện đánh giá định lượng ảnh hưởng của các đặc trưng khí tượng đầu vào đến độ chính xác của mô hình dự báo sử dụng mạng nơ-ron hồi tiếp Long Short-Term Memory (LSTM). Dựa trên tập dữ liệu vận hành thực tế của nhà máy điện mặt trời công suất 50 MW, hai kịch bản thực nghiệm đã được thiết lập để so sánh giữa bộ 3 đặc trưng cơ sở (Bức xạ mặt trời, Nhiệt độ môi trường, Nhiệt độ tấm pin) và bộ 7 đặc trưng mở rộng (bổ sung độ ẩm, áp suất, tốc độ gió và độ che phủ mây). Kết quả thực nghiệm cho thấy mô hình sử dụng bộ đặc trưng tối giản đạt mức sai số NMAPE thấp (dưới 4%), trong khi việc bổ sung các biến khí tượng nâng cao chỉ mang lại sự cải thiện không đáng kể, dao động từ 0,05% đến 0,11%. Điều này chứng minh rằng các biến số bức xạ và nhiệt độ đã mang đủ thông tin cốt lõi để mô hình học được các quy luật phi tuyến của hệ thống. Nghiên cứu khẳng định chiến lược tối giản đặc trưng là giải pháp tối ưu về mặt kỹ thuật - kinh tế, đặc biệt phù hợp cho các hệ thống điện mặt trời tích hợp công trình đô thị hoặc áp mái, nơi việc cắt giảm chi phí hạ tầng cảm biến mà vẫn đảm bảo độ tin cậy dự báo là mục tiêu ưu tiên hàng đầu.

Từ khóa: Dự báo công suất phát điện mặt trời; đặc trưng thời tiết; LSTM.

ABSTRACT

Solar power forecasting plays a pivotal role in ensuring the stability of power system dispatching and optimizing the integration of renewable energy. This study conducts a quantitative assessment of the influence of input meteorological features on the accuracy of a forecasting model using Long Short-Term Memory (LSTM) networks. Based on real operational data from a 50 MW solar power plant, two experimental scenarios were established to compare a baseline 3-feature set (Solar Irradiance, Ambient Temperature, Module Temperature) with an expanded 7-feature set (including humidity, atmospheric pressure, wind speed, and cloud cover). Experimental results show that the model using the minimalist feature set achieves a low NMAPE (below 4%), while the integration of additional meteorological variables provides only marginal improvement, ranging from 0.05% to 0.11%. This demonstrates that solar radiation and temperature variables provide sufficient core information for the model to learn the nonlinear patterns of the system. The study confirms that a minimalist feature strategy is a techno-economically optimal solution, particularly suitable for urban-integrated or rooftop solar systems where reducing sensor infrastructure costs while maintaining forecasting reliability is a top priority.

Keywords: Solar power forecasting; meteorological features; LSTM

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự gia tăng nhanh chóng của các nguồn năng lượng tái tạo, đặc biệt là điện mặt trời, đã đặt ra những thách thức lớn đối với công tác điều độ và vận hành hệ thống điện do tính biến động và phụ thuộc chặt chẽ vào điều kiện thời tiết [1]. Để đảm bảo tính ổn định của lưới điện và tối ưu hóa việc tích hợp năng lượng sạch, các phương pháp dự báo công suất chính xác trong ngắn hạn và trung hạn trở thành yêu cầu cấp thiết [2].

Trong những năm gần đây, các mô hình học sâu, đặc biệt là mạng nơ-ron hồi tiếp Long Short-Term Memory (LSTM) đã chứng minh được ưu thế vượt trội trong việc xử lý các dữ liệu chuỗi thời gian có tính phụ thuộc dài hạn. Khả năng ghi nhớ các quy luật thời

tiết từ quá khứ giúp LSTM bám sát được các biến động công suất thực tế tốt hơn so với các phương pháp thống kê truyền thống [3].

Tuy nhiên, một vấn đề quan trọng thường bị bỏ qua trong các nghiên cứu dự báo là bài toán lựa chọn đặc trưng (Feature Selection) gắn liền với chi phí đầu tư hạ tầng quan trắc. Hầu hết các mô hình hiện nay có xu hướng tích hợp tối đa các biến khí tượng như áp suất, độ ẩm, tốc độ và hướng gió để đạt được độ chính xác cao nhất. Mặc dù điều này phù hợp với các nhà máy điện mặt trời quy mô lớn (Utility-scale), nhưng lại gây ra rào cản tài chính và kỹ thuật đáng kể đối với các hệ thống điện mặt trời áp mái hoặc tích hợp trong công trình đô thị (BIPV). Việc lắp đặt và bảo trì các trạm quan trắc khí tượng đầy đủ cho từng tòa nhà không chỉ làm tăng chi phí đầu tư ban đầu mà còn gây khó khăn trong công tác vận hành hệ thống quản lý năng lượng thông minh.

Nghiên cứu này tập trung phân tích mối tương quan giữa việc tối ưu hóa chi phí hạ tầng thiết bị và duy trì độ chính xác dự báo, qua đó đánh giá khả năng đáp ứng ngưỡng sai số cho phép của bộ đặc trưng khí tượng tối giản. Tác động định lượng của các thành phần khí tượng đầu vào đến hiệu năng mô hình dự báo Long Short-Term Memory (LSTM) được khảo sát chi tiết thông qua hai kịch bản thực nghiệm.

Kết quả nghiên cứu không chỉ đóng góp về mặt học thuật trong việc xác định độ nhạy của mô hình LSTM mà còn cung cấp cơ sở tham chiếu quan trọng cho việc triển khai các giải pháp dự báo chi phí thấp, phù hợp với xu thế phát triển đô thị thông minh và công trình xanh hiện nay. Nghiên cứu được chia ra làm 4 phần bao gồm: Phần 1 là giới thiệu tổng quan về nghiên cứu, phần 2 là phương pháp nghiên cứu, phần 3 trình bày các kết quả và cuối cùng là kết luận.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

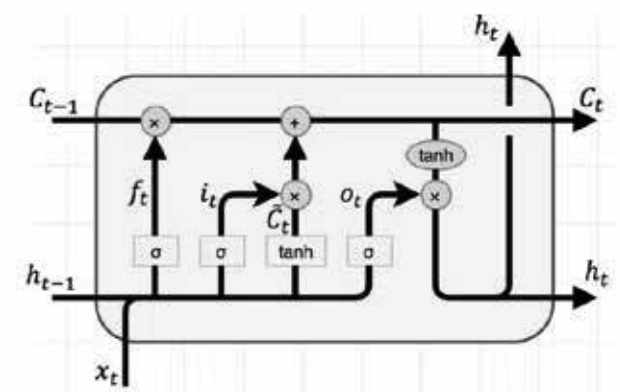
2.1. Dữ liệu nghiên cứu

Dữ liệu huấn luyện được thu thập từ một nhà máy điện mặt trời có công suất lắp đặt 50 MW tại tỉnh Đắk Lắk trong khoảng thời gian từ ngày 01/01/2022 đến ngày 31/12/2022. Với chu kỳ lấy mẫu 5 phút, bộ dữ liệu bao gồm 105,120 điểm đo, phản ánh chi tiết sự biến thiên của công suất phát điện dưới tác động của các yếu tố khí tượng. Nhằm đánh giá khả năng tổng quát hóa của mô hình, nghiên cứu thiết lập hai tập dữ liệu dự báo độc lập: Tập dự báo 1 (dữ liệu ngày 30/06/2023) đại diện cho kịch bản dự báo ngắn hạn trong ngày và Tập dự báo 2 (từ ngày 04/06 đến 06/06/2023) phục vụ đánh giá tính ổn định trong dự báo trung hạn. Việc tách biệt hoàn toàn các tập dữ liệu này đảm bảo tính khách quan và loại bỏ hiện tượng rò rỉ dữ liệu trong quá trình thực nghiệm.

Trước khi đưa vào mô hình, dữ liệu thô được chuẩn hóa về khoảng [0], [1] bằng phương pháp Min-Max Scaler. Quá trình này giúp loại bỏ sự khác biệt về đơn vị đo lường giữa các đặc trưng khí tượng, đồng thời tăng tốc độ hội tụ của thuật toán tối ưu. Các tham số chuẩn hóa được xác định từ tập huấn luyện và giữ cố định khi áp dụng cho các tập dự báo để đảm bảo tính đồng nhất về phân phối dữ liệu.

2.2. Mô hình LSTM

Mạng LSTM được lựa chọn nhờ cơ chế cổng (gate mechanism) đặc thù, cho phép mô hình kiểm soát luồng thông tin và lưu trữ các phụ thuộc dài hạn trong chuỗi thời gian. Trong cấu trúc này, cổng quên (forget gate) quyết định thông tin nào từ quá khứ sẽ bị loại bỏ, cổng đầu vào (input gate) cập nhật trạng thái ô hiện tại, và cổng đầu ra (output gate) trích xuất thông tin cần thiết cho bước thời gian tiếp theo [4]. Khả năng này đặc biệt quan trọng đối với dữ liệu điện mặt trời, vốn mang tính chu kỳ và phụ thuộc vào các xu hướng thời tiết từ các bước thời gian trước đó.



Hình 1. Mô hình LSTM [5]

Mô hình LSTM trong nghiên cứu này được thiết kế với cấu trúc tối ưu gồm một lớp LSTM 64 nơ-ron, kết hợp cùng lớp ẩn Dense 16 nơ-ron sử dụng hàm kích hoạt Tanh để tăng tính phi tuyến. Lớp đầu ra thực hiện dự báo giá trị công suất đơn lẻ. Các tham số huấn luyện được thiết lập cụ thể như sau:

- Hàm tối ưu: Adam (learning rate = 0,001)
- Look-back window: 12 bước (60 phút)
- Batch size: 32
- Epoch: 100

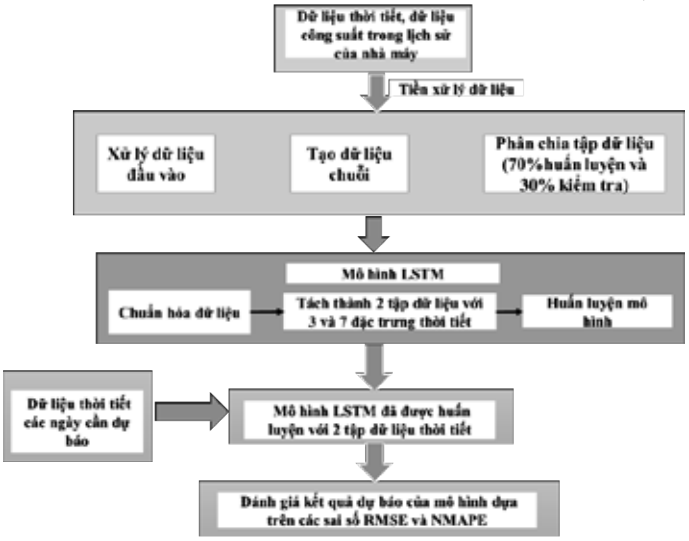
Dữ liệu của tập huấn luyện được chia theo tỷ lệ 70% huấn luyện và 30% kiểm tra.

2.3. Kịch bản thử nghiệm

Nghiên cứu tiến hành so sánh hiệu năng thông qua hai kịch bản dựa trên số lượng đặc trưng đầu vào, nhằm xác định mức độ phụ thuộc của độ chính xác dự báo vào sự phức tạp của hệ thống quan trắc:

- Kịch bản 1 (Mô hình tối giản): Sử dụng bộ 3 đặc trưng cơ sở gồm bức xạ mặt trời (GHI), nhiệt độ môi trường và nhiệt độ tấm pin. Kịch bản này nhằm kiểm chứng xem mô hình LSTM với số lượng đặc trưng đầu vào tối thiểu có đáp ứng yêu cầu dự báo hay không.
- Kịch bản 2 (Mô hình mở rộng): Bổ sung thêm 4 đặc trưng khí tượng gồm độ ẩm không khí, tốc độ gió, độ che phủ mây và áp suất khí quyển. Việc thiết lập kịch bản này nhằm kiểm chứng liệu sự gia tăng các đặc trưng dữ liệu có mang lại sự cải thiện đáng kể về mặt kỹ thuật cho mô hình dự báo hay không.

Các bước thực hiện dự báo được thể hiện trong sơ đồ sau đây:



Hình 2. Các bước thực hiện dự báo

2.4. Các sai số được sử dụng

Hiệu năng của mô hình được định lượng thông qua hai chỉ số thống kê phổ biến:

Sai số trung bình bình phương (RMSE): Chỉ số RMSE đo lường độ lệch giữa giá trị dự báo và giá trị thực tế, có xu hướng nhạy cảm với các sai số lớn. Giá trị RMSE càng thấp cho thấy mô hình có độ chính xác càng cao trong việc bám sát các biến động mạnh của công suất. Công thức tính RMSE được thể hiện sau đây [6].

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\hat{y}_i - y_i\right)^2} \qquad (1)$$

Trong đó: $\hat{y}_i$ là công suất dự báo (kW), y_i là công suất thực tế (kW), n là số lượng điểm dữ liệu.

Sai số tuyệt đối phần trăm trung bình đã được chuẩn hóa (NMAPE): Đối với hệ thống điện mặt trời, việc sử dụng NMAPE là cực kỳ quan trọng do công suất thường về mức 0 vào ban đêm. NMAPE thực hiện chuẩn hóa sai số dựa trên công suất định mức của nhà máy là 50 MW (tương đương 50000 kW) thay vì giá trị thực tế tại thời điểm đo, giúp tránh lỗi chia cho phần tử bằng 0 và cung cấp cái nhìn khách quan về hiệu suất mô hình trên toàn dải công suất. Công thức tính NMAPE được thể hiện như sau [7]:

$$NMAPE = \frac{100}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left|P_i^{db} - P_i^{tt}\right|}{P_{dm}} \qquad (2)$$

Trong đó: P_i^{db} giá trị công suất phát của dự báo thứ i (kW), P_i^{tt} là giá trị công suất trong thực tế của tín hiệu thứ i (kW), P_{dm} là công suất định mức của nhà máy (kW), n là số tín hiệu dự báo được đánh giá trong khung thời gian của loại dự báo.

3. KẾT QUẢ

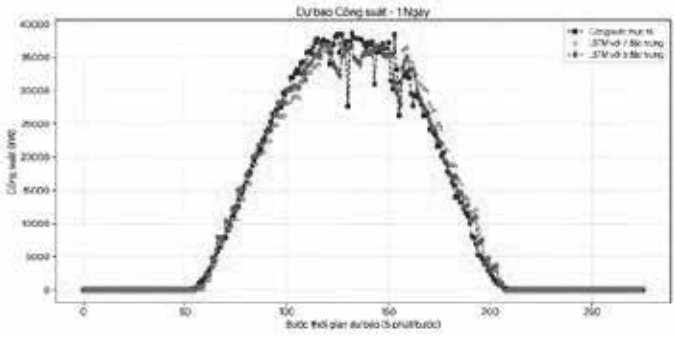
Hiệu suất dự báo của mô hình mạng LSTM đối với các kịch bản thực nghiệm được tổng hợp chi tiết tại Bảng 1.

Bảng 1. Kết quả dự báo của mô hình LSTM cho 2 kịch bản

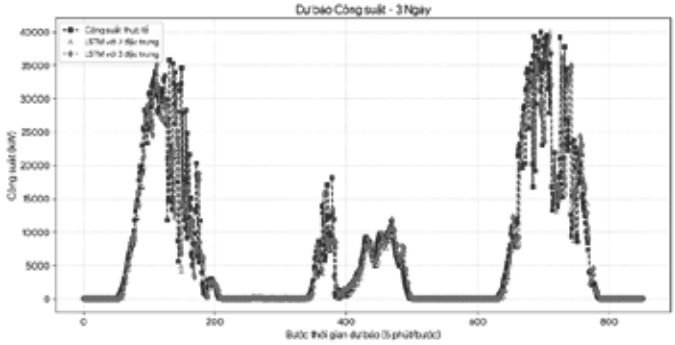
Kịch bản	Mô hình	RMSE (kW)	NMAPE (%)
Kịch bản 1 (3 đặc trưng khí tượng)	LSTM cho dự báo 1 ngày	2465,12	2,94
	LSTM cho dự báo 3 ngày	4219,23	3,92
Kịch bản 2 (7 đặc trưng khí tượng)	LSTM cho dự báo 1 ngày	2399,86	3,05
	LSTM cho dự báo 3 ngày	4137,45	3,87

Bảng 1 cho thấy sự chênh lệch về chỉ số NMAPE giữa hai kịch bản là rất nhỏ. Với dự báo cho 1 ngày thì độ chênh lệch của 2 kịch bản là 0,11% và với dự báo cho 3 ngày thì độ chênh lệch là 0,05%. Với công suất định mức của nhà máy là 50 MW, mức chênh lệch 0,05%-0,11% tương đương sai khác công suất trung bình chỉ khoảng 25-55 kW. So với biên độ dao động công suất hàng ngày lên tới hàng chục MW, mức sai lệch này là không đáng kể và hầu như không tạo ra khác biệt về mặt vận hành hệ thống hoặc lập kế hoạch điều độ. Đáng chú ý, tất cả các kết quả dự báo đều nằm trong ngưỡng sai số vận hành cho phép của Công ty TNHH MTV Vận hành hệ thống điện và Thị trường điện quốc gia (NSMO) với yêu cầu NMAPE dưới 15% [8]. Ngoài ra, kết quả huấn luyện lặp lại nhiều lần cho thấy độ lệch chuẩn của NMAPE dao động trong khoảng từ ±0,06% đến ±0,08%, tương đương với mức chênh lệch giữa hai kịch bản. Điều này cho thấy sự khác biệt về độ chính xác giữa bộ dữ liệu 3 đặc trưng và 7 đặc trưng không tạo ra sự khác biệt có ý nghĩa trong bối cảnh vận hành thực tế.

Việc so sánh công suất thực tế và kết quả dự báo của mô hình LSTM trong hai cấu hình đặc trưng được minh họa chi tiết qua Hình 3 và Hình 4.



Hình 3. So sánh công suất dự báo của mô hình LSTM theo hai cấu hình đặc trưng và công suất thực tế trong dự báo ngắn hạn (1 ngày)



Hình 4. So sánh công suất dự báo của mô hình LSTM theo hai cấu hình đặc trưng và công suất thực tế trong dự báo trung hạn (3 ngày)

Đồ thị tại Hình 3 và Hình 4 cho thấy cả hai cấu hình đặc trưng mô hình dự báo đều có khả năng tái tạo tốt hình dạng đường cong công suất thực tế, đặc biệt là trong giai đoạn đạt đỉnh. Tại các bước thời gian có biến động thời tiết nhanh (mây che cục bộ), mô hình LSTM sử dụng 3 đặc trưng vẫn duy trì được xu hướng bám sát đường công suất thực tế không hề thua kém so với mô hình đầy đủ 7 đặc trưng. Điều này chứng minh rằng các biến số bức xạ và nhiệt độ đã mang đủ thông tin cốt lõi để mô hình học được các quan hệ phi tuyến phức tạp. Việc mở rộng thêm các biến khí tượng bổ trợ như áp suất, độ ẩm và các biến bổ trợ khác không mang lại cải thiện đáng kể trong quá trình dự báo.

❖ **Khả năng ứng dụng thực tiễn và mở rộng cho hệ thống điện mặt trời đô thị**

Mặc dù các dữ liệu thực nghiệm trong nghiên cứu này được trích xuất từ nhà máy điện mặt trời quy mô lớn (50 MW), kết quả này mang lại những giá trị tham chiếu quan trọng cho các hệ thống quy mô nhỏ hơn.

Các đặc tính vật lý chi phối quá trình biến đổi quang điện như cường độ bức xạ và tác động của nhiệt độ lên tế bào quang điện là đồng nhất trên mọi quy mô. Do đó, mô hình dự báo với bộ đặc trưng tối giản có thể dễ dàng chuyển giao cho các hệ thống điện mặt trời tích hợp công trình đô thị hoặc điện mặt trời mái nhà tại các khu chung cư, nhà máy.

Trong bối cảnh phát triển đô thị thông minh, việc ưu tiên sử dụng bộ 3 đặc trưng (Bức xạ, Nhiệt độ môi trường, Nhiệt độ tấm pin) mang lại nhiều lợi ích thiết thực:

1. Tối ưu hóa chi phí đầu tư: Giảm bớt nhu cầu lắp đặt các cảm biến chuyên dụng đắt tiền như máy đo tốc độ gió, cảm biến áp suất khí quyển, camera toàn cảnh bầu trời.

2. Đơn giản hóa hạ tầng dữ liệu: Giảm khối lượng truyền tải và lưu trữ dữ liệu, phù hợp với các hệ thống điều khiển tại tòa nhà.

3. Hỗ trợ quản lý năng lượng thông minh: Cung cấp đầu vào tin cậy cho hệ thống quản lý năng lượng tòa nhà để điều phối phụ tải, tối ưu hóa việc sạc/xả hệ thống lưu trữ và lập kế hoạch mua bán điện theo biểu giá thời gian một cách hiệu quả nhất.

Để minh họa cụ thể cho tiềm năng ứng dụng này, Hình 5 mô tả cấu trúc điển hình của một hệ thống điện mặt trời mái nhà tích hợp trên các công trình cao tầng trong không gian đô thị. Đây chính là bối cảnh mà giải pháp tối giản hóa bộ đặc trưng khí tượng phát huy tối đa ưu thế về mặt kinh tế và kỹ thuật.

Hình 5. Hệ thống điện mặt trời mái nhà tích hợp trên các công trình đô thị

Việc áp dụng mô hình LSTM dựa trên bộ 3 đặc trưng cốt lõi (bức xạ, nhiệt độ môi trường, nhiệt độ tấm pin) giúp các đơn vị quản lý tòa nhà giảm bớt gánh nặng về hạ tầng quan trắc mà vẫn đạt được độ chính xác dự báo cần thiết. Điều này tạo tiền đề cho việc tích hợp sâu rộng năng lượng tái tạo vào lưới điện phân phối tại các khu vực dân cư đông đúc.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thực hiện đánh giá định lượng về ảnh hưởng của các đặc trưng khí tượng đến độ chính xác của mô hình dự báo công suất điện mặt trời dựa trên mạng LSTM. Thông qua việc phân tích dữ liệu thực tế và thử nghiệm trên các kịch bản dự báo ngắn hạn và trung hạn, một số kết luận quan trọng được rút ra như sau:

Thứ nhất, mô hình LSTM thể hiện sự ổn định và chính xác cao trong cả hai kịch bản dự báo. Khi sử dụng bộ 3 đặc trưng cơ sở (bức xạ mặt trời, nhiệt độ môi trường và nhiệt độ tấm pin), sai số NMAPE vẫn đạt mức thấp dưới 4%, hoàn toàn đáp ứng các tiêu chuẩn vận hành nghiêm ngặt của hệ thống điện.

Thứ hai, kết quả thực nghiệm khẳng định rằng việc bổ sung các đặc trưng nâng cao như độ ẩm, áp suất khí quyển, tốc độ gió và độ che phủ của đám mây chỉ mang lại sự cải thiện sai số không đáng kể (dao động từ 0,05% đến 0,11%). Điều này chỉ ra rằng các biến số cơ sở đã mang đủ thông tin đặc trưng để mô hình học được quy luật phát điện của hệ thống, trong khi các đặc trưng bổ trợ có thể làm nhiễu thông tin đối với các mô hình học sâu như LSTM.

Thứ ba, nghiên cứu đề xuất một chiến lược tiếp cận tối giản trong việc xây dựng hạ tầng dữ liệu dự báo. Việc tập trung vào bộ 3 đặc trưng cốt lõi giúp giảm thiểu đáng kể chi phí đầu tư cảm biến và đơn giản hóa quy trình vận hành hệ thống giám sát. Đây là cơ sở quan trọng để triển khai rộng rãi các mô hình dự báo cho hệ thống điện mặt trời mái nhà và tích hợp công trình đô thị, nơi yếu tố chi phí và sự tinh gọn của thiết bị luôn được ưu tiên hàng đầu.

Trong tương lai, nghiên cứu có thể được mở rộng bằng cách khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố đặc thù trong đô thị như bóng đổ từ các công trình lân cận hoặc tác động của ô nhiễm không khí đến độ chính xác dự báo, nhằm hoàn thiện hơn nữa khả năng ứng dụng của mô hình trong thực tế quản lý năng lượng thông minh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] N. D. Tuyen, V. Xuan, S. Huu, and L. V. Thinh, "Photovoltaic Power Generation Forecasting Utilizing Long Short Term Memory," Meas. Control Autom., vol. 1, no. April, pp. 2-7, 2021.

[2] Nguyễn Tuấn Anh, Phạm Mạnh Hải, Vũ Minh Pháp, Nguyễn Đăng Toản và Vũ Thị Anh Thơ, "Dự báo công suất nguồn phát điện mặt trời bằng mô hình BiGRU," Tạp chí Khoa học và Công nghệ Năng lượng - Trường Đại học Điện lực, vol. 34, pp. 1-14, 2024.

[3] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, "Long Short-Term Memory," Neural Comput., vol. 9, no. 8, pp. 1735-1780, 1997, doi: 10.1162/neco.1997.9.8.1735.

[4] L. D. Bui, N. Q. Nguyen, B. Van Doan, and E. R. Sanseverino, "Forecasting energy output of a solar power plant in curtailment condition based on LSTM a case study in Vietnam," Electr. Power Syst. Res., vol. 213, 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108706.

[5] N. N. V. Nhat, D. N. Huu, and T. T. H. Nguyen, "Short-term multi-step forecasting of rooftop solar power generation using a combined data decomposition and deep learning model of EEMD-GRU," J. Renew. Sustain. Energy, vol. 16, no. 1, 2024, doi: 10.1063/5.0176951.

[6] E. Nziyumva, R. Hu, Y. Xu, J. Niyogisubizo, Z. Li, and P. C. Nshimyumukiza, "Solar Radiation Forecasting Using Ensemble-Based Hybrid LGBM-GB-MLP Model: A Novel Stacked Generalization Method," SSRN Electron. J., no. October, 2022, doi: 10.2139/ssrn.4076358.

[7] Bộ Công Thương, "67 QĐ/quy trình dự báo công suất, điện năng phát của các nguồn điện năng lượng tái tạo," pp. 1-22, 2021.

[8] EVNNLDC, "4608/ĐĐQG-NLTT, yêu cầu độ chính xác đối với dự báo công suất phát các NMĐ NLTT năm 2024," pp. 1-10, 2023.

■Ngày nhận bài: 16/3/2026 ■Ngày sửa bài: 23/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 02/4/2026

Giải pháp chuẩn hóa và phân tích dữ liệu trong quản lý các bãi chôn lấp đã đóng cửa tại Việt Nam

Standardization and data analysis solutions in the management of closed landfills in Vietnam

> PGS.TS NGHIÊM VÂN KHANH[1,*], PGS.TS MAI THỊ LIÊN HƯƠNG[2]
[1]Khoa KTHT và MT Đô thị, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội; [*]Email: khanhnv@hau.edu.vn
[2]Hội Quy hoạch phát triển đô thị Việt Nam

TÓM TẮT

Bài báo trình bày các giải pháp chuẩn hóa dữ liệu gồm: các nhóm dữ liệu về hành chính, pháp lý, địa chất, kỹ thuật - công nghệ và môi trường đầu vào; các nhóm dữ liệu không gian và đưa ra các giải pháp phân tích dữ liệu như: phân tích hiện trạng và xu thế môi trường; phân tích đánh giá rủi ro, an toàn môi trường và mức độ phù hợp tái sử dụng đất của các bãi chôn lấp (BCL) đã đóng cửa. Kết quả nghiên cứu đã phân tích và lựa chọn được phương pháp chuẩn hóa dữ liệu theo bộ chỉ tiêu lõi, thực hiện phân lớp dữ liệu kết hợp phân tích đa tiêu chí (MCDA) và chỉ số tổng hợp trên nền tảng cơ sở dữ liệu GIS để quản lý các BCL chất thải rắn sinh hoạt (CTRSH) đã đóng cửa phù hợp với điều kiện Việt Nam. Đây là cơ sở khoa học trong việc chuẩn hóa và phân tích dữ liệu đối với công tác quản lý các BCL đã đóng cửa hướng tới việc triển khai công tác cải tạo, phục hồi môi trường và tái sử dụng các BCL một cách đồng bộ, hiệu quả trong thời gian tới.

Từ khóa: Chuẩn hóa dữ liệu; phân tích dữ liệu; chất thải rắn sinh hoạt; bãi chôn lấp; bãi chôn lấp đã đóng cửa.

ABSTRACT

This study proposes a systematic framework for data standardization and analysis to support the management, restoration, and reuse of closed municipal solid waste landfills in Vietnam. The standardized data framework comprises administrative and regulatory data, geological data, technical and technological information, environmental baseline data, and spatial datasets. Based on these datasets, the study applies a set of analytical approaches, including environmental status and trend analysis, environmental risk and safety assessment, and land reuse suitability evaluation for closed landfill sites. The research identifies an appropriate data standardization method based on a core indicator system and implements data classification integrated with multi-criteria decision analysis (MCDA) and composite indices within a GIS-based database platform. This integrated approach enables comprehensive assessment and effective management of closed landfills under Vietnamese conditions. The results provide a scientific basis for harmonizing data standardization and analytical processes, thereby supporting the coordinated implementation of landfill remediation, environmental restoration, and sustainable land reuse strategies in the future.

Keywords: Data standardization; Data analysis; municipal solid waste; landfill; closed landfill.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tại Việt Nam, hầu hết các BCL chất thải rắn sinh hoạt dù đã được đóng cửa hoặc ngừng tiếp nhận chất thải nhưng vẫn tiềm ẩn nguy cơ ô nhiễm môi trường đất, nước, không khí và phát sinh rủi ro mất an toàn trong quá trình phục hồi môi trường, cải tạo và tái sử dụng đất đòi hỏi phải được quản lý, giám sát chặt chẽ thực hiện theo các quy định hiện hành như Luật Bảo vệ môi trường năm 2020 [4], Nghị định số 08/2022/NĐ-CP [8], Thông tư 41/2025/TT-BNNMT [9]….. Thực tiễn cho thấy dữ liệu liên quan đến các BCL đã đóng cửa hiện còn phân tán, không đồng nhất về cấu trúc, thiếu cập nhật và khó khai thác, gây hạn chế cho công tác giám sát dài hạn, đánh giá hiện trạng, kiểm soát rủi ro và ra quyết định quản lý tái sử dụng đất theo định hướng kinh tế tuần hoàn. Cụ thể việc quản lý dữ liệu của nhiều địa phương thời gian qua còn những tồn tại như sau:

(i) Không có thông tin lưu trữ đầy đủ đối với các BCL tạm, mang tính tự phát và quy mô nhỏ nên không thể xác định được thời gian đã bắt đầu vận hành, không có số liệu về khối lượng CTRSH đã chôn lấp, không có thông tin về các biện pháp kiểm soát ô nhiễm môi trường trong quá trình chôn lấp;

(ii) Hầu hết các tỉnh đều có tình trạng các dữ liệu thiếu thống nhất theo nhiều cấp quản lý khác nhau;

(iii) Việc cập nhật dữ liệu quản lý còn chậm, mang tính thủ công và thiếu đồng bộ.

Trong bối cảnh thực hiện Chương trình Chuyển đổi số quốc gia theo Quyết định số 749/QĐ-TTg [6] và yêu cầu tăng cường quản lý môi trường dựa trên dữ liệu, việc nghiên cứu chuẩn hóa và phân tích dữ liệu để quản lý các bãi chôn lấp đã đóng cửa là hết sức cấp thiết.

2. THỰC TRẠNG CÔNG TÁC QUẢN LÝ VÀ CƠ SỞ PHÁP LÝ TRONG QUẢN LÝ CÁC BCL CTRSH ĐÃ ĐÓNG CỬA TẠI VIỆT NAM

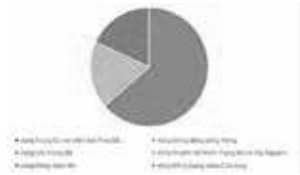
2.1. Thực trạng công tác quản lý các BCL CTRSH đã đóng cửa tại Việt Nam

Theo thống kê chưa đầy đủ, hiện cả nước có khoảng 1.322 cơ sở xử lý CTRSH. Các cơ sở xử lý chất thải rắn (CTR) này đã đầu tư 381 lò đốt CTRSH, 37 dây chuyền sản xuất phân compost, khoảng 904 BCL CTRSH; trong đó nhiều BCL không hợp vệ sinh. Một số cơ sở áp dụng phương pháp đốt kết hợp thu hồi năng lượng để phát điện hoặc có kết hợp nhiều phương pháp xử lý [1].

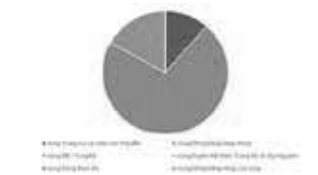
Thực tế cho thấy, so với các phương pháp xử lý CTR khác, phương pháp chôn lấp CTR tại các BCL luôn chiếm nhiều diện tích đất, không phù hợp với xu hướng đô thị hóa. Nhiều BCL rác thải hiện đang quá tải, có nguy cơ gây ô nhiễm môi trường nghiêm trọng và thường xuyên gặp phải sự phản đối của người dân. Trong bối cảnh đó, nhiều địa phương đã và đang thực hiện việc đóng các BCL để chuyển sang các hình thức xử lý khác nhưng vẫn chưa có những thông tin đầy đủ về quá trình này. Theo nghiên cứu hiện trạng đóng cửa các BCL CTRSH tại Việt Nam, qua thực hiện tổng hợp, rà soát và thống kê thông tin chưa đầy đủ dựa trên các báo cáo quy hoạch, công tác quản lý CTRSH gần đây nhất tại 34 tỉnh thành sau sáp nhập. (Gồm: 09 tỉnh vùng Trung du và miền núi phía Bắc; 06 tỉnh, thành phố vùng Đồng bằng sông Hồng; 05 tỉnh, thành phố vùng Bắc Trung Bộ; 06 tỉnh, thành phố vùng duyên hải Nam Trung Bộ và Tây Nguyên; 03 tỉnh, thành phố vùng Đông Nam Bộ; và 05 tỉnh, thành phố vùng Đồng bằng sông Cửu Long) cho thấy: có khoảng 559 BCL đã được đóng cửa tại các địa phương trong cả nước trong thời gian gần đây. Trong đó, vùng Trung du và miền núi phía Bắc là vùng có tỷ lệ lên tới gần 90% các BCL tạm, tự phát, gây ô nhiễm môi trường và quy mô nhỏ dưới 2 ha hoặc công suất dưới 50T/ngày, cao nhất so với các vùng khác trong cả nước. Vùng Đồng bằng sông Cửu Long và vùng đồng bằng sông hồng là 2 vùng lần lượt có tỷ lệ số lượng các BCL nhỏ đã được đóng cửa đứng thứ 2 và thứ 3 trong cả nước tương ứng 64% và 43%. Bên cạnh đó, một số vùng tỉnh có tỷ lệ các BCL mới chỉ tạm dừng và chưa thực hiện quy trình đóng cửa chính thức tập trung cao nhất tại các tỉnh thuộc vùng Đồng bằng sông Hồng và vùng Bắc Trung Bộ với số liệu tương ứng khoảng 24% và 14,5% so với tổng số BCL thống kê trong vùng [2]. Xem minh họa tại các Hình 1, 2, 3, 4 dưới đây.

Hình 1. Số lượng các BCL đã đóng cửa gần đây tại các vùng trong cả nước [2]

Hình 2. So sánh tỷ lệ các BCL đã đóng cửa theo quy mô tại các vùng trong cả nước



Hình 3. Tỷ lệ các BCL đã di dời tại các vùng trong cả nước



Hình 4. Tỷ lệ các BCL tạm dừng tiếp nhận CTR nhưng chưa thực hiện quy trình đóng cửa chính thức tại các vùng trong cả nước

2.2. Các hành lang pháp lý liên quan

- Luật chuyển đổi số 2025, đã được Quốc Hội thông qua ngày 11/12/2025; [3]
- Luật Bảo vệ môi trường số 72/2020/QH14 ngày 17/11/2020, có hiệu lực kể từ ngày 01/01/2022; được sửa đổi, bổ sung bởi Luật Thanh tra số 11/2022/QH15 ngày 14/11/2022 của Quốc hội, có hiệu lực kể từ ngày 01/7/2023 theo Văn bản hợp nhất số 21/VBHN-VPQH; [4]
- Nghị quyết số 214/NQ-CP của Chính phủ, ngày 23/7/2025, ban hành Kế hoạch hành động của Chính phủ về thúc đẩy tạo lập dữ liệu phục vụ chuyển đổi số toàn diện đã đặt ra những yêu cầu mới trong quản lý CTR của Việt Nam đặt trọng tâm vào việc phân tích, xử lý dữ liệu để ra quyết định hướng tới xây dựng phát triển nền tảng số, quản lý dữ liệu quốc gia. [5]
- Quyết định số 491/QĐ-TTg ngày 07/5/2018 đã đặt ra mục tiêu đến năm 2025 thực hiện giảm tỉ lệ chôn lấp CTRSH trực tiếp đạt dưới 30% [7]
- Quyết định số 749/QĐ-TTg ngày 03/6/2020 trong Chương trình Chuyển đổi số quốc gia đến năm 2025, định hướng đến năm 2030 đã đặt ra mục tiêu đến năm 2030 là 70% hoạt động kiểm tra của cơ quan quản lý nhà nước được thực hiện thông qua môi trường số và hệ thống thông tin của cơ quan quản lý [6]
- Thông tư số 02/2022/TT-BTNMT, Điều 17, hướng dẫn kỹ thuật cải tạo, phục hồi môi trường; Điều 32, đóng BCL CTRSH sau khi kết thúc hoạt động [8]
- Thông tư 41/2025/TT-BNNMT ngày 14/7/2025 Hướng dẫn kỹ thuật về phòng ngừa, ứng phó sự cố chất thải và phục hồi môi trường sau sự cố môi trường; [9]
- TCVN 6696 : 2009, Điều 10, hướng dẫn quy trình và yêu cầu BVMT khi đóng BCL [10]

3. CHUẨN HÓA VÀ PHÂN TÍCH DỮ LIỆU TRONG QUẢN LÝ CÁC BCL ĐÃ ĐÓNG CỬA TẠI VIỆT NAM

3.1. Mục tiêu của chuẩn hóa và phân tích dữ liệu các BCL đã đóng cửa tại Việt Nam

Dữ liệu được thu thập về các BCL đã đóng cửa tại Việt Nam thường rất phức tạp, có thể chứa nhiều lỗi như thiếu giá trị, dữ liệu trùng lặp, hoặc không nhất quán. Quá trình làm sạch và chuẩn hóa dữ liệu giúp đảm bảo rằng dữ liệu đầu vào là chính xác, đồng nhất, và sẵn sàng cho các bước xử lý tiếp theo. Vì Vậy, việc chuẩn hóa và phân tích dữ liệu các BCL đã đóng cửa tại Việt Nam cần được thực hiện nhằm các mục tiêu cơ bản sau:

- Thiết lập bộ dữ liệu thống nhất, tin cậy về hiện trạng môi trường, các thông số kỹ thuật vận hành và tình hình mức độ đã cải tạo, phục hồi môi trường của các BCL đã đóng cửa trong cả nước.
- Lập các báo cáo đánh giá rủi ro môi trường, an toàn đối với môi trường và cộng đồng theo các giai đoạn ngắn hạn, trung hạn và dài hạn.
- Phân loại mức độ phù hợp tái sử dụng đất của mỗi BCL theo đặc thù và yêu cầu thực tế tại mỗi địa phương (ví dụ: tài sử dụng đất làm khu công viên, cây xanh, bãi xe, năng lượng tái tạo, đất dự trữ hạ tầng kỹ thuật…)
- Hỗ trợ ra quyết định trong công tác quy hoạch đô thị, quản lý đất đai và đầu tư phục hồi môi trường các dự án;
- Làm cơ sở xây dựng quy chuẩn, kỹ thuật quốc gia, sổ tay hướng dẫn, định mức kinh tế,… về quản lý các BCL sau đóng cửa

3.2. Nguyên tắc của chuẩn hóa và phân tích dữ liệu các BCL đã đóng cửa tại Việt Nam

Để bảo đảm dữ liệu đúng, đủ và có thể sử dụng được cho các mục đích quản lý, việc chuẩn hóa và phân tích dữ liệu phải thực hiện theo 5 nguyên tắc chính, đó là:

- Nguyên tắc đầy đủ - tối thiểu cần thiết (Minimum Required Completeness) : các thông tin thu thập, tổng hợp cần đầy đủ nhưng tránh dàn trải, lãng phí và nên đưa ra bộ chỉ tiêu thống nhất cho tất cả các BCL trước khi thực hiện phân tích.

- Nguyên tắc thống nhất - so sánh được (Consistency & Comparability): bao gồm việc thống nhất về thuật ngữ, thứ nguyên, các phương pháp và nguồn cung cấp dữ liệu, đồng thời các dữ liệu phải so sánh được giữa các BCL với nhau cũng như so sánh theo thời gian. Nguyên tắc này giúp cho việc phân tích dữ liệu đưa ra các mô tả, trực quan mang tính xu thế hoặc dễ dàng phân tích, đánh giá rủi ro môi trường từ các BCL.

- Nguyên tắc gắn với vòng đời BCL (Lifecycle-based Data Structuring): nguyên tắc này đòi hỏi việc chuẩn hóa dữ liệu theo các giai đoạn như trước đóng bãi; thời điểm đóng bãi; sau đóng bãi (khoảng 3÷5 năm/lần) để có thể theo dõi diễn biến chất lượng môi trường và kịp thời kiểm soát ô nhiễm khi đóng bãi.

- Nguyên tắc tích hợp không gian - thời gian (Spatio-temporal Integration) : các BCL cần có dữ liệu theo không gian để xác định vị trí và vùng ảnh hưởng theo tọa độ hệ thống quản lý thông tin địa lý (GIS) và thời gian (theo chương trình quan trắc) để giám sát, kiểm tra tức thời.

- Nguyên tắc hướng tới quyết định (Decision-oriented Data): việc chuẩn hóa không chỉ phục vụ lưu trữ mà còn cần giúp cho cơ quan quản lý đưa ra các quyết định như : BCL cần cải tạo, phục hồi môi trường như thế nào ? Mức độ an toàn và khả năng đưa vào tái sử dụng được chưa ?...

4. ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP CHUẨN HÓA VÀ PHÂN TÍCH DỮ LIỆU TRONG QUẢN LÝ CÁC BCL ĐÃ ĐÓNG CỬA TẠI VIỆT NAM

4.1. Lựa chọn phương pháp chuẩn hóa và phân tích dữ liệu

Để chuẩn hóa dữ liệu cho các BCL đã đóng cửa, có 3 phương pháp sau:

- Phương pháp chuẩn hóa theo bộ chỉ tiêu lõi (Core Indicator Standardization - CIS): trong đó các dữ liệu được chia thành các nhóm gồm (i) thông tin về mặt hành chính - pháp lý; (ii) thông tin về đặc điểm kỹ thuật - công nghệ; (iii) thông tin về môi trường (không khí, nước, đất,…) và (iv) thông tin về quy hoạch liên quan đến tái sử dụng đất.

- Phương pháp chuẩn hóa theo cấu trúc cơ sở dữ liệu tích hợp GIS: phương pháp này cần mã hóa và thiết lập các bảng biểu, các quan hệ theo cơ sở dữ liệu thuộc tính và cơ sở dữ liệu không gian.

- Phương pháp chuẩn hóa bằng phân lớp dữ liệu (Data Tiering): các dữ liệu được chia thành 3 lớp, trong đó dữ liệu lớp 1 là bắt buộc với mọi BCL; lớp 2 là dữ liệu nâng cao và lớp 3 là dữ liệu chuyên sâu.

Đối với phương pháp chuẩn hóa theo bộ chỉ tiêu lõi có ưu điểm là dễ triển khai, phù hợp điều kiện địa phương nhưng có hạn chế là chưa phản ánh được đầy đủ mối quan hệ giữa các chỉ tiêu của BCL. Đối với phương pháp chuẩn hóa theo cấu trúc cơ sở dữ liệu tích hợp GIS có ưu điểm là phù hợp trong việc quản lý dài hạn và có khả năng tích hợp tốt Dashboard, tuy nhiên phương pháp này đòi hỏi địa phương phải có năng lực về công nghệ thông tin. Phương pháp Chuẩn hóa bằng phân lớp dữ liệu (Data Tiering) có ưu điểm là có thể linh hoạt với dữ liệu thiếu, điều này phù hợp với thực trạng các BCL của Việt Nam nhưng điểm hạn chế là đòi hỏi phải quản lý tốt metadata.

Để phân tích dữ liệu cho các BCL đã đóng cửa, có 4 phương pháp sau:

- Phương pháp phân tích thống kê mô tả và xu thế (Descriptive & Trend Analysis): việc phân tích dựa vào trung bình, cực trị, độ lệch và phân tích môi trường theo chuỗi thời gian.

- Phương pháp phân tích không gian (GIS-based Spatial Analysis): việc phân tích thường được thực hiện theo vùng bị ảnh hưởng của ô nhiễm và dựa trên các dữ liệu được chồng lớp (như lớp dữ liệu về điều kiện xã hội, môi trường,…)

- Phương pháp phân tích đa tiêu chí (MCDA/AHP): là phương pháp phân tích kết hợp các tiêu chí như quy hoạch, môi trường tự nhiên, môi trường xã hội, đặc điểm công nghệ, địa kỹ thuật,…

- Phương pháp chỉ số tổng hợp (Composite Index - RI, LRI): phân tích dựa trên việc thiết lập các chỉ số hoặc chỉ tiêu (ví dụ chỉ số rủi ro, chỉ tiêu tái sử dụng BCL,…) và chuẩn hóa các chỉ tiêu/chỉ số đó về cùng thang điểm.

Phương pháp phân tích thống kê mô tả và xu thế thường phù hợp để theo dõi, đánh giá diễn biến ô nhiễm môi trường sau đóng bãi. Trường hợp phân tích dữ liệu để đánh giá rủi ro hoặc sự lan truyền ô nhiễm thì phương pháp phân tích không gian phù hợp nhất. Để thực hiện phân tích dữ liệu phục vụ quản lý việc tái sử dụng đất sau đóng BCL nên chọn phương pháp phân tích đa tiêu chí và để phân hạng và xếp loại thứ tự ưu tiên đầu tư tái sử dụng đất tại các BCL sau đóng cửa cần sử dụng phương pháp chỉ số tổng hợp. Ngoài 4 phương pháp trên, hiện nay còn có phương pháp dùng mô hình học máy (machine learning) nhưng phương pháp này chưa phù hợp áp dụng trong cả nước vì hiện tại việc quản lý các BCL của Việt Nam còn thiếu dữ liệu, dữ liệu không đồng nhất và khó diễn giải.

Tóm lại, qua xem xét các phương pháp này, cho thấy, phương pháp chuẩn hóa và phân tích dữ liệu các BCL đã đóng cửa phù hợp với điều kiện Việt Nam hiện nay là phương pháp chuẩn hóa dữ liệu theo bộ chỉ tiêu lõi, thực hiện phân lớp dữ liệu kết hợp phân tích đa tiêu chí (MCDA) và chỉ số tổng hợp trên nền tảng cơ sở dữ liệu GIS. Đây là phương pháp chấp nhận dữ liệu không đầy đủ và có thể cập nhật dần. Đồng thời phương pháp này cũng phù hợp năng lực quản lý hiện nay, không đòi hỏi thuật toán phức tạp và có thể triển khai tùy theo các mức độ của các cấp, ban, ngành để phục vụ hỗ trợ ra quyết định cho các cấp lãnh đạo cũng như dễ dàng tương tích trong hệ thống cơ sở dữ liệu quốc gia, dashboard quản lý theo định hướng chuyển đổi số.

4.2. Các giải pháp thực hiện triển khai chuẩn hóa và phân tích dữ liệu

Nội dung của phần chuẩn hóa dữ liệu được đề xuất như Bảng 1.

Bảng 1. Nội dung chuẩn hóa dữ liệu theo bộ chỉ tiêu lõi (CIS) và chuẩn hóa dữ liệu không gian theo GIS đối với các BCL đã đóng cửa tại Việt Nam

Tên nhóm dữ liệu cần chuẩn hóa	Thông tin cần chuẩn hóa	Biện pháp thực hiện chuẩn hóa
Dữ liệu thông tin về mặt hành chính - pháp lý	✓ Tên bãi, mã định danh BCL (ID thống nhất toàn quốc) ✓ Vị trí hành chính theo đơn vị chính quyền 2 cấp hiện hành ✓ Chủ quản lý cũ / đơn vị chịu trách nhiệm sau đóng cửa ✓ Năm bắt đầu vận hành - năm đóng cửa ✓ Hồ sơ pháp lý hiện có (ĐTM, phương án đóng cửa, cải tạo)	✓ Xây dựng biểu mẫu dữ liệu chuẩn (Data Form BCL-01) áp dụng thống nhất ✓ Liên kết với cơ sở dữ liệu đất đai và môi trường cấp tỉnh/thành phố

Dữ liệu thông tin về đặc điểm kỹ thuật - công nghệ	✓ Diện tích, chiều cao bãi ✓ Loại BCL (hở, bán hợp vệ sinh, hợp vệ sinh) ✓ Công nghệ chống thấm đáy và phủ bề mặt ✓ Hệ thống thu gom, xử lý: nước rỉ rác; khí BCL (LFG) ✓ Tình trạng công trình còn hoạt động hay hư hỏng	✓ Định nghĩa thống nhất thuật ngữ theo tiêu chuẩn, quy chuẩn hiện hành ✓ Chuẩn hóa đơn vị đo (m, m^2, m^3, mg/l, m^3CH_4/h…)
Dữ liệu thông tin về môi trường (không khí, nước, đất,…)	✓ Chất lượng môi trường (nước ngầm, nước mặt, đất, khí CH_4, CO_2, H_2S, VOCs,…kim loại nặng Pb, Cd, Cr, Hg… theo các chỉ số ô nhiễm đặc trưng của BCL)	✓ Áp dụng khung chỉ tiêu giám sát tối thiểu cho BCL đã đóng cửa ✓ Chuẩn hóa theo tiêu chuẩn, quy chuẩn hiện hành
Dữ liệu địa kỹ thuật - địa chất	✓ Thành phần rác dự kiến còn lại trong bãi (khi khai đào) ✓ Độ lún, độ ổn định của mái dốc (thành bãi) ✓ Khả năng phát sinh khí và nước rỉ trong tương lai ✓ Kết quả khoan thăm dò lõi rác (nếu có)	✓ Mẫu báo cáo khảo sát địa kỹ thuật BCL (BCL-GEO-01) ✓ Phân lớp dữ liệu theo độ sâu và thời gian
Dữ liệu thông tin về quy hoạch liên quan đến tái sử dụng đất	✓ Dữ liệu quy hoạch không gian: ranh giới quy hoạch sử dụng đất (polygon); chức năng sử dụng đất hiện tại; chức năng sử dụng đất theo quy hoạch; phân khu chức năng đô thị/nông thôn; Vùng hạn chế xây dựng ✓ Dữ liệu pháp lý và thời hạn quy hoạch: tên đồ án quy hoạch, cấp phê duyệt, năm phê duyệt, thời kỳ quy hoạch, tình trạng hiệu lực ✓ Dữ liệu quy hoạch liên quan trực tiếp đến tái sử dụng đất: Hiện trạng sử dụng đất xung quanh; Dân cư; Công trình nhạy cảm; Mức độ phù hợp quy hoạch, Loại hình tái sử dụng cho phép; Mức độ hạn chế xây dựng; Yêu cầu cải tạo bắt buộc; vùng ảnh hưởng môi trường (từ 50 - 500 m) ;	✓ Xây dựng cơ sở dữ liệu GIS cho các BCL sau đóng cửa ✓ Kết nối với các loại quy hoạch ✓ Chuẩn hóa mã hóa theo chức năng sử dụng đất hoặc chuẩn hóa theo mức độ xung đột quy hoạch (Planning Conflict Matrix) hoặc chuẩn hóa thành chỉ số quy hoạch (Planning Compatibility Index - PCI)

Trên cơ sở các dữ liệu đã được chuẩn hóa, việc phân tích dữ liệu được sử dụng trong quản lý các BCL đã đóng cửa được đề xuất theo mô tả chi tiết tại Bảng 2.

Bảng 2. Đề xuất thực hiện phân tích dữ liệu để phục vụ quản lý các BCL đã đóng cửa tại Việt Nam

Nội dung phân tích	Yêu cầu phân tích dữ liệu	Công cụ áp dụng để phân tích
Phân tích hiện trạng và xu thế môi trường	✓ Phân tích xu thế suy giảm hoặc gia tăng ô nhiễm, nguy cơ ô nhiễm thứ cấp hoặc rò rỉ lan truyền của nước rỉ rác, khí thải phát sinh từ BCL, chất lượng nước ngầm,… theo chuỗi thời gian	✓ Phân tích thống kê mô tả ✓ Hồi quy tuyến tính/ phi tuyến ✓ Phân tích xu thế (trend analysis)
Phân tích đánh giá rủi ro môi trường	✓ Phân tích rủi ro: Cháy nổ khí CH_4; Ô nhiễm nước ngầm ; Lún sụt, mất ổn định;… ✓ Xây dựng chỉ số rủi ro tổng hợp (LRI - Landfill Risk Index)	Phân tích theo thang điểm (0–100) để phân thành các nhóm: ✓ Rủi ro thấp → có thể tái sử dụng ✓ Trung bình → cần cải tạo bổ sung ✓ Cao → chỉ duy trì giám sát, không tái sử dụng
Phân tích mức độ phù hợp tái sử dụng đất	✓ Lập bản đồ phân vùng tái sử dụng theo các mục đích như: làm công viên, khu cây xanh, bãi đỗ xe, công trình điện mặt trời,… ✓ So sánh và xác định ngưỡng kỹ thuật cho phép tái sử dụng; Thời gian tối thiểu sau đóng cửa; Yêu cầu giám sát bắt buộc;…	Phân tích đa tiêu chí (MCDA / AHP) với các nhóm tiêu chí: Môi trường; Địa kỹ thuật; Kinh tế - xã hội; Quy hoạch

5. KẾT LUẬN

Chuẩn hóa và phân tích dữ liệu là một trong các bước quan trọng để tổ chức thực hiện và số hóa việc xây dựng cơ sở dữ liệu quốc gia về các BCL đã đóng cửa tại Việt Nam giai đoạn 2026 - 2030 nhằm góp phần phục vụ hiệu quả trong việc lập kế hoạch cải tạo, tái sử dụng BCL gắn với kinh tế tuần hoàn, phát triển bền vững cũng như đưa ra cơ sở thúc đẩy đầu tư PPP. Để có thể ứng dụng trong công tác quản lý mang tính khả thi, các địa phương cần thống nhất các bước từ thu thập, cập nhật, phân tích và báo cáo dữ liệu theo đúng quy trình chuẩn hóa đã đề xuất, đồng thời sớm có kế hoạch để triển khai ứng dụng GIS cũng như dashboard quản lý và đào tạo cán bộ đáp ứng các yêu cầu về công nghệ thông tin.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Tài nguyên và Môi trường, Báo cáo thuyết minh tổng hợp Quy hoạch bảo vệ môi trường quốc gia thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050, 2023.

[2] Nghiêm Vân Khanh, Nghiên cứu tổng quan hiện trạng đóng bãi chôn lấp tại Việt Nam, Trường Đại học Thủy lợi, 2025.

[3] Quốc Hội, Luật chuyển đổi số, số 148/2025/QH15, ngày 11/12/2025, có hiệu lực thi hành từ ngày 01/7/2026, 2025.

[4] Quốc Hội 2020, Luật Bảo vệ môi trường, số 72/2020/QH14 ngày 17/11/2020, có hiệu lực kể từ ngày 01/01/2022; được sửa đổi, bổ sung bởi Luật Thanh tra số 11/2022/QH15 ngày 14/11/2022 của Quốc hội, có hiệu lực kể từ ngày 01/7/2023 theo Văn bản hợp nhất số 21/VBHN-VPQH, 2020.

[5] Chính phủ 2025, Nghị quyết số 214/NQ-CP, ngày 23/7/2025, ban hành Kế hoạch hành động của Chính phủ về thúc đẩy tạo lập dữ liệu phục vụ chuyển đổi số toàn diện, 2025.

[6] Thủ tướng Chính phủ 2020, Quyết định số 749/QĐ-TTg của: Phê duyệt Chương trình Chuyển đổi số quốc gia đến năm 2025, định hướng đến năm 2030, 2020.

[7] Thủ tướng Chính phủ , Quyết định số 491/QĐ-TTg ngày 07/5/2018, Phê duyệt điều chỉnh chiến lược quốc gia về quản lý tổng hợp chất thải rắn đến năm 2025, tầm nhìn đến năm 2050, 2018.

[8] Bộ Tài nguyên và môi trường, Thông tư số 02/2022/TT-BTNMT, ngày 10/01/2022, Quy định chi tiết thi hành một số điều của Luật Bảo vệ môi trường; được sửa đổi, bổ sung bởi Thông tư số 07/2025/TT-BTNMT ngày 28/02/2025, 2022.

[9] Bộ Nông nghiệp và Môi trường, Thông tư số 41/2025/TT-BNNMT ngày 14/7/2025, Hướng dẫn kỹ thuật về phòng ngừa, ứng phó sự cố chất thải và phục hồi môi trường sau sự cố môi trường.

[10] Bộ Khoa học Công nghệ và Môi trường , Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 6696 : 2009, Chất thải rắn - Bãi chôn lấp hợp vệ sinh - Yêu cầu chung về bảo vệ môi trường, 2009.

■Ngày nhận bài: 03/3/2026 ■Ngày sửa bài: 19/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 02/4/2026

Kinh nghiệm thực tiễn và giải pháp đấu nối thoát nước hộ gia đình trong điều kiện đô thị Việt Nam

Practical experience and solutions in connecting domestic wastewater drainage systems in Vietnamese urban conditions

> TS NGUYỄN THANH PHONG
Bộ môn Công nghệ nước, Khoa KTHT&MTĐT, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
Email: nguyenthanhphong73@gmail.com

TÓM TẮT

Đấu nối thoát nước hộ gia đình là khâu cuối cùng trong hệ thống thoát nước đô thị nhưng lại có vai trò quyết định đến hiệu quả vận hành tổng thể của toàn bộ hệ thống. Thực tế tại nhiều đô thị Việt Nam cho thấy công tác đấu nối thoát nước hộ gia đình còn tồn tại nhiều bất cập, phổ biến nhất là đấu nối sai kỹ thuật, đấu lẫn nước mưa và nước thải, bể tự hoại không đạt chuẩn và tình trạng xả trực tiếp nước thải sinh hoạt ra hệ thống thoát nước mưa hoặc kênh rạch đô thị. Những tồn tại này là nguyên nhân trực tiếp gây ra tình trạng ngập úng, ô nhiễm môi trường nước, phát sinh mùi hôi và làm gia tăng chi phí vận hành, bảo trì hệ thống thoát nước.

Bài báo này tổng hợp kinh nghiệm thực tiễn trong công tác đấu nối thoát nước hộ gia đình tại các đô thị Việt Nam, phân tích chi tiết các dạng sai sót kỹ thuật điển hình và làm rõ các nguyên nhân gốc rễ từ các khía cạnh kỹ thuật, quản lý và kinh tế - xã hội. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất hệ thống giải pháp đồng bộ bao gồm chuẩn hóa quy trình kỹ thuật đấu nối, tách nước mưa - nước thải theo lộ trình phù hợp với điều kiện phát triển đô thị, nâng cao hiệu quả xử lý sơ bộ nước thải tại hộ gia đình, đồng thời hoàn thiện cơ chế quản lý, tài chính và số hóa công tác quản lý đấu nối. Các giải pháp được đánh giá là khả thi và có thể áp dụng rộng rãi nhằm nâng cao hiệu quả và tính bền vững của hệ thống thoát nước đô thị Việt Nam.

Từ khóa: Đấu nối thoát nước; hộ gia đình.

ABSTRACT

Connecting domestic wastewater drainage systems is the final step in urban drainage systems but plays a crucial role in the overall efficiency of the entire system. In reality, many Vietnamese cities show that the connection of domestic wastewater drainage systems still has many shortcomings, most commonly incorrect connections, mixing of rainwater and wastewater, substandard septic tanks, and direct discharge of domestic wastewater into rainwater drainage systems or urban canals. These shortcomings directly cause flooding, water pollution, odor generation, and increased operating and maintenance costs for the drainage system.

This paper synthesizes practical experience in connecting domestic wastewater drainage systems in Vietnamese cities, analyzes typical technical errors in detail, and clarifies the root causes from technical, management, and socio-economic perspectives. Based on this, the paper proposes a comprehensive system of solutions including standardizing technical connection procedures, separating rainwater and wastewater according to a roadmap suitable for urban development conditions, improving the efficiency of preliminary wastewater treatment at households, and perfecting management, financial, and digital mechanisms for connection management. These solutions are considered feasible and widely applicable to improve the efficiency and sustainability of Vietnam's urban drainage systems.

Keywords: Wastewater connection; households.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh tại Việt Nam, hệ thống thoát nước đô thị đang chịu áp lực ngày càng lớn do gia tăng dân số, mật độ xây dựng cao và tác động của biến đổi khí hậu, hệ thống thoát nước ở Việt Nam hiện nay phần lớn là chưa hoàn chỉnh vì đa số các tỉnh thành phố trong cả nước mới có mạng lưới cống và chủ yếu là mạng lưới cống chung, thoát cho cả nước mưa và nước thải, nhiều khu đô thị mới được xây dựng có mạng lưới cống thoát nước thải và thoát nước mưa riêng nhưng lại xả chung vào sông hồ mà không qua xử lý gây ra tình trạng nhiễm bẩn sông hồ rất trầm trọng. Nhiều

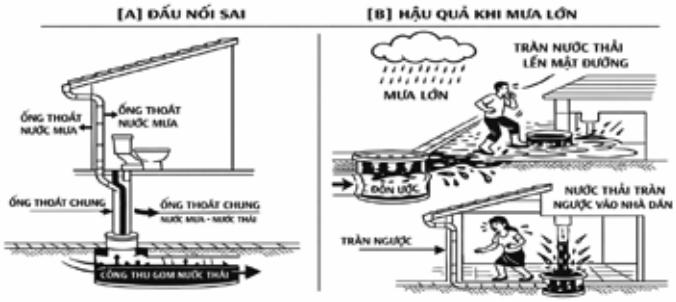
dự án thoát nước hiện đang được triển khai đối với các đô thị có mạng lưới cống chung đều hướng tới việc tách nước thải đưa về Nhà máy xử lý nước thải, xử lý trước khi xả ra nguồn tiếp nhận, hoặc xây dựng hệ thống thoát nước riêng thu gom xử lý toàn bộ nước thải sinh hoạt. Nhiều đô thị đã và đang đầu tư xây dựng các tuyến cống chính, trạm bơm và nhà máy xử lý nước thải với quy mô lớn. Tuy nhiên, hiệu quả thực tế của các công trình này phụ thuộc rất lớn vào chất lượng đấu nối thoát nước của từng hộ gia đình - nơi phát sinh nước thải sinh hoạt hằng ngày.

Trong thực tế quản lý hiện nay ở Việt Nam, đấu nối thoát nước hộ gia đình thường bị xem là hạng mục nhỏ lẻ, mang tính cá nhân, phần lớn do người dân tự thực hiện. Việc thiếu hướng dẫn kỹ thuật chi tiết, thiếu kiểm tra nghiệm thu và thiếu quản lý sau đấu nối đã dẫn đến nhiều sai sót kỹ thuật, làm giảm hiệu quả đầu tư của toàn bộ hệ thống thoát nước đô thị.

Do đó, việc nghiên cứu một cách hệ thống kinh nghiệm thực tiễn, đặc biệt kinh nghiệm đấu nối thoát nước hộ gia đình của Nhật Bản, nơi việc đấu nối thoát nước hộ gia đình ở nhiều thành phố đã đạt tỷ lệ tới 100%, và đề xuất các giải pháp kỹ thuật, quản lý phù hợp cho công tác đấu nối thoát nước hộ gia đình cho các đô thị Việt Nam là hết sức cần thiết và có ý nghĩa thực tiễn cao.

2. HIỆN TRẠNG ĐẤU NỐI THOÁT NƯỚC HỘ GIA ĐÌNH

2.1. Hiện tượng đấu lẫn nước mưa và nước thải



Hình 1. Hình ảnh minh họa đấu nối sai khi nước mưa mái nhà và nước thải sinh hoạt được đấu chung vào cùng một ống thoát nước thải

Tại nhiều khu dân cư, đặc biệt là khu nhà ống và nhà ở cải tạo nhiều lần, nước mưa từ mái nhà, ban công và sân thượng thường được đấu trực tiếp vào ống thoát nước thải sinh hoạt. Nguyên nhân chủ yếu là do giải pháp này dễ thi công, ít tốn chi phí và không có sự kiểm tra, giám sát của cơ quan quản lý.

Hệ quả của hiện tượng này là trong mùa mưa, lưu lượng nước mưa lớn làm gia tăng đột ngột lưu lượng trong tuyến cống thu gom nước thải, gây quá tải, tràn nước thải lên mặt đường hoặc chảy ngược vào nhà dân. Ngoài ra, việc pha loãng nước thải cũng làm giảm hiệu quả xử lý sinh học tại các nhà máy xử lý nước thải tập trung [6], [7].

2.2. Xả nước thải sinh hoạt trực tiếp ra hệ thống thoát nước mưa và kênh rạch

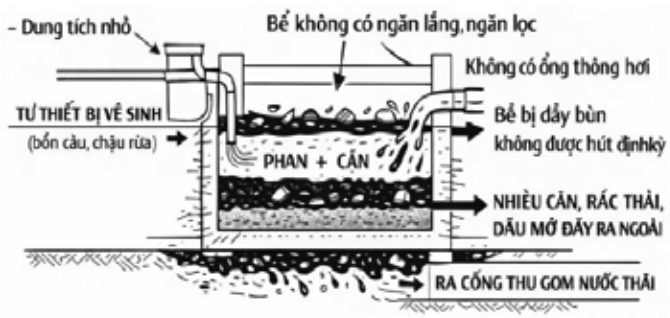
Kênh Hàng Bàng TP.HCM

Kênh Đôi TP.HCM

Hình 2. Nước thải sinh hoạt từ hộ gia đình xả trực tiếp ra cống thoát nước mưa và kênh rạch đô thị [6], [7]

Ở những khu vực chưa có hệ thống thu gom nước thải hoặc nơi việc đấu nối gặp khó khăn về mặt kỹ thuật và chi phí, nhiều hộ gia đình lựa chọn giải pháp xả trực tiếp nước thải sinh hoạt ra cống thoát nước mưa, mương hở hoặc kênh rạch. Đây là nguyên nhân chính gây ô nhiễm môi trường nước mặt đô thị, phát sinh mùi hôi, ảnh hưởng đến cảnh quan và sức khỏe cộng đồng.

2.3. Bể tự hoại không đạt chuẩn kỹ thuật



Hình 3. Hình minh họa bể tự hoại không đạt chuẩn: dung tích nhỏ, thiếu ngăn lắng, không có ống thông hơi

Bể tự hoại là công trình xử lý sơ bộ nước thải sinh hoạt phổ biến tại Việt Nam. Tuy nhiên, nhiều bể tự hoại được xây dựng không đúng quy chuẩn kỹ thuật, dung tích không phù hợp với số người sử dụng, thiếu các ngăn lắng và ngăn lọc cần thiết, không có ống thông hơi và không được hút bùn định kỳ. Điều này làm giảm đáng kể hiệu quả xử lý, khiến bùn và chất rắn theo nước thải đi vào hệ thống cống, gây tắc nghẽn và phát sinh mùi hôi.

3. PHÂN TÍCH NGUYÊN NHÂN ĐỐI VỚI TÌNH TRẠNG ĐẤU NỐI THOÁT NƯỚC HỘ GIA ĐÌNH TẠI CÁC ĐÔ THỊ VIỆT NAM

3.1. Nguyên nhân kỹ thuật và điều kiện hạ tầng hiện hữu

Một trong những nguyên nhân cơ bản dẫn đến tình trạng đấu nối thoát nước hộ gia đình chưa đúng kỹ thuật tại các đô thị Việt Nam xuất phát từ đặc điểm của hệ thống hạ tầng thoát nước hiện hữu. Tại nhiều đô thị, đặc biệt là các khu vực phát triển sớm, hệ thống thoát nước vẫn tồn tại dưới dạng hỗn hợp hoặc bán tách riêng, trong đó nước mưa và nước thải sinh hoạt cùng được thu gom trong một mạng lưới cống. Sự thiếu rõ ràng về chức năng của từng tuyến cống khiến các hộ gia đình khó xác định chính xác vị trí đấu nối phù hợp, dẫn đến tình trạng đấu lẫn nước mưa và nước thải.

Hiện tượng này được thể hiện rõ trong Hình 2, trong đó nước mưa mái nhà được đấu chung với nước thải sinh hoạt vào cùng một ống thoát nước thải. Khi mưa lớn, lưu lượng nước mưa làm gia tăng đột ngột tải trọng thủy lực trong hệ thống, gây quá tải cục bộ, tràn nước thải lên mặt đường hoặc chảy ngược vào nhà dân.

Bên cạnh đó, hình thức nhà ở phổ biến tại đô thị Việt Nam là nhà ống, nhà liền kề, thường xuyên được cải tạo, nâng tầng hoặc thay đổi công năng theo thời gian. Quá trình cải tạo này làm biến đổi sơ đồ thoát nước ban đầu, trong khi không gian bố trí các công trình kỹ thuật như bể tự hoại, hố ga kiểm tra và đường ống tách riêng bị hạn chế. Khi điều kiện thoát tự chảy không đảm bảo, người dân có xu hướng lựa chọn các giải pháp đấu nối đơn giản, thuận tiện nhưng không tuân thủ yêu cầu kỹ thuật.

Ngoài ra, tại nhiều hộ gia đình còn thiếu các cấu phần kỹ thuật cần thiết như hố ga kiểm tra tại ranh giới đất, bẫy mỡ cho khu vực bếp và ống thông khí cho hệ thống thoát nước. Việc thiếu các cấu phần này không chỉ làm gia tăng nguy cơ đấu nối sai mà còn gây khó khăn cho công tác vận hành, bảo trì và xử lý sự cố trong quá trình sử dụng.

3.2. Nguyên nhân về quản lý và thể chế

Nguyên nhân thứ hai có tính quyết định đến tính tuân thủ kỹ thuật của đấu nối thoát nước hộ gia đình là những hạn chế trong công tác quản lý và thể chế. Trong nhiều trường hợp, công tác đấu nối hộ gia đình chưa được coi là một hạng mục bắt buộc và thống nhất trong chuỗi quản lý hệ thống thoát nước đô thị. Các dự án thoát nước thường tập trung đầu tư vào cống chính, trạm bơm và nhà máy xử lý nước thải, trong khi phần đấu nối từ hộ gia đình vào mạng lưới lại được giao cho người dân tự thực hiện.

Hệ quả của cách tiếp cận này là sự tồn tại phổ biến của các dạng đấu nối sai kỹ thuật, như đấu lẫn nước mưa và nước thải thông qua hố ga trong sân nhà hoặc đấu nối trực tiếp vào cống thu gom nước thải mà không qua kiểm tra, nghiệm thu. Các dạng đấu nối này, cho thấy rõ sự thiếu kiểm soát kỹ thuật tại điểm đấu nối hộ gia đình.

Bên cạnh đó, quy trình cấp phép xây dựng và nghiệm thu công trình nhà ở tại nhiều địa phương chưa kiểm soát chặt chẽ phương án đấu nối thoát nước. Việc thiếu yêu cầu thẩm tra, nghiệm thu kỹ thuật đối với điểm đấu nối khiến các sai sót phát sinh trong giai đoạn thi công không được phát hiện và khắc phục kịp thời. Một khi công trình đã đưa vào sử dụng, các sai sót này thường tồn tại lâu dài và gây ảnh hưởng tiêu cực đến toàn bộ hệ thống thoát nước khu vực.

Ngoài ra, công tác quản lý đấu nối còn chịu ảnh hưởng bởi sự phân tán trách nhiệm giữa các cơ quan quản lý nhà nước và đơn vị vận hành thoát nước. Việc thiếu một đầu mối chịu trách nhiệm chính đối với điểm đấu nối, cùng với việc chưa xây dựng cơ sở dữ liệu đầy đủ về các điểm đấu nối hộ gia đình, làm hạn chế hiệu quả kiểm tra, giám sát và xử lý vi phạm.

3.3. Nguyên nhân kinh tế - xã hội và hành vi sử dụng

Nhóm nguyên nhân thứ ba liên quan đến yếu tố kinh tế - xã hội và hành vi của người sử dụng hệ thống thoát nước. Đấu nối thoát nước đúng kỹ thuật thường đòi hỏi chi phí đầu tư ban đầu cho việc cải tạo đường ống, xây dựng hố ga kiểm tra, nâng cấp bể tự hoại hoặc lắp đặt các thiết bị phụ trợ. Đối với các hộ gia đình có thu nhập thấp hoặc nhà ở thuê, chi phí này trở thành rào cản đáng kể, khiến người dân lựa chọn các giải pháp đấu nối đơn giản, chi phí thấp nhưng không phù hợp về mặt kỹ thuật.

Bể tự hoại không đạt tiêu chuẩn là một biểu hiện điển hình của nhóm nguyên nhân này. Như minh họa trong Hình 3, nhiều bể tự hoại hộ gia đình có dung tích nhỏ, thiếu ngăn xử lý hoặc không được hút bùn định kỳ, làm giảm đáng kể hiệu quả xử lý sơ bộ nước thải. Khi bể tự hoại bị quá tải, chất rắn và cặn lơ lửng theo nước thải đi vào hệ thống cống, làm gia tăng nguy cơ tắc nghẽn và phát sinh mùi hôi trong khu dân cư.

Bên cạnh yếu tố chi phí, nhận thức và thói quen sử dụng hệ thống thoát nước của một bộ phận người dân còn hạn chế. Các hành vi như xả rác, dầu mỡ và chất thải rắn xuống cống làm gia tăng nguy cơ tắc nghẽn, đồng thời làm suy giảm hiệu quả của bể tự hoại và hệ thống thu gom. Trong nhiều trường hợp, ngay cả khi đấu nối ban đầu được thực hiện tương đối đúng kỹ thuật, hành vi sử dụng không phù hợp vẫn dẫn đến các sự cố vận hành, tạo ra nhận thức sai lệch về hiệu quả của hệ thống.

Ngoài ra, cơ chế kinh tế và chính sách khuyến khích hiện nay chưa tạo được động lực rõ ràng để người dân chủ động đấu nối đúng và duy trì hệ thống. Phí thoát nước và xử lý nước thải tại nhiều địa phương chưa phản ánh đầy đủ chi phí vận hành, trong khi các chế tài đối với hành vi đấu nối sai còn hạn chế, dẫn đến mức độ tuân thủ chưa cao.

Những phân tích trên cho thấy tình trạng đấu nối thoát nước hộ gia đình tại các đô thị Việt Nam là kết quả tổng hợp của các yếu tố kỹ thuật, quản lý và kinh tế - xã hội. Do đó, các giải pháp đề xuất trong phần tiếp theo cần được xây dựng theo hướng đồng bộ, vừa khắc phục hạn chế của hạ tầng hiện hữu, vừa hoàn thiện cơ chế quản lý và tạo động lực để người dân tham gia tích cực vào công tác đấu nối và bảo vệ hệ thống thoát nước đô thị.

4. KINH NGHIỆM THỰC TIỄN TRONG ĐẤU NỐI THOÁT NƯỚC HỘ GIA ĐÌNH

4.1. Kinh nghiệm của Nhật Bản

4.1.1. Tổng quan hệ thống thoát nước đô thị của Nhật Bản

Nhật Bản là quốc gia có mức độ đô thị hóa cao, mật độ dân cư lớn và điều kiện tự nhiên phức tạp, bao gồm mưa lớn, bão, động đất và địa hình dốc. Trong bối cảnh đó, Nhật Bản đã phát triển hệ thống thoát nước đô thị hiện đại, đồng bộ và đặc biệt coi trọng đấu nối thoát nước hộ gia đình như một bộ phận không thể tách rời của hạ tầng kỹ thuật đô thị.

Từ sau Chiến tranh thế giới thứ hai, Nhật Bản đã từng bước chuyển đổi từ hệ thống thoát nước hỗn hợp sang hệ thống thoát nước tách riêng, đồng thời xây dựng khung pháp lý chặt chẽ để quản lý đấu nối nước thải sinh hoạt từ các hộ gia đình. Đến nay, tại hầu hết các đô thị của Nhật Bản, tỷ lệ hộ gia đình đấu nối nước thải vào hệ thống thu gom tập trung đạt trên 90%, trong đó các điểm đấu nối đều được kiểm soát nghiêm ngặt về mặt kỹ thuật [1].

4.1.2. Nguyên tắc quản lý đấu nối thoát nước hộ gia đình tại Nhật Bản

• **Đấu nối hộ gia đình là nghĩa vụ pháp lý bắt buộc**

Tại Nhật Bản, việc đấu nối nước thải sinh hoạt của hộ gia đình vào hệ thống thu gom nước thải đô thị được quy định là nghĩa vụ pháp lý của chủ sở hữu công trình. Khi khu vực đã có hệ thống thu gom nước thải, mọi hộ gia đình đều bắt buộc phải đấu nối trong thời hạn quy định. Trường hợp không thực hiện, chủ hộ có thể bị xử phạt hành chính hoặc buộc thực hiện đấu nối.

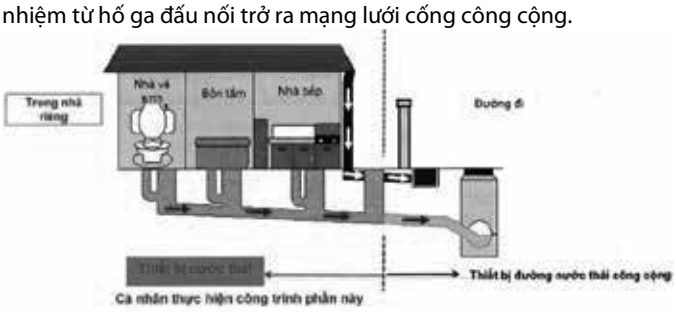
Cách tiếp cận này giúp Nhật Bản tránh được tình trạng xả thải tự phát ra môi trường và đảm bảo hiệu quả đầu tư của hệ thống thoát nước đô thị.

• **Phân định rõ trách nhiệm giữa hộ gia đình và đơn vị quản lý**

Một đặc điểm nổi bật trong kinh nghiệm của Nhật Bản là ranh giới trách nhiệm rất rõ ràng giữa hộ gia đình và đơn vị quản lý thoát nước đô thị. Thông thường:

➢ Hộ gia đình chịu trách nhiệm đối với hệ thống thoát nước bên trong khuôn viên đất (ống nhánh, bể xử lý sơ bộ nếu có);

➢ Chính quyền địa phương hoặc đơn vị thoát nước chịu trách nhiệm từ hố ga đấu nối trở ra mạng lưới cống công cộng.



Hình 4. Hình vẽ minh họa về ranh giới trách nhiệm giữa hộ gia đình và đơn vị quản lý thoát nước [2]

Việc phân định rõ trách nhiệm giúp giảm tranh chấp, thuận lợi cho công tác bảo trì, sửa chữa và xử lý sự cố.

4.1.3. Quy trình kỹ thuật đấu nối thoát nước hộ gia đình tại Nhật Bản

Quy trình đấu nối thoát nước hộ gia đình tại Nhật Bản được chuẩn hóa và kiểm soát chặt chẽ, thường bao gồm các bước sau:

Trước hết, chủ hộ phải nộp hồ sơ đăng ký đấu nối cho chính quyền địa phương hoặc đơn vị quản lý thoát nước. Hồ sơ bao gồm bản vẽ hiện trạng, phương án đấu nối và các thông tin kỹ thuật liên quan. Chỉ sau khi phương án đấu nối được phê duyệt, việc thi công mới được phép triển khai.

Trong quá trình thi công, việc đấu nối phải được thực hiện bởi các nhà thầu hoặc thợ kỹ thuật đã được cấp chứng chỉ hành nghề. Các yêu cầu kỹ thuật như độ dốc ống nhánh, vật liệu ống, vị trí hố ga kiểm tra, bẫy nước chống mùi và thông khí đều được quy định chi tiết trong các tiêu chuẩn kỹ thuật quốc gia.

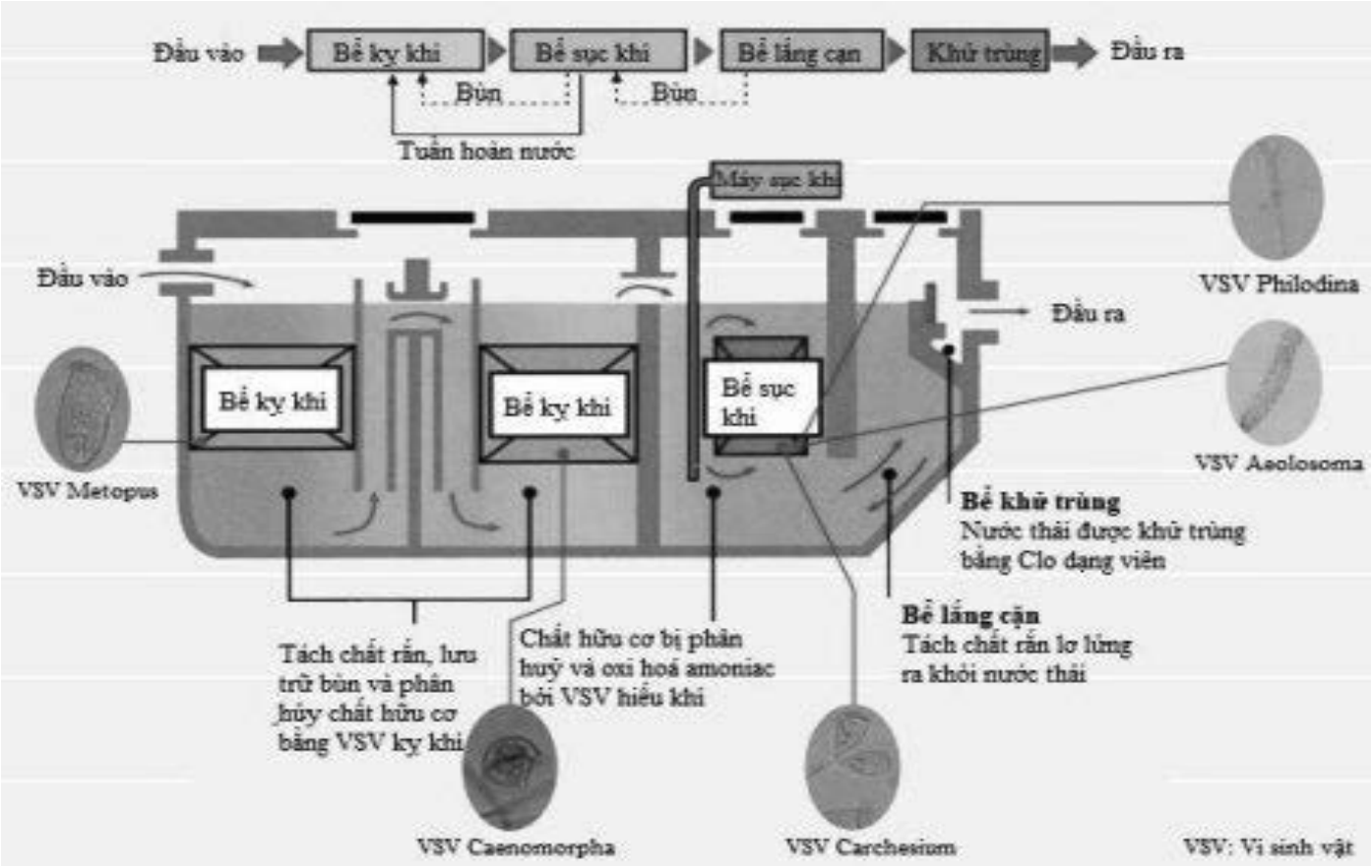
Sau khi thi công, cơ quan quản lý tiến hành nghiệm thu tại hiện trường, kiểm tra kín nước, kiểm tra dòng chảy và đối chiếu với bản vẽ đã được phê duyệt. Chỉ khi đạt yêu cầu, điểm đấu nối mới được đưa vào sử dụng chính thức [1], [2].

4.1.4. Quản lý nước mưa và tách nước mưa - nước thải tại hộ gia đình

Nhật Bản đặc biệt chú trọng việc quản lý nước mưa tại nguồn nhằm giảm tải cho hệ thống thoát nước đô thị. Tại nhiều khu dân cư, nước mưa từ mái nhà được thu gom vào bể chứa để tái sử dụng cho tưới cây, rửa đường hoặc xả vệ sinh. Phần nước mưa dư thừa được dẫn vào hệ thống thoát nước mưa riêng hoặc các công trình thấm tại chỗ.

Việc tách nước mưa và nước thải ngay từ hộ gia đình không chỉ giúp giảm lưu lượng đỉnh trong mùa mưa mà còn góp phần hạn chế ngập úng và cải thiện môi trường đô thị.

4.1.5. Kinh nghiệm quản lý xử lý sơ bộ nước thải tại hộ gia đình (Johkasou)



Hình 5. Hệ thống xử lý nước thải hộ gia đình Johkasou được sử dụng phổ biến tại Nhật Bản [1]

Tại các khu vực chưa có hệ thống thu gom nước thải tập trung, Nhật Bản áp dụng rộng rãi hệ thống xử lý nước thải hộ gia đình tiên tiến gọi là Johkasou**.** Đây là hệ thống xử lý sinh học quy mô nhỏ, có hiệu quả xử lý cao hơn nhiều so với bể tự hoại truyền thống.

Johkasou được tiêu chuẩn hóa về thiết kế, sản xuất công nghiệp và lắp đặt. Việc vận hành và bảo trì Johkasou được quản lý chặt chẽ, bao gồm kiểm tra định kỳ, hút bùn và báo cáo chất lượng nước thải đầu ra. Chính phủ Nhật Bản cũng có chính sách hỗ trợ tài chính cho các hộ gia đình lắp đặt Johkasou tại khu vực nông thôn hoặc vùng chưa có hệ thống thoát nước tập trung.

4.1.6. Bài học kinh nghiệm áp dụng cho đô thị Việt Nam

Từ kinh nghiệm của Nhật Bản, có thể rút ra một số bài học quan trọng cho Việt Nam như sau:

Thứ nhất, cần xác định đấu nối thoát nước hộ gia đình là nghĩa vụ bắt buộc, gắn liền với quyền sử dụng đất và giấy phép xây dựng, thay vì chỉ mang tính khuyến khích.

Thứ hai, cần chuẩn hóa quy trình kỹ thuật đấu nối và kiểm soát chặt chẽ từ khâu thiết kế, thi công đến nghiệm thu, đồng thời yêu cầu các đơn vị thi công phải có đủ năng lực và chứng chỉ hành nghề.

Thứ ba, cần phân định rõ trách nhiệm quản lý giữa hộ gia đình và đơn vị thoát nước, đặc biệt là tại điểm đấu nối, nhằm thuận lợi cho công tác vận hành và bảo trì.

Thứ tư, cần từng bước áp dụng các giải pháp quản lý nước mưa tại nguồn và tách nước mưa - nước thải, phù hợp với điều kiện hạ tầng và khả năng đầu tư của từng đô thị.

Thứ năm, đối với các khu vực chưa có hệ thống thu gom nước thải tập trung, có thể nghiên cứu áp dụng các mô hình xử lý nước

thải hộ gia đình cải tiến theo hướng của Johkasou, kết hợp với cơ chế hỗ trợ tài chính và quản lý vận hành tập trung.

4.2. Kinh nghiệm thực tiễn của các tỉnh, thành phố Việt Nam

4.2.1. Nhận thức vai trò then chốt của đấu nối hộ gia đình trong hệ thống thoát nước đô thị

Thực tiễn triển khai hệ thống thoát nước tại nhiều tỉnh, thành phố ở Việt Nam cho thấy, đấu nối thoát nước hộ gia đình là khâu có ảnh hưởng trực tiếp và lâu dài đến hiệu quả vận hành của toàn bộ hệ thống thoát nước đô thị. Trong giai đoạn đầu, nhiều địa phương tập trung chủ yếu vào đầu tư xây dựng các tuyến cống chính, trạm bơm và nhà máy xử lý nước thải, trong khi công tác đấu nối hộ gia đình chưa được quản lý chặt chẽ. Hệ quả là dù hạ tầng chính đã được đầu tư, nước thải sinh hoạt vẫn không được thu gom đầy đủ hoặc bị đấu nối sai kỹ thuật, làm giảm hiệu quả đầu tư và phát sinh các vấn đề môi trường.Từ thực tiễn đó, nhiều địa phương đã dần thay đổi cách tiếp cận, coi đấu nối hộ gia đình là bộ phận cấu thành bắt buộc của hệ thống thoát nước đô thị và là điều kiện tiên quyết để các công trình thu gom, xử lý nước thải phát huy hiệu quả.

4.2.2. Kinh nghiệm lồng ghép đấu nối hộ gia đình trong các dự án thoát nước đô thị

Tại các đô thị lớn như Hà Nội, TP.HCM, Đà Nẵng và Cần Thơ, trong quá trình triển khai các dự án thoát nước và cải thiện môi trường đô thị, công tác đấu nối hộ gia đình đã từng bước được lồng ghép như một hạng mục quan trọng của dự án. Việc tổ chức khảo sát hiện trạng đấu nối, lập danh sách các hộ chưa đấu nối hoặc đấu nối sai, sau đó thiết kế và thi công đấu nối đồng loạt theo từng tuyến phố hoặc khu dân cư đã mang lại hiệu quả rõ rệt.

Kinh nghiệm cho thấy, khi đấu nối được thực hiện đồng thời với việc cải tạo cống, mặt đường và hạ tầng kỹ thuật ngoài nhà, chi phí đầu tư trên mỗi hộ giảm đáng kể, đồng thời hạn chế được tình trạng đào phá nhiều lần và đấu nối tự phát sau dự án. Đây là cách làm phù hợp với điều kiện đô thị Việt Nam, nơi không gian xây dựng hạn chế và việc tổ chức thi công riêng lẻ từng hộ gặp nhiều khó khăn.

4.2.3. Kinh nghiệm kiểm soát đấu nối và hạn chế đấu nối sai kỹ thuật

Một vấn đề phổ biến tại nhiều đô thị là tình trạng đấu lẫn nước mưa và nước thải sinh hoạt tại hộ gia đình. Thực tiễn tại TP.HCM và Hà Nội cho thấy, việc yêu cầu các hộ dân không đấu nước mưa mái nhà, sân thượng vào tuyến thoát nước thải sinh hoạt đã góp phần giảm đáng kể tình trạng quá tải cục bộ và tràn nước thải trong mùa mưa.

Một số địa phương đã bước đầu tăng cường kiểm soát kỹ thuật đấu nối thông qua công tác cấp phép xây dựng và cải tạo nhà ở. Trong đó, phương án đấu nối thoát nước được yêu cầu thể hiện trong hồ sơ xin phép, đồng thời được kiểm tra trong quá trình nghiệm thu công trình. Mặc dù việc triển khai còn chưa đồng bộ, song đây là kinh nghiệm quan trọng cho thấy vai trò của kiểm soát kỹ thuật ngay từ đầu trong việc hạn chế các sai sót kéo dài về sau.

4.2.4. Kinh nghiệm quản lý bể tự hoại và xử lý sơ bộ nước thải tại hộ gia đình

Tại nhiều tỉnh, thành phố, đặc biệt là các đô thị loại II, loại III và các khu vực chưa có hệ thống thu gom nước thải hoàn chỉnh, bể tự hoại vẫn là công trình xử lý sơ bộ nước thải sinh hoạt chủ yếu. Thực tiễn cho thấy, hiệu quả của bể tự hoại phụ thuộc rất lớn vào việc tuân thủ quy chuẩn thiết kế và công tác vận hành, hút bùn định kỳ.

Một số địa phương như Bình Dương, Đồng Nai và các tỉnh Đồng bằng sông Cửu Long đã bước đầu triển khai các chương trình tuyên truyền, hướng dẫn người dân xây dựng bể tự hoại đúng kỹ thuật, đồng thời tổ chức dịch vụ hút bùn theo khu vực. Những biện pháp này đã góp phần hạn chế tình trạng bể tự hoại quá tải, giảm lượng bùn và chất rắn theo nước thải đi vào hệ thống cống, từ đó giảm tắc nghẽn và mùi hôi trong khu dân cư.

4.2.5. Kinh nghiệm huy động vai trò của chính quyền địa phương và cộng đồng

Một bài học quan trọng rút ra từ thực tiễn các tỉnh, thành phố là vai trò của chính quyền địa phương cấp quận, huyện, phường, xã trong công tác quản lý đấu nối thoát nước hộ gia đình. Tại những địa phương mà chính quyền cơ sở tham gia tích cực vào việc tuyên truyền, hướng dẫn và kiểm tra đấu nối, tình trạng đấu nối sai kỹ thuật được hạn chế rõ rệt so với những nơi chỉ giao toàn bộ trách nhiệm cho đơn vị thoát nước.

Việc kết hợp giữa công tác quản lý hành chính, kiểm tra kỹ thuật và tuyên truyền nâng cao nhận thức cộng đồng đã giúp người dân hiểu rõ hơn vai trò của đấu nối đúng kỹ thuật, từ đó nâng cao tính tự giác trong việc tuân thủ các quy định về thoát nước.

4.2.6. Bài học rút ra từ kinh nghiệm thực tiễn trong nước

Từ kinh nghiệm của các tỉnh, thành phố ở Việt Nam, có thể rút ra một số bài học quan trọng cho công tác đấu nối thoát nước hộ gia đình. Trước hết, đấu nối hộ gia đình cần được coi là hạng mục bắt buộc trong các dự án thoát nước đô thị và chương trình cải tạo hạ tầng kỹ thuật. Thứ hai, việc tổ chức đấu nối đồng loạt theo khu vực mang lại hiệu quả cao hơn so với đấu nối riêng lẻ từng hộ. Thứ ba, kiểm soát kỹ thuật ngay từ khâu thiết kế, thi công và nghiệm thu công trình nhà ở là yếu tố then chốt để hạn chế đấu nối sai kỹ thuật. Cuối cùng, vai trò của chính quyền địa phương và sự tham gia của cộng đồng là điều kiện quan trọng để duy trì hiệu quả lâu dài của hệ thống thoát nước đô thị.

4.3. So sánh đấu nối thoát nước hộ gia đình giữa Việt Nam và Nhật Bản

4.3.1. So sánh về quản lý và kỹ thuật

Bảng 1. So sánh công tác đấu nối thoát nước hộ gia đình giữa Việt Nam và Nhật Bản

Nội dung so sánh	Việt Nam	Nhật Bản
Tính pháp lý của đấu nối	Chủ yếu mang tính khuyến khích	Nghĩa vụ pháp lý bắt buộc
Hệ thống thoát nước	Chủ yếu là hệ thống hỗn hợp	Chủ yếu là hệ thống tách riêng
Thiết kế đấu nối	Thường không có thiết kế chi tiết	Thiết kế mẫu, phê duyệt bắt buộc
Đơn vị thi công	Thợ dân dụng, ít kiểm soát	Đơn vị có chứng chỉ hành nghề
Nghiệm thu sau thi công	Chưa được thực hiện đầy đủ	Bắt buộc, kiểm tra tại hiện trường
Hố ga kiểm tra	Thường thiếu	Bắt buộc tại mọi điểm đấu nối
Quản lý sau đấu nối	Hạn chế	Theo dõi, kiểm tra định kỳ

4.3.2. So sánh trực quan sơ đồ đấu nối

Hình 6. So sánh sơ đồ đấu nối thoát nước hộ gia đình (đấu sai - trái) và (đấu đúng - phải) [1]

Hình minh họa cho thấy sự khác biệt rõ rệt về việc tách nước mưa - nước thải, bố trí hố ga kiểm tra và quản lý điểm đấu nối.

Phía đấu sai:

- Đấu nối nước mưa và nước thải chung
- Không có hố ga kiểm tra
- Nguy cơ quá tải khi mưa lớn

Phía đấu đúng:

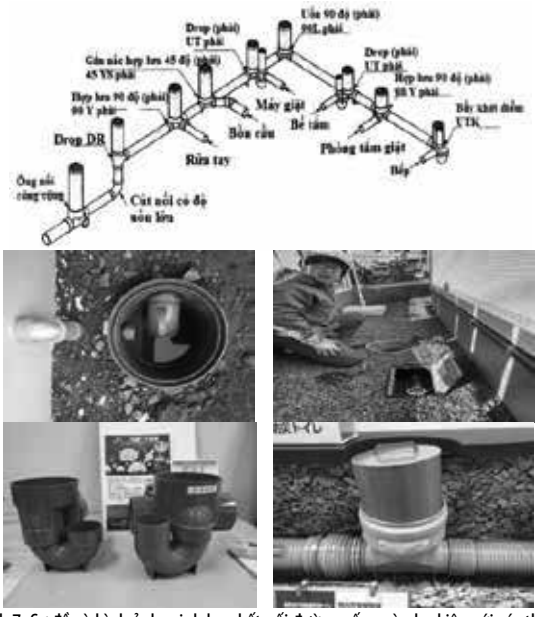
- Nước mưa và nước thải tách riêng
- Có hố ga kiểm tra tại điểm đấu nối
- Quản lý vận hành thuận lợi

5. GIẢI PHÁP ĐỀ XUẤT

- Chuẩn hóa quy trình kỹ thuật đấu nối

Quy trình kỹ thuật đấu nối cần được chuẩn hóa và áp dụng thống nhất, bao gồm khảo sát hiện trạng, thiết kế đấu nối theo mẫu, thi công đúng kỹ thuật và nghiệm thu chặt chẽ. Việc bố trí hố ga kiểm tra tại điểm đấu nối giúp thuận lợi cho công tác bảo trì và xử lý sự cố, ưu tiên sử dụng thiết bị phụ kiện đồng bộ chế tạo sẵn thuận lợi cho việc lắp đặt và vận hành quản lý sau này.

Sơ đồ kết nối đường cống và phụ kiện với các thiết bị thải nước được minh họa bằng (Hình 7).



Hình 7. Sơ đồ và hình ảnh minh họa kết nối đường cống và phụ kiện với các thiết bị thải nước [1], [2]

- Tách nước mưa - nước thải theo lộ trình

Trong điều kiện chưa thể tách ngay toàn bộ hệ thống, cần áp dụng lộ trình phù hợp, trước mắt ưu tiên tách các nguồn nước mưa dễ thực hiện tại hộ gia đình, sau đó từng bước tách theo tuyến phố và khu vực khi cải tạo hạ tầng.

- Nâng cao hiệu quả xử lý sơ bộ nước thải tại hộ gia đình

Việc chuẩn hóa thiết kế và vận hành bể tự hoại, tổ chức dịch vụ hút bùn định kỳ và lắp đặt bẫy mỡ đối với các hộ kinh doanh dịch vụ ăn uống là những giải pháp quan trọng nhằm giảm tải ô nhiễm cho hệ thống thoát nước đô thị.

- Hoàn thiện cơ chế quản lý và tài chính

Cần xây dựng cơ chế hỗ trợ chi phí đấu nối cho các hộ thu nhập thấp, lồng ghép công tác đấu nối vào các dự án cải tạo hạ tầng đô thị, đồng thời xây dựng cơ sở dữ liệu số hóa về đấu nối thoát nước hộ gia đình nhằm nâng cao hiệu quả quản lý và vận hành hệ thống.

6. KẾT LUẬN

Đấu nối thoát nước hộ gia đình có vai trò then chốt trong việc đảm bảo hiệu quả vận hành và tính bền vững của hệ thống thoát nước đô thị. Thực trạng tại các đô thị Việt Nam cho thấy còn nhiều tồn tại về kỹ thuật, quản lý và nhận thức. Bài báo đã phân tích toàn diện các vấn đề này và đề xuất hệ thống giải pháp đồng bộ, khả thi, phù hợp với điều kiện thực tế. Việc triển khai hiệu quả các giải pháp đề xuất sẽ góp phần quan trọng trong việc giảm ngập úng, ô nhiễm môi trường nước và nâng cao chất lượng sống đô thị.

Việc tham khảo và vận dụng kinh nghiệm của Nhật Bản cho thấy công tác đấu nối thoát nước hộ gia đình chỉ thực sự hiệu quả khi được đặt trong một hệ thống quản lý đồng bộ, có khung pháp lý rõ ràng, tiêu chuẩn kỹ thuật cụ thể và cơ chế giám sát chặt chẽ. Những bài học này có giá trị tham khảo cao đối với Việt Nam trong bối cảnh nhiều đô thị đang chuyển đổi hệ thống thoát nước và đẩy mạnh đầu tư xử lý nước thải đô thị.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Tài liệu và trải nghiệm thực tế khóa đào tạo tại Nhật Bản - Dự án hỗ trợ kỹ thuật thành lập trung tâm đào tạo và phát triển thoát nước Việt Nam - Cơ quan hợp tác Quốc tế Nhật Bản, tháng 01/2019.

[2] Giáo trình đào tạo - Dự án hỗ trợ kỹ thuật thành lập trung tâm đào tạo và phát triển thoát nước Việt Nam, Cơ quan hợp tác Quốc tế Nhật Bản phối hợp với BXD Việt Nam, tháng 3/2019.

[3] Bộ Xây dựng, QCVN 07:2016/BXD - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về các công trình hạ tầng kỹ thuật, 2016.

[4] Bộ Xây dựng, Định hướng phát triển hệ thống thoát nước đô thị Việt Nam, 2020.

[5] Metcalf & Eddy, Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, 2014.

[6] JICA, Final Report - Urban Drainage and Sewerage Improvement Projects in Vietnam, (2015 - 2020).

[7] Ngân hàng Thế giới (World Bank), Vietnam Urban Wastewater Review, 2019.

■Ngày nhận bài: 16/3/2026 ■Ngày sửa bài: 23/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 30/3/2026

Quản trị dữ liệu - nền tảng của chuyển đổi số bền vững trong ngành cấp thoát nước

Data governance as the foundation for sustainable digital transformation in the water and wastewater sector

> **TS NGUYỄN THANH THƯ*, TS NGUYỄN THỊ MỸ HẠNH, THS NGUYỄN BÍCH NGỌC**
Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội; *Email: thunt@hau.edu.vn

TÓM TẮT

Chuyển đổi số đang trở thành xu hướng tất yếu trong ngành cấp thoát nước nhằm nâng cao hiệu quả vận hành, giảm thất thoát nước và tăng cường năng lực quản lý trong bối cảnh đô thị hóa nhanh và biến đổi khí hậu ngày càng gia tăng. Trong thực tiễn, nhiều hệ thống và công nghệ thông tin như SCADA, GIS, hệ thống đo đếm và cơ sở dữ liệu đã được ứng dụng; tuy nhiên, quá trình chuyển đổi số tại nhiều đơn vị cấp thoát nước vẫn còn phân tán, thiếu tính đồng bộ và chưa đạt được hiệu quả tổng thể. Một trong những nguyên nhân chủ yếu là công tác quản trị dữ liệu chưa được quan tâm và tổ chức một cách có hệ thống. Bài báo phân tích vai trò của quản trị dữ liệu như nền tảng của chuyển đổi số bền vững trong ngành cấp thoát nước thông qua tổng hợp và phân tích các nghiên cứu và tài liệu chuyên ngành. Kết quả cho thấy quản trị dữ liệu có vai trò chiến lược trong việc bảo đảm chất lượng, tính thống nhất và khả năng khai thác dữ liệu, qua đó hỗ trợ tích hợp hệ thống thông tin, nâng cao hiệu quả quản lý, vận hành và quản lý tài sản hạ tầng kỹ thuật. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất định hướng áp dụng quản trị dữ liệu trong ngành cấp thoát nước phù hợp với điều kiện Việt Nam.

Từ khóa: Quản trị dữ liệu; chuyển đổi số; doanh nghiệp cấp thoát nước; hệ thống cấp thoát nước thông minh.

ABSTRACT

Digital transformation is becoming an inevitable trend in the water and wastewater sector, aiming to improve operational efficiency, reduce non-revenue water, and strengthen management capacity in the context of rapid urbanization and increasing climate change impacts. In practice, various information systems and digital technologies, such as SCADA, GIS, metering systems, and databases, have been applied; however, digital transformation efforts in many water utilities remain fragmented, lack system-wide integration, and have not yet achieved overall effectiveness. One of the main reasons is the absence of a systematic and well-structured approach to data governance. This paper analyzes the role of data governance as the foundation for sustainable digital transformation in the water and wastewater sector through a synthesis and analysis of relevant scientific studies and technical literature. The results indicate that data governance plays a strategic role in ensuring data quality, consistency, and effective data utilization, thereby supporting information system integration and enhancing the efficiency of management, operation, and infrastructure asset management. Based on these findings, the paper proposes orientations for applying data governance in the water supply and drainage industry that are appropriate to the Vietnamese context.

Keywords: Data governance; digital transformation; water utilities; smart water.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngành cấp thoát nước giữ vai trò thiết yếu trong phát triển đô thị bền vững, bảo đảm an ninh nguồn nước, sức khỏe cộng đồng và chất lượng môi trường sống. Trong bối cảnh đô thị hóa diễn ra nhanh chóng, gia tăng dân số đô thị và tác động ngày càng rõ nét của biến đổi khí hậu, các hệ thống cấp thoát nước đang phải đối mặt với những thách thức ngày càng phức tạp cả về kỹ thuật lẫn quản lý. Nhu cầu sử dụng nước gia tăng liên tục, trong khi hạ tầng kỹ thuật tại nhiều đô thị đã và đang chịu áp lực quá tải, xuống cấp hoặc không còn phù hợp với điều kiện phát triển mới. Đồng thời, các hiện tượng thời tiết cực đoan như hạn hán, mưa lớn cường độ cao và ngập lụt gia tăng tần suất và mức độ, làm gia tăng rủi ro cho hoạt động vận hành hệ thống cấp thoát nước [1]. Bên cạnh các thách thức về điều kiện tự nhiên và đô thị hóa, ngành cấp thoát nước còn phải đối mặt với những vấn đề tồn tại mang tính hệ thống, trong đó nổi bật là tỷ lệ thất thoát nước cao và hiệu quả vận hành chưa tương xứng với mức đầu tư hạ tầng. Theo nhiều nghiên cứu và báo cáo quốc tế, thất thoát nước vẫn là một trong những vấn đề nghiêm trọng tại nhiều quốc gia, đặc biệt ở các nước đang phát triển, gây tổn thất lớn về tài chính, tài nguyên và năng lượng [2]. Việc thiếu các công cụ giám sát, phân tích và ra quyết định hiệu quả làm hạn

chế khả năng kiểm soát thất thoát, tối ưu hóa vận hành và quản lý tài sản hạ tầng trong dài hạn. Trong bối cảnh đó, chuyển đổi số đã và đang được xem là một xu hướng tất yếu của ngành cấp thoát nước nhằm nâng cao hiệu quả quản lý, vận hành hệ thống và chất lượng dịch vụ. Nhiều nghiên cứu quốc tế cho thấy việc ứng dụng các hệ thống và công nghệ thông tin đã mang lại những cải thiện đáng kể trong giám sát thời gian thực, phát hiện sớm sự cố, tối ưu hóa áp lực mạng lưới và hỗ trợ ra quyết định [3-5]. Trên cơ sở đó, khái niệm "smart water" hay "smart water utilities" được hình thành nhằm mô tả các mô hình quản lý hệ thống cấp thoát nước dựa trên dữ liệu và công nghệ số. Nhiều khảo sát quy mô quốc tế cho thấy phần lớn các đơn vị cấp thoát nước đã triển khai ít nhất một hoặc một số giải pháp công nghệ số trong hoạt động quản lý và vận hành. Tuy nhiên, mức độ hiệu quả của chuyển đổi số giữa các đơn vị và giữa các quốc gia còn rất khác nhau [3]. Một số đơn vị đã đạt được những kết quả tích cực nhờ tích hợp hiệu quả các hệ thống thông tin và khai thác dữ liệu cho mục tiêu chiến lược, trong khi nhiều đơn vị khác vẫn chỉ dừng lại ở việc ứng dụng công nghệ ở quy mô cục bộ, thiếu liên kết và chưa mang lại hiệu quả tổng thể. Các nghiên cứu gần đây chỉ ra rằng một trong những hạn chế phổ biến của chuyển đổi số trong ngành cấp thoát nước là xu hướng "thiên về công nghệ", trong đó trọng tâm được đặt vào việc đầu tư và triển khai các giải pháp kỹ thuật, trong khi các yếu tố về tổ chức, quy trình và quản trị dữ liệu chưa được quan tâm tương xứng [6].

Quản trị dữ liệu được các nghiên cứu quốc tế gần đây nhấn mạnh như một yếu tố then chốt bảo đảm hiệu quả và tính bền vững của chuyển đổi số. Quản trị dữ liệu không chỉ bao gồm các vấn đề kỹ thuật liên quan đến lưu trữ và xử lý dữ liệu, mà còn bao hàm các khía cạnh về chính sách, quy trình, tiêu chuẩn, phân định trách nhiệm và cơ chế phối hợp giữa các bên liên quan trong tổ chức [6]. Một số công trình nghiên cứu đã đề xuất các khung quản trị dữ liệu cho lĩnh vực cấp thoát nước, tập trung vào việc chuẩn hóa dữ liệu, xác định quyền sở hữu dữ liệu, nâng cao chất lượng dữ liệu và hỗ trợ ra quyết định dựa trên dữ liệu [7]. Tuy nhiên, các nghiên cứu về quản trị dữ liệu trong ngành cấp thoát nước hiện nay vẫn còn tương đối hạn chế về số lượng và phạm vi. Tại Việt Nam, chuyển đổi số trong ngành cấp thoát nước đang được thúc đẩy thông qua các chương trình, dự án và định hướng phát triển ngành, với trọng tâm là ứng dụng công nghệ số trong quản lý và vận hành hệ thống. Các báo cáo chuyên ngành và hội thảo khoa học cho thấy nhiều đơn vị cấp thoát nước đã triển khai SCADA, GIS, và các phần mềm quản lý khác nhằm nâng cao hiệu quả hoạt động [8]. Tuy nhiên, các nghiên cứu khoa học trong nước chủ yếu tập trung vào giải pháp kỹ thuật và công nghệ cụ thể, trong khi vai trò của quản trị dữ liệu như một nền tảng chiến lược của chuyển đổi số vẫn chưa được nghiên cứu một cách hệ thống và toàn diện. Khoảng trống nghiên cứu này cho thấy sự cần thiết phải có các nghiên cứu mang tính tổng hợp và phân tích, nhằm làm rõ vai trò của quản trị dữ liệu trong chuyển đổi số ngành cấp thoát nước, đặc biệt trong bối cảnh Việt Nam. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất các định hướng áp dụng quản trị dữ liệu phù hợp với đặc thù ngành cấp thoát nước và điều kiện thực tiễn tại Việt Nam.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU VÀ CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Chuyển đổi số trong ngành cấp thoát nước

Trong những năm gần đây, chuyển đổi số đã trở thành một xu hướng quan trọng trong ngành cấp thoát nước nhằm nâng cao hiệu quả vận hành, tăng cường năng lực quản lý và sử dụng bền vững tài nguyên nước. Các khái niệm Digital Water và Smart Water Utility được sử dụng rộng rãi để mô tả quá trình ứng dụng công nghệ số và dữ liệu trong quản lý hệ thống cấp thoát nước [3], [4]. Theo các nghiên cứu và báo cáo chuyên ngành, Digital Water không chỉ bao gồm việc triển khai công nghệ thông tin mà còn hàm ý sự thay đổi trong cách thức thu thập, quản lý, chia sẻ và khai thác dữ liệu phục vụ ra quyết định [3]. Trọng tâm của Digital Water là dữ liệu. Các thành phần cốt lõi của Digital Water: cảm biến & IoT (lưu lượng, áp lực, chất lượng nước); SCADA; Hệ thống quản lý dữ liệu (Data Platforms, Cloud); Mô hình số (Hydraulic models, Digital Twin); Phân tích dữ liệu & AI; Ra quyết định dựa trên dữ liệu. Mục tiêu của Digital Water là: tăng hiệu quả vận hành; Giảm thất thoát nước; Dự báo sự cố; Nâng cao minh bạch và khả năng giám sát; Hỗ trợ ra quyết định chiến lược. Trên cơ sở đó, mô hình Smart Water Utility được xem là giai đoạn phát triển cao hơn, trong đó dữ liệu được coi là tài sản chiến lược và được khai thác xuyên suốt các chức năng quản lý, vận hành và lập kế hoạch [3], [4]. Smart Water Utility là kết quả vận hành của Digital Water, chứ không chỉ là công nghệ. Các công nghệ số được triển khai cho phép thu thập dữ liệu thời gian thực, giám sát trạng thái hệ thống và hỗ trợ tối ưu hóa vận hành. Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng việc triển khai các công nghệ số tại các đơn vị cấp thoát nước thường mang tính cục bộ, theo từng dự án hoặc từng bộ phận chức năng, dẫn đến tình trạng dữ liệu phân tán và khó tích hợp [3], [6]. Việc thiếu các cơ chế quản lý và kiểm soát dữ liệu hiệu quả thường dẫn đến tình trạng "nhiều dữ liệu nhưng ít giá trị", làm hạn chế lợi ích thực tế của chuyển đổi số [6].

2.2. Quản trị dữ liệu - khái niệm và nội hàm

2.2.1. Phân biệt quản trị dữ liệu và quản lý dữ liệu

Trong các nghiên cứu về hệ thống thông tin và chuyển đổi số, quản trị dữ liệu và quản lý dữ liệu là hai khái niệm có liên quan chặt chẽ nhưng không đồng nhất. Theo Khatri và Brown, quản trị dữ liệu tập trung vào việc thiết lập các chính sách, quy trình, vai trò và trách nhiệm nhằm bảo đảm dữ liệu được sử dụng một cách hiệu quả và nhất quán trong toàn tổ chức [9]. Trong khi đó, quản lý dữ liệu chủ yếu đề cập đến các hoạt động kỹ thuật như thu thập, lưu trữ, xử lý và duy trì dữ liệu. Otto cho rằng quản trị dữ liệu đóng vai trò như một khung tổ chức, tạo nền tảng cho các hoạt động quản lý dữ liệu và ứng dụng công nghệ được triển khai đồng bộ [10].

Bảng 1. Phân biệt quản trị dữ liệu và quản lý dữ liệu

Tiêu chí	Quản trị dữ liệu	Quản lý dữ liệu
Cấp độ	Chiến lược, tổ chức	Tác nghiệp, kỹ thuật
Trọng tâm	Chính sách, quy trình, trách nhiệm	Thu thập, lưu trữ, xử lý
Phạm vi	Toàn đơn vị	Hệ thống/cơ sở dữ liệu
Mục tiêu	Tạo giá trị bền vững từ dữ liệu	Bảo đảm dữ liệu vận hành

2.2.2. Các thành phần cốt lõi của quản trị dữ liệu

Các nghiên cứu quốc tế đã đề xuất nhiều khung quản trị dữ liệu khác nhau, song nhìn chung đều thống nhất về một số thành phần cốt lõi.

2.2.2.1. Chiến lược dữ liệu

Chiến lược dữ liệu xác định vai trò của dữ liệu trong việc đạt được các mục tiêu quản lý và phát triển của tổ chức. Otto chỉ ra rằng trong bối cảnh doanh nghiệp hiện đại, dữ liệu không đơn thuần là kết quả của các hoạt động kỹ thuật mà cần được xem xét trong khuôn khổ chiến lược tổng thể, nơi dữ liệu được liên kết với các mục tiêu quản lý, vận hành và phát triển nhằm tạo ra giá trị gia tăng cho tổ chức [10]. Đối với ngành cấp thoát nước, chiến lược dữ liệu giúp liên kết dữ liệu vận hành, dữ liệu tài sản

và dữ liệu khách hàng với các mục tiêu nâng cao hiệu quả, giảm thất thoát và phát triển bền vững

2.2.2.2. Chuẩn hóa và chất lượng dữ liệu

Chuẩn hóa và kiểm soát chất lượng dữ liệu là điều kiện tiên quyết để tích hợp hệ thống thông tin và khai thác dữ liệu ở quy mô lớn. Nhiều nghiên cứu cho thấy dữ liệu không đồng nhất và thiếu chuẩn hóa làm suy giảm đáng kể hiệu quả của các chương trình Digital Water và Smart Water Utility. Việc thiếu các chuẩn dữ liệu thống nhất cũng như cơ chế kiểm soát chất lượng phù hợp là một trong những nguyên nhân chủ yếu hạn chế hiệu quả của các sáng kiến chuyển đổi số [11], [12]

2.2.2.3. Quyền sở hữu và chia sẻ dữ liệu

Việc xác định rõ quyền sở hữu dữ liệu, trách nhiệm quản lý và cơ chế chia sẻ dữ liệu xuyên suốt các bộ phận và bên liên quan là nhân tố then chốt để đảm bảo dữ liệu hoạt động minh bạch và hiệu quả trong các hệ thống cấp thoát nước. Theo Yin et al. (2025), việc thiết lập cơ chế hợp tác và tiêu chuẩn dữ liệu rõ ràng là điều kiện cần thiết để chia sẻ dữ liệu hiệu quả và đánh giá chính xác các thông tin vận hành, từ đó hỗ trợ ra quyết định và nâng cao hiệu quả quản lý [13].

2.2.2.4. Bảo mật và an toàn dữ liệu

Trong bối cảnh số hóa hạ tầng kỹ thuật, bảo mật dữ liệu và an ninh hệ thống ngày càng trở nên quan trọng. Quản trị dữ liệu đóng vai trò thiết lập các nguyên tắc, chính sách và quy trình nhằm bảo vệ dữ liệu trước các rủi ro về an ninh mạng, truy cập trái phép và thất thoát thông tin. Dai et al. (2025) chỉ ra rằng thách thức về khả năng tương tác dữ liệu, bảo mật và khả năng chia sẻ dữ liệu giữa các hệ thống là rào cản quan trọng đối với hiệu quả quản lý nước hiện đại [11].

2.3. Khoảng trống nghiên cứu

Mặc dù số lượng nghiên cứu về chuyển đổi số và hệ thống cấp thoát nước thông minh ngày càng gia tăng, phần lớn các công trình hiện nay vẫn tập trung vào giải pháp công nghệ cụ thể, trong khi mối liên hệ giữa quản trị dữ liệu và hiệu quả chuyển đổi số chưa được phân tích một cách hệ thống. Bên cạnh đó, các nghiên cứu về quản trị dữ liệu trong ngành cấp thoát nước chủ yếu được thực hiện tại các quốc gia phát triển, nơi có nền tảng hạ tầng số và thể chế tương đối hoàn thiện [3]. Đối với các quốc gia đang phát triển như Việt Nam, nơi quá trình chuyển đổi số còn gặp nhiều hạn chế về tổ chức, nguồn lực và năng lực quản lý, các nghiên cứu chuyên sâu về quản trị dữ liệu vẫn còn rất hạn chế.

Tổng quan nghiên cứu cho thấy quản trị dữ liệu là nền tảng then chốt quyết định mức độ tích hợp, khả năng khai thác dữ liệu và tính bền vững của chuyển đổi số trong ngành cấp thoát nước. Tuy nhiên, vai trò này vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ, đặc biệt trong bối cảnh các nước đang phát triển, tạo cơ sở cho việc phân tích sâu hơn vai trò cụ thể của quản trị dữ liệu trong các phần tiếp theo của bài báo.

3. VAI TRÒ CỦA QUẢN TRỊ DỮ LIỆU TRONG QUÁ TRÌNH CHUYỂN ĐỔI SỐ CỦA NGÀNH CẤP THOÁT NƯỚC

3.1. Nền tảng tích hợp hệ thống số

Một trong những thách thức lớn nhất trong chuyển đổi số ngành cấp thoát nước là tình trạng dữ liệu phân mảnh, tồn tại rời rạc trong các hệ thống như SCADA, GIS, hệ thống đo đếm - tính cước (Billing), và hệ thống quản lý tài sản (CMMS). Thiếu cơ chế quản trị dữ liệu thống nhất dẫn đến khó khăn trong việc tích hợp, chia sẻ và khai thác dữ liệu giữa các hệ thống này [3], [6]. Quản trị dữ liệu cung cấp khung nguyên tắc và chuẩn dữ liệu chung, giúp đồng bộ hóa cấu trúc dữ liệu giữa các hệ thống số. Nhờ đó, dữ liệu vận hành thời gian thực từ SCADA có thể được liên kết với dữ liệu không gian trong GIS, và dữ liệu tài sản trong CMMS, hình thành nền tảng dữ liệu tích hợp phục vụ quản lý tổng thể hệ thống cấp thoát nước. Việc tránh phân mảnh dữ liệu không chỉ nâng cao hiệu quả vận hành mà còn tạo tiền đề cho các ứng dụng phân tích và ra quyết định nâng cao.

Hình 1. Vai trò trung tâm của quản trị dữ liệu trong chuyển đổi số ngành cấp thoát nước

3.2. Cơ sở cho ra quyết định dựa trên dữ liệu

Ra quyết định dựa trên dữ liệu là mục tiêu cốt lõi của chuyển đổi số trong ngành cấp thoát nước. Tuy nhiên, các quyết định liên quan đến giảm thất thoát nước, dự báo nhu cầu sử dụng hay tối ưu hóa vận hành chỉ có thể đạt độ tin cậy cao khi dữ liệu được quản trị tốt về chất lượng, tính đầy đủ và khả năng truy xuất [4], [12]. Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng việc kết hợp dữ liệu đo đếm, dữ liệu áp lực - lưu lượng và dữ liệu khách hàng, dưới sự hỗ trợ của khung quản trị dữ liệu thống nhất, giúp các đơn vị cấp nước xác định chính xác khu vực thất thoát, ưu tiên đầu tư và nâng cao hiệu quả quản lý mạng lưới [12]. Dữ liệu lịch sử được chuẩn hóa và lưu trữ có hệ thống là cơ sở cho các mô hình dự báo nhu cầu nước, hỗ trợ lập kế hoạch vận hành và phát triển hệ thống cấp thoát nước trong dài hạn.

3.3. Điều kiện triển khai công nghệ thông minh

Các công nghệ thông minh như trí tuệ nhân tạo (AI), phân tích dữ liệu nâng cao hay mô hình Digital Twin đang được xem là xu hướng phát triển tiếp theo của ngành nước. Tuy nhiên, hiệu quả của các công nghệ này phụ thuộc chặt chẽ vào mức độ sẵn sàng của dữ liệu và năng lực quản trị dữ liệu của tổ chức. AI và Digital Twin yêu cầu dữ liệu lớn, liên tục, đáng tin cậy và có khả năng tích hợp từ nhiều nguồn khác nhau. Nếu thiếu chuẩn dữ liệu, dữ liệu không đồng nhất hoặc không được kiểm soát chất lượng, các mô hình thông minh có nguy cơ đưa ra kết quả sai lệch, làm giảm giá trị đầu tư công nghệ. Do đó, quản trị dữ liệu cần được xem là điều kiện tiên quyết, đi trước hoặc song hành với việc triển khai các giải pháp công nghệ thông minh trong ngành cấp thoát nước.

3.4. Tăng cường quản trị và minh bạch

Bên cạnh khía cạnh kỹ thuật và vận hành, quản trị dữ liệu còn

góp phần nâng cao năng lực quản trị của doanh nghiệp cấp thoát nước. Dữ liệu được quản trị tốt giúp tăng cường tính minh bạch trong báo cáo, giám sát hiệu quả hoạt động và hỗ trợ công tác kiểm tra, đánh giá của các cơ quan quản lý nhà nước [13]. Việc thiết lập các quy trình quản trị dữ liệu rõ ràng về trách nhiệm, quyền truy cập và chia sẻ dữ liệu giúp giảm rủi ro sai lệch thông tin, đồng thời nâng cao khả năng giải trình của các đơn vị cấp thoát nước. Trong bối cảnh chuyển đổi số hướng tới phát triển bền vững, quản trị dữ liệu đóng vai trò cầu nối giữa công nghệ, quản lý và chính sách, góp phần bảo đảm hiệu quả lâu dài của các chương trình chuyển đổi số.

4. KHUNG QUẢN TRỊ DỮ LIỆU ĐỀ XUẤT VÀ KHẢ NĂNG ÁP DỤNG TẠI VIỆT NAM

Trong bối cảnh chuyển đổi số ngành cấp thoát nước, thay vì tiếp cận chuyển đổi số chủ yếu từ góc độ công nghệ, nghiên cứu này cho rằng cần đặt quản trị dữ liệu ở vị trí trung tâm, đóng vai trò nền tảng cho toàn bộ quá trình chuyển đổi số trong ngành cấp thoát nước.

4.1. Khung quản trị dữ liệu đề xuất

Dựa trên tổng hợp các nghiên cứu quốc tế về quản trị dữ liệu trong lĩnh vực cấp thoát nước và hạ tầng kỹ thuật [6], [13], bài báo đề xuất một khung quản trị dữ liệu tích hợp, gồm bốn trụ cột cốt lõi. Khung này được xây dựng theo các nguyên tắc: (i) dữ liệu là tài sản chiến lược, (ii) quản trị dữ liệu là quá trình liên ngành, và (iii) hiệu quả chuyển đổi số phụ thuộc vào mức độ phát triển của quản trị dữ liệu.

4.1.1. Chiến lược dữ liệu

Chiến lược dữ liệu là trụ cột định hướng, xác định vai trò của dữ liệu trong việc đạt được các mục tiêu quản lý và phát triển của đơn vị cấp thoát nước. Khác với cách tiếp cận truyền thống coi dữ liệu chỉ là sản phẩm phụ của hoạt động vận hành, chiến lược dữ liệu coi dữ liệu là nguồn lực có thể khai thác nhằm nâng cao hiệu quả vận hành, giảm thất thoát nước và hỗ trợ ra quyết định dựa trên bằng chứng. Trong ngành cấp thoát nước, chiến lược dữ liệu cần bao quát dữ liệu vận hành, dữ liệu không gian, dữ liệu tài sản và dữ liệu khách hàng, đồng thời bảo đảm tính liên thông giữa các nhóm dữ liệu này.

4.1.2. Thể chế và chính sách dữ liệu

Thể chế và chính sách dữ liệu tạo khung pháp lý và tổ chức cho việc quản lý, chia sẻ và sử dụng dữ liệu. Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng sự thiếu vắng các quy định rõ ràng về quyền sở hữu và việc thiếu phân định rõ ràng về trách nhiệm đối với dữ liệu là một trong những nguyên nhân chính dẫn đến tình trạng dữ liệu bị phân tán, quản lý rời rạc theo từng phòng ban, từ đó làm suy giảm hiệu quả tích hợp hệ thống thông tin trong các đơn vị cấp thoát nước. Do đó, trụ cột này cần xác định rõ vai trò của các chủ thể tham gia quản trị dữ liệu, thiết lập cơ chế phối hợp và bảo đảm tính minh bạch trong sử dụng dữ liệu.

4.1.3. Hạ tầng và kiến trúc dữ liệu

Hạ tầng và kiến trúc dữ liệu là trụ cột kỹ thuật, đóng vai trò chuyển hóa chiến lược và chính sách dữ liệu thành năng lực vận hành cụ thể. Hạ tầng dữ liệu không chỉ bao gồm các hệ thống lưu trữ và xử lý dữ liệu, mà còn bao hàm kiến trúc tích hợp cho phép kết nối các hệ thống SCADA, GIS, đo đếm và quản lý khách hàng. Kiến trúc dữ liệu hợp lý là điều kiện tiên quyết để triển khai các công nghệ phân tích nâng cao, trí tuệ nhân tạo và mô hình Digital Twin trong ngành cấp thoát nước.

4.1.4. Con người và năng lực dữ liệu

Con người và năng lực dữ liệu là trụ cột bảo đảm tính bền vững của khung quản trị dữ liệu. Quản trị dữ liệu không thể đạt hiệu quả nếu thiếu đội ngũ nhân lực có năng lực dữ liệu và nhận thức đúng về vai trò của dữ liệu trong quản lý. Việc xác định các vai trò như chủ sở hữu dữ liệu, người quản lý dữ liệu và xây dựng văn hóa ra quyết định dựa trên dữ liệu được xem là yếu tố then chốt quyết định mức độ trưởng thành của quản trị dữ liệu.

4.2. Khả năng áp dụng tại Việt Nam

Trong bối cảnh Việt Nam, quá trình chuyển đổi số ngành cấp thoát nước đã được triển khai tại nhiều địa phương, song phần lớn vẫn tập trung vào đầu tư các hệ thống công nghệ riêng lẻ. Dữ liệu được hình thành và lưu trữ phân tán, thiếu chuẩn hóa và chưa được quản trị như một tài sản chung của tổ chức. Thực trạng này làm hạn chế khả năng tích hợp hệ thống thông tin và khai thác dữ liệu cho mục tiêu quản lý tổng thể. Tuy nhiên, theo Quyết định số 950/QĐ-TTg của Thủ tướng Chính phủ về việc triển khai Chương trình Chuyển đổi số quốc gia (CĐS) của Việt Nam định hướng 2030, và các chiến lược phát triển đô thị thông minh đang tạo ra điều kiện thuận lợi để tái cấu trúc cách tiếp cận chuyển đổi số trong ngành cấp thoát nước. Trong bối cảnh đó, khung quản trị dữ liệu được đề xuất có thể đóng vai trò như một công cụ định hướng, giúp các đơn vị cấp thoát nước chuyển từ cách tiếp cận thiên về công nghệ sang cách tiếp cận dựa trên dữ liệu và quản trị. Bên cạnh các cơ hội, việc áp dụng khung quản trị dữ liệu tại Việt Nam còn đối mặt với những thách thức đáng kể, bao gồm sự thiếu đồng bộ về thể chế, hạn chế về nguồn nhân lực dữ liệu, và sự phụ thuộc vào các dự án đầu tư công nghệ ngắn hạn. Những thách thức này đòi hỏi các giải pháp mang tính hệ thống, thay vì chỉ tập trung vào nâng cấp hạ tầng công nghệ.

4.3. Định hướng và khuyến nghị

Từ các phân tích trên, nghiên cứu đề xuất một số định hướng cho quá trình chuyển đổi số ngành cấp thoát nước tại Việt Nam. Trước hết, quản trị dữ liệu cần được xác định là ưu tiên chiến lược, đóng vai trò nền tảng cho mọi sáng kiến chuyển đổi số. Thứ hai, cần xây dựng lộ trình triển khai quản trị dữ liệu theo từng giai đoạn, bắt đầu từ chuẩn hóa dữ liệu và thiết lập thể chế quản trị, sau đó mới mở rộng sang các ứng dụng phân tích và công nghệ thông minh. Cuối cùng, quản trị dữ liệu cần được gắn kết với cải cách quản trị doanh nghiệp cấp thoát nước, nhằm nâng cao hiệu quả quản lý và tính minh bạch trong vận hành.

5. KẾT LUẬN

5.1. Tóm tắt các phát hiện chính

Nghiên cứu đã tổng hợp và phân tích các công trình khoa học quốc tế liên quan đến chuyển đổi số và quản trị dữ liệu, đồng thời đối chiếu với bối cảnh thực tiễn của ngành cấp thoát nước. Kết quả cho thấy, mặc dù các công nghệ số như SCADA, GIS, trí tuệ nhân tạo (AI), mô hình song sinh kỹ thuật số (Digital Twin) hay phân tích dữ liệu nâng cao đang được quan tâm và từng bước triển khai, nhưng hiệu quả ứng dụng trên thực tế phụ thuộc vào mức độ trưởng thành của công tác quản trị dữ liệu trong các đơn vị cấp thoát nước. Các nghiên cứu quốc tế đều thống nhất rằng dữ liệu không chỉ là sản phẩm phụ của quá trình vận hành, mà đã trở thành một nguồn lực chiến lược, đòi hỏi phải được quản trị một cách có hệ thống, xuyên suốt từ chiến lược, thể chế, hạ tầng kỹ thuật đến yếu tố con người [3],[4].

5.2. Khẳng định vai trò nền tảng của quản trị dữ liệu

Từ các phân tích ở các phần trước, có thể khẳng định rằng quản trị dữ liệu là nền tảng quyết định sự thành công của chuyển đổi số ngành cấp thoát nước. Quản trị dữ liệu hiệu quả tạo điều kiện cho việc tích hợp các hệ thống số, giảm tình trạng dữ liệu phân mảnh, nâng cao độ tin cậy của thông tin và hỗ trợ ra quyết định dựa trên dữ liệu trong các hoạt động cốt lõi như giảm thất

thoát nước, tối ưu vận hành và lập kế hoạch phát triển hạ tầng. Ngược lại, việc triển khai công nghệ số khi chưa có khung quản trị dữ liệu rõ ràng thường dẫn đến đầu tư dàn trải, thiếu liên thông giữa các hệ thống và không khai thác được giá trị thực sự của dữ liệu, như đã được chỉ ra trong nhiều nghiên cứu về chuyển đổi số ngành nước [3].

Ngoài ra, quản trị dữ liệu có vai trò then chốt trong việc nâng cao hiệu quả kinh tế – tài chính của doanh nghiệp cấp thoát nước thông qua giảm tỷ lệ thất thoát nước và tối ưu hóa quyết định đầu tư. Dữ liệu được chuẩn hóa, đầy đủ và tích hợp cho phép thực hiện cân bằng nước chính xác, nhận diện khu vực thất thoát cao và phân biệt rõ thất thoát vật lý và thương mại, từ đó hỗ trợ các biện pháp xử lý hiệu quả. Đồng thời, quản trị dữ liệu hiệu quả giúp doanh nghiệp đưa ra quyết định đầu tư dựa trên những thông tin về tình trạng tài sản, rủi ro hư hỏng và hiệu suất vận hành, góp phần phân bổ nguồn vốn hợp lý, tránh đầu tư dàn trải và nâng cao hiệu quả tài chính dài hạn. Vì vậy, quản trị dữ liệu không chỉ là công cụ hỗ trợ kỹ thuật mà còn là nền tảng quan trọng cho phát triển kinh tế bền vững trong ngành cấp thoát nước.

5.3. Đóng góp khoa học và giá trị thực tiễn

Về mặt khoa học, bài báo góp phần hệ thống hóa cơ sở lý luận về quản trị dữ liệu trong bối cảnh chuyển đổi số ngành cấp thoát nước, làm rõ mối quan hệ giữa quản trị dữ liệu, kiến trúc hệ thống số và hiệu quả vận hành. Khung quản trị dữ liệu đề xuất với bốn trụ cột - chiến lược dữ liệu, thể chế và chính sách, hạ tầng và kiến trúc dữ liệu, con người và năng lực dữ liệu - là sự tổng hợp và điều chỉnh phù hợp từ các mô hình quốc tế cho điều kiện của các đơn vị cấp thoát nước. Về mặt thực tiễn, nghiên cứu cung cấp một cơ sở tham khảo cho các doanh nghiệp cấp thoát nước, cơ quan quản lý và các nhà hoạch định chính sách tại Việt Nam trong việc xây dựng lộ trình chuyển đổi số, nhấn mạnh việc ưu tiên thiết lập nền tảng quản trị dữ liệu trước khi mở rộng triển khai các công nghệ thông minh.

5.4. Hạn chế của nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện chủ yếu dựa trên phương pháp tổng quan và phân tích tài liệu thứ cấp, chưa đi sâu vào các nghiên cứu tình huống cụ thể tại các đơn vị cấp thoát nước ở Việt Nam. Do đó, một số nhận định mang tính khái quát và cần được kiểm chứng thêm thông qua dữ liệu thực nghiệm hoặc khảo sát chuyên sâu. Bên cạnh đó, khung quản trị dữ liệu đề xuất mới dừng ở mức định hướng, chưa đánh giá chi tiết về chi phí, nguồn lực và mức độ sẵn sàng của từng nhóm đơn vị cấp thoát nước với quy mô và điều kiện khác nhau.

5.5. Hướng nghiên cứu tiếp theo

Trong các nghiên cứu tiếp theo, cần tiến hành các nghiên cứu tình huống tại các doanh nghiệp cấp thoát nước điển hình nhằm đánh giá mức độ trưởng thành về quản trị dữ liệu và hiệu quả của việc áp dụng khung đề xuất. Ngoài ra, việc phát triển các chỉ số đánh giá năng lực quản trị dữ liệu và xây dựng lộ trình chuyển đổi số theo từng giai đoạn cụ thể sẽ giúp tăng tính khả thi và giá trị ứng dụng của nghiên cứu trong thực tiễn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Wang D, Chen Y, Jarin M and Xie X. Increasingly frequent extreme weather events urge the development of point-of-use water treatment systems. npj Clean Water, 5, 36, 2022, doi: https://doi.org/10.1038/s41545-022-00182-1.

[2] Bill Kingdom, Roland Liemberger and Philippe Marin. The challenge of reducing non-revenue water in developing countries: How the private sector can help: A look at performance-based service contracting. World Bank, Paper No. 8, December 2006.

[3] Daniel I, Ajami NK, Castelletti A, Savic D, Stewart RA and Cominola A. A survey of water utilities' digital transformation: drivers, impacts, and enabling technologies. npj Clean Water, 6, 51, 2023, doi: https://doi.org/10.1038/s41545-023-00265-7

[4] Arnell M, Miltell M and Olsson G. Making waves: A vision for digital water utilities. Water Research X, Volume 19, 100170, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.wroa.2023.100170.

[5] Ghorbani Bam P, Rezaei N, Roubanis A, Austin D, Austin E, Tarroja B, Takacs I, Villez K and Rosso D. Digital Twin Applications in the Water Sector: A Review. Water, 17(20), 2957, 2025, doi: https://doi.org/10.3390/w17202957.

[6] Wawi A and Özerol G. Governance challenges in water data management: Insights from the application of the practitioner governance assessment tool in Palestine. Water Research X, Volume 29, Article 100399, 2025, doi: https://doi.org/10.1016/j.wroa.2025.100399.

[7] Baycheva-Merger T, Kramer J, Stahl K and Kruse S. User acceptance of digital groundwater technologies: A data governance perspective. Water Alternatives, 18(3), 546–563, 2025.

[8] Vy Anh. Nước và tương lai xanh: Chuyển đổi số thúc đẩy ngành nước phát triển an toàn, thông minh và bền vững. Hiệp hội Cấp thoát nước Việt Nam (VWSA). Internet: https://vwsa.org.vn/vn/article/3151/nuoc-va-tuong-lai-xanh-chuyen-doi-so-thuc-day-nganh-nuoc-phat-trien-an-toan-thong-minh-va-ben-vung.html (truy cập tháng 12/2025).

[9] Khatri, V and Brown CV. Designing data governance. Communications of the ACM, 53(1), 148–152, 2010, doi:10.1145/1629175.1629210.

[10] Otto B. A morphology of the organisation of data governance. European Conference on Information Systems (ECIS) 2011, Proceedings 272.

[11] Dai Y, Huang Z, Khan N and Labbo MS. Smart water management: Governance innovation, technological integration, and policy pathways toward economic and ecological sustainability. Water, 17(13), 1932, 2025, doi: https://doi.org/10.3390/w17131932.

[12] Soares Ascenção É, Melo Marinangelo F, Meschini Almeida CF, Kagan N and Dias EM. Applications of smart water management systems: A literature review. Water, *15*(3492), 2023, doi: https://doi.org/10.3390/w15193492.

[13] Yin R, Xu H, Wei J and Varga L. Addressing data sharing challenges for leakage management in water distribution networks – An MCDM-based assessment of barriers and solutions. Journal of Environmental Management, Volume 391, September 2025, 126481, doi: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126481

■Ngày nhận bài: 26/02/2026 ■Ngày sửa bài: 05/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 12/3/2026

Tích hợp di sản công nghiệp và khả năng phục hồi đô thị: Cách tiếp cận lớp đệm hình thái cho hành lang đường sắt Phan Thiết - Mương Mán

Integrating Industrial Heritage and Urban Resilience: A Morphological buffer approach for Railway corridor landscape in Phan Thiet - Muong Man

> KTS LÊ BÁ TOÀN[1], TS.KTS PHẠM NGỌC TUẤN[2,*]
[1]Viện Đào tạo Sau đại học, Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM
[2]Khoa Quy hoạch, Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM; *Email: tuan.phamngoc@uah.edu.vn

TÓM TẮT

Các hành lang đường sắt cũ trong lòng những đô thị đang phát triển thường trở thành những "khoảng trống đô thị", gây ra sự đứt gãy về hình thái và suy giảm chất lượng sinh thái. Những khu vực này đang đứng trước thách thức mang tính chiến lược: bị xóa bỏ để phát triển hạ tầng đường bộ hoặc được bảo tồn như một thành phần di sản đô thị. Nghiên cứu này lập luận rằng, thông qua cách tiếp cận "Tái thiết lấy di sản làm động lực", tuyến đường sắt có thể chuyển hóa thành một hành lang sinh thái - văn hóa đa mục tiêu, kết nối ký ức lịch sử với động lực phát triển đương đại. Nghiên cứu đề xuất một khung lý thuyết và thực hành thiết kế thông qua phương pháp "Phân tích lớp đệm hình thái" để tái thiết tuyến đường sắt Phan Thiết - Mương Mán (Lâm Đồng, Việt Nam). Bằng kỹ thuật chồng lớp dữ liệu giữa di sản công nghiệp, hệ thống hạ tầng xanh và cấu trúc phát triển định hướng giao thông (TOD), nghiên cứu đã xác lập 04 phân vùng chuyển đổi không gian đặc thù: (1) Nút thắt ký ức đô thị, (2) Hành lang di sản nông nghiệp, (3) Vùng động lực TOD và (4) Đệm sinh thái cửa ngõ. Kết quả cho thấy việc tổ chức lại không gian kiến trúc cảnh quan theo hướng tăng cường "tính thẩm thấu" không chỉ giúp xóa bỏ rào cản vật lý mà còn tạo ra một hệ thống hạ tầng xanh thích ứng, góp phần phục hồi tính kết nối xã hội và giá trị di sản trong bối cảnh đô thị hóa nhanh tại Việt Nam.

Từ khóa: TOD; hành lang đường sắt đô thị; di sản công nghiệp; lớp đệm hình thái; tính thẩm thấu.

ABSTRACT

Old railway corridors in developing cities often transform into "urban voids," leading to morphological fragmentation and ecological degradation. These sites currently face a strategic dilemma: demolition for road infrastructure expansion or preservation as urban heritage. This study argues that through a "heritage-led regeneration" approach, railway lines can evolve into multi-functional eco-cultural corridors that bridge historical memory with contemporary development dynamics. It proposes a theoretical and practical design framework utilizing "Morphological Buffer Analysis" to revitalize the Phan Thiet - Muong Man railway (Lam Dong, Vietnam). By overlaying data from industrial heritage, green infrastructure, and Transit-Oriented Development (TOD) structures, the research identifies four specific spatial transformation zones: (1) Urban Memory Nodes, (2) Agri-heritage Corridors, (3) Dynamic TOD Hubs, and (4) Gateway Ecological Buffers. The findings indicate that reorganizing landscape architecture to enhance "spatial permeability" not only eliminates physical barriers but also establishes adaptive green infrastructure. This process significantly restores social connectivity and heritage values within the context of rapid urbanization in Viet Nam.

Keywords: TOD; urban railway corridor; industrial heritage; morphological buffer; urban permeability; nature-based solutions.

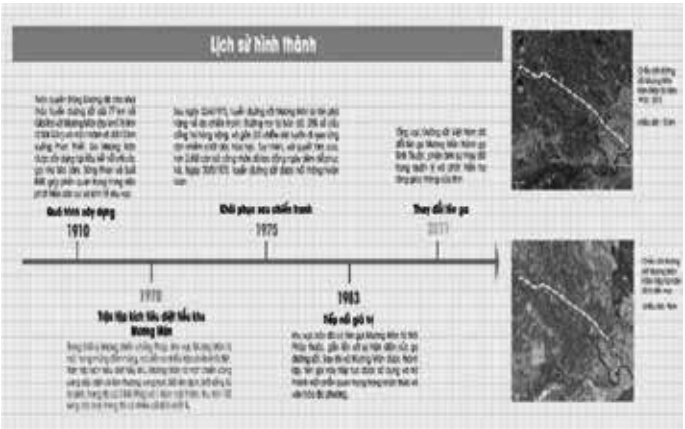
1. GIỚI THIỆU

Tuyến đường sắt Phan Thiết - Mương Mán (dài gần 9 km) nằm trên địa bàn khu vực đô thị Phan Thiết, tỉnh Lâm Đồng (sau khi sáp nhập tỉnh Bình Thuận vào tỉnh Lâm Đồng) không đơn thuần là một hạ tầng giao thông, mà là một phần di sản công nghiệp quan trọng của vùng duyên hải Nam Trung Bộ. Được hình thành từ đầu thế kỷ XX, tuyến đường này từng là cầu nối giao thương huyết mạch, kết nối giao thông liên kết lõi trung tâm TP Phan Thiết, tỉnh Bình Thuận (cũ), góp phần hình thành nên diện mạo đô thị Phan Thiết sơ khai. Sự hiện diện của các cấu trúc hạ tầng như nhà ga, đường ray và hệ

thống kho tàng đã tạo nên một lớp "Ký ức đô thị" sâu đậm trong tâm thức cộng đồng địa phương.

1.1. Bối cảnh quốc tế - Sự đứt gãy của hạ tầng đường sắt trong tiến trình đô thị hóa

Trong lịch sử phát triển đô thị, mạng lưới đường sắt từng được coi là "xương sống" của nền văn minh công nghiệp. Tuy nhiên, dưới áp lực của quá trình đô thị hóa nhanh chóng và sự thay đổi phương thức vận tải, nhiều tuyến đường sắt nội đô hiện nay đang rơi vào tình trạng suy thoái, trở thành những "khoảng trống đô thị" hay "không gian vô định". Sự tồn tại của các dải hạ tầng này vô hình trung tạo ra những "vết cắt" vật lý và xã hội, làm đứt gãy tính liên kết hình thái và ngăn cản sự phát triển bền vững của hệ sinh thái đô thị.



Hình 1. Lịch sử hình thành tuyến đường sắt Phan Thiết - Mương Mán
(Nguồn: Tác giả)

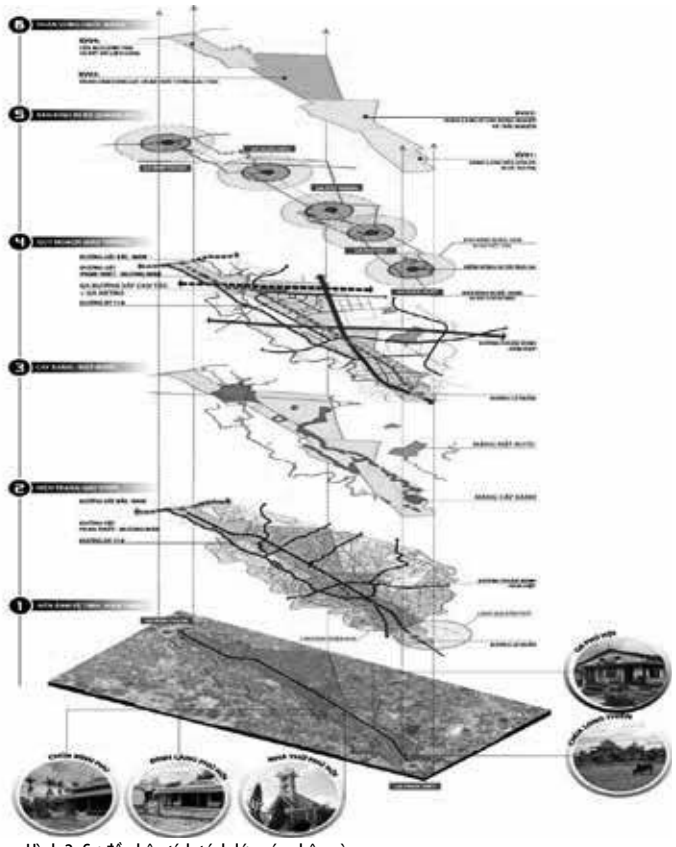
1.2. Thách thức phát triển đô thị

Tuyến đường sắt địa phương Phan Thiết - Mương Mán đang đứng trước một nghịch lý: một mặt, tuyến đường lưu giữ những giá trị di sản công nghiệp tích lũy qua nhiều thập kỷ (hình ảnh toa tàu, đường ray, các nhà ga…); mặt khác, nó lại đang bị cô lập khỏi dòng chảy phát triển hiện đại của đô thị. Trong bối cảnh tái cấu trúc không gian phát triển vùng, cùng với sự hình thành tuyến đường bộ cao tốc Bắc - Nam, định hướng phát triển đường sắt cao tốc Bắc - Nam, cũng như các trục kết nối chiến lược như Đại lộ Lê Duẩn (kết nối trung tâm đô thị Phan Thiết với cao tốc), tuyến cao tốc Phan Thiết - Bảo Lộc - Gia Nghĩa và định hướng tuyến metro kết nối từ ga đường sắt cao tốc vào khu lõi trung tâm, cấu trúc đô thị đang có xu hướng dịch chuyển mạnh về phía Tây. Những yếu tố này đã xác lập cho tuyến đường sắt Phan Thiết - Mương Mán một vị thế chiến lược mới trong tương lai.

1.3. Lỗ hổng nghiên cứu và hướng tiếp cận mới

Mặc dù lý thuyết về Phát triển đô thị theo định hướng giao thông công cộng (TOD) đã được phổ biến, việc ứng dụng nó để "tái cấu trúc" một hành lang đường sắt di sản hiện hữu trong một đô thị ven biển đang chuyển mình như Phan Thiết vẫn còn là một khoảng trống lớn trong nghiên cứu thực tiễn. Nghiên cứu này không tiếp cận hành lang đường sắt như một rào cản kỹ thuật, mà xem đó là một "lớp đệm hình thái" đầy tiềm năng.

Thông qua phương pháp phân tích đa tầng, nghiên cứu tập trung giải quyết câu hỏi: *Làm thế nào để chuyển hóa một hạ tầng giao thông cũ kỹ thành một trục động lực xanh, nơi tính thẩm thấu đô thị và bảo tồn di sản công nghiệp được vận hành song song?* Kết quả nghiên cứu sẽ đề xuất một khung thiết kế tích hợp, làm tiền đề cho việc tái thiết các không gian cho khu vực nghiên cứu và khả năng vận dụng vào không gian hạ tầng tương tự tại các đô thị trong nước.



Hình 2. Sơ đồ phân tích tách lớp các phân vùng
(Nguồn: Tác giả)

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu này thiết lập một khung phân tích tích hợp nhằm mục tiêu chuyển đổi tuyến đường sắt địa phương Phan Thiết - Mương Mán từ một hạ tầng đơn chức năng thành một "Hành lang di sản và sinh thái đa mục tiêu". Quy trình nghiên cứu được cấu trúc chặt chẽ qua ba giai đoạn:

2.1. Giai đoạn 1: Lập bản đồ không gian và phân tích vùng đệm

Giai đoạn này sử dụng Hệ thống thông tin địa lý (GIS) để định lượng hóa phạm vi tác động và xác lập ranh giới nghiên cứu.

● **Xác lập vùng đệm**: Dựa trên lý thuyết về bán kính đi bộ hiệu quả, nghiên cứu thiết lập hai ngưỡng phân tích: 400 m (vùng ảnh hưởng trực tiếp) và 800 m (vùng ảnh hưởng gián tiếp) dọc theo 9 km tuyến đường. Đây là cơ sở để đánh giá khả năng tiếp cận từ các khu dân cư hiện hữu đến hệ thống các nhà ga.

● **Phân tích tính thẩm thấu**: Sử dụng kỹ thuật chồng lớp bản đồ (Map Overlay) để xác định các điểm "đứt gãy" không gian do tuyến đường sắt tạo ra. Mục tiêu là nhận diện các vị trí có tiềm năng thiết lập các "nút giao mềm" nhằm xóa bỏ rào cản vật lý giữa hai bên tuyến.

2.2. Giai đoạn 2: Phân loại hình thái đa lớp

Để hiểu sâu sắc bản sắc của khu vực, nghiên cứu áp dụng phương pháp hình thái học đô thị thông qua 4 lớp đặc trưng:

● **Lớp Cấu trúc xây dựng & ký ức:** Đánh giá mật độ xây dựng và nhận diện các yếu tố di sản công nghiệp (nhà ga, đường ray, thiết bị cũ) như những thành phần cấu thành giá trị nơi chốn .

● **Lớp Di sản văn hóa - tâm linh:** Số hóa hệ thống các đình, chùa (Long Thiền, Phổ Đà), nhà thờ (Phú Hội) dọc tuyến để thiết lập các hành lang bảo vệ cảnh quan di sản.

● **Lớp Sinh thái bản địa:** Tài liệu hóa hệ thống vườn Thanh Long, mạng lưới suối (Suối Dầu, Suối Lạng) và khu vực Hồ Lở. Lớp này được xem là "hạ tầng xanh" cốt lõi để thích ứng với biến đổi khí hậu.

● **Lớp Vật liệu & chất cảm:** Khảo sát các loại vật liệu đặc trưng địa phương như gạch nung, đá chẻ, tà vẹt gỗ cũ để tái ứng dụng vào thiết kế bền vững.

2.3. Giai đoạn 3: Phân vùng không gian và đề xuất ma trận giải pháp

Giai đoạn cuối cùng chuyển hóa các dữ liệu phân tích thành các chiến lược thiết kế cụ thể. Nghiên cứu xây dựng một ma trận thiết kế để đảm bảo tính tương thích giữa giải pháp và đặc thù của từng phân đoạn:

● Phân đoạn 1 - Tái thiết ký ức: Tập trung vào tính thẩm thấu đô thị, ưu tiên không gian công cộng và nghệ thuật tương tác đường phố.

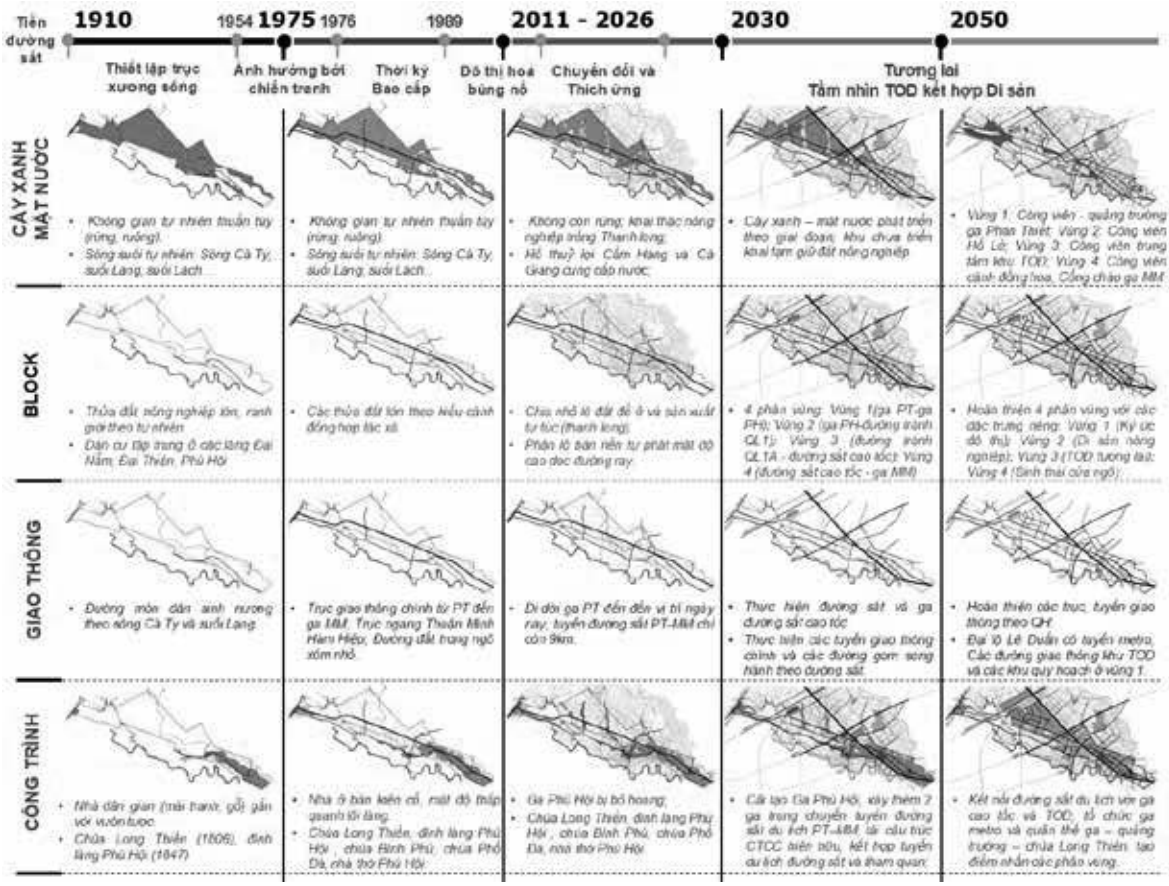
● Phân đoạn 2 - Hành lang di sản & nông nghiệp: Kết hợp bảo tồn vườn thanh long với các mô hình du lịch canh tác, sử dụng vật liệu tự nhiên.

● Phân đoạn 3 - Đô thị động lực - TOD: Áp dụng mô hình phát triển nén tại các nút giao cắt với nhà ga đường sắt Bắc - Nam tốc độ cao, tuyến metro kết nối trực tiếp nhà ga đường sắt cao tốc vào lõi trung tâm Phan Thiết; chú trọng kết nối đa phương thức.

● Phân đoạn 4 - Cửa ngõ sinh thái: Thiết lập các không gian đệm xanh tự nhiên để lọc nước và giảm thiểu tiếng ồn.

Bảng 1. Bảng tổng hợp 4 phân vùng

Tiêu chí	Vùng 1: Ký ức	Vùng 2: Di sản nông nghiệp	Vùng 3: TOD tương lai	Vùng 4: Sinh thái cửa ngõ
Slogan	"Nơi thời gian dừng lại"	"Hương vị bản địa"	"Nhịp đập thời đại"	"Lời chào của thiên nhiên"
		Tôn vinh bản sắc địa phương, tạo điểm "check-in" du lịch và kéo dài thời gian lưu trú của khách du lịch trải nghiệm.	Tối ưu hóa kết nối đi bộ, giảm thiểu tiếng ồn đường sắt tốc độ cao và tạo không gian giao lưu hiện đại cho giới trẻ/văn phòng.	Tạo ấn tượng đầu tiên về một thành phố xanh, xử lý nước mưa bề mặt và tạo trạm nghỉ cho người đi xe đạp liên vùng.
Tính chất	Bảo tồn và tái thiết đô thị	Cảnh quan sinh thái nông nghiệp bản địa.	Đô thị hiện đại, đa chức năng (Mixed-use).	Cảnh quan cửa ngõ và sinh thái phục hồi.
Đặc trưng	Đoạn đi qua khu vực dân cư lâu đời, gắn liền với sông Cà Ty và các làng nghề cũ.	Tập trung làng cổ Phú Hội, các vườn thanh long và hệ thống đình chùa.	Là khu vực giao thoa giữa hạ tầng cũ và hạ tầng tốc độ cao Bắc - Nam, có tiềm năng phát triển mật độ cao.	Điểm bắt đầu của tuyến từ mạng lưới quốc gia, mật độ xây dựng thấp.



Hình 3. Sơ đồ phân tích các lớp chức năng qua các giai đoạn - định hướng TOD *(Nguồn: Tác giả)*

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ CÁC ĐỀ XUẤT CHIẾN LƯỢC

3.1. Tổng hợp dữ liệu hình thái và khung hướng dẫn thiết kế

Kết quả từ quá trình phân tích đa lớp (Mapping & Categorization) cho thấy tuyến đường sắt 9 km không phải là một thực thể đồng nhất mà là một tập hợp của các đơn vị hình thái khác biệt. Nghiên cứu xác lập khung hướng dẫn thiết kế dựa trên 4 chỉ số cốt lõi nhằm giải quyết sự đứt gãy không gian:

● **Chỉ số thẩm thấu:** Thiết lập các "nút giao mềm" tại các điểm giao cắt lịch sử để tái kết nối cộng đồng hai bên đường ray.

● **Chỉ số di sản:** Bảo tồn nguyên trạng cấu trúc hạ tầng đường sắt cũ và tích hợp chúng vào không gian đương đại.

● **Chỉ số xanh:** Sử dụng hệ thống vườn canh tác và mặt nước làm bộ lọc sinh thái tự nhiên.

● **Chỉ số cảm thụ:** Khai thác vật liệu bản địa (gạch nung, đá chẻ) để gợi nhắc ký ức nơi chốn.

3.2. Đề xuất tổ chức không gian theo phân đoạn

Dựa trên ma trận loại hình, nghiên cứu đề xuất giải pháp cụ thể cho 4 phân đoạn chiến lược:

3.2.1. Phân đoạn 1: Tái thiết ký ức công nghiệp

● Phạm vi: Khu vực Ga Phan Thiết và nội thành.

● Chiến lược: Áp dụng thủ pháp "Châm cứu đô thị".

● Giải pháp: Chuyển đổi các khoảng trống đô thị dọc đường ray thành các Bảo tàng mở (Pocket Museums). Tái sử dụng toa tàu cũ làm không gian khởi nghiệp sáng tạo. Sử dụng nghệ thuật đường phố để kể lại câu chuyện lịch sử của tuyến tàu Mương Mán trên các diện tường ngăn cách hiện hữu.

3.2.2. Phân đoạn 2: Cảnh quan văn hóa sản xuất

● Phạm vi: Khu vực xã Hàm Hiệp cũ (nay là phường Bình Thuận).

● Chiến lược: Bảo tồn dựa trên sự thích ứng

● Giải pháp: Thiết lập mô hình Công viên Nông nghiệp đường sắt. Thay vì tường rào bê tông, sử dụng "rào chắn xanh" bằng cây trồng địa phương. Xây dựng các trạm dừng chân kết hợp điểm thu mua nông sản (thanh long), biến hành lang đường sắt thành trục kinh tế du lịch trải nghiệm nông nghiệp.

Hình 4. Sơ đồ phân vùng KGKTCQ khu vực *(Nguồn: Tác giả)*

3.2.3. Phân đoạn 3: Nút giao động lực & kết nối đa phương thức

● Phạm vi: Khu vực giao thoa giữa đường sắt địa phương và đường sắt tốc độ cao (Ga Bình Thuận).

● Chiến lược: Phát triển đô thị theo định hướng giao thông công cộng - mô hình TOD .

● Giải pháp: Xây dựng cầu vượt bộ hành cảnh quan kết nối hai hệ thống ga. Tổ chức các quảng trường trung chuyển thông minh, tích hợp cây xanh thẳng đứng để giảm thiểu tiếng ồn và bụi mịn, tạo diện mạo đô thị hiện đại nhưng vẫn mang hơi thở bản địa.

3.2.4. Phân đoạn 4: Hành lang thích ứng sinh thái

● Phạm vi: Khu vực cửa ngõ và vùng đệm nông thôn.

● Chiến lược: Giải pháp dựa vào tự nhiên.

● Giải pháp: Thiết lập hệ thống mương lọc sinh học dọc hai bên đường ray để quản lý nước mưa tự nhiên và tái tạo hệ sinh thái bản địa. Sử dụng vật liệu thô mộc (đất nện, gỗ tà vẹt cũ) cho các tiểu cảnh dọc đường, tạo sự chuyển tiếp mềm mại giữa không gian hạ tầng kỹ thuật và thiên nhiên.

3.3. Đánh giá tính bền vững và khả năng thực thi

Kết quả nghiên cứu khẳng định rằng việc tổ chức không gian cảnh quan theo loại hình không chỉ cải thiện diện mạo đô thị mà còn mang lại giá trị đa mục tiêu:

● **Về xã hội:** Xóa bỏ sự ngăn cách, tạo không gian sinh hoạt cộng đồng an toàn và giàu tính nhân văn.

● **Về kinh tế:** Đánh thức giá trị đất đai "bị lãng quên" dọc tuyến, tạo cơ hội kinh doanh du lịch và dịch vụ cho cư dân địa phương.

● **Về quản lý:** Cung cấp cho chính quyền một bộ công cụ kiểm soát thiết kế cụ thể cho từng phân đoạn thay vì áp dụng một công thức chung cứng nhắc.

4. THẢO LUẬN VÀ PHẢN BIỆN

4.1. Sự tương thích với các khung lý thuyết quốc tế

Kết quả nghiên cứu tại tuyến đường sắt Phan Thiết - Mương Mán khẳng định tính hiệu quả của việc chuyển đổi hạ tầng đường sắt từ một "vết cắt đô thị" thành một trục liên kết đa năng.

● **Tính thẩm thấu và rào cản hạ tầng:** Nghiên cứu này ủng hộ lý thuyết của Kevin Lynch và Jan Gehl về việc xóa bỏ các rào cản vật lý để tạo ra "thành phố cho con người". Việc thiết lập các nút giao mềm tại Phân đoạn 1 đã biến đường ray từ một ranh giới chia cắt thành một "đường nối", tăng cường khả năng tiếp cận và giao lưu cộng đồng.

● **Tái thiết di sản công nghiệp:** Phương pháp tiếp cận này phù hợp với xu hướng thế giới (như dự án High Line - New York hay Promenade Plantée - Paris). Tuy nhiên, nghiên cứu đã "địa phương hóa" lý thuyết bằng cách không chỉ bảo tồn các vật thể (nhà ga, đường ray) mà còn bảo tồn cả "cấu trúc sản xuất" (vườn thanh long) - một dạng di sản nông nghiệp đô thị độc đáo.

4.2. Phản biện về mô hình phát triển và sự đồng nhất hóa đô thị

Nghiên cứu đặt ra cái nhìn phản biện đối với tư duy quy hoạch "san phẳng" thường thấy:

● **Chống lại sự đồng nhất hóa:** Rất nhiều các dự án cải tạo hiện nay áp dụng một công thức chung cho toàn tuyến. Nghiên cứu phản biện rằng: Mỗi phân đoạn (Các nhà ga cũ, vườn canh tác, cửa ngõ, khu dân cư, làng xóm,...) sở hữu một "mã gene" riêng biệt. Việc áp dụng ma trận phân loại hình thái giúp duy trì bản sắc đa dạng của khu vực, tránh rơi vào cái bẫy của những đô thị "vô tính" đang tràn lan tại các vùng duyên hải Việt Nam.

● **Sự thỏa hiệp giữa bảo tồn và phát triển:** Một điểm thảo luận quan trọng là sự mâu thuẫn giữa nhu cầu nén đô thị (mô hình TOD tại Phân đoạn 3) và yêu cầu bảo tồn cảnh quan thấp tầng. Nghiên cứu đề xuất giải pháp "vùng chuyển tiếp hình thái" như một sự thỏa hiệp khoa học để đảm bảo động lực kinh tế mà không phá hủy giá trị lịch sử.

4.3. Hàm ý chính sách: Tuyến đường sắt như một "Di sản sống" và quyết sách địa phương

Đây là phần cốt lõi nhằm cung cấp luận cứ cho chính quyền địa phương trong việc giữ lại và phát triển tuyến đường:

● **Từ hạ tầng lỗi thời đến hạ tầng văn hóa chiến lược**: Nghiên cứu phản biện quan điểm cho rằng tuyến đường sắt là vật cản của giao thông đường bộ. Thay vào đó, nghiên cứu khẳng định đây là một "di sản sống" - một thực thể cần được tích hợp vào bối cảnh phát triển đương đại thay vì bị loại bỏ. Việc duy trì tuyến đường cho phép chính quyền sở hữu một "trục xương sống văn hóa" mà không thể tái tạo bằng nguồn lực tài chính trong tương lai.

● **Thương hiệu đô thị và lợi thế cạnh tranh:** Trong chiến lược phát triển du lịch, Phan Thiết cần một câu chuyện bản sắc riêng ngoài đặc trưng biển. Việc biến hơn 9 km đường sắt thành "Hành lang di sản" tạo ra một thương hiệu đô thị độc nhất, thu hút khách du lịch bằng trải nghiệm văn hóa bản địa độc đáo.

● **Tầm nhìn kết nối tương lai:** Tuyến Phan Thiết - Mương Mán cần được coi là hệ thống "con thoi" trung chuyển khách từ ga tốc độ cao Bắc - Nam vào lõi đô thị. Đây là quyết sách mang tính kinh tế bền vững, tận dụng hạ tầng có sẵn để tối ưu hóa kết nối vùng.

Bảng 2. Bảng so sánh hai kịch bản - Đối chiếu giá trị chiến lược để làm rõ hơn cho chính quyền địa phương nghiên cứu thực hiện

Tiêu chí	Kịch bản 1: Phá bỏ để làm đường bộ	Kịch bản 2: Phát triển di sản sống
Bản sắc đô thị	Đồng nhất hóa, thiếu đặc trưng	Độc nhất, tạo dấu ấn thương hiệu
Giá trị lịch sử	Mất hoàn toàn ký ức đô thị	Được bảo tồn và phát huy giá trị
Sinh kế người dân	Xáo trộn do thu hồi đất	Phát triển du lịch cộng đồng & canh tác
Môi trường	Gia tăng hiệu ứng đảo nhiệt	Hành lang xanh thích ứng biến đổi khí hậu
Kinh tế	Chi phí xây mới và bồi thường lớn	Tận dụng hạ tầng hiện hữu, kích cầu du lịch

5. KẾT LUẬN

Cách tiếp cận Lớp đệm Hình thái cho hành lang đường sắt Phan Thiết - Mương Mán đã đóng góp cả về mặt lý luận lẫn thực tiễn cho quy hoạch đô thị đương đại, Kết quả nghiên cứu đã chứng minh rằng tuyến đường sắt 9,6 km không phải là một rào cản chia cắt đô thị, mà ngược lại, thông qua các phân tích nhận dạng và phân vùng không gian với 4 phân đoạn (ký ức - di sản - động lực - sinh thái), tuyến đường đã được tái định nghĩa như một hành lang di sản và sinh thái đa mục tiêu. Việc giữ lại và thích ứng di sản công nghiệp không chỉ bảo tồn ký ức nơi chốn mà còn tạo ra động lực phát triển kinh tế thông qua du lịch tham quan, trải nghiệm và dịch vụ đô thị thông minh.

Kết quả nghiên cứu cung cấp cho chính quyền địa phương một cái nhìn chiến lược về việc bảo tồn tuyến đường sắt trong nhịp thở đương đại. Thay vì phá bỏ để làm đường bộ thông thường, việc phát triển theo hướng di sản sống giúp:

● **Nâng tầm thương hiệu đô thị:** Tạo ra một đặc trưng riêng biệt cho Phan Thiết bên cạnh du lịch biển.

● **Tăng cường khả năng thích ứng:** Sử dụng hạ tầng xanh để giải quyết vấn đề nước mặt, vi khí hậu, tiếng ồn và tăng cường cảnh quan

● **Đón đầu tương lai:** Chuẩn bị sẵn sàng cho sự kết nối đa phương thức với tuyến đường sắt tốc độ cao Bắc - Nam, tuyến metro khu vực và đại lộ Lê Duẩn,...

6. HƯỚNG MỞ VÀ KHUYẾN NGHỊ

Dù đã đề xuất được khung giải pháp thiết kế chi tiết, sự thành công của dự án trong tương lai phụ thuộc vào các yếu tố then chốt:

● **Cơ chế chính sách:** Cần thiết lập "Vùng quy hoạch đặc thù" cho hành lang đường sắt để cho phép các hoạt động kinh tế sáng tạo và dịch vụ di sản được vận hành hợp pháp.

● **Sự tham gia của cộng đồng:** Di sản chỉ thực sự "sống" khi người dân địa phương - từ những người nông dân trồng thanh long đến cư dân nội đô - trở thành những chủ thể cùng tham gia bảo tồn và hưởng lợi từ dự án.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] "Quy hoạch chung xã Hàm Hiệp", Quyết định số 1696/QĐ-UBND ngày 17/4/2025, 2025.

[2] "Chương trình phát triển đô thị TP Phan Thiết, tỉnh Bình Thuận đến năm 2040", Quyết định số 927/QĐ-UBND ngày 14/4/2021, 2021.

[3] "Chủ trương đầu tư Dự án đường sắt tốc độ cao trên trục Bắc - Nam", Nghị quyết số 172/2024/QH15 ngày 30/11/2024 tại kỳ họp số 8, Quốc hội khóa XV, 2024.

[4] Jan Gehl, Cities for People, Island Press, Washington, D.C., 2010.

[5] Kevin Lynch, Wasting Away, Sierra Club Books, San Francisco, 1990.

[6] M. Conzen, Thinking About Urban Form: Papers on Urban Morphology, Peter Lang, 2004.

[7] Peter Calthorpe, The Next American Metropolis: Ecology, Community, and the American Dream, Princeton Architectural Press, New York, 1993.

[8] "Đồ án điều chỉnh Quy hoạch chung TP Phan Thiết đến năm 2040", Quyết định số 1197/QĐ-UBND ngày 27/5/2020, 2020.

[9] Jane Jacobs, The Death and Life of Great American Cities, Random House, New York, 1961.

[10] Christina Schwenkel, Building Socialism: The Afterlife of East German Architecture in Urban Vietnam, 2000.

[11] Mell, I. C., Global Green Infrastructure: Lessons for Successful Policy-Making, Investment and Management, Routledge, 2016.

[12] Dittmar, H., & Ohland, G., The New Transit Town: Best Practices in Transit-Oriented Development, Island Press, 2004.

[13] Newman, P., & Kenworthy, J., The End of Automobile Dependence: Cities Beyond Automobiles, Island Press, 2015.

[14] Curtis, C., Renne, J. L., & Bertolini, L., Transit Oriented Development: Making It Happen, Ashgate Publishing, 2009.

[15] Urban Redevelopment Authority (URA), The Rail Corridor: A Continuous Green Link, Singapore Government, https://www.ura.gov.sg/Corporate/Planning/Master-Plan/Urban-Design/Rail-Corridor, 2021.

■Ngày nhận bài: 25/02/2026 ■Ngày sửa bài: 04/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 12/3/2026

Quá trình phát triển giao thông Hà Nội: Từ đô thị di sản đến siêu đô thị thế hệ mới

Urban transport development in Hanoi: From a heritage city to a new-generation megacity

> PGS.TS VŨ THỊ VINH[1], TS PHAN ĐỨC HOÀNG[2]
[1]Nguyên Phó Hiệu trưởng Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội; Email: vuthivinhacvn@gmail.com
[2]Khoa Quản lý đô thị, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội; Email: hoangpd@hau. edu.vn

TÓM TẮT

Hà Nội là một đô thị có cấu trúc lịch sử đặc thù, nơi "di sản không gian" (mạng ngõ phố, mặt cắt đường, cấu trúc khu ở, các trục cảnh quan - hành chính hình thành qua nhiều giai đoạn) vừa là giá trị bản sắc, vừa là ràng buộc kỹ thuật đối với tổ chức giao thông hiện đại. Trong bối cảnh mở rộng không gian đô thị và chuyển dịch sang mô hình "siêu đô thị vùng Thủ đô", nhu cầu đi lại tăng nhanh theo hướng đa tâm - liên vùng, tạo sức ép lên hệ thống hạ tầng vốn không đồng đều và chịu ảnh hưởng mạnh bởi lịch sử phát triển. Bài báo hệ thống hóa tiến trình phát triển giao thông đô thị Hà Nội theo các giai đoạn, chỉ ra các mâu thuẫn cốt lõi của "đô thị di sản - siêu đô thị hiện đại", đồng thời đề xuất định hướng giải pháp theo tiếp cận ba lớp: (i) tổ chức không gian - thiết kế đường phố, (ii) phát triển vận tải công cộng và đa phương thức, (iii) quản trị hệ thống dựa trên dữ liệu và công cụ quản lý nhu cầu. Trọng tâm chuyển từ tư duy "mở rộng cung đường" sang "quản trị hệ thống giao thông - không gian" nhằm nâng cao năng lực thông hành, an toàn, công bằng tiếp cận và giảm phát thải.

Từ khóa: Hà Nội; di sản đô thị; siêu đô thị; đa phương thức; TOD; quản lý nhu cầu giao thông; chuyển đổi số giao thông.

ABSTRACT

Hanoi is an urban area with a specific historical structure, where "spatial heritage" (street alley network, road cross-section, residential structure, landscape-administrative axes formed through many stages) is both an identity value and a technical constraint for modern transportation organization. In the context of expanding urban space and shifting to the model of "megacity in the capital region", the demand for travel is increasing rapidly in the direction of multi-centric - inter-regional, putting pressure on the infrastructure system, which is uneven and strongly influenced by the history of development. This paper systematizes the process of Hanoi's urban transport development in stages, points out the core contradictions of "heritage city - modern megacity", and proposes a solution orientation according to a three-layer approach: (i) spatial organization - street design, (ii) development of public transportation and multimodality, (iii) administration of data-driven systems and demand management tools. The focus shifts from the mindset of "expanding roads" to "managing the transport-space system" to improve traffic capacity, safety, fair access and reduce emissions.

Keywords: Hanoi; urban heritage; megacity; multimodal; TOD; traffic demand management; digital transformation of traffic.

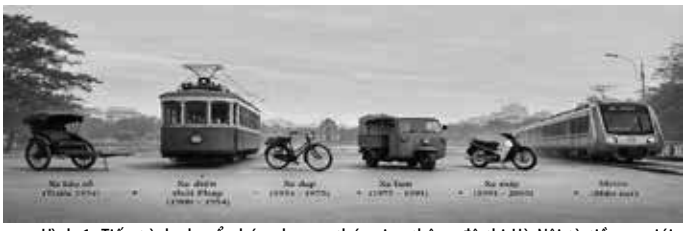
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hà Nội đang trải qua đồng thời ba quá trình lớn: (i) đô thị hóa và mở rộng không gian đô thị theo hướng vùng hóa, (ii) chuyển đổi mô hình tăng trưởng và cơ cấu việc làm - dịch vụ, (iii) hiện đại hóa hạ tầng và quản trị đô thị theo định hướng thông minh, xanh, phát thải thấp. Trong bối cảnh đó, giao thông không chỉ là "hạ tầng kỹ thuật" mà còn là hạ tầng nền tảng, quyết định hiệu quả sử dụng đất, năng lực kết nối, chất lượng sống và sức cạnh tranh của đô thị.

Thủ đô Hà Nội là đô thị có bề dày lịch sử, bao gồm khu phố cổ với mạng ngõ hẹp, khu phố cũ với cấu trúc trục - ô phố, các khu tập thể và khu ở mở rộng giai đoạn sau, cùng các khu đô thị mới phát triển nhanh theo cơ chế thị trường. Những lớp không gian này tạo nên "bản đồ giao thông" đặc thù: mật độ nút giao dày, mặt cắt đường không đồng đều, chức năng hỗn hợp bám đường và thói quen di chuyển hình thành trong giai đoạn xe máy bùng nổ. Hiện nay, dân số Hà Nội đã vượt 8,5 triệu người và đang có xu hướng phát triển thành siêu đô thị; do đó, bài toán giao thông trở thành thách thức lớn, cần được nghiên cứu và giải quyết một cách khoa học nhằm đáp ứng yêu cầu phát triển.

2. TIẾN TRÌNH PHÁT TRIỂN GIAO THÔNG HÀ NỘI QUA CÁC THỜI KỲ

Sự phát triển về hình thái đô thị luôn gắn với sự phát triển của hệ thống giao thông đô thị, vì vậy mỗi giai đoạn mạng lưới giao thông Hà Nội sẽ có những đặc thù khác nhau. Tiến trình phát triển giao thông Hà Nội được thể hiện qua các giai đoạn sau (Hình 1).



Hình 1. Tiến trình chuyển hóa phương thức giao thông đô thị Hà Nội từ tiền cơ giới đến đa phương thức hiện đại *(Sưu tầm và tổng hợp 2026)*

2.1. Thăng Long xưa - Đô thị truyền thống (1010-1873)

Thăng Long phát triển như một đô thị thương mại - thủ công với mạng lưới phường nghề, chợ và bến nước. Cấu trúc đường phố gồm các ngõ nhỏ, ô phố hẹp, mật độ giao cắt cao và gắn chặt với hệ thống sông hồ. Phương thức di chuyển chủ yếu là đi bộ và phương tiện thô sơ. Hệ thống này có khả năng tiếp cận cao trong phạm vi ngắn nhưng không phù hợp với giao thông cơ giới quy mô lớn [1].

Hình 2. Giao thông thời kỳ Hà Nội xưa [1], [2]

2.2. Giai đoạn quy hoạch thời Pháp (1888-1954)

Thời kỳ Pháp thuộc đánh dấu bước chuyển quan trọng trong cấu trúc giao thông Hà Nội với việc hình thành các đại lộ, quảng trường và mạng lưới ô phố quy hoạch tương đối hoàn chỉnh. Đặc biệt, hệ thống xe điện được xây dựng và vận hành, tạo nên mạng lưới vận tải công cộng đầu tiên của Hà Nội. Cấu trúc phố cũ với vỉa hè rộng và các trục cảnh quan cũng hình thành trong giai đoạn này [1].

(a) *(b)*

Hình 3. (a) Đường xe điện; (b) Mạng lưới xe điện ở Hà Nội [1], [2]

2.3. Giai đoạn sau năm 1954

Sau năm 1954, Hà Nội phát triển các khu tập thể và cơ sở công nghiệp. Phương tiện di chuyển chủ yếu là xe đạp, xe buýt và đi bộ. Quy mô đô thị còn tương đối nhỏ nên nhu cầu di chuyển chưa quá lớn. Tuy nhiên, cấu trúc đường nội bộ và các nút giao chưa được thiết kế cho lưu lượng cơ giới cao trong tương lai.

Hình 4. (a) Xe đạp trên đường phố Hà Nội những năm 1975; (b) Bản đồ Hà Nội được mở rộng khu vực ngoại thành vào năm 1961 *(Ảnh: vnexpress.net)*

2.4. Giai đoạn đổi mới bùng nổ xe máy

Sau năm 1986, cùng với quá trình phát triển kinh tế, xe máy trở thành phương tiện giao thông chủ đạo. Hà Nội chuyển sang mô hình "đô thị xe máy", trong đó phần lớn chuyến đi diễn ra theo mô hình "từ cửa đến cửa". Sự gia tăng nhanh của phương tiện cá nhân cùng với tốc độ đô thị hóa nhanh đã tạo ra nhiều áp lực đối với hệ thống hạ tầng giao thông [1].

Hình 5. (a) Xe máy Hà Nội những năm 2000 *(Internet)*; (b) Bản đồ quy hoạch Hà Nội năm 1992 [2]

2.5. Giao thông đô thị Hà Nội hiện nay

Hiện nay, Hà Nội phát triển theo mô hình đô thị mở rộng với các tuyến vành đai và trục hướng tâm. Các phương thức vận tải đa dạng hơn, bao gồm xe buýt, metro, ô tô cá nhân và các dịch vụ vận tải công nghệ. Tuy nhiên, sự phát triển của hệ thống giao thông vẫn chưa theo kịp tốc độ gia tăng nhu cầu đi lại trong đô thị [11].

Hình 6. Giao thông Hà Nội hiện nay *(Nguồn: Internet)*

3. SIÊU ĐÔ THỊ THẾ HỆ MỚI VÀ NHỮNG THÁCH THỨC TRONG GIAO THÔNG ĐÔ THỊ

Sự phát triển của đô thị thường được nhìn nhận như một quá trình tiến hóa theo quy mô và chức năng. Ban đầu là đô thị (city) - trung tâm cư trú, hành chính và thương mại của một lãnh thổ. Khi dân số vượt quá 10 triệu người và không gian kinh tế và hạ tầng mở rộng mạnh mẽ, đô thị chuyển sang giai đoạn siêu đô thị (megacity), với vai trò đầu tàu tăng trưởng và trung tâm kết nối toàn cầu (UN DESA, 2019). Trong bối cảnh chuyển đổi số, biến đổi khí hậu và yêu cầu phát triển bền vững, nhiều nghiên cứu gần đây đề cập tới mô hình siêu đô thị thế hệ mới (Next-Generation Megacity). Xu hướng này đã và đang định hình tầm nhìn phát triển của nhiều đô thị lớn trên thế giới (Hình 7).

Hình 7. Sự phát triển của đô thị *(Tác giả tổng hợp sưu tầm 2026)*

3.1. Khái niệm siêu đô thị

Theo Liên Hợp Quốc [4], siêu đô thị (megacity) là các đô thị có dân số trên 10 triệu người. Đây là các trung tâm kinh tế và kết nối

toàn cầu, đồng thời đối mặt với nhiều thách thức về hạ tầng, môi trường và quản trị. Trong bối cảnh phát triển bền vững và chuyển đổi số, nhiều nghiên cứu đề cập đến khái niệm siêu đô thị thế hệ mới - là mô hình đô thị tích hợp hạ tầng thông minh, hạ tầng xanh và quản trị dựa trên dữ liệu nhằm nâng cao khả năng thích ứng với biến đổi khí hậu và cải thiện chất lượng sống.

3.2. Siêu đô thị thế hệ mới

Theo Liên Hợp Quốc và các nghiên cứu gần đây của UN-Habitat, OECD và World Bank, định hướng phát triển đô thị lớn hiện nay không chỉ dừng ở quy mô, mà ngày càng nhấn mạnh các thuộc tính như khả năng chống chịu khí hậu, quản trị đa cấp, tích hợp giao thông công cộng, chuyển đổi số, giảm phát thải và nâng cao chất lượng sống. Vì vậy, khái niệm "siêu đô thị thế hệ mới" được sử dụng để chỉ giai đoạn phát triển mới của siêu đô thị: quy mô rất lớn nhưng đồng thời phải xanh hơn, thông minh hơn, tích hợp hơn và thích ứng tốt hơn với biến đổi khí hậu và áp lực hạ tầng [4].

Siêu đô thị thế hệ mới là các đô thị có quy mô dân số cực lớn (thường trên 10 triệu người) [4], được quy hoạch tổng thể đồng bộ, kết nối giao thông mạnh mẽ và tích hợp hạ tầng thông minh, công viên, bệnh viện, trường học hiện đại. Khác với đô thị truyền thống, các siêu đô thị này hướng tới không gian sống hoàn chỉnh, bền vững, đẳng cấp và là động lực tăng trưởng kinh tế mới. Đặc điểm chính của siêu đô thị thế hệ mới: ***Quy mô và dân số*:** Là những đô thị lớn trên thế giới, dân số vượt mốc 10 triệu người. ***Quy hoạch đồng bộ*:** Thường được quy hoạch bài bản từ đầu, tránh tình trạng phát triển tự phát, quá tải hạ tầng. ***Hạ tầng hiện đại*:** Sở hữu hệ thống giao thông công cộng, kết nối hạ tầng kỹ thuật và xã hội đồng bộ. ***Chất lượng sống*:** Tập trung xây dựng không gian xanh, tiện ích công cộng (bệnh viện, trường học, thương mại) để nâng cao chất lượng cuộc sống. ***Động lực kinh tế*:** Trở thành các trung tâm kinh tế, tài chính lớn, thu hút đầu tư, giáo dục và công nghệ. Đây là mô hình đang hình thành sau 2020, trong bối cảnh: Biến đổi khí hậu, khủng hoảng tài nguyên; AI & dữ liệu lớn; Kinh tế số, rủi ro thiên tai cực đoan. Siêu đô thị thế hệ mới không chỉ "lớn" mà phải: Sáng tạo - Xanh **-** Thông minh - thích ứng - bền vững - nhân văn**.** Như vậy Siêu đô thị thế hệ mới là một hệ thống đô thị tích hợp, vận hành dựa trên dữ liệu, thích ứng với biến đổi khí hậu, tối ưu tài nguyên và đặt con người - hệ sinh thái làm trung tâm phát triển.

Hình 8. Hình ảnh siêu đô thị thế hệ mới *(Tác giả tổng hợp sưu tầm 2026)*

3.3. Các thách thức giao thông của siêu đô thị thế hệ mới

Trong bối cảnh đô thị hóa toàn cầu tăng tốc, các "siêu đô thị" đang trở thành động lực tăng trưởng kinh tế nhưng đồng thời cũng là không gian tập trung cao độ của các vấn đề giao thông phức tạp. Hệ thống giao thông đô thị trong các siêu đô thị không còn chỉ là vấn đề hạ tầng kỹ thuật mà đã trở thành một cấu phần cốt lõi của đô thị. Kinh nghiệm quốc tế cho thấy các siêu đô thị thường phải đối mặt với nhiều thách thức giao thông mang tính cấu trúc [5], [13], [14].

• **Ùn tắc giao thông**: nhu cầu di chuyển tăng nhanh hơn năng lực hạ tầng, đặc biệt khi đô thị phụ thuộc quá mức vào giao thông đường bộ.

• **Ô nhiễm môi trường**: giao thông là nguồn phát thải lớn của CO_2 và bụi mịn, ảnh hưởng trực tiếp đến sức khỏe cộng đồng.

• **Bất bình đẳng tiếp cận giao thông**: các nhóm thu nhập thấp thường sống xa trung tâm và chịu chi phí di chuyển cao hơn.

• **Quá tải giao thông công cộng**: nhiều hệ thống metro và xe buýt chưa được tích hợp hiệu quả với các phương thức di chuyển khác.

• **Áp lực logistics đô thị:** sự phát triển của thương mại điện tử làm gia tăng lưu lượng vận tải hàng hóa trong đô thị.

• **Rủi ro an toàn giao thông:** sự pha trộn nhiều loại phương tiện làm gia tăng xung đột giao thông.

• **Phân mảnh thể chế quản lý:** nhiều cơ quan cùng quản lý giao thông khiến việc điều phối thiếu hiệu quả.

3.4. Thách thức giao thông đối với Hà Nội

Khi tiến tới ngưỡng siêu đô thị, Hà Nội sẽ đối mặt với nhiều vấn đề giao thông mang tính cấu trúc [10]:

i) Ùn tắc giao thông kéo dài tại các trục chính. Hiện Hà Nội có 21 điểm tắc nghẽn giao thông tập trung vào các giờ cao điểm.

ii) Ô nhiễm không khí do phương tiện cá nhân. Phương tiện giao thông cá nhân chiếm trên 70% chủ yếu là xe mô tô gây ra nhiều khí thải.

iii) Xung đột giao thông giữa ô tô, xe máy, xe buýt và người đi bộ là một trong những nguyên nhân chính làm gia tăng tai nạn giao thông. Mặc dù Hà Nội đã triển khai nhiều biện pháp, tình trạng mất an toàn giao thông vẫn diễn biến phức tạp. Trong quý I năm 2025, toàn thành phố ghi nhận 306 vụ tai nạn giao thông, làm 177 người chết và 199 người bị thương.

iii) Áp lực vận tải công cộng trong giờ cao điểm. Hiện nay phương tiện giao thông công cộng đã có nhiều chuyển biến tốt nhưng tỷ lệ vận chuyển chỉ đạt khoảng 20% là thấp so với nhu cầu cần khoảng 55% - 60%.

iv) Gia tăng vận tải logistics đô thị do áp lực tăng lên của dòng hàng hóa đi vào, đi ra và luân chuyển bên trong Hà Nội khi thành phố phát triển theo hướng siêu đô thị. Không chỉ có xe container hay xe tải lớn, mà còn gồm xe tải nhẹ, xe giao hàng chặng cuối, kho trung chuyển, điểm tập kết và nhu cầu bốc dỡ trên mặt đường đô thị.

v) Phân mảnh quản lý giao thông vùng, là tình trạng không tương thích giữa phạm vi vận động thực tế của đô thị Hà Nội theo hướng vùng - mạng lưới với cơ chế quản lý còn chia cắt theo địa giới hành chính và ngành dọc. Trong bối cảnh Hà Nội đang vận hành như hạt nhân của một vùng đô thị mở rộng, sự thiếu đồng bộ về quy hoạch, đầu tư và điều phối liên tỉnh làm suy giảm hiệu quả của các dự án giao thông, vận tải công cộng và logistics liên vùng.

3.5. Bài học kinh nghiệm quốc tế cho Hà Nội

Trong tiến trình phát triển thành siêu đô thị thế hệ mới, thách thức lớn nhất đối với Hà Nội không chỉ nằm ở việc gia tăng quy mô hạ tầng giao thông, mà ở sự chuyển đổi mô hình vận hành từ một đô thị phụ thuộc vào phương tiện cá nhân sang hệ thống giao thông đa phương thức, tích hợp theo cấu trúc không gian vùng. Kinh nghiệm quốc tế cho thấy các siêu đô thị thành công như Tokyo, Seoul, London, Paris, Singapore không giải quyết vấn đề giao thông bằng cách "xây thêm đường", mà thông qua việc tái cấu trúc mối quan hệ giữa giao thông - không gian đô thị - quản trị vùng. Trên nền tảng đó, những bài học cốt lõi dưới đây có thể gợi mở định hướng cho Hà Nội trong những năm tới [3].

• Bài học 1: Giao thông công cộng khối lượng lớn chỉ phát huy hiệu quả khi gắn với TOD thực chất

Một đặc trưng chung của các siêu đô thị phát triển là giao thông công cộng không được xem như một hệ thống kỹ thuật độc lập, mà là cấu phần tổ chức không gian đô thị. Kinh nghiệm từ Tokyo và Hong Kong cho thấy hiệu quả của hệ thống đường sắt đô thị không chỉ phụ thuộc vào chiều dài tuyến, mà chủ yếu đến từ việc hình thành các cực phát triển mật độ cao, hỗn hợp chức năng trong phạm vi tiếp cận đi bộ quanh nhà ga. Do đó, TOD (Transit-Oriented Development) không chỉ đơn thuần là phát triển không gian xung quanh nhà ga, mà là quá trình tái cấu trúc hình thái đô thị theo logic tiếp cận giao thông công cộng.

Theo đó, TOD không chỉ là một chiến lược quy hoạch, mà còn là điều kiện nền tảng để giao thông công cộng trở thành phương thức di chuyển ưu tiên trong siêu đô thị.

• Bài học 2: Siêu đô thị cần cấu trúc giao thông vùng để giảm áp lực cho lõi trung tâm

Các đô thị như Paris (với RER) hay Munich (với S-Bahn) cho thấy rằng giao thông đô thị chỉ thực sự bền vững khi được đặt trong cấu trúc vùng. Khi dân cư và việc làm phân bố ra ngoài lõi trung tâm, việc dồn toàn bộ lưu lượng vào hệ thống nội đô sẽ tạo ra "nghẽn cổ chai cấu trúc". Thành công của Tokyo không nằm ở hệ thống metro nội đô, mà ở sự kết hợp giữa metro - đường sắt vùng - các trung tâm vệ tinh. Chính cấu trúc này giúp phân tán nhu cầu đi lại và hình thành mô hình đa cực.

Đối với Hà Nội, vấn đề này đặc biệt quan trọng trong bối cảnh vùng Thủ đô đang mở rộng mạnh mẽ với các cực phát triển tại các tỉnh trước khi sáp nhập như: Bắc Ninh, Hưng Yên, Vĩnh Phúc, Hà Nam. Nếu không hình thành các tuyến giao thông vùng hiệu quả (đặc biệt là đường sắt vùng), các nỗ lực giảm ùn tắc khu vực nội đô sẽ khó đạt hiệu quả bền vững. Do đó, hệ thống giao thông của siêu đô thị cần được tiếp cận không chỉ trong ranh giới hành chính của Hà Nội, mà trong không gian vùng chức năng rộng hơn.

• Bài học 3: Tích hợp đa tầng là điều kiện để hệ thống vận hành hiệu quả

Kinh nghiệm của Singapore về cơ quan LTA (Land Transport Authority). Khác với nhiều đô thị nơi giao thông bị chia nhỏ giữa nhiều cơ quan, Singapore tổ chức theo mô hình "một đầu mối thống nhất" - và LTA chính là "nhạc trưởng" của toàn bộ hệ thống giao thông. LTA là cơ quan trung tâm chịu trách nhiệm toàn diện về quy hoạch, phát triển và quản lý hệ thống giao thông đường bộ và vận tải công cộng tại Singapore.

LTA chịu trách nhiệm đồng thời về: Quy hoạch mạng lưới giao thông dài hạn; Phát triển hạ tầng (MRT, đường bộ, hạ tầng đi bộ - xe đạp); Điều phối vận tải công cộng (quy hoạch tuyến, đấu thầu vận hành); Quản lý nhu cầu giao thông (ERP, kiểm soát xe cá nhân); Tích hợp hệ thống (vé liên thông, dữ liệu, điều hành thông minh).

Nhờ đó, giao thông tại Singapore không phát triển như các dự án rời rạc, mà vận hành như một hệ thống tích hợp gắn chặt với cấu trúc đô thị và định hướng TOD.

Hình 9. Mô hình "nhạc trưởng giao thông" LTA của Singapore [3]

• Bài học 4: Quản lý nhu cầu giao thông quan trọng không kém phát triển hạ tầng

Một đặc điểm của siêu đô thị là không thể "xây đủ đường". Các đô thị như Singapore hay Paris đã chứng minh rằng kiểm soát nhu cầu đi lại thông qua công cụ kinh tế và quản lý không gian (thu phí ùn tắc, quản lý đỗ xe) là điều tất yếu. Các biện pháp này không nhằm hạn chế di chuyển, mà nhằm tái phân bổ hành vi giao thông theo hướng sử dụng hiệu quả hạ tầng công cộng.

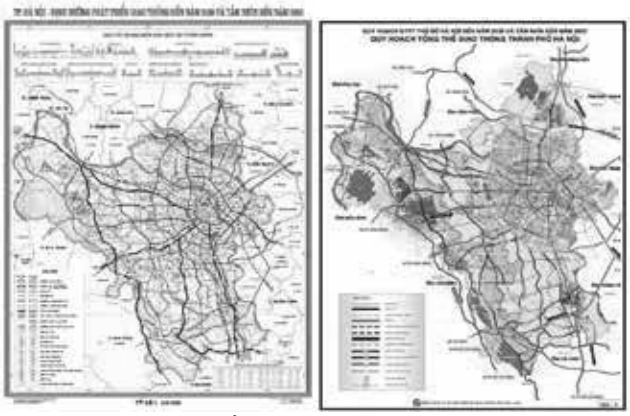
4. NHỮNG ĐỊNH HƯỚNG LỚN VỀ PHÁT TRIỂN GIAO THÔNG VÀ ĐỀ XUẤT MỘT SỐ GIẢI PHÁP ĐỐI VỚI SIÊU ĐÔ THỊ HÀ NỘI

4.1. Những định hướng lớn trong phát triển giao thông của siêu đô thị Hà Nội

Phát triển hệ thống giao thông Thủ đô Hà Nội trong dài hạn được đặt trong bối cảnh chuyển đổi mô hình phát triển đô thị từ cấu trúc đơn tâm sang đa trung tâm, từ tăng trưởng theo chiều rộng sang phát triển theo hành lang và mạng lưới. Định hướng này phù hợp với tinh thần Nghị quyết số 15-NQ/TW của Bộ Chính trị (2022) về phương hướng phát triển Thủ đô đến năm 2030, tầm nhìn 2045; đồng thời kế thừa Quyết định số 519/QĐ-TTg (2016) phê duyệt Quy hoạch giao thông vận tải Thủ đô Hà Nội đến năm 2030, tầm nhìn 2050, cũng như các định hướng trong Quy hoạch Thủ đô thời kỳ 2021-2030 với tầm nhìn đến năm 2100. Trong tổng thể đó, giao thông không chỉ là hạ tầng kỹ thuật mà còn là công cụ tổ chức không gian đô thị, góp phần định hình mô hình phát triển bền vững.

4.1.1. Đến năm 2030

Trọng tâm của phát triển giao thông Hà Nội là hoàn thiện khung cấu trúc liên kết vùng và nâng cao năng lực vận tải công cộng khối lượng lớn. Hệ thống các tuyến vành đai chiến lược (vành đai 3, 4 và 5) đóng vai trò then chốt trong phân luồng giao thông, giảm áp lực cho khu vực nội đô và tạo tiền đề mở rộng không gian phát triển theo hướng vùng Thủ đô. Đồng thời, các trục cao tốc hướng tâm như Hà Nội - Hải Phòng, Hà Nội - Lào Cai, Hà Nội - Thái Nguyên, Hà Nội - Hòa Bình tiếp tục được củng cố nhằm tăng cường kết nối liên vùng và giảm sự phụ thuộc vào mạng lưới xuyên tâm truyền thống. Song song với việc mở rộng năng lực đường bộ, Hà Nội ưu tiên nâng tỷ lệ đất dành cho giao thông và phát triển hệ thống giao thông tĩnh, phù hợp với các mục tiêu trong Quyết định số 519/QĐ-TTg của Thủ tướng Chính phủ, 2016.



Hình 10. Định hướng phát triển mạng lưới vành đai và trục hướng tâm theo Quyết định 519/QĐ-TTg *(Thủ tướng Chính phủ, 2016)* [8]

Trong giai đoạn này, đường sắt đô thị từng bước được xác lập vai trò trục xương sống của vận tải đô thị. Theo quy hoạch, mạng lưới metro gồm 8 tuyến với tổng chiều dài khoảng 318 km sẽ đảm nhận chức năng vận tải khối lượng lớn, kết nối các khu vực phát triển mới và hình thành các điểm trung chuyển. Sự phát triển của Metro tạo điều kiện triển khai mô hình phát triển đô thị gắn với giao thông công cộng (TOD), thúc đẩy tiếp cận đi bộ quanh nhà ga và từng bước giảm phụ thuộc vào phương tiện cá nhân.

4.1.2. Đến mốc 2045 - tầm nhìn theo Nghị quyết 15-NQ/TW

Hệ thống giao thông Hà Nội được định hướng chuyển từ giai đoạn mở rộng hạ tầng sang hoàn thiện mạng lưới đa phương thức. Khi các tuyến vành đai cơ bản hoàn chỉnh, trọng tâm phát triển sẽ chuyển sang tối ưu hóa vận hành, quản trị hành lang giao thông và tích hợp công nghệ quản lý giao thông thông minh (ITS). Cấu trúc giao thông khi đó không còn dựa trên các tuyến riêng lẻ mà vận hành như một mạng lưới liên kết, góp phần tái cấu trúc dòng di chuyển trong đô thị và giảm phụ thuộc vào lõi trung tâm.

Trong lĩnh vực vận tải công cộng, giai đoạn này đánh dấu bước chuyển từ "xây dựng tuyến" sang "hình thành hiệu ứng mạng". Việc tăng cường các điểm trung chuyển, phát triển các tuyến vòng và nâng cao khả năng liên thông giữa các tuyến metro sẽ giúp hệ thống vận hành như một chỉnh thể thống nhất. Đồng thời, giao thông công cộng được tích hợp với xe buýt điện, BRT và các phương thức di chuyển vi mô như đi bộ và xe đạp, hướng tới cấu trúc vận tải đa phương thức. Việc thúc đẩy phương tiện sạch và tối ưu hóa logistics đô thị cũng trở thành một phần quan trọng của chiến lược phát triển.

Hình 11. (a) Quy hoạch mạng lưới đường lưới đường bộ Hà Nội năm 2045; (b) Quy hoạch mạng lưới đường lưới đường sắt Hà Nội năm 2045 [9]

4.1.3. Tầm nhìn đến năm 2100

Đặt giao thông trong vai trò nền tảng tổ chức không gian đô thị và nâng cao năng lực cạnh tranh của Thủ đô trong dài hạn. Theo định hướng quy hoạch Thủ đô tầm nhìn 100 năm, hệ thống giao thông sẽ hỗ trợ phát triển mô hình đô thị đa trung tâm, trong đó các cực phát triển được kết nối bằng đường sắt đô thị, đường sắt vùng và các tuyến vành đai. Cấu trúc này giúp giảm nhu cầu di chuyển xuyên tâm, đồng thời thúc đẩy phát triển theo hành lang. Trong dài hạn, vận tải công cộng khối lượng lớn, đặc biệt là metro và đường sắt vùng, được định hướng trở thành phương thức di chuyển chủ đạo trong nội đô, trong khi phương tiện cá nhân dần chuyển sang vai trò bổ trợ. Song song, hạ tầng giao thông cần được thiết kế theo hướng thích ứng với biến đổi khí hậu, bao gồm khả năng chống ngập, giảm phát thải và tích hợp với hạ tầng xanh đô thị. Việc vận hành hệ thống giao thông trong tương lai cũng sẽ dựa trên dữ liệu thời gian thực, thông qua các nền tảng điều phối thông minh và mô hình "Mobility-as-a-Service"- Di chuyển như một dịch vụ.

Như vậy, các mốc 2030, 2045 và 2100 phản ánh một tiến trình chuyển đổi: từ phát triển năng lực hạ tầng sang hoàn thiện mạng lưới đa phương thức, và hướng tới xây dựng hệ thống giao thông thích ứng dài hạn. Trong tiến trình này, đường bộ giữ vai trò liên kết vùng, đường sắt đô thị đóng vai trò xương sống của hệ thống vận tải, trong khi việc tổ chức không gian đô thị theo định hướng giao thông trở thành yếu tố quyết định tính bền vững. Định hướng này không chỉ phù hợp với các chiến lược quốc gia mà còn góp phần định hình Hà Nội trở thành đô thị có mức độ kết nối cao, phát triển bền vững và thích ứng trong thế kỷ tới.

4.2. Đề xuất một số giải pháp chủ chốt cho giao thông Hà Nội trong bối cảnh siêu đô thị thế hệ mới

Để đáp ứng yêu cầu phát triển của một siêu đô thị thế hệ mới, hệ thống giao thông Hà Nội cần chuyển từ cách tiếp cận mở rộng hạ tầng đơn thuần sang mô hình tổ chức không gian - vận hành tích hợp. Trong đó, ba trụ cột định hướng gồm: phát triển đô thị theo giao thông công cộng (TOD), tăng cường liên kết giao thông vùng, và xây dựng hệ thống giao thông đa tầng.

4.2.1. Tăng cường cấu trúc giao thông vùng của siêu đô thị

Một siêu đô thị không thể vận hành hiệu quả nếu thiếu hệ thống giao thông vùng mạnh. Định hướng gồm:

- Hoàn thiện các tuyến vành đai để phân luồng giao thông quá cảnh.
- Phát triển mạng lưới đường sắt đô thị - đường sắt vùng kết nối các đô thị vệ tinh.
- Xây dựng các trung tâm logistics và trung chuyển ngoài lõi đô thị.
- Tăng cường kết nối với các cực tăng trưởng trong Vùng Thủ đô.

Với mục tiêu là: Tách dòng giao thông liên vùng khỏi khu vực nội đô; Giảm áp lực lên các trục xuyên tâm; Hình thành cấu trúc di chuyển đa hướng thay vì tập trung vào trung tâm lịch sử; Giao thông vùng chính là "khung xương" giúp siêu đô thị vận hành theo mô hình đa cực.

Hình 12. Cấu trúc giao thông vùng của siêu đô thị Hà Nội *(Tác giả tổng hợp sưu tầm 2026)*

4.2.2. Xây dựng hệ thống giao thông tích hợp đa tầng

Siêu đô thị hiện đại cần một hệ thống giao thông vận hành theo nhiều lớp không gian. Trong đó định hướng gồm:

Tầng	Nội dung
Tầng mặt đất	– Tối ưu hóa mạng lưới xe buýt và giao thông phi cơ giới. – Tổ chức lại không gian đường theo ưu tiên vận tải công cộng.
Tầng trên cao và ngầm	– Phát triển metro, đường sắt đô thị. – Nghiên cứu các giải pháp giao thông trên cao tại các hành lang chính.
Tầng số	– Ứng dụng hệ thống quản lý giao thông thông minh. – Điều phối luồng giao thông theo thời gian thực. – Kết nối dữ liệu giữa các loại hình vận tải.
Tầng logistics đô thị	– Tổ chức lại vận tải hàng hóa đô thị. – Phát triển hệ thống trung chuyển và giao nhận ngoài lõi.

Hình 13. Xây dựng hệ thống giao thông tích hợp đa tầng của siêu đô thị Hà Nội *(Tác giả tổng hợp sưu tầm 2026)*

Hệ thống đa tầng giúp tối ưu hóa sử dụng không gian; Giảm xung đột giữa các dòng giao thông; Nâng cao khả năng vận hành linh hoạt của toàn đô thị.

4.2.3. Phát triển đô thị theo định hướng giao thông công cộng (TOD)

Trong bối cảnh siêu đô thị, TOD không chỉ là giải pháp giao thông mà là công cụ tái cấu trúc không gian đô thị. Định hướng chính gồm:

- Hình thành các hành lang đô thị gắn với mạng lưới Metro và BRT.
- Phát triển các trung tâm hỗn hợp mật độ cao quanh các nhà ga.
- Tăng khả năng tiếp cận đi bộ và xe đạp trong bán kính TOD.
- Hạn chế phụ thuộc vào phương tiện cá nhân trong các khu vực lõi.

Hình 14. Mô hình TOD và hệ thống giao thông tích hợp đa tầng cho Hà Nội hướng tới siêu đô thị thế hệ mới *(Tác giả tổng hợp sưu tầm 2026)*

Việc triển khai TOD sẽ giúp: Rút ngắn nhu cầu di chuyển dài, giảm áp lực lên hạ tầng đường bộ; Tái phân bố mật độ dân cư và việc làm theo các trục giao thông công cộng. Trong dài hạn, TOD sẽ là nền tảng để Hà Nội chuyển từ "đô thị xe máy" sang "đô thị giao thông công cộng".

5. KẾT LUẬN

Quá trình phát triển giao thông đô thị Hà Nội là câu chuyện vừa mang tính lịch sử, vừa mang tính hệ thống. Di sản không gian tạo nên bản sắc đô thị nhưng đồng thời đặt ra giới hạn vật lý cho hạ tầng giao thông cơ giới; trong khi đó, siêu đô thị thế hệ mới làm gia tăng nhu cầu đi lại đa tâm - liên vùng, đòi hỏi mạng lưới đa phương thức và quản trị tinh vi hơn. Vì vậy, giải pháp không thể chỉ dựa vào mở rộng đường, mà cần chuyển trọng tâm sang quản trị hệ thống giao thông - không gian, kết hợp thiết kế đường phố an toàn, ưu tiên vận tải công cộng, quản lý nhu cầu, và điều hành dựa trên dữ liệu.

Hà Nội có cơ hội lớn để phát triển nếu khai thác hiệu quả giá trị di sản (tăng cường đi bộ, hạn chế phương tiện cơ giới trong khu vực lõi), đồng thời phát triển vận tải công cộng khối lượng lớn gắn với TOD và hệ thống trung chuyển hiệu quả. Lộ trình thực hiện cần bắt đầu từ các can thiệp ngắn hạn có tác động nhanh (an toàn giao thông, ưu tiên xe buýt, quản lý đỗ xe), từng bước tiến tới tích hợp mạng lưới và các công cụ quản lý nhu cầu theo quy mô vùng trong trung và dài hạn, hướng tới hệ thống giao thông xanh - thông minh - công bằng trong tiếp cận.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Đào Đức Cường, Hội yêu lịch sử 11/2024.

[2] Việt Chung, "Địa giới hành chính Hà Nội qua tài liệu lưu trữ", VN Expresss, 3/10/2019, Internet: https://vnexpress.net/dia-gioi-hanh-chinh-ha-noi-qua-cac-thoi-ky-3990675.html, truy cập 02/2026.

[3] SM Knupfor, Elements of success : Urban transportation systems of global cities, 2018.

[4] Language Link Academic, 2025.

[5] D Li, J Ma, T Cheng, JL van Genderen , Challenges and opportunities for the development of MEGACITIES, 2019.

[6] Mai Huyền và Hải Linh, "Đường sắt đô thị Hà Nội góp phần xây dựng Thủ đô văn minh", Báo Nhân dân, 30/10/2025, Internet: https://nhandan.vn/duong-sat-do-thi-ha-noi-gop-phan-xay-dung-thu-do-van-minh-hien-dai-post918669.html, truy cập 02/2026.

[7] OECD/ITF, *ITF Transport Outlook 2023*, OECD Publishing, 2023.

[8] Quyết định số 519/QĐ-TTg của Thủ tướng Chính phủ: Phê duyệt Quy hoạch giao thông vận tải Thủ đô Hà Nội đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2050, 31/03/2016.

[9] Quyết định số 1668/QĐ-TTg phê duyệt điều chỉnh Quy hoạch chung Thủ đô Hà Nội đến năm 2045, tầm nhìn đến năm 2065, 27/12/2024.

[10] Minh Tường, "Hà Nội tích cực giải quyết thách thức kép về giao thông", Báo kinh tế đô thị, 09/11/2025, Internet: https://kinhtedothi.vn/ha-noi-tich-cuc-giai-quyet-thach-thuc-kep-ve-giao-thong.902152.html, truy cập 02/2026.

[11] UN-Habitat, World Cities Report 2022.

[12] WHO, Health risks of transport-related air pollution, 2021.

[13] WHO, Global status report on road safety, 2023.

[14] World Bank, Urban Transport Institutional Challenges, 2013.

[15] World Bank , Transforming Transportation 2025: Driving Change, Delivering, 2025.

[16] Phạm Quỳnh, "Hà Nội điều chỉnh quy hoạch hệ thống giao thông vận tải: Tạo lực phát triển trong kỷ nguyên mới", Tạp chí Người Hà Nội, 04/06/2025, Internet: https://nguoihanoi.vn/ha-noi-dieu-chinh-quy-hoach-he-thong-giao-thong-van-tai-tao-luc-phat-trien-trong-ky-nguyen-moi-91301.html, truy cập 02/2026.

■Ngày nhận bài: 25/02/2026 ■Ngày sửa bài: 04/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 12/3/2026

Thực trạng và giải pháp nâng cao việc chuẩn hóa cơ sở dữ liệu quốc gia về đất đai làm nền tảng cho công tác quản lý đô thị phục vụ chính quyền hai cấp tại TP Hồ Chí Minh

The context and enhanced solutions to form the standardization of national database on land for urban management in order to service the two levels of local government in Ho Chi Minh City

> **THS.KTS NGUYỄN TẤN VĨNH NAM**
Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường TP Hồ Chí Minh
Email: ntvnam@hcmunre.edu.vn

TÓM TẮT

Quá trình quản lý đô thị thông minh tại nước ta hiện còn nhiều khó khăn, thách thức và cả cơ hội lớn. Trong đó, việc đòi hỏi phải chuẩn hóa và phân cấp, phân quyền hệ thống thông tin và cơ sở dữ liệu quốc gia về đất đai có ý nghĩa nền tảng để thực hiện Luật Đất đai 2024, góp phần khắc họa đậm nét bản chất chế độ, tính ưu việt của xã hội xã hội chủ nghĩa Việt Nam, đồng thời là cơ sở vững chắc để xây dựng chính quyền địa phương hai cấp tại TP.HCM (mới).

Từ khóa: Hệ thống thông tin và cơ sở dữ liệu quốc gia về đất đai; đô thị thông minh; chuyển đổi số và quản lý đất đai.

ABSTRACT

The process of managing the smart city in our country currently still has many difficulties, challenges and great opportunities. In particular, the requirement to standardize and devolve, decentralize the information system and national database on land has fundamental significance for adopting the Land Law 2024, participating to impress the Vietnamese State of spirit and socialist society's primacy, in addition, it is foundation for building two levels of local government in Ho Chi Minh City (new).

Keywords: Information system and national database in land; smart city; digital transformation; land administration.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việc xây dựng đô thị thông minh tại TP.HCM (mới) hiện nay đã đạt nhiều thành tựu như hệ thống giao thông công cộng vành đai phát triển mạnh mẽ, cải tạo xanh hóa một số kênh rạch, phát triển du lịch cùng các ngành nghề kinh doanh thương mại - dịch vụ…, chính quyền Thành phố ban hành một loạt hệ thống hành lang pháp lý về xây dựng đô thị thông minh, chuyển đổi số cụ thể:

1) Sắp xếp, tinh gọn bộ máy hành chính: Hoàn chỉnh việc sắp xếp và vận hành 168 cấp xã và thành phố trong năm 2025; xây dựng chương trình cải cách hành chính; triển khai chiến lược an toàn, an ninh mạng…; thành lập các ban chỉ đạo tại mỗi đề án, nhiệm vụ; chương trình cải cách hành chính càng đi sâu về chất lượng, nâng cấp dịch vụ hành chính công lên mức độ 4; hỗ trợ phát triển doanh nghiệp và thương mại hóa giá trị chất xám trên lĩnh vực công nghệ thông tin, truyền thông.

2) Bước đầu thực hiện Đề án Đô thị thông minh làm tiền đề cho việc quản lý đô thị đối với chính quyền địa phương hai cấp như: Tham gia xây dựng kho dữ liệu cơ sở dữ liệu quốc gia về dân cư, y tế, bảo hiểm xã hội, bảo hiểm y tế; cơ sở dữ liệu về giáo dục và đào tạo; cơ sở dữ liệu doanh nghiệp; dữ liệu bản đồ số; xây dựng chính quyền điện tử tiến đến chính quyền số; kiến trúc chính quyền điện tử; chiến lược quản trị dữ liệu, xây dựng kho dữ liệu dùng chung;

xây dựng đề án kinh tế số, kinh tế chia sẻ, kinh tế tuần hoàn; chương trình nghiên cứu trí tuệ nhân tạo; đề án y tế thông minh…

3) Xây dựng các trung tâm về: Chuyển đổi số, Điều hành đô thị thông minh, Mô phỏng và dự báo kinh tế xã hội, An toàn thông tin; xây dựng mã điện tử định danh áp dụng các cơ quan, đơn vị; đã hoàn thành 100% cơ sở dữ liệu địa chính đối với 168 xã, phường, thị trấn trực thuộc TP.HCM (mới); cơ sở dữ liệu về quy hoạch, quy chế quản lý kiến trúc tại Thành phố.

Bên cạnh những tín hiệu đáng mừng như vậy vẫn còn một số hạn chế mang tính chất chiến lược trong việc quản lý đô thị cho chính quyền địa phương hai cấp cụ thể như sau: Việc chưa hoàn thiện hệ thống thông tin và cơ sở dữ liệu đất đai, công tác quy hoạch và quản lý sử dụng đất còn nhiều bất cập, nguồn lực tài chính thu từ đất đai chưa rõ ràng, bị phân tán, khó kiểm soát…

Đồng thời, việc quản lý đô thị thông minh như hiện nay vẫn còn chưa quan tâm đến việc xây dựng cả về phần "hồn", "tinh thần" đó là tinh thần, bản sắc văn hóa của đô thị, đồng bộ với phần "cứng" - hệ thống kỹ thuật số, hạ tầng kỹ thuật đô thị hiện đại, từ đó kết hợp định hướng chính trị về công nghiệp hóa, hiện đại hóa tại Nghị quyết số 29-NQ/TW ngày 17/11/2022 của Đảng về tiếp tục đẩy mạnh công nghiệp hóa, hiện đại hóa đất nước đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

2.1 Cơ sở dữ liệu về đất đai

Hệ thống thông tin quốc gia về đất đai là hệ thống tổng hợp các yếu tố hạ tầng kỹ thuật công nghệ thông tin, phần mềm, dữ liệu được xây dựng thành một hệ thống tập trung, thống nhất trên phạm vi cả nước để quản lý, vận hành, cập nhật, khai thác thông tin đất đai. Nội hàm của nó bao gồm cả cơ sở dữ liệu quốc gia về đất đai; hạ tầng kỹ thuật công nghệ thông tin; phần mềm của hệ thống thông tin quốc gia về đất đai.

Trong đó, cơ sở dữ liệu quốc gia về đất đai là tập hợp các dữ liệu đất đai, trong đó, dữ liệu được sắp xếp, tổ chức để truy cập, khai thác, chia sẻ, quản lý và cập nhật thông qua phương tiện điện tử, gồm: Văn bản quy phạm pháp luật về đất đai; địa chính; điều tra, đánh giá, bảo vệ, cải tạo, phục hồi đất; quy hoạch, kế hoạch sử dụng đất; giá đất; thống kê, kiểm kê đất đai; thanh tra, kiểm tra, tiếp công dân, giải quyết tranh chấp, khiếu nại, tố cáo về đất đai; dữ liệu khác liên quan.

2.2. Đô thị thông minh

Hiện nay, có nhiều khái niệm về *"Đô thị thông minh", "smart city",* được định nghĩa là những thành phố được xây dựng bao quanh bởi kỹ thuật công nghệ thông tin tiên tiến (ICT) và có những nguồn lực xã hội để gia tăng chất lượng, hiệu quả của cuộc sống đô thị theo hướng bền vững. Đô thị thông minh được khắc họa bởi hệ thống hạ tầng vật chất được sử dụng hiệu quả (hệ thống giao thông, công trình…); có cách quản trị mở, thông suốt và có sự tham gia của nhiều phía; có khả năng học và ứng phó với sự biến đổi khí hậu, sự thay đổi của môi trường tự nhiên theo hướng ngày càng khắc nghiệt.

Theo European Commision, *"đô thị thông minh"* còn là những thành phố sử dụng các giải pháp kỹ thuật để cải thiện công tác quản lý đô thị và sự hiệu quả của môi trường. Một đô thị thông minh là nơi mà những mạng lưới kỹ thuật và những dịch vụ truyền thống được phát triển hiệu quả hơn cùng với việc sử dụng những giải pháp số phục vụ lợi ích người dân và việc kinh doanh. Nó sử dụng kỹ thuật số nhiều hơn nhằm tận dụng khả năng cao nhất của các nguồn lực và điều chỉnh sự hao phí, thất thoát trong quá trình vận hành đến mức thấp nhất. Điều này có nghĩa là mạng lưới giao thông đô thị sẽ thông minh hơn, những cơ sở xử lý nước thải và cung cấp nước sạch được nâng cấp và nhiều tiện ích khác sẽ giúp các công trình đô thị tận dụng được ánh sáng và nhiệt độ một cách hiệu quả hơn; giúp cho công tác quản lý đô thị được đáp ứng nhanh chóng hơn, tạo lập được nhiều khoảng không gian công cộng hơn và đáp ứng nhu cầu của bộ phận dân số lớn tuổi.

Như vậy, *"smart city", "đô thị thông minh"* hiện nay chủ yếu tập trung vào việc đô thị dựa hoàn toàn vào phần "cứng" là hệ thống kỹ thuật số, hạ tầng kỹ thuật đô thị để tái tạo nguồn năng lượng, nguồn lực vận hành và quản lý đô thị một cách hiệu quả, nhanh chóng. Trong đó, cơ sở dữ liệu quốc gia về đất đai được Chính phủ quyết định là một trong sáu cơ sở dữ liệu quốc gia cần ưu tiên triển khai tạo nền tảng phát triển Chính phủ điện tử, trụ cột của đề án xây dựng đô thị thông minh.

2.3. Luật Đất đai 2024

Sau 10 năm thực hiện Luật Đất đai 2013, ngày 18/01/2024, Quốc hội đã quyết định ban hành Luật Đất đai số 31/2024/QH15 với 6 điểm lớn được điều chỉnh, bổ sung là (1) Quy hoạch, kế hoạch sử dụng đất; (2) Thu hồi, bồi thường, hỗ trợ tái định cư; (3) Giao đất, cho thuê đất, chuyển mục đích sử dụng đất; (4) Phân cấp, phân quyền; (5) Đất cho đồng bào dân tộc thiểu số; (6) Điều tra cơ bản, trong đó xây dựng cơ sở dữ liệu đất đai tập trung, thống nhất. Theo đó, hệ thống thông tin và cơ sở dữ liệu quốc gia về đất đai chiếm một bộ phận quan trọng của Luật Đất đai 2024. Đây cũng chính là một trong các nội dung trụ cột làm nền tảng để xây dựng các mô hình đô thị thông minh.

Trong khuôn khổ phạm vi nghiên cứu, tác giả khuyến nghị một số giải pháp bổ sung các dữ liệu về tài chính, nguồn thu từ đất đai, thuế, xuất nhập khẩu, di sản văn hóa đô thị, quản trị tài sản gắn liền với đất, quản lý cả con người sử dụng đất… vào hệ thống thông tin quốc gia về đất đai và thể hiện được giá trị tái đầu tư này mang lại sự thịnh vượng cho đô thị, hạnh phúc cho con người mà người dân làm trung tâm.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

** Mẫu khảo sát hệ thống thông tin và cơ sở dữ liệu đất đai:*

Tác giả chọn phường Diên Hồng, Vườn Lài, Hòa Hưng là 3 trong những phường trung tâm của TP.HCM (mới), có nhiều điều kiện thuận lợi trong việc giao lưu kinh tế, văn hóa xã hội với các phường lân cận để nghiên cứu điển hình. Tổng diện tích tự nhiên của 3 phường xấp xỉ 571,81 ha, các tác giả tiến hành việc khảo sát thực tế tại mỗi phường và nhận thấy từng phường hiện sau khi sáp nhập chưa được giao số lượng công chức chuyên trách lĩnh vực địa chính - xây dựng - đô thị và môi trường cụ thể (hiện chỉ sáp nhập nhân sự theo phương pháp cơ học), có 1 phó chủ tịch UBND phường chịu trách nhiệm chỉ đạo công tác kinh tế, địa chính - môi trường - đô thị.

Các phường hiện tại chỉ được cung cấp tệp tin bản đồ địa chính Autocad để sử dụng với dữ liệu thô (thể hiện số nhà, kích thước công trình, đường xá, thửa, quy hoạch lộ giới), loại bản đồ này chỉ có thể điều chỉnh, cập nhập biến động cục bộ, thủ công. Đồng thời, chưa liên thông kết quả điều chỉnh, cập nhật biến động đất đai với Chi nhánh Văn phòng đăng ký đất đai số 10. UBND các phường có thực hiện việc công bố thông tin điều chỉnh quy hoạch bằng giấy trước trụ sở cơ quan.

Hình 1. Các yếu tố được thể hiện trên bản đồ địa chính Autocad hiện nay, 2025

Qua khảo sát tại 3 phường cho thấy, bản đồ địa chính Autocad thuộc nhóm cơ sở dữ liệu quốc gia về đất đai, các đối tượng (objects) trên bản đồ không thể hiện được các thuộc tính đi kèm. Nói cách khác, đây là một dạng bản đồ không thể khai thác tiềm năng, lợi thế đất đai này được. Ngược lại, Chi nhánh Văn phòng đăng ký đất đai số 10 được sử dụng loại bản đồ trên có tích hợp thông tin GIS, có thể điều chỉnh, cập nhật thông tin biến động trên hệ thống bản đồ này, là dạng bản đồ phục vụ cơ sở dữ liệu đất đai khi có biến động về chủ thể đất đai, nhà cửa. Tuy nhiên, bản đồ GIS của Chi nhánh Văn phòng đăng ký đất đai sử dụng cũng có hạn chế vì chưa liên thông được với các phường trực thuộc cũng như với Sở Nông nghiệp và Môi trường; chưa tích hợp cập nhật các trường thông tin về tiền thuê đất, tiền sử dụng đất, thuế, biến động về chủ sử dụng đất, tầng cao…; việc cập nhật hệ thống thông tin về đất đai trên bản đồ này cũng rất thủ công và chậm; công tác phân tích dữ liệu trên từng máy tính riêng lẻ gây lãng phí tài nguyên, ngân sách đầu tư công. Cơ sở dữ liệu địa chính của 168 đơn vị hành chính của Thành phố cũng còn hạn chế khi thực hiện kết nối với cơ sở dữ liệu địa chính của 33 tỉnh, thành còn lại trong cả nước…, điều này cũng làm ảnh hưởng đến việc xây dựng bản đồ số quốc gia mở làm nền tảng phát triển các dịch vụ số phát triển kinh tế - xã hội. Đây là điểm cần phải khắc phục.

Bên cạnh đó, tác giả đã thực hiện việc khảo sát nhỏ bằng phiếu với 10 câu hỏi đối với 21 ứng viên (công chức chuyên trách địa chính - xây dựng - đô thị và môi trường của 3 phường) và 9 người dân ngẫu nhiên đến UBND phường thực hiện thủ tục hành chính. Kết quả cho thấy 100% ứng viên rất quan tâm các yếu tố quốc phòng an ninh, vệ sinh môi trường, thu nhập, thông tin quy hoạch - xây dựng, kinh tế, văn hóa - xã hội, hạ tầng kỹ thuật, sự tham gia cộng đồng vào việc đánh giá và xác lập hệ thống thông tin quốc gia về đất đai và cơ sở dữ liệu quốc gia về đất đai, phát triển kinh tế, giao thông công cộng thân thiện, đặc trưng bản sắc văn hóa địa phương, tiện ích đô thị. Cho thấy, cơ sở dữ liệu quốc gia về đất đai cũng cần phải được bổ sung thông tin này, nhằm hoàn thiện để khắc phục, đảm bảo tính đa chiều, gìn giữ "tinh thần" của mỗi khu vực.

4. THẢO LUẬN

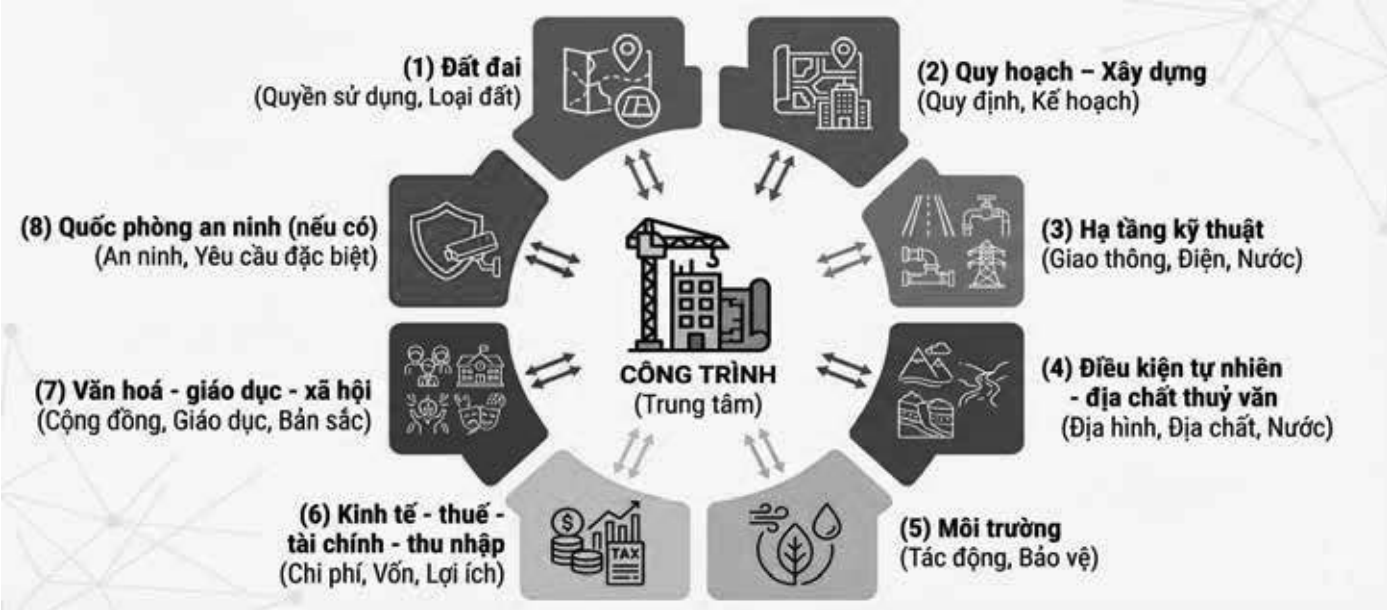
Trên cơ sở chiến lược xây dựng đô thị thông minh tại Việt Nam, kết quả khảo sát thực trạng tại 3 phường trung tâm điển hình, hệ thống thông tin và cơ sở dữ liệu quốc gia của Luật Đất đai 2024, một số giải pháp đề xuất áp dụng mới cụ thể như sau:

Thứ nhất, về công tác quản trị cơ sở dữ liệu, đề xuất mỗi một đơn vị thửa đất sẽ có hai loại dữ liệu: dữ liệu bản sao và dữ liệu gốc. Dữ liệu bản sao không tự cập nhật mà được xuất từ dữ liệu gốc và không thể hiệu chỉnh - tùy theo mỗi nội dung. Nhà nước sẽ cung cấp dịch vụ cho người sử dụng/người sở hữu/người đầu tư (cá nhân) hoặc tổ chức có thẩm quyền có nhu cầu. Nguồn thu này nhằm tái phục vụ cho việc nâng cấp cơ sở dữ liệu thường xuyên trong hệ thống, từ đó, Nhà nước cũng có lợi và người dân/tổ chức cũng có lợi. Dữ liệu gốc sẽ bao gồm các loại cơ sở dữ liệu có thể tùy biến hiệu chỉnh, thay đổi được trên cơ sở tổ chức/cá nhân có quyền sử dụng đất, quyền sở hữu tài sản gắn liền với đất tại mỗi thửa đất.

Cụ thể, đề xuất bổ sung 8 trường dữ liệu gốc sau đây sẽ đồng bộ với cơ sở dữ liệu quản lý theo ngành và cả theo địa phương, dữ liệu này sẽ gắn liền với thông tin tổ chức/cá nhân có quyền sử dụng đất, quyền sở hữu tài sản gắn liền với đất và cơ sở dữ liệu quốc gia về dân cư làm chuẩn khi có sự thay đổi, cụ thể đề xuất 8 trường dữ liệu cơ bản như: (1) Đất đai, (2) quy hoạch - xây dựng, (3) hạ tầng kỹ thuật, (4) điều kiện tự nhiên, địa chất thuỷ văn, (5) môi trường, (6) kinh tế, thuế, tài chính, thu nhập, (7) văn hóa, giáo dục - xã hội, (8) quốc phòng an ninh (nếu có).

Thứ hai, giải pháp nâng cao việc chuẩn hóa dữ liệu gốc phải được thực hiện ngay từ ban đầu tại mỗi xã, phường, thị trấn trực thuộc bởi đội ngũ công chức địa chính - xây dựng - đô thị và môi trường, chuyên trách về kinh tế, thuế, công chức văn hóa - xã hội, Chỉ huy trưởng Ban Chỉ huy quân sự phường, xã, thị trấn, Trưởng Công an phường, xã, thị trấn từ phần mềm chuyên dụng. Khi có thay đổi về chủ thể tổ chức/cá nhân sử dụng đất đai hoặc sở hữu nhà ở cần phải được cập nhật biến động ngay từ thông tin đầu vào. Từ đó, 8 trường dữ liệu này sẽ đồng bộ toàn diện đối với tổ chức/cá nhân có quyền sử dụng đất, quyền sở hữu tài sản gắn liền với đất từ cơ sở cho đến thành phố, Trung ương. Việc bảo mật và khai thác 8 trường dữ liệu này thuộc cơ quan Nhà nước có thẩm quyền.

Thứ ba, cần sớm nâng cấp hạ tầng kỹ thuật phục vụ cho cơ sở dữ liệu đất đai đồng bộ với cơ sở dữ liệu của 33 tỉnh, thành còn lại; tập huấn việc làm sạch và khai thác dữ liệu cho đội ngũ công chức các lĩnh vực văn hóa - xã hội, địa chính, xây dựng, đô thị và môi trường, chuyên trách kinh tế, công an và quân sự tại 168 xã, phường, thị trấn.



Hình 2. Đề xuất 8 trường dữ liệu đa chiều bổ sung cho bản đồ địa chính GIS

5. KẾT LUẬN

Những nội dung liên quan trực tiếp đến quyền lợi có nguồn gốc từ đất đai đến mỗi gia đình, cá nhân đều phải được tích hợp trên cơ sở dữ liệu quốc gia về đất đai như: Thu hồi, trưng dụng đất; bồi thường, hỗ trợ, tái định cư; tài chính về đất đai, giá đất; quy hoạch, kế hoạch sử dụng đất. Các nội dung trên nếu làm chưa tốt đều dẫn đến việc tranh chấp, khiếu nại, tố cáo và xử lý vi phạm pháp luật về đất đai.

Mặt khác, lợi ích lượng hóa bằng tiền từ Hệ thống thông tin quốc gia về đất đai và cơ sở dữ liệu quốc gia về đất đai sẽ là nguồn lực to lớn để vận hành đô thị thông minh. Giá trị này sẽ giúp chính quyền lượng hóa rõ rệt sự phát triển của đô thị thông minh, ví dụ như sau 24 giờ thì đô thị lại có thêm bao nhiêu tiền để tái thiết và phát triển; nó phải tự động hóa cảnh báo giúp cho chính quyền thấy đâu là những điểm "mù", tiền tiêu tốn vào đó đi về đâu? Vấn đề sử dụng đất phức hợp, đất ở, đất chuyên dụng (văn hóa, giáo dục, quốc phòng…) đã được tối ưu chưa và người dân cần được thấy rõ cái mà Nhà nước đang đại diện họ để quản lý. Chú trọng chức năng sử dụng đất theo hướng tích hợp (land mixed use) và truyền thống - văn hóa của mỗi địa phương sẽ góp phần làm nên bản sắc văn hóa, phần hồn đô thị TP.HCM.

Giai đoạn đầu quản lý đô thị áp dụng cho chính quyền địa phương hai cấp có nghĩa là phải áp dụng thành tựu mới về mọi mặt, cả về hạ tầng đô thị hiện đại, hạ tầng công nghệ thông tin, kỹ thuật số nhằm tạo nguồn lực trực tiếp về kinh tế, tài nguyên, vật chất, sản phẩm làm giàu đất nước, là kết quả bề nổi rõ nét của tiến trình công nghiệp hóa mang lại. Đây sẽ là nội dung quan trọng mà Luật Đất đai năm 2024 tác động vào công cuộc xây dựng TP.HCM (mới) trở thành đô thị thông minh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Quyết định số 950/Qđ-Ttg ngày 01/8/2018 của Thủ tướng Chính phủ về phê duyệt đề án phát triển đô thị thông minh bền vững Việt Nam giai đoạn 2018 - 2025 và định hướng đến năm 2030.

[2] Chương trình hành động số 36-CTrHĐ/TU ngày 25/3/2023 của Ban Chấp hành Đảng bộ TP.HCM thực hiện Nghị quyết số 31-NQ/TW ngày 30/12/2022 của Bộ Chính trị về phương hướng, nhiệm vụ phát triển TP.HCM đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045.

[3] Nghị quyết số 1685/NQ-UBTVQH15 ngày 16/6/2025 của UBTVQH về việc sắp xếp các đơn vị hành chính cấp xã của TP.HCM năm 2025.

[4] Quyết định số 3637/QĐ-UBND ngày 20/10/2021 của UBND TP.HCM ban hành Kế hoạch số thực hiện Chương trình tổng thể cải cách hành chính nhà nước trên địa bàn TP.HCM giai đoạn 2021 - 2030.

[5] Chỉ thị số 17-CT/TU ngày 27/8/2022 của Ban Chấp hành Đảng bộ TP.HCM về đẩy mạnh công tác chuyển đổi số và xây dựng TP.HCM trở thành đô thị thông minh.

[6] Quyết định số 714/QĐ-TTg ngày 25/5/2015 của Thủ tướng Chính phủ về ban hành danh mục cơ sở dữ liệu quốc gia cần ưu tiên triển khai tạo nền tảng phát triển chính phủ điện tử.

[7] Kế hoạch số 2649 /KH-UBND ngày 16/6/2023 của BBND Thành phố về triển khai thực hiện Quyết định số 411/QĐ-TTg ngày 31/3/2022 của Thủ tướng Chính phủ về phê duyệt Chiến lược quốc gia phát triển kinh tế số và xã hội số đến năm 2025, định hướng đến năm 2030 trên địa bàn TP.HCM.

[8] Nghị quyết số 18-NQ/TW ngày 16/6/2022 của Ban Chấp hành Trung ương Khóa XIII - Hội nghị lần 5, về "tiếp tục đổi mới, hoàn thiện thể chế, chính sách, nâng cao hiệu lực, hiệu quả quản lý và sử dụng đất, tạo động lực đưa nước ta trở thành nước phát triển có thu nhập cao".

[9] Luật số 31/2024/QH15. Luật Đất đai của Quốc hội khóa 15.

[10] Peter Enderwick. A Dictionary of Business and Management in India. 1st, Oxford University Press, 2017, doi: 10.1093/acref/9780191829000.001.0001.

[11] https://commission.europa.eu/index_en.

■Ngày nhận bài: 22/02/2026 ■Ngày sửa bài: 15/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/3/2026

Phát triển kiến trúc xí nghiệp công nghiệp nhẹ theo hướng xanh tại Vùng kinh tế trọng điểm phía Nam

Developing architecture for light industrial factories towards green development in the Southern Key Economic Region

> THS.KTS ĐẶNG HOÀNG QUYÊN
Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM; Email: quyen.danghoang@uah.edu.vn

TÓM TẮT

Kiến trúc theo hướng xanh hiện là xu hướng toàn cầu và kiến trúc xí nghiệp công nghiệp nhẹ là một phần của xu hướng đó. Vùng kinh tế trọng điểm phía Nam (VKTTĐPN) là vùng kinh tế động lực đầu tàu của cả nước về phát triển kinh tế và kiến trúc công nghiệp có vai trò rất quan trọng trong việc tạo lập môi trường lao động và sản xuất. Bài viết này trình bày khái quát thực trạng tổ chức không gian xí nghiệp nhẹ theo hướng xanh trên thế giới, tại Việt Nam và VKTTĐPN. Bên cạnh đó, bài viết cũng tổng hợp các cơ sở khoa học về tổ chức không gian xí nghiệp công nghiệp (XNCN) nhẹ theo hướng xanh. Từ đó đề xuất định hướng giải pháp tổ chức không gian xí nghiệp nhẹ theo hướng xanh tại VKTTĐPN.

Từ khóa: Xí nghiệp công nghiệp nhẹ; kiến trúc xanh; Vùng kinh tế trọng điểm phía Nam.

ABSTRACT

Green architecture is currently a global trend, and architecture of light industrial factories is part of this movement. The Southern Key Economic Region is among the most important drivers of the country's economic growth, and industrial architecture plays a crucial role in creating effective working and production environments. This article presents an overview of the current situation of light industrial factories towards green development in the world, in Vietnam, and in the Southern Key Economic Region. Besides, it also synthesizes the scientific foundations related to the green-oriented spatial organization of light industrial factories. Based on this, the article proposes orientations and solutions for spatial organization of light industrial factories towards green development in the Southern Key Economic Region.

Keywords: Light industrial factory; green architecture; the Southern Key Economic Region.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

VKTTĐPN là khu vực phát triển kinh tế năng động, dẫn đầu cả nước về tỷ trọng đóng góp GDP. Trong đó, công nghiệp nhẹ là một trong những ngành công nghiệp chủ chốt của vùng với lực lượng lao động tập trung cao. XNCN nhẹ thường có mặt bằng xây dựng lớn, mức độ tiêu thụ năng lượng cao và công nhân làm việc trong môi trường tương đối khắc nghiệt. Song kiến trúc XNCN nhẹ hiện nay chủ yếu tập trung tới dây chuyền sản xuất, yếu tố "xanh" còn chưa được quan tâm đúng mức. Do đó, phát triển kiến trúc XNCN nhẹ theo hướng xanh sẽ mang lại hiệu quả năng lượng, kinh tế và tạo điều kiện làm việc tốt hơn cho người lao động.

2. CÁC KHÁI NIỆM VÀ THUẬT NGỮ

- XNCN là cụm từ mang tính khái quát chung để chỉ tất cả các cơ sở sản xuất công nghiệp bao gồm các nhà máy và xí nghiệp [2]. Ở đó tiến hành hoạt động sản xuất từ nhập nguyên liệu, gia công và tạo ra sản phẩm công nghiệp.

- Công trình công nghiệp nhẹ là một công trình độc lập, một tổ hợp các công trình hoặc một dây chuyền công nghệ trong các cơ sở sản xuất, chế biến, đóng gói và kho chứa các sản phẩm. Công trình công nghiệp nhẹ gồm 03 lĩnh vực: thực phẩm, tiêu dùng và nông - thuỷ - hải sản [3].

- XNCN nhẹ là cơ sở sản xuất công nghiệp nhẹ, có ranh giới khu đất cụ thể, diễn ra hoạt động sản xuất hoàn chỉnh và có đầy đủ các khu chức năng. Trong đó, khu sản xuất gồm các công trình công nghiệp nhẹ. Bài báo này phân tích đối tượng XNCN nhẹ thuộc lĩnh vực sản xuất hàng tiêu dùng, với đặc điểm không gian sản xuất yêu cầu thông gió và chiếu sáng kết hợp tự nhiên và nhân tạo.

- Kiến trúc theo hướng xanh là thiết kế đảm bảo chất lượng môi trường bên trong và bên ngoài công trình theo định hướng tiết kiệm năng lượng, hiệu quả kinh tế, bảo vệ môi trường và tạo điều kiện tốt nhất cho con người trong các không gian, hướng tới các tiêu chuẩn LEED, EDGE, LOTUS và chiến lược tăng trưởng xanh quốc gia.

- Tổ chức không gian (TCKG) XNCN là việc bố trí, sắp xếp hợp lý các khu chức năng trong phạm vi XNCN.

3. TÌNH HÌNH TCKG XNCN NHẸ THEO HƯỚNG XANH TẠI MỘT SỐ KHU VỰC TRÊN THẾ GIỚI VÀ TẠI VIỆT NAM

3.1. Tại một số khu vực trên thế giới

Châu Âu và châu Mỹ là nơi khởi nguồn của phát triển công trình hiệu quả năng lượng và công trình xanh. Tuy nhiên, do yêu cầu về số lượng lao động trong lĩnh vực công nghiệp nhẹ thường khá cao nên XNCN nhẹ có xu hướng chuyển dịch về các quốc gia có lực lượng lao động dồi dào.

Châu Á chuyển đổi xanh chậm hơn so với châu Âu và châu Mỹ. Song đến nay, các quốc gia dẫn đầu số lượng XNCN nhẹ theo hướng xanh trên thế giới đều nằm ở châu lục này. Ví dụ như Bangladesh, Trung Quốc, Đài Loan, Ấn Độ…

Cụ thể, tại Trung Quốc, kế hoạch về sản xuất xanh được thiết lập từ năm 2015 và xây dựng nhà máy xanh là một phần quan trọng của kế hoạch. Năm 2018, tiêu chuẩn GB/T 36132-2018 - Nguyên tắc chung đánh giá nhà máy xanh được ban hành. Đến tháng 8/2020, số lượng nhà máy xanh trong lĩnh vực điện tử, dệt may và thực phẩm lần lượt là 230; 67 và 124 [12].

Tại Hàn Quốc, từ năm 2004, các khu công nghiệp (KCN) ở Ulsan bắt đầu chuyển sang mô hình KCN sinh thái với sự hỗ trợ của Bộ Thương mại, Công nghiệp và Năng lượng [10]. Năm 2009, Chính phủ Hàn Quốc đã ban hành Chiến lược quốc gia về tăng trưởng xanh, tầm nhìn đến năm 2050. Từ đó đến nay, số lượng doanh nghiệp công nghiệp xanh vừa và nhỏ đã tăng hơn 40%. Hệ thống Chứng chỉ xanh của Hàn Quốc đã công nhận hơn 400 doanh nghiệp xanh từ năm 2010 [4].

Bangladesh có ngành công nghiệp may mặc phát triển mạnh mẽ, đóng góp hơn 80% thu nhập xuất khẩu của quốc gia và tạo việc làm cho hàng triệu lao động, đã và đang chuyển đổi xanh để tăng khả năng cạnh tranh trong khu vực. Tính đến đầu 2025, 237 nhà máy may mặc đạt chứng nhận LEED tại Bangladesh đã giúp quốc gia này dẫn đầu thế giới về số lượng nhà máy xanh trong lĩnh vực may mặc [14].

Tại ASEAN, một số quốc gia như Thái Lan và Malaysia cũng đã nhanh chóng hướng tới xanh trong lĩnh vực kiến trúc công nghiệp. Năm 2011, Liên đoàn Công nghiệp Thái Lan đã thiết lập chứng nhận Nhà máy xanh. Chứng nhận này gồm các định nghĩa, tiêu chuẩn, phạm vi và hướng dẫn để phát triển nhà máy sinh thái để thúc đẩy chuyển đổi xanh trong lĩnh vực công nghiệp [12]. Malaysia cũng có công cụ riêng để đánh giá công trình công nghiệp xanh có tên INC (Industrial New Construction) thuộc hệ thống GBI, nhằm khuyến khích các nhà máy xây mới tại quốc gia này theo hướng xanh [15].

3.2. Tại Việt Nam

Kiến trúc xanh đang ngày càng phổ biến ở Việt Nam, nhưng vẫn còn khá mới mẻ với nhiều chủ đầu tư và người lao động trong XNCN. Nhiều chủ đầu tư và người sử dụng chưa thực sự nắm rõ được lợi ích của XNCN theo hướng xanh. Mặc dù số công trình công nghiệp đạt chứng nhận xanh tăng dần qua các năm và có tỷ lệ cao hơn các loại hình khác, song số lượng này vẫn chiếm tỷ lệ rất nhỏ so với tổng số công trình công nghiệp xây mới.

Tại VKTTĐPN, XNCN nhẹ có nhiều lợi thế để phát triển xanh về điều kiện tự nhiên, kinh tế và xã hội, khi vùng là trung tâm sản xuất và xuất khẩu của cả nước. Bên cạnh các chứng nhận như LEED, LOTUS, EDGE, nhiều văn bản pháp luật liên quan đến công trình xanh đã được ban hành, cùng các chính sách khuyến khích của địa phương. Ví dụ, khu vực Bình Dương (cũ) đã công bố 40 XNCN theo hướng xanh vào năm 2022 [7]. Năm 2024, giải cao nhất Giải thưởng Kiến trúc công nghiệp Việt Nam 2024 thuộc về XNCN điện tử Hayward Quatz Technology tại KCN VSIP 1 Bình Dương.

4. GIỚI THIỆU CHUNG VÀ THỰC TRẠNG TCKG XNCN NHẸ THEO HƯỚNG XANH TẠI VKTTĐPN

4.1. Giới thiệu chung về VKTTĐPN

VKTTĐPN có diện tích khoảng 30.592 km^2, chiếm 9,24% so với cả nước. Trước 01/7/2025, vùng gồm 08 tỉnh, thành phố: TP.HCM, Bình Phước, Tây Ninh, Bình Dương, Đồng Nai, Bà Rịa - Vũng Tàu, Long An và Tiền Giang [6]. Sau khi sáp nhập địa giới hành chính từ 01/7/2025, vùng gồm TP.HCM, Đồng Nai, Tây Ninh và một phần tỉnh Đồng Tháp.

Về điều kiện tự nhiên, VKTTĐPN nằm trọn vẹn trong vùng khí hậu Vùng Nam Bộ - Vùng VII với đặc điểm khí hậu khá đồng nhất, mang đặc điểm điển hình của khí hậu nhiệt đới gió mùa với 02 mùa là mùa mưa và mùa khô [1]. Về điều kiện kinh tế, vùng có sức hút đầu tư lớn trong khu vực và là trung tâm công nghiệp lớn nhất cả nước. Lĩnh vực công nghiệp - xây dựng chiếm khoảng 50% tổng cơ cấu ngành trong cơ cấu kinh tế vùng. Về điều kiện xã hội, vùng tập trung lực lượng lao động trẻ với trình độ kỹ thuật cao hơn so với các khu vực khác, sẵn sàng đáp ứng nhu cầu phát triển kinh tế và hội nhập quốc tế [8].

4.2.Thực trạng tổ chức không gian XNCN nhẹ tại VKTTĐPN

Số lượng XNCN nhẹ trong VKTTĐPN chiếm số lượng lớn và có xu hướng ngày càng gia tăng. Tuy nhiên, phần lớn các xí nghiệp hiện nay có quy mô vừa và nhỏ với vốn đầu tư thấp, công nghệ sản xuất còn lạc hậu. Các giải pháp thiết kế hướng đến tiết kiệm năng lượng và bảo vệ môi trường trong XNCN nhẹ còn ít được quan tâm.

Bố trí tổng mặt bằng XNCN hiện nay chủ yếu đảm bảo dây chuyền công năng. Mật độ xây dựng tại các XNCN thường khá cao. Thiết kế hình khối, hướng nhà và lớp vỏ bao che của công trình nhằm hiệu quả năng lượng chưa thực sự chú trọng. Một số công trình kỹ thuật chưa chú ý đến hướng gió chính gây ảnh hưởng bất lợi đến khu vực sản xuất.

Không gian nhà sản xuất trong XNCN nhẹ hiện nay phần lớn đáp ứng yêu cầu công năng. Các yếu tố liên quan đến các vấn đề năng lượng và bảo vệ môi trường hầu như chưa được xem xét một cách toàn diện. Mặc dù mặt bằng không gian sản xuất thường lớn đặt ra yêu cầu về thông gió tự nhiên và thoát nhiệt hiệu quả, song nhiều thiết kế vẫn chưa chú trọng đến điều này. Một số không gian tập trung đông công nhân chưa được ưu tiên bố trí vị trí và hướng thuận lợi về điều kiện tự nhiên, dẫn tới chất lượng môi trường bên trong không gian làm việc chưa cao và làm tăng nhu cầu sử dụng năng lượng trong quá trình vận hành (Hình 1 và Hình 2).

Hiện nay, vật liệu xây dựng ngày càng đa dạng với sự góp mặt của nhiều sản phẩm mới giúp tăng cường hiệu quả năng lượng như panel cách nhiệt, kính Low-E, các vật liệu từ nhựa tổng hợp…Tuy nhiên, do yếu tố giá thành của các vật liệu trên còn tương đối cao nên hầu hết XNCN nhẹ hiện nay sử dụng vật liệu bao che bằng tôn có lớp cách nhiệt, kết cấu chịu lực bằng khung thép tiền chế hoặc kết cấu hỗn hợp (móng và cột bằng bê tông cốt thép, kết cấu mang lực mái bằng thép).

Hình 1. Thực trạng XNCN sản xuất giày tại VKTTĐPN

Hình 2. Thực trạng XNCN sản xuất may mặc tại VKTTĐPN

Không gian khu vực hành chính và phục vụ công cộng - sinh hoạt bên trong XNCN nhẹ phần lớn đáp ứng nhu cầu sử dụng cơ bản với các hạng mục thiết yếu theo quy định. Rất ít xí nghiệp đầu tư các hạng mục không gian nghỉ ngơi giữa ca, không gian thể dục thể thao, không gian giao lưu văn hoá, văn nghệ. Mặc dù khu vực phục vụ công cộng đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao sức khỏe và tinh thần cho người lao động, song có khá ít XNCN nhẹ đầu tư các hạng mục này.

Khu vực cung cấp và đảm bảo kỹ thuật được bố trí đầy đủ và đảm bảo hoạt động sản xuất. Tuy nhiên, vẫn còn tồn tại xí nghiệp chưa lưu ý đến vị trí của khu vực này để tránh làm ảnh hưởng bất lợi tới khu vực sản xuất và khu vực phục vụ công cộng sinh hoạt trong xí nghiệp. Đối với việc sử dụng nguyên nhiên liệu sạch, năng lượng tái tạo và các biện pháp khuyến khích phương tiện giao thông sử dụng nhiên liệu sạch, số lượng XNCN nhẹ đã áp dụng còn rất hạn chế.

4.3. Thực trạng áp dụng các hệ thống tiêu chuẩn công trình xanh cho công trình công nghiệp nhẹ tại VKTTĐPN

Công trình công nghiệp đạt chứng nhận công trình xanh đầu tiên tại VKTTĐPN là nhà máy Congate Pamolive Vietnam với chứng nhận LEED Silver vào năm 2010. Đây cũng là sự khởi đầu cho công trình công nghiệp đạt chứng nhận LEED tại Việt Nam. Đến nay, LEED là tiêu chuẩn công trình xanh được sử dụng phổ biến nhất trong lĩnh vực công nghiệp tại VKTTĐPN nói riêng và trên toàn quốc nói chung. Trong đó, các công trình công nghiệp nhẹ chiếm đa số, chủ yếu thuộc lĩnh vực hàng tiêu dùng như may mặc, giày dép và điện tử.

Bên cạnh chứng nhận LEED, công trình công nghiệp đạt chứng nhận xanh EDGE cũng có xu hướng tăng nhanh trong những năm gần đây và phần lớn thuộc lĩnh vực trung tâm kho vận. Một số công trình công nghiệp trong VKTTĐPN đạt chứng nhận LOTUS như Xí nghiệp May 3, Công ty CP Đồng Tiến, XNCN may Đồng Phú Cường 2 (Hình 3 và Hình 4).

Hình 3. XNCN may Đồng Phú Cường 2 - đạt chứng nhận LOTUS NC v2.0 - NR Platinum năm 2018

Hình 4. Tổ chức không gian kiến trúc cảnh quan XNCN may Đồng Phú Cường 2

So sánh ba hệ thống đánh giá công trình xanh phổ biến tại Việt Nam hiện nay cho thấy LEED có mức độ uy tín toàn cầu, song một số tiêu chí khó đạt được đối với các công trình công nghiệp ở Việt Nam. LOTUS mang tính địa phương cao do được xây dựng dựa trên tiêu chuẩn, quy chuẩn Việt Nam. Tuy nhiên, phạm vi áp dụng của QCVN 09:2017/BXD dùng để xây dựng hệ tiêu chí không bao gồm công trình công nghiệp. EDGE có quy trình đơn giản song còn chưa đánh giá được toàn diện các vấn đề.

5. MỘT SỐ CƠ SỞ KHOA HỌC VỀ TCKG XNCN NHẸ THEO HƯỚNG XANH TẠI VKTTĐPN

5.1. Cơ sở pháp lý

a) Các văn bản pháp lý liên quan đến TCKG XNCN nhẹ: TCVN 4514:2012 về XNCN - Tổng mặt bằng - Tiêu chuẩn thiết kế; TCVN 4604:2012 - XNCN - Nhà sản xuất - Tiêu chuẩn thiết kế; QCVN 01:2021/BXD - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về quy hoạch xây dựng; Thông tư số 06/2021/TT-BXD quy định về phân cấp công trình xây dựng.

b) Các văn bản pháp lý liên quan đến VKTTĐPN: Quyết định số 252/QĐ-TTg (2014) Phê duyệt Quy hoạch tổng thể phát triển kinh tế - xã hội VKTTĐPN đến năm 2020, định hướng đến năm 2030; Quyết định số 3318/QĐ-BCT (2017) Phê duyệt quy hoạch phát triển công nghiệp VKTTĐPN đến 2025, tầm nhìn đến 2035.

c) Các văn bản pháp lý liên quan đến TCKG theo hướng xanh, hiệu quả năng lượng, bảo vệ môi trường và phát triển bền vững: Luật số 50/2010/QH12 - Luật sử dụng năng lượng tiết kiệm hiệu quả; Luật số 72/2020/QH14 - Luật bảo vệ môi trường; Quyết định số 432/QĐ-TTg (2012) phê duyệt chiến lược phát triển bền vững Việt Nam giai đoạn 2011-2020; Quyết định số 1393/QĐ-TTg (2012) Phê duyệt Chiến lược quốc gia về tăng trưởng xanh; QCVN 09:2017/BXD về công trình xây dựng sử dụng năng lượng và hiệu quả; Hội nghị COP26 với cam kết đạt mức phát thải ròng bằng "0" của Việt Nam vào năm 2050; Quyết định số 1658/QĐ-TTg (2021) phê duyệt Chiến lược quốc gia về tăng trưởng xanh giai đoạn 2021-2030, tầm nhìn 2050; Quyết định số 882/QĐ-TTg (2022) Phê duyệt Kế hoạch hành động quốc gia về tăng trưởng xanh giai đoạn 2021-2030. Quyết định số 21/2025/QĐ-TTg - Quy định tiêu chí môi trường và việc xác nhận dự án đầu tư thuộc danh mục phân loại xanh.

***5.2.* Cơ sở lý thuyết**

a) Lý thuyết công trình xanh, kiến trúc xanh: Lý thuyết xuất hiện từ khoảng cuối thế kỷ 20 - đầu thế kỷ 21. Lý thuyết về công trình xanh áp dụng trong TCKG XNCN nhẹ nhằm hướng tới việc tận dụng điều kiện tự nhiên và tối ưu các giải pháp kiến trúc, công nghệ, để giảm tiêu thụ năng lượng, nước, vật liệu, sử dụng tài nguyên hiệu quả và hạn chế tác động xấu đến môi trường.

b) Lý thuyết phát triển bền vững: Năm 1987, báo cáo Brundtland trong Hội nghị Toàn cầu về môi trường và phát triển của Liên hợp quốc đưa ra khái niệm phát triển bền vững [11]. Lý thuyết về phát triển bền vững bao gồm 03 khía cạnh: kinh tế, môi trường và xã hội. Theo đó, TCKG XNCN nhẹ hướng tới phát triển bền vững không chỉ đơn thuần là giải quyết các vấn đề về kỹ thuật, mà còn có trách nhiệm với xã hội và môi trường sinh thái.

c) Lý thuyết kiến trúc sinh khí hậu và lý thuyết thiết kế thụ động: Lý thuyết kiến trúc sinh khí hậu xuất hiện từ năm 1948 qua nghiên cứu của James Marston Fitch về thiết kế thích ứng khí hậu. Lý thuyết thiết kế thụ động là bước phát triển cao hơn của kiến trúc sinh khí hậu, bắt nguồn từ châu Âu từ năm 1970 tại Đức bởi Wolfgang Feist với các nghiên cứu về công trình tiêu thụ ít năng lượng nhưng vẫn đảm bảo tiện nghi nhiệt [9]. Tại VKTTĐPN, tiện nghi nhiệt là yếu tố cần được ưu tiên, do đó thiết kế XNCN nên tận dụng tối đa điều kiện tự nhiên để giảm nhu cầu năng lượng.

d) Lý thuyết tổ chức môi trường lao động: Gồm các biện pháp nhằm tạo lập môi trường lao động đáp ứng các yêu cầu cho sản xuất và người lao động, từ quy mô đô thị, KCN, XNCN, công trình công nghiệp, đến vị trí làm việc [5]. Áp dụng trong TCKG XNCN nhẹ, lý thuyết này có ý nghĩa thiết kế không gian sản xuất và phục vụ người lao động đáp ứng ở các cấp độ nhằm mang lại điều kiện làm việc chất lượng cho người lao động.

e) Lý thuyết tháp nhu cầu con người của Maslow: Gồm 05 cấp độ và mỗi cấp độ đại diện cho một nhóm nhu cầu của con người, từ đơn giản đến phức tạp [13]. Áp dụng trong TCKG XNCN, ở cấp độ cơ bản, người lao động cần được đáp ứng các yêu cầu về nơi làm việc an toàn, đảm bảo điều kiện vi khí hậu, không gian phục vụ công cộng và sinh hoạt thiết yếu. Ở mức độ cao hơn, người lao động cần có các không gian nâng cao trình độ, chăm sóc sức khỏe, giao lưu, giải trí, sáng tạo và ghi nhận đóng góp.

6. ĐỊNH HƯỚNG GIẢI PHÁP TCKG XNCN NHẸ THEO HƯỚNG XANH TẠI VKTTĐPN

6.1. Định hướng giải pháp bố trí tổng mặt bằng và không gian kiến trúc cảnh quan XNCN nhẹ theo hướng xanh tại VKTTĐPN

Bố trí tổng mặt bằng XNCN có ảnh hưởng rất lớn đến TCKG toàn xí nghiệp theo hướng xanh. Tuỳ thuộc vào quy mô xí nghiệp và yêu cầu chất lượng môi trường bên trong nhà sản xuất để xác định giải pháp hợp khối hay tách khối các hạng mục trong khu vực sản xuất và giữa khu sản xuất với khu vực hành chính, phục vụ công cộng. Trong các trường hợp đều cần ưu tiên bố trí cạnh dài của nhà sản xuất chính đón gió chủ đạo và tránh hướng có bức xạ mặt trời trực

tiếp để hạn chế lượng nhiệt truyền vào bên trong công trình và giúp giảm tải cho các thiết bị điện.

Tổ chức không gian kiến trúc cảnh quan trong XNCN cần được xem xét theo từng khu chức năng. Khu không gian mở, thường đặt trước khối hành chính, nên được đầu tư đa dạng yếu tố cảnh quan và đa dạng sinh học để tạo điểm nhấn. Tuy nhiên, cây xanh dọc tuyến giao thông cần chọn lọc với mức độ đa dạng sinh học thấp hơn và không gây cản trở vận chuyển hàng hóa của các loại xe chuyên dụng. Nhìn chung, nên ưu tiên thực vật chịu hạn, bản địa hoặc thích ứng, ít rụng lá, tán rậm và nhiều tầng để giảm bụi, tiếng ồn và phù hợp với môi trường sản xuất.

6.2. Định hướng giải pháp tổ chức không gian nhà sản xuất trong XNCN nhẹ theo hướng xanh tại VKTTĐPN

Tổ chức mặt bằng nhà sản xuất nên ưu tiên không gian sản xuất chính, tập trung đông người lao động, tại vị trí thuận lợi về điều kiện tự nhiên. Không gian kho, phụ trợ sản xuất, hành lang và nút giao thông (đối với nhà sản xuất nhiều tầng), thường có mật độ lao động thấp hơn, đóng vai trò như khoảng đệm cho không gian sản xuất chính, nên bố trí ở hướng kém thuận lợi để cải thiện điều kiện cho không gian sản xuất chính.

Giải pháp bao che đối với các XNCN nhẹ sử dụng thông gió và chiếu sáng tự nhiên kết hợp nhân tạo cần ưu tiên thoát nhiệt qua mái đối với nhà một tầng và tầng trên cùng của nhà nhiều tầng bằng hệ thống cửa sổ mái để thoát nhiệt hiệu quả và giảm năng lượng điện làm mát. Đồng thời, tăng cường chiếu sáng tự nhiên qua tấm lấy sáng và kính tiết kiệm năng lượng, kết hợp sử dụng phần mềm mô phỏng trong thiết kế để lựa chọn thông số phù hợp, tránh chói và đảm bảo quá trình sản xuất. Bên cạnh đó, cần bố trí kết cấu che nắng tại các mặt đứng chịu bức xạ cao nhằm giảm nhiệt nhưng vẫn duy trì thông gió tự nhiên.

Giải pháp công nghệ và vật liệu cần hướng tới nâng cao hiệu quả năng lượng và giảm phát thải thông qua ứng dụng công nghệ thông minh, tự động hoá, giám sát và quản lý năng lượng, kiểm soát môi trường trong công trình. Đồng thời, cần kết hợp hài hoà giữa thiết kế thụ động và chủ động để tối ưu hiệu quả năng lượng. Về vật liệu, nên ưu tiên vật liệu có nguồn gốc địa phương, thân thiện môi trường và có khả năng tái chế nhằm giảm phát thải CO_2 và chất thải xây dựng.

6.3. Định hướng giải pháp TCKG khu hành chính, khu vực phục vụ công cộng và sinh hoạt trong XNCN nhẹ theo hướng xanh tại VKTTĐPN

Không gian hành chính - điều hành trong XNCN nhẹ có thể áp dụng mô hình văn phòng hybrid (kết hợp trực tiếp và trực tuyến), phù hợp với XNCN có vị trí ở xa trung tâm. Bên cạnh các hạng mục thiết yếu, khu phục vụ và sinh hoạt cần được tăng cường với không gian nghỉ giữa ca, thể dục thể thao, giao lưu văn hoá và các tiện ích cho nhóm đối tượng đặc thù, nhằm nâng cao chất lượng phục vụ và gắn kết người lao động với doanh nghiệp.

6.4. Định hướng giải pháp tổ chức giao thông và khu cung cấp - đảm bảo kỹ thuật trong XNCN nhẹ theo hướng xanh tại VKTTĐPN

Giải pháp tổ chức giao thông cần hướng tới mục tiêu giảm phát thải, thông qua việc khuyến khích sử dụng phương tiện sử dụng năng lượng sạch và giao thông công cộng. Các biện pháp có thể áp dụng bao gồm: ưu tiên bố trí chỗ đỗ cho xe điện, xe đạp, đồng thời tổ chức hệ thống xe đưa đón công nhân viên. Bên cạnh đó, khu vực cung cấp và đảm bảo kỹ thuật cần ưu tiên áp dụng các công nghệ thân thiện với môi trường, đồng thời bố trí hợp lý các hạng mục nhằm hạn chế ảnh hưởng của bụi, khí thải và hóa chất đến các khu vực tập trung đông người trong XNCN.

7. KẾT LUẬN

Phát triển kiến trúc XNCN nhẹ theo hướng xanh là xu thế tất yếu nhờ các lợi ích như tiết kiệm năng lượng, bảo vệ môi trường, nâng cao chất lượng không gian làm việc và hình ảnh doanh nghiệp. Quá trình này đòi hỏi sự phối hợp của nhiều bên, từ cơ quan quản lý Nhà nước, chủ đầu tư, doanh nghiệp xây dựng, kiến trúc sư đến người lao động và cộng đồng. Trong bối cảnh hội nhập, xanh hóa trở thành yếu tố then chốt giúp doanh nghiệp nâng cao năng lực cạnh tranh và đáp ứng mục tiêu phát triển bền vững, hướng tới phát thải ròng bằng "0". Trong tương lai, XNCN nhẹ sẽ không chỉ là không gian sản xuất đơn thuần mà còn là mô hình đa chức năng tích hợp sản xuất - nghiên cứu - phát triển, trở thành môi trường làm việc thân thiện, gắn kết người lao động và hướng tới tiêu chí ESG (Môi trường - Xã hội - Quản trị).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tài liệu trong nước

[1] Bộ Xây dựng. QCVN 02:2022/BXD - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về số liệu điều kiện tự nhiên dùng trong xây dựng, 2022.

[2] Lương Bá Chấn. Quy hoạch thiết kế Tổng mặt bằng xí nghiệp công nghiệp, NXB Xây dựng, tr. 5, 2015.

[3] Chính phủ. Nghị định 06/2021/NĐ-CP: Quy định chi tiết một số nội dung về quản lý xây dựng, thi công xây dựng và bảo trì công trình xây dựng, 2021.

[4] Nguyễn Ngọc Sinh, Trần Hiếu Nhuệ. Doanh nghiệp với thương hiệu xanh cho phát triển bền vững, NXB Chính trị quốc gia sự thật, 2023.

[5] Ngô Thế Thi. Tổ chức môi trường lao động, một bộ phận của văn hoá lao động, Tạp chí Kiến trúc, số 5/2001, 2001.

[6] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định 252/QĐ-TTg - Quyết định phê duyệt Quy hoạch tổng thể phát triển kinh tế - xã hội vùng Kinh tế trọng điểm phía Nam đến năm 2020, định hướng đến năm 2030, 2014.

[7] UBND tỉnh Bình Dương (2022), Quyết định số 3213/QĐ-UBND - Quyết định về việc ban hành sách xanh tỉnh Bình Dương năm 2022.

[8] Viện Quy hoạch xây dựng miền Nam. Điều chỉnh quy hoạch xây dựng vùng TP.HCM đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2050, tr.77, 2017.

Tài liệu quốc tế

[9] J Bere. An Introduction to Passive House, RIBA Publishing, tr. 13, 2013.

[10] H.S Park, E.R Rene, S.M Choi, A.S.F Chiu. Strategies for sustainable development of industrial park in Ulsan, South Korea - From spontaneous evolution to systematic expansion of industrial symbiosis. Journal of Environmental Management

Volume 87, Issue 1, tr. 1-13, 2008, doi: 10.1016/j.jenvman.2006.12.045.

[11] United Nations. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future, 1987.

[12] M Yang, H Li, J Li. The Theory and Practice of Evaluating Green Factories in China. South Asian Journal of Social Studies and Economics, Volume 10, Issue 1, tr. 24-33, 2021, doi: 10.9734/sajsse/2021/v10i130253.

[13] Mcleod S (2024), Maslow's Hierarchy Of Needs. Internet: https://www.simplypsychology.org/maslow.html (truy cập tháng 01/2025).

[14] Bangladesh now boasts a total of 237 LEED Certified Factories. Internet: https://textilefocus.com/bangladesh-now-boasts-a-total-of-237-leed-certified-factories/ (truy cập tháng 03/2025).

[15] Green Building Index. Internet: https://www.greenbuildingindex.org/ (truy cập tháng 01/2025).

■Ngày nhận bài: 26/02/2026 ■Ngày sửa bài: 05/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 12/3/2026

Vai trò trung tâm của thiết kế nội thất trong một dự án xây dựng

The central role of interior design in construction projects

> PGS.TS.KTS VŨ HỒNG CƯƠNG[1], THS NGUYỄN THANH VÂN[2*]
[1] Khoa Nội thất, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội; Email: ktsvuhongcuong@gmail.com
[2*] Khoa Nội thất, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội; Email: thanhvan.hau.vn@gmail.com

TÓM TẮT

Trong bối cảnh kinh tế - xã hội ngày càng phát triển, nhu cầu nâng cao chất lượng cuộc sống, tiện nghi và trải nghiệm không gian của con người không ngừng gia tăng. Điều này phụ thuộc vào chất lượng tổ chức không gian bên trong công trình với các vật liệu, trang thiết bị đi kèm. Qua đó, thiết kế nội thất ngày càng khẳng định vai trò trọng yếu trong các dự án xây dựng. Tuy nhiên, thực tiễn cho thấy nhận thức về vị trí và vai trò của thiết kế nội thất trong tổng thể dự án vẫn còn thiếu tính hệ thống và đồng bộ, dẫn đến những hạn chế trong hiệu quả sử dụng và chất lượng không gian công trình. Trên cơ sở phân tích thực trạng, kết hợp tham chiếu kinh nghiệm từ một số quốc gia phát triển, bài báo làm rõ vai trò trung tâm, mang tính chi phối của thiết kế nội thất trong cấu trúc không gian của một dự án xây dựng. Từ đó, đề xuất một số định hướng việc hình thành nâng cao hiệu quả thiết kế nội thất, góp phần nâng cao chất lượng không gian sống và giá trị sử dụng công trình trong tiến trình phát triển đất nước thời kỳ mới.

Từ khóa: Thiết kế nội thất; dự án xây dựng; chất lượng không gian; vai trò trung tâm.

ABSTRACT

In the context of continuous socio-economic development, the demand for improving quality of life, comfort, and spatial experience has been steadily increasing. These demands are closely associated with the quality of interior spatial organization, including the integration of materials and building systems. Consequently, interior design has increasingly affirmed its critical role in construction projects. However, in practice, the perception of the position and role of interior design within the overall project framework remains insufficiently systematic and coordinated, leading to limitations in functional efficiency and spatial quality. Based on an analysis of current practices, combined with references to experiences from selected developed countries, this paper clarifies the central and decisive role of interior design in shaping the spatial structure of construction projects. Accordingly, it proposes several orientations to enhance the effectiveness of interior design, thereby contributing to the improvement of living environments and the functional value of buildings in the contemporary development context.

Keywords: Interior design; construction projects; spatial quality; central role.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đối với thể loại nhà ở tại Việt Nam đã trải qua nhiều biến đổi gắn liền với những thay đổi về điều kiện kinh tế, xã hội và tiến trình đô thị hóa. Nhìn lại tiến trình lịch sử, quan niệm về không gian sống tại Việt Nam đã chịu sự chi phối mạnh mẽ từ bối cảnh kinh tế - xã hội đang phát triển và hệ lụy của chiến tranh kéo dài. Trong một thời gian dài, ngôi nhà chỉ đơn thuần thực hiện chức năng "trú ẩn", đáp ứng những nhu cầu sinh tồn tối thiểu thay vì hướng tới sự thụ hưởng hay nâng cao chất lượng sống. Bước sang thời kỳ bao cấp, tư duy "ăn chắc mặc bền" tiếp tục đóng khung tâm lý xã hội. Chỉ khi nền kinh tế chuyển mình, nhu cầu con người mới thực sự có bước chuyển dịch từ "ăn no, mặc ấm" sang "ăn ngon, mặc đẹp", kéo theo sự đòi hỏi khắt khe hơn đối với chất lượng không gian nội thất. Tuy nhiên, sự thay đổi về nhu cầu sống này lại chưa được chuyển hóa đồng bộ vào quy trình thực hành xây dựng thực tế.

Bên cạnh đó, trong thực hành dự án xây dựng hiện nay, đặc biệt đối với các dự án đầu tư công vốn ngân sách, thiết kế nội thất chưa được xác lập như một nội dung bắt buộc trong quy trình thiết kế. Việc thiếu vắng các quy định pháp lý cụ thể, đồng thời chưa có hướng dẫn rõ ràng về chi phí thiết kế nội thất trong cơ cấu tổng mức đầu tư, dẫn đến tình trạng nội thất không được triển khai ngay từ giai đoạn ban đầu, mà thường bị quy giản thành hạng mục mua sắm và lắp đặt thiết bị ở giai đoạn hoàn thiện công trình. Các hệ thống kỹ thuật như cơ điện (M&E) thường chỉ được thiết kế ở mức chung chung, dừng lại ở phạm vi công trình hoặc đến ranh giới không gian, thiếu sự tích hợp với nội thất, dẫn đến những bất cập trong quá trình vận hành và sử dụng. Hệ quả là công trình được hình thành trên cơ sở các giải pháp kiến trúc và kỹ thuật mang tính khái quát, tương đối. Khi thiết kế nội thất bị xem nhẹ hoặc chỉ được thực hiện một cách "tương đối", hệ quả tất yếu là chất lượng không gian không được đảm bảo về công năng và cả thẩm mỹ. Chất lượng công trình vì vậy không đáp ứng được nhu cầu sử dụng thực tiễn, thậm chí phát sinh yêu cầu cải tạo ngay khi vừa bàn giao đưa vào sử dụng và hạn chế khả năng đáp ứng nhu cầu đa dạng và cá nhân hóa của người sử dụng không gian.

Thực trạng này cũng phản ánh rõ trong phân khúc nhà ở và dự án đầu tư tư nhân; trước đây trong một thời gian dài; nhiều chủ nhà, chủ đầu tư vẫn xem thiết kế kiến trúc và nội thất là hai phần biệt lập, thậm chí nội thất không được thiết kế mà chỉ được bổ sung dần theo quá trình sử dụng. Trong quá trình thiết kế và xây dựng, việc nhận thức chưa đầy đủ về vai trò của thiết kế nội thất, cùng với thiếu dự toán tổng thể ngay từ giai đoạn đầu khiến quá trình xây dựng diễn ra theo hướng "làm dần", kéo theo nguy cơ vượt mức đầu tư; nguồn lực tài chính bị suy giảm sau khi hoàn thiện phần "vỏ" công trình, dẫn đến hạn chế trong đầu tư cho nội thất - yếu tố quyết định chất lượng sử dụng lại không được tổ chức một cách tương xứng và hiệu quả.

Trong những năm gần đây, cùng với sự nâng cao về mức sống, khái niệm thiết kế nội thất chuyên nghiệp đã dần được thị trường đón nhận; chủ đầu tư ngày càng sẵn sàng trả phí cho các dịch vụ tư vấn thiết kế nội thất như một bước đi tất yếu nhằm hiện thực hóa không gian sống chất lượng. Sự chuyển biến này cho thấy nội thất không còn được xem là phần bổ sung sau cùng, mà đang từng bước trở thành một cấu phần quan trọng trong quá trình đầu tư xây dựng.

Bên cạnh đó, những bất cập trong thực tiễn hành nghề hiện nay cũng phản ánh một "khoảng trống" đáng kể trong hệ thống đào tạo. Khi đào tạo kiến trúc vẫn chiếm ưu thế, trong khi lĩnh vực kiến trúc nội thất chuyên sâu chưa được phát triển tương xứng, đã dẫn đến sự thiếu hụt đội ngũ có năng lực tích hợp giữa tổ chức không gian, hệ thống kỹ thuật công trình và yêu cầu sử dụng thực tiễn. Khoảng trống này không chỉ làm suy giảm chất lượng hành nghề, mà còn trực tiếp ảnh hưởng đến hiệu quả tổ chức không gian và giá trị sử dụng của công trình xây dựng.

Từ thực trạng trên có thể nhận thấy, thiết kế nội thất trong thực tiễn xây dựng tại Việt Nam hiện nay vẫn chưa được xác lập đúng vị trí, đặc biệt trong hệ thống văn bản quy định của Nhà nước. Sự chưa tương thích giữa nhu cầu thực tiễn và khung pháp lý không chỉ làm hạn chế hiệu quả tổ chức không gian, mà còn cho thấy sự cần thiết phải nhìn nhận lại vai trò của thiết kế nội thất như một thành phần cốt lõi trong quá trình đầu tư xây dựng, nhằm nâng cao chất lượng không gian sống và giá trị sử dụng của công trình.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ THỰC TIỄN CỦA QUAN ĐIỂM NỘI THẤT LÀ TRUNG TÂM TRONG MỘT DỰ ÁN XÂY DỰNG

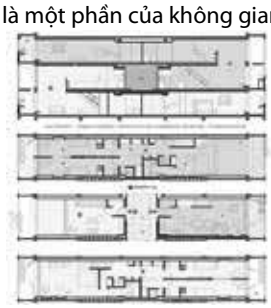
2.1. Nhận thức về thiết kế nội thất và mối quan hệ giữa kiến trúc - nội thất

Trong khi thiết kế kiến trúc nhằm đáp ứng các nhu cầu vật chất và tinh thần của con người, thì thiết kế nội thất hướng tới việc tổ chức và kiến tạo không gian nghệ thuật bên trong công trình. Thiết kế nội thất được triển khai dựa trên một kiến trúc hiện tồn hoặc kiến trúc đã được xác lập trước, đồng thời không ngừng phát triển các giá trị thẩm mỹ và công năng của không gian bên trong, song song với việc giải quyết các vấn đề kỹ thuật nhằm tạo nên một không gian nội thất hoàn chỉnh.

Có thể thấy rằng, kiến trúc và nội thất tồn tại trong mối quan hệ hữu cơ: kiến trúc đóng vai trò như "vỏ bao che" hay "hình thức chứa đựng", trong khi thiết kế nội thất chính là phần "nội dung" bên trong, góp phần hoàn thiện giá trị sử dụng và thẩm mỹ của công trình [1].

Thiết kế nội thất là một công việc mang tính tổng hợp của thực tiễn - nghệ thuật - khoa học. Tính thực tiễn thể hiện ở việc sản phẩm phải đáp ứng nhu cầu của con người - gọi là công năng, thông qua hiệu quả sử dụng không gian và đảm bảo dây chuyền hoạt động. Tính nghệ thuật thể hiện ở cách bài trí, trang trí, lựa chọn mẫu mã, sử dụng ánh sáng, màu sắc, hoa văn phù hợp với đặc điểm của không gian, gây ấn tượng thẩm mỹ tốt và phù hợp tâm sinh lý của người sử dụng. Tính khoa học thể hiện ở việc tiên liệu trước các tình huống trong quá trình sử dụng, từ đó đưa ra các phương án, lựa chọn giải pháp tối ưu; đồng thời tính toán, tạo dựng không gian và bố trí các trang thiết bị một cách hợp lý song song cả công năng lẫn thẩm mỹ, lựa chọn các vật liệu, thiết bị phù hợp và giá cả phải chăng; thi công thuận lợi, thời hạn sử dụng lâu dài [2]. Như vậy có thể thấy được vai trò của Thiết kế nội thất tiệm cận với kiến trúc về việc tổ chức không gian cho công trình. Kiến trúc tạo ra vỏ công trình, đưa ra các hệ thống không gian, phòng chức năng; còn nội thất công năng hóa, cụ thể hóa, nâng cao chất lượng, cụ thể chức năng của từng không gian. Không nên coi nội thất là phần hoàn thiện xuất hiện ở giai đoạn sau để lấp đầy những khoảng trống, mà cần nhìn nhận đây là một lĩnh vực thiết kế chuyên sâu, đảm nhiệm việc tổ chức và tối ưu hóa không gian bên trong công trình; nó là sự giao thoa giữa kỹ thuật kiến trúc và nghệ thuật thiết kế nội thất.

Lịch sử kiến trúc thế giới đã hình thành nhiều quan điểm tiêu biểu về mối quan hệ hữu cơ giữa kiến trúc và nội thất, gắn liền với các nhân vật có ảnh hưởng sâu rộng đến tư duy thiết kế hiện đại. Trong đó có thể điểm qua một số cách tiếp cận đáng chú ý sau: Frank Lloyd Wright, cha đẻ của triết lý kiến trúc hữu cơ (organic architecture) cho rằng kiến trúc và nội thất là một thực tế sống và kiến trúc phát triển từ trong ra ngoài hài hòa với môi trường xung quanh. Với ông nội thất không phải là thứ đặt vào trong công trình sau khi xây xong, mà nó phải được sinh ra từ chính cấu trúc đó. Wright là người tiên phong xóa bỏ ranh giới giữa bên trong và bên ngoài của ngôi nhà, ông nói "Cái ghế không chỉ là một món đồ, nó là một phần của không gian kiến trúc bao quanh nó" [3].



Hình 1a, 1b. Hình ảnh tác giả chụp tại dự án căn hộ Le Corbusier's Unité D'Habitation

Le Corbusier với khái niệm "Nhà là cái máy để ở" cho rằng nội thất là những "thiết bị" phục vụ con người trong một cấu trúc tối ưu như những chi tiết của một cái máy. Hệ thống Modulor của ông là yếu tố gắn kết con người, kiến trúc và nội thất [4].

Một công trình được xem là hoàn chỉnh khi đạt được sự đồng bộ từ trong ra ngoài và từ ngoài vào trong, trong đó kiến trúc và nội thất có sự gắn kết chặt chẽ về cả công năng lẫn thẩm mỹ. phần "vỏ" thực chất chỉ là yếu tố bao che, tạo lập nên khoảng rỗng để con người sử dụng. Do vậy, nội thất chính là phần "hồn" - yếu tố cốt lõi tác động trực tiếp tới trải nghiệm và chất lượng

sống của người sử dụng. Các nhận định của các kiến trúc sư bậc thầy nêu bên trên cho thấy rõ mối quan hệ hữu cơ giữa kiến trúc và nội thất. Khi mối quan hệ này không được nhận thức đầy đủ, những hệ lụy tất yếu sẽ phát sinh. Việc thiếu vắng thiết kế nội thất ngay từ giai đoạn đầu khiến tổ chức công năng không được xác lập rõ ràng, đồng thời làm giảm khả năng phối hợp với các hệ thống kỹ thuật như cơ điện, cấp thoát nước… vốn là những yếu tố gắn chặt với không gian nội thất. Hệ quả là sau khi công trình hoàn thiện có thể phải điều chỉnh, thậm chí cải tạo, dẫn đến lãng phí về thời gian, chi phí và nguồn lực.

2.2. Cơ sở thực tiễn hành nghề thiết kế nội thất tại một số nước và bài học kinh nghiệm cho Việt Nam

Trong bối cảnh quốc tế, thiết kế nội thất ngày càng được công nhận là một thành phần quan trọng của công trình xây dựng, tác động trực tiếp đến an toàn, tiện nghi và hiệu quả sử dụng không gian. Các quốc gia phát triển đã thiết lập các quy chuẩn pháp lý, tiêu chuẩn kỹ thuật và hệ thống chứng chỉ hành nghề bắt buộc nhằm nâng cao tính chuyên nghiệp, bảo vệ quyền lợi công chúng và đảm bảo trách nhiệm pháp lý của người hành nghề.

Ở Hoa Kỳ, thiết kế nội thất tại nhiều bang được quản lý thông qua các quy định hành nghề, trong đó chứng chỉ NCIDQ (National Council for Interior Design Qualification) được sử dụng rộng rãi như một tiêu chuẩn đánh giá năng lực chuyên môn. Chứng chỉ này là một trong các điều kiện quan trọng để tham gia thiết kế các công trình công cộng hoặc thương mại trong các bang có quy định cấp phép hành nghề, đồng thời phản ánh năng lực của nhà thiết kế trong các lĩnh vực như vật liệu, hệ thống xây dựng, an toàn và khả năng tiếp cận [5]. Cơ chế này tạo ra một ràng buộc pháp lý rõ ràng, phân biệt giữa những người có năng lực chuyên môn và những cá nhân chỉ tham gia trang trí thuần túy.

Tương tự, ở Canada, hoạt động hành nghề thiết kế nội thất được quản lý theo cấp tỉnh bang, trong đó NCIDQ được sử dụng như tiêu chuẩn năng lực cốt lõi để được công nhận là "Registered Interior Designer". Quá trình này được điều phối bởi các tổ chức nghề nghiệp và cơ quan quản lý, tiêu biểu là Interior Designers of Canada (IDC), nhằm đảm bảo chất lượng chuyên môn và chuẩn mực hành nghề trong các dự án nội thất [6], tích hợp trong các quy chuẩn xây dựng về an toàn, accessibility và ergonomics. Việc yêu cầu chứng chỉ NCIDQ cùng đăng ký nghề giúp nâng cao chuẩn mực nghề nghiệp và đảm bảo rằng các công trình nội thất công cộng và thương mại được thiết kế bởi những người đủ năng lực chuyên môn.

Một mô hình nổi bật khác là Philippines, nơi Republic Act No. 10350 - Interior Design Act of 2012 đặt ra yêu cầu pháp lý bắt buộc cho nghề thiết kế nội thất. Theo luật, cá nhân muốn hành nghề phải thi đỗ kỳ thi cấp phép do Board of Interior Design, trực thuộc Professional Regulation Commission (PRC) tổ chức và được cấp "certificate of registration" cùng chứng nhận hành nghề. Luật quy định rõ, người không có giấy phép hành nghề sẽ không được sử dụng danh xưng "interior designer" hoặc thực hiện thiết kế nội thất hợp pháp [7].

Mô hình này minh chứng rằng thiết kế nội thất có thể được quản lý bằng luật quốc gia, tương tự như kiến trúc sư hay các ngành kỹ thuật khác, nhằm đảm bảo tiêu chuẩn năng lực, an toàn và trách nhiệm pháp lý trong mọi dự án.

Nhìn chung, các quốc gia này cho thấy một số điểm chung trong quản lý nghề nội thất: tích hợp chứng chỉ hành nghề vào hệ thống quy chuẩn xây dựng, yêu cầu kiến thức kỹ thuật và an toàn, và thiết lập ràng buộc pháp lý rõ ràng. Điều này tạo nên một mức độ chuyên nghiệp và chuẩn hóa cao, đồng thời là cơ sở quan trọng để tham chiếu trong việc hoàn thiện khung pháp lý và quản lý hoạt động thiết kế nội thất tại Việt Nam trong bối cảnh hội nhập quốc tế.

Bảng 1. Khung pháp lý và hệ thống hành nghề thiết kế nội thất trong ngành Xây dựng tại một số quốc gia

Quốc gia (Country)	Chứng chỉ hành nghề/ Bằng cấp (Professional Certification / Qualification)	Cơ quan quản lý (Regulatory Authority)	Luật/Quy định liên quan (Relevant Laws/Regulations)
Hoa Kỳ	Chứng chỉ NCIDQ (National Council for Interior Design Qualification)	Council for Interior Design Qualification (CIDQ); Cơ quan quản lý hành nghề cấp bang (State Regulatory Boards)	Luật hành nghề thiết kế nội thất cấp bang (State Interior Design Practice Acts); yêu cầu năng lực dựa trên NCIDQ
Canada	Chứng chỉ NCIDQ (National Council for Interior Design Qualification); Nhà thiết kế nội thất được đăng ký (Registered Interior Designer - RID)	Cơ quan quản lý hành nghề cấp tỉnh bang (Provincial Regulatory Bodies); Interior Designers of Canada (IDC)	Luật thiết kế nội thất cấp tỉnh bang (Provincial Interior Design Acts); khung quản lý IDC (sử dụng NCIDQ làm tiêu chuẩn năng lực)
Philippines	Kỳ thi cấp phép hành nghề thiết kế nội thất (Licensure Examination for Interior Designers); Chứng nhận đăng ký hành nghề (Certificate of Registration)	Ủy ban Quản lý Nghề nghiệp (Professional Regulation Commission - PRC); Hội đồng Thiết kế Nội thất (Board of Interior Design)	Luật Thiết kế Nội thất Philippines (Republic Act No. 10350, 2012)

3. NHẬN THỨC VỀ VAI TRÒ TRUNG TÂM CỦA THIẾT KẾ NỘI THẤT TRONG MỘT DỰ ÁN XÂY DỰNG

Trong bối cảnh ngành Xây dựng Việt Nam đang chuyển dịch theo hướng nâng cao chất lượng không gian sống và hiệu quả vận hành công trình, thiết kế nội thất cần được nhìn nhận như một cấu phần trung tâm trong một dự án xây dựng. Trên cơ sở tham chiếu kinh nghiệm quốc tế và thực tiễn trong nước, việc định hình các định hướng và giải pháp phát triển lĩnh vực này là cần thiết, nhằm hướng tới một mô hình tổ chức thiết kế đồng bộ, tích hợp và chuyên nghiệp.

Trước hết, cần từng bước hoàn thiện khung pháp lý và cơ chế quản lý hành nghề đối với thiết kế nội thất. Thực tiễn tại nhiều quốc gia cho thấy việc thiết lập hệ thống chứng chỉ hành nghề, gắn với các tiêu chuẩn năng lực và trách nhiệm pháp lý rõ ràng, là nền tảng quan trọng để nâng cao chất lượng chuyên môn và bảo vệ lợi ích cộng đồng. Tại Việt Nam, hiện chưa có quy định cụ thể về cấp phép hành nghề thiết kế nội thất, cũng như chưa xác lập rõ vai trò của các tổ chức nghề nghiệp và cơ quan quản lý nhà nước trong lĩnh vực này. Do đó, cần nghiên cứu xây dựng cơ chế quản lý phù hợp, bao gồm việc ban hành các tiêu chuẩn hành nghề, xác lập hệ thống

chứng chỉ chuyên môn, đồng thời phát huy vai trò của các hội nghề nghiệp trong việc kiểm soát chất lượng và đạo đức nghề nghiệp. Đây không chỉ là yêu cầu về quản lý, mà còn là điều kiện tiên quyết để nâng cao vị thế của thiết kế nội thất trong hệ thống ngành Xây dựng.

Bên cạnh đó, cần định hướng lại vị trí và vai trò của thiết kế nội thất trong quy trình thực hành và phát triển dự án xây dựng. Thực tế hiện nay cho thấy nội thất thường được triển khai ở giai đoạn sau, khi các quyết định về kiến trúc và kỹ thuật đã gần như hoàn tất, dẫn đến hạn chế trong khả năng tổ chức không gian và tích hợp hệ thống. Kinh nghiệm quốc tế cho thấy thiết kế nội thất cần tham gia ngay từ giai đoạn đầu của dự án, tích hợp từ giai đoạn ý tưởng (concept) cùng kiến trúc và các hệ thống kỹ thuật như cơ điện (M&E), điều hòa không khí, chiếu sáng và mạng lưới dữ liệu, nhằm đồng thời giải quyết các vấn đề về công năng, tổ chức không gian, và tích hợp kỹ thuật. Như vậy, nội thất cần được xem xét trong tổng mức đầu tư, với ngân sách được phân bổ ngay từ khi lập dự án sơ bộ. Đặc biệt, đối với các dự án sử dụng vốn đầu tư công hoặc các công trình có quy mô lớn, việc đưa nội thất vào như một thành phần thiết kế ngay từ đầu sẽ góp phần nâng cao hiệu quả đầu tư và chất lượng sử dụng lâu dài.

Trong mối quan hệ với kiến trúc, thiết kế nội thất cần được xác định là một lĩnh vực có tính liên kết hữu cơ nhưng có phạm vi chuyên môn riêng. Kiến trúc có thể được xem là hệ thống tổ chức không gian tổng thể, bao gồm cấu trúc công trình, hệ thống giao thông và phân khu chức năng; trong khi đó, thiết kế nội thất tập trung vào tổ chức không gian bên trong, hoàn thiện môi trường sử dụng, tích hợp các hệ thống kỹ thuật và thiết bị, cũng như tạo lập trải nghiệm không gian cho người dùng. Việc xác định rõ ranh giới và phạm vi công việc giữa hai lĩnh vực này không nhằm tách rời, mà để tạo cơ sở cho sự phối hợp hiệu quả, tránh chồng chéo và nâng cao trách nhiệm chuyên môn. Một công trình được coi là thành công khi đạt được sự đồng bộ từ tổng thể kiến trúc đến chi tiết nội thất, theo cả hai chiều "từ ngoài vào trong" và "từ trong ra ngoài". Đây là những vấn đề có ý nghĩa nền tảng, cần được nghiên cứu một cách hệ thống và liên ngành.

Trong bối cảnh thiết kế nội thất được xác định là thành tố cốt lõi, trực tiếp định hướng chất lượng không gian và giá trị sử dụng của dự án, vấn đề đào tạo nguồn nhân lực cần được nhìn nhận như một yêu cầu mang tính cấp thiết. Điều này đặt ra yêu cầu cần xây dựng các chương trình đào tạo theo hướng tích hợp giữa mỹ thuật, kiến trúc và kỹ thuật xây dựng, đồng thời tăng cường gắn kết với môi trường hành nghề thông qua các dự án thực tiễn và sự tham gia của doanh nghiệp. Trong cách tiếp cận đó, thiết kế nội thất không đứng sau kiến trúc, mà cần được nhìn nhận như trung tâm tổ chức không gian sống, giữ vai trò quyết định đến hiệu quả sử dụng và giá trị vận hành của công trình. Việc nâng cao chất lượng đào tạo vì vậy không chỉ nhằm hoàn thiện năng lực chuyên môn cho đội ngũ thiết kế nội thất, mà còn góp phần định hình lại nhận thức xã hội, chuyển dịch từ cách hiểu nội thất như một hoạt động trang trí sang một lĩnh vực kỹ thuật - sáng tạo có vai trò chi phối trong toàn bộ quá trình hình thành và vận hành công trình, qua đó từng bước khẳng định vị thế trung tâm của thiết kế nội thất trong dự án xây dựng.

4. KẾT LUẬN

Trong bối cảnh ngành Xây dựng trong kỷ nguyên vươn mình của dân tộc, đây là thời điểm cần nhìn nhận lại một cách toàn diện và khoa học vị trí của thiết kế nội thất trong tiến trình đầu tư xây dựng. Thiết kế nội thất không còn là phần việc hoàn thiện bị động sau khi xây dựng dự án, mà là một cấu phần trung tâm của công trình, tham gia ngay từ giai đoạn đầu, gắn kết hữu cơ với kiến trúc nhằm đảm bảo hiệu quả sử dụng, an toàn và chất lượng không gian sống. Thực tiễn hiện nay đặt ra yêu cầu cấp thiết phải hoàn thiện cơ chế quản lý hành nghề, xây dựng hành lang pháp lý rõ ràng và nâng cao chất lượng đào tạo nguồn nhân lực trong lĩnh vực thiết kế nội thất. Khi mà khoảng trống giữa đào tạo và nhu cầu thực tiễn vẫn còn tồn tại, việc học hỏi kinh nghiệm quốc tế và từng bước chuẩn hóa hoạt động hành nghề là một định hướng cần thiết, góp phần nâng cao tính chuyên nghiệp và trách nhiệm trong hoạt động thiết kế. Một công trình không thể đạt được hiệu quả và giá trị bền vững nếu chỉ được giải quyết tốt phần kiến trúc bên ngoài mà bỏ ngỏ chất lượng không gian bên trong. Vì vậy, việc nâng cao nhận thức về vai trò trung tâm của thiết kế nội thất không chỉ là một yêu cầu chuyên môn, mà còn là đòi hỏi tất yếu trong chiến lược phát triển ngành xây dựng, hướng tới mục tiêu nâng cao chất lượng công trình, chất lượng sống và hiệu quả đầu tư trong giai đoạn phát triển mới của đất nước.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Đặng Thái Hoàng. Kiến trúc nội thất. NXB Xây dựng, Hà Nội, 2023.

[2] Ngô Minh Thịnh. Thiết kế nội thất. Sách phục vụ đào tạo Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội, 2022.

[3] Frank Lloyd Wright. The Natural House, New York: Horizon Press, 1954.

[4] Le Corbusier, Vers une Architecture. Paris: Éditions Crès, 1923.

[5] Council for Interior Design Qualification (CIDQ). About NCIDQ Certification. Internet: https://www.cidq.org/about (truy cập tháng 11/2025).

[6] Interior Designers of Canada (IDC). Becoming a Registered Interior Designer in Canada. Internet: https://idcanada.org/become-a-designer/ (truy cập tháng 11/2025).

[7] Republic of the Philippines. Republic Act No. 10350 - Interior Design Act of 2012. Internet: https://lawphil.net/statutes/repacts/ra2012/ra_10350_2012.html (truy cập tháng 11/2025).

■Ngày nhận bài: 26/02/2026 ■Ngày sửa bài: 05/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 12/3/2026

Nghiên cứu giải pháp tổ chức không gian kiến trúc - cảnh quan khu dân cư thích ứng với điều kiện khí hậu bất lợi tại vùng Tây Nam Bộ Việt Nam

Research planning solutions - residential architecture to adapt to climate change in South West Delta area Vietnam

> THS.KTS LÊ BÁ THÁI QUYỀN, TS.KTS LÊ KIM THƯ*
Học viện Kỹ thuật quân sự
*Email: Thulk@lqdtu.edu.vn

TÓM TẮT

Các tỉnh miền Tây Nam Bộ (MTNB) đang và sẽ tiếp tục phải đối mặt với những tác động ngày càng gia tăng của biến đổi khí hậu (BĐKH). Biểu hiện rõ nét là nhiệt độ tăng cao, hạn hán khốc liệt, xâm nhập mặn diễn ra thường xuyên; triều cường và sạt lở bờ sông, bờ biển diễn biến phức tạp. Những yếu tố này ảnh hưởng nghiêm trọng đến đời sống dân cư, cũng như các hoạt động quy hoạch, kiến trúc, xây dựng, sản xuất và an sinh xã hội. Hằng năm, Nhà nước và người dân trong khu vực phải tiêu tốn đáng kể nguồn lực tài chính và công sức để khắc phục các tác động bất lợi từ thiên nhiên. Tuy nhiên, đến nay vẫn chưa có các giải pháp căn cơ, mang tính bền vững và lâu dài. Vì vậy, nghiên cứu này hướng tới việc đóng góp cơ sở lập luận khoa học và đề xuất một số giải pháp cụ thể.

Từ khóa: Quy hoạch; kiến trúc; thích ứng; dân cư; môi trường...

ABSTRACT

The provinces in the Mekong Delta (Mekong DELTA) have been faced with the increasingly powerful impact of climate change. Apparent expression is the rising temperature, fierce drought, saline intrusion taking place regularly, the tide and the river landslide, the complicated coastline, which greatly influences the unstable life of the population on planning work, architecture, construction, manufacturing, living life and social security work. The annual State and people of this influence have to spend a lot of effort and finances to overcome the adverse problems that nature brings. However, it has yet to offer a long-lasting, sustainable base solution. So the topic would like to contribute a number of scientific reasoning issues and propose some specific measures.

Keywords: Planning; architecture; adaptation; residential; environment...

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL) là vùng đất thấp ven biển của Việt Nam, được đánh giá là khu vực chịu tác động nặng nề nhất của BĐKH. Trong mùa khô, nhiều tỉnh trong vùng đang bị xâm nhập mặn sâu, gây thiệt hại cho sản xuất nông nghiệp và thiếu nước ngọt phục vụ sinh hoạt. Vào mùa mưa lũ, tình trạng sạt lở bờ sông, bờ biển diễn ra nghiêm trọng, làm sập và cuốn trôi nhà cửa, đồng thời tiếp tục lấn sâu vào đất liền, biến nhiều khu dân cư trước đây thành các vùng sông nước.

Ứng phó với mực nước biển dâng, sạt lở và xâm nhập mặn là nhiệm vụ có ý nghĩa đặc biệt quan trọng trên nhiều phương diện như kinh tế, xã hội và an ninh quốc phòng, không chỉ đối với ĐBSCL mà còn đối với cả nước.

Đồng bằng Tây Nam Bộ của Việt Nam là vùng hạ lưu của lưu vực sông Mekong trước khi đổ ra biển. Đây là khu vực đất thấp, được xem là vùng đất ngập nước lớn nhất cả nước. Hằng năm, từ tháng 8 đến tháng 10, khu vực này chịu ảnh hưởng của lũ từ sông Mekong, đặc biệt tại các vùng như Đồng Tháp Mười, Tứ giác Long Xuyên và khu vực giữa sông Tiền và sông Hậu.

Đồng bằng Tây Nam Bộ là một trong những đồng bằng lớn và phì nhiêu nhất Đông Nam Á, thậm chí trên thế giới. Đây là vùng trọng điểm về sản xuất và xuất khẩu lương thực, đồng thời là khu vực trồng cây ăn trái nhiệt đới lớn nhất Việt Nam. Khu vực này cũng giữ vai trò quan trọng đối với Nam Bộ và cả nước trong bảo đảm an ninh quốc phòng, phát triển kinh tế, cũng như thúc đẩy hợp tác đầu tư và giao thương quốc tế.

Trong thời gian dài, công tác quy hoạch, kiến trúc và xây dựng các khu dân cư tại Đồng bằng Tây Nam Bộ còn mang tính kinh nghiệm, thiếu sự định hướng tổng thể. Nguyên nhân một phần là do trước đây, các yếu tố như lũ lụt, BĐKH và nước biển dâng chưa

được nhận thức đầy đủ hoặc chưa thể hiện rõ tác động trong đời sống và phát triển của khu vực.

Nói chung, khu vực Đồng bằng Tây Nam Bộ đang đối mặt với nhiều vấn đề cấp bách cần được quan tâm giải quyết, bao gồm:

• Các vấn đề về quy hoạch, kiến trúc và xây dựng khu dân cư thích ứng với lũ lụt, triều cường và nước biển dâng trong bối cảnh BĐKH;

• Đảm bảo nguồn nước ngọt phục vụ sinh hoạt và sản xuất trong điều kiện xâm nhập mặn ngày càng gia tăng;

• Những thách thức trong sinh kế và đời sống của người dân dưới tác động của lũ lụt và BĐKH;

• Vấn đề thích ứng của cư dân với điều kiện "sống chung với lũ" và BĐKH;

• Tình trạng sụt lún đất và sạt lở bờ sông, bờ biển gây tổn thất lớn về môi trường, nhà ở và tài sản;

• Các vấn đề về hạ tầng kỹ thuật và hạ tầng xã hội;

• Những hạn chế trong phát triển giáo dục và đào tạo tại khu vực.

Trong bối cảnh BĐKH, nhiều diện tích của vùng Đồng bằng Tây Nam Bộ được dự báo có nguy cơ bị ngập với mực nước khoảng 1 m vào năm 2070. Đây là nhận định do Viện Quy hoạch Thủy lợi miền Nam đưa ra tại hội thảo về đánh giá quy hoạch thủy lợi vùng trong điều kiện thích ứng với BĐKH và nước biển dâng. Kết quả hội thảo cho thấy, khi mực nước biển dâng gần 1 m, hơn 40% diện tích toàn vùng có nguy cơ bị ngập.

BĐKH đang diễn biến ngày càng nghiêm trọng, đòi hỏi phải có các giải pháp toàn diện, bao gồm cả quy hoạch và kiến trúc khu dân cư, nhằm thích ứng với điều kiện "sống chung với lũ" và BĐKH. Thực tế cho thấy, cư dân vùng này đã có lịch sử thích nghi hơn 300 năm, tuy nhiên trong bối cảnh mới, các giải pháp cần được nghiên cứu và hoàn thiện ở mức độ cao hơn. Trên thực tế, các giải pháp về quy hoạch và kiến trúc khu dân cư tại Đồng bằng Tây Nam Bộ không phải là vấn đề mới. Tuy nhiên, việc tổ chức quy hoạch và thiết kế kiến trúc các công trình trong khu dân cư nhằm thích ứng với BĐKH, đồng thời phù hợp với điều kiện kinh tế - xã hội, hướng tới phát triển bền vững, vẫn là một vấn đề phức tạp cần được tiếp tục nghiên cứu một cách toàn diện và sâu sắc. Từ trước đến nay, việc khai thác các lợi thế phát triển kinh tế của vùng Đồng bằng Tây Nam Bộ luôn giữ vai trò quan trọng trong chiến lược phát triển quốc gia. Các chủ trương, chính sách của Đảng và Nhà nước đối với khu vực này đều hướng tới mục tiêu nâng cao đời sống vật chất và tinh thần của người dân. Những chính sách này đã, đang và sẽ tiếp tục được triển khai nhằm phát triển Đồng bằng Tây Nam Bộ, cùng với TP.HCM, trở thành cực tăng trưởng của vùng Nam Bộ và cả nước.

Trong bối cảnh BĐKH, yêu cầu đặt ra là các khu dân cư phải có khả năng thích ứng với các điều kiện tự nhiên ngày càng bất lợi. Việc tổ chức quy hoạch và thiết kế kiến trúc các khu dân cư thích ứng với BĐKH tại Đồng bằng Tây Nam Bộ, nhằm hướng tới phát triển bền vững, là một vấn đề khó khăn do những đặc thù về điều kiện tự nhiên và khí hậu, cũng như diễn biến ngày càng phức tạp và khó lường của thời tiết trong khu vực.

Như đã trình bày ở trên, khu vực Đồng bằng Tây Nam Bộ đang đối mặt với nhiều vấn đề bức thiết cần được quan tâm và giải quyết. Trong khuôn khổ bài báo, nhóm tác giả tập trung vào một số vấn đề cốt lõi nhằm nghiên cứu và giải quyết thấu đáo hơn nội dung "Tổ chức quy hoạch và tổ hợp kiến trúc các khu dân cư thích ứng với biến đổi khí hậu tại Đồng bằng Tây Nam Bộ", qua đó góp phần thúc đẩy sự phát triển bền vững của khu vực.

- Các vấn đề về quy hoạch, kiến trúc và xây dựng khu dân cư thích ứng với lũ lụt và triều cường trong bối cảnh BĐKH;

- Đề xuất giải pháp quy hoạch và kiến trúc khu dân cư thích ứng với biến đổi khí hậu và điều kiện kinh tế - xã hội tại địa bàn nghiên cứu;

- Các vấn đề liên quan đến đời sống, đặc biệt là sinh kế của người dân trong điều kiện lũ lụt và triều cường gia tăng do BĐKH;

- Đề xuất giải pháp quy hoạch và kiến trúc khu dân cư đảm bảo nguồn nước ngọt phục vụ sinh hoạt và sản xuất của cư dân;

- Bên cạnh đó, do điều kiện thời tiết biến động phức tạp và các nguyên nhân gây sạt lở bờ sông, bờ biển tại những khu vực tập trung dân cư truyền thống, cần xem xét các khó khăn và thuận lợi trong quá trình sinh sống và sản xuất của người dân, qua đó làm cơ sở cho các đề xuất của đề tài.

Trong phạm vi bài viết, tác giả tập trung nghiên cứu và đề xuất các mô hình khu dân cư thích ứng vớ BĐKH, đồng thời phù hợp với điều kiện kinh tế - xã hội trong quá trình phát triển tại các vùng đặc thù sau:

• Mô hình khu dân cư gắn với hệ thống kênh rạch, góp phần hạn chế ngập lụt, không ảnh hưởng đến sản xuất, đồng thời tăng khả năng tiêu thoát nước, giảm ngập úng cục bộ;

• Mô hình khu dân cư gắn với hệ thống trữ nước ngọt nhằm đảm bảo đời sống và sản xuất trong điều kiện xâm nhập mặn và hạn hán;

• Mô hình khu dân cư tại các vùng thường xuyên ngập sâu do lũ lụt, triều cường và nước biển dâng trong bối cảnh BĐKH;

• Mô hình khu dân cư gắn với sông, biển và kênh rạch tại các khu vực có nguy cơ sạt lở cao.

Như vậy, bài báo đã xác định hướng nghiên cứu nhằm hướng tới việc xây dựng các khu dân cư vừa thích ứng với BĐKH, vừa phù hợp với điều kiện kinh tế - xã hội của khu vực. Bài báo tập trung nghiên cứu các giải pháp về mô hình tổ chức quy hoạch và tổ hợp không gian kiến trúc của các loại hình công trình trong khu dân cư tại những địa bàn nghiên cứu cụ thể thuộc vùng Đồng bằng Tây Nam Bộ. Các mô hình đề xuất có khả năng áp dụng rộng rãi trong toàn vùng, qua đó góp phần giúp Đồng bằng Tây Nam Bộ, một vùng châu thổ giàu tiềm năng của Tổ quốc - phát triển theo hướng bền vững. Đây chính là ý nghĩa nhân văn và kinh tế - xã hội của bài báo.

Như vậy, nghiên cứu đã xác định rõ định hướng nhằm xây dựng các khu dân cư vừa thích ứng với BĐKH, vừa phù hợp với điều kiện kinh tế - xã hội của khu vực. Nghiên cứu tập trung đề xuất các giải pháp về mô hình tổ chức quy hoạch và tổ hợp không gian kiến trúc cho các loại hình công trình trong khu dân cư tại những địa bàn cụ thể thuộc vùng ĐBSCL. Các mô hình đề xuất có khả năng áp dụng rộng rãi trong toàn vùng, qua đó góp phần thúc đẩy sự phát triển bền vững của Đồng bằng Tây Nam Bộ - một vùng châu thổ giàu tiềm năng của đất nước. Đây chính là ý nghĩa khoa học và thực tiễn, đồng thời mang giá trị kinh tế - xã hội của nghiên cứu.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nội dung 1: Nghiên cứu kinh nghiệm quy hoạch - kiến trúc khu dân cư thích ứng với BĐKH và điều kiện kinh tế - xã hội, hướng tới phát triển bền vững Đồng bằng Tây Nam Bộ

• **Công việc 1:** Thu thập và nghiên cứu các kinh nghiệm về tổ chức quy hoạch và tổ hợp không gian kiến trúc khu dân cư thích ứng với BĐKH và điều kiện kinh tế - xã hội;

• **Công việc 2:** Phân tích, so sánh, nhận xét và đánh giá các kinh nghiệm về tổ chức quy hoạch và tổ hợp không gian kiến trúc khu dân cư trong điều kiện BĐKH;

• **Công việc 3:** Xác định các vấn đề còn tồn tại trong công tác quy hoạch và tổ chức không gian kiến trúc khu dân cư thích ứng với BĐKH và điều kiện kinh tế - xã hội;

• **Công việc 4:** Xác định nhiệm vụ nghiên cứu.

Nội dung 2: Xây dựng cơ sở khoa học

• **Công việc 1:** Xây dựng cơ sở khoa học phục vụ nghiên cứu;

• **Công việc 2:** Phân tích cơ sở khoa học và xác định các nguyên tắc cơ bản làm tiền đề cho việc đề xuất giải pháp tổ chức quy hoạch và tổ hợp không gian kiến trúc khu dân cư thích ứng với BĐKH và điều kiện kinh tế - xã hội, nhằm góp phần phát triển bền vững Đồng bằng Tây Nam Bộ.

Nội dung 3: Đề xuất giải pháp quy hoạch - kiến trúc khu dân cư thích ứng với biến đổi khí hậu và điều kiện kinh tế - xã hội

• **Công việc 1:** Đề xuất giải pháp tổ chức quy hoạch khu dân cư thích ứng với BĐKH và điều kiện kinh tế - xã hội, hướng tới phát triển bền vững Đồng bằng Tây Nam Bộ;

• **Công việc 2:** Đề xuất giải pháp tổ chức không gian kiến trúc khu dân cư thích ứng với BĐKH và điều kiện kinh tế - xã hội;

• **Công việc 3:** Đề xuất giải pháp tổ chức không gian kiến trúc một số công trình dân sinh cơ bản (nhà ở, trạm y tế, cơ sở giáo dục) phù hợp với các mô hình khu dân cư.

• **Công việc 4:** Đề xuất giải pháp tổ chức không gian kiến trúc cảnh quan cho các mô hình khu dân cư khác nhau, trong đó đặc biệt chú trọng đến không gian kiến trúc cảnh quan của các công trình dân sinh cơ bản như nhà ở, trạm y tế và cơ sở giáo dục.

3. KẾT QUẢ

a) Tác động đến xã hội - kinh tế và môi trường và tác động đối với ngành, lĩnh vực khoa học

Kết quả nghiên cứu của bài báo có thể là tài liệu tham khảo cho các cơ quan chuyên ngành quy hoạch - kiến trúc và các đơn vị quản lý xây dựng từ Trung ương đến địa phương tại các tỉnh, thành phố thuộc vùng Đồng bằng Tây Nam Bộ, cũng như các khu vực có điều kiện tự nhiên - khí hậu và kinh tế - xã hội tương tự. Đồng thời, nghiên cứu có thể hỗ trợ công tác hoạch định chính sách liên quan đến di dân, bố trí tái định cư, điều chuyển và phát triển dân cư trong khu vực.

Kết quả nghiên cứu cũng có thể là cơ sở khoa học cho việc xây dựng tiêu chuẩn quy hoạch và kiến trúc các khu dân cư thích ứng với biến đổi khí hậu và điều kiện kinh tế - xã hội, qua đó góp phần thúc đẩy phát triển bền vững Đồng bằng Tây Nam Bộ.

b) Tác động đối với lĩnh vực có liên quan

Kết quả nghiên cứu là nguồn tài liệu tham khảo phục vụ xây dựng chiến lược phát triển nông thôn và kinh tế nông nghiệp tại vùng Đồng bằng Tây Nam Bộ. Đồng thời, nghiên cứu cung cấp cơ sở tham khảo cho định hướng phát triển thủy nông tại một số khu vực trong vùng.

Bên cạnh đó, nghiên cứu góp phần cung cấp luận cứ khoa học cho việc hoạch định chính sách đảm bảo nguồn nước ngọt phục vụ đời sống và sản xuất trong điều kiện xâm nhập mặn và hạn hán ngày càng gia tăng.

Ngoài ra, nghiên cứu còn cung cấp cơ sở khoa học cho việc định hướng sử dụng các loại cấu kiện xây dựng đúc sẵn có trọng lượng nhẹ, chất lượng cao, dễ lắp ghép, tháo dỡ và di chuyển, qua đó nâng cao khả năng huy động lực lượng tại chỗ trong xây dựng, tháo dỡ và tái thiết trong điều kiện thiên tai hoặc các tình huống bất thường.

c) Tác động đối với tổ chức chủ trì và các cơ sở ứng dụng kết quả nghiên cứu

Kết quả nghiên cứu góp phần đề xuất các giải pháp mang tính khoa học và hiện đại, hỗ trợ các cơ quan quản lý trong bối cảnh Cách mạng công nghiệp 4.0, đảm bảo tính đồng bộ, hiệu quả và phù hợp thực tiễn.

Nghiên cứu cung cấp cơ sở dữ liệu và luận cứ khoa học phục vụ công tác xây dựng kế hoạch phát triển khu dân cư thích ứng với biến đổi khí hậu và điều kiện kinh tế - xã hội, qua đó góp phần thúc đẩy phát triển bền vững Đồng bằng Tây Nam Bộ.

Đồng thời, nghiên cứu là tài liệu tham khảo cho các đơn vị quản lý và tư vấn trong việc lựa chọn phương án quy hoạch và kiến trúc khu dân cư thích ứng với BĐKH tại khu vực nghiên cứu.

Giải pháp quy hoạch - kiến trúc khu dân cư hướng tới mục tiêu phát triển bền vững, trên cơ sở chủ động thích ứng với các hiện tượng như lũ lụt, sạt lở, ngập úng, nước lợ và xâm nhập mặn, đồng thời đề xuất các giải pháp ứng phó với thiên tai như bão, hạn hán và các tác động bất lợi gia tăng do BĐKH và biến động dòng chảy thượng nguồn sông Mekong.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] CEM (International Centre for Environmental Management), Biến đổi khí hậu ở Việt Nam và các giải pháp ứng phó, Hội thảo khoa học, 2009.

[2] Ngô Huy Quỳnh, Lịch sử kiến trúc Việt Nam, 1998.

[3] Lê Thị Hồ Vi, "Kiến trúc nhà ở truyền thống của người Việt thích ứng với khí hậu tại Đồng bằng sông Cửu Long", Tạp chí Kiến trúc, tháng 4/2026.

[4] Trương Hữu Quýnh, Đại cương Lịch sử Việt Nam, 2001.

[5] Nguyễn Hữu Dũng, Phạm Thúy Hương, Dân số và phát triển ở Việt Nam, 2004.

[6] Hội Kiến trúc sư Việt Nam, Tập hợp các bài viết của Tạp chí Kiến trúc 1983-2003, 2004.

[7] John M. Levy, Quy hoạch đô thị đương đại, 2017.

■Ngày nhận bài: 26/02/2026 ■Ngày sửa bài: 05/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 12/3/2026

Ứng dụng công nghệ cao trong trùng tu và khai thác bền vững di sản Địa đạo Củ Chi cho du lịch và giáo dục

Application of Advanced Technologies in the Conservation and Sustainable Utilization of the Cu Chi Tunnels Heritage for Tourism and Education

> THS.KTS VÕ NGỌC TRƯỞNG, TS.KTS NGUYỄN BẢO THÀNH*, TS.KTS TRẦN ANH TUẤN
Khoa Kiến trúc, Trường Đại học Văn Lang; *Email: thanh.nb@vlu.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu khai thác bền vững di sản Địa đại Củ Chi cho du lịch và giáo dục đề xuất các giải pháp bảo tồn công trình kiến trúc ngầm tiêu biểu này. Trên cơ sở khảo sát thực địa, phân tích lịch sử và đánh giá hiện trạng kiến trúc, kết cấu, vi khí hậu, nghiên cứu cho thấy di tích đang xuống cấp nghiêm trọng do khí hậu nhiệt đới ẩm, nước ngầm, sinh vật xâm thực và áp lực du lịch. Các phương pháp gia cố truyền thống tuy hiệu quả ngắn hạn nhưng ảnh hưởng đến tính nguyên gốc của di tích.

Nghiên cứu đề xuất cách tiếp cận liên ngành giữa kiến trúc, kỹ thuật xây dựng và bảo tồn di sản, nhấn mạnh vai trò của đất xử lý bằng công nghệ cao như giải pháp ít xâm lấn, phù hợp với nguyên tắc bảo tồn quốc tế. Ba nhóm giải pháp chính gồm: (1) gia cố, ổn định và đảm bảo an toàn kết cấu; (2) bảo tồn tính nguyên gốc và kéo dài tuổi thọ; (3) hoàn thiện cơ chế quản lý, khai thác bền vững gắn với du lịch và giáo dục. Kết quả góp phần bổ sung cơ sở khoa học cho ứng dụng công nghệ cao trong bảo tồn di tích ngầm tại Việt Nam, đồng thời mở ra hướng tiếp cận bền vững, tôn trọng yếu tố gốc và thích ứng với điều kiện hiện đại.

Từ khóa: Địa đạo Củ Chi; bảo tồn di sản; công nghệ đất xử lý; kiến trúc ngầm; du lịch bền vững; giáo dục di sản.

ABSTRACT

This study proposes solutions to preserve this representative underground architectural structure. Based on field surveys, historical analysis, and assessments of architectural, structural, and microclimatic conditions, the study indicates that the site is undergoing severe deterioration due to the tropical humid climate, groundwater, biological intrusion, and tourism pressure. Traditional reinforcement methods, while effective in the short term, tend to compromise the authenticity of the heritage.

The research proposes an interdisciplinary approach integrating architecture, construction engineering, and heritage conservation, emphasizing the role of technologically treated soil as a minimally invasive solution aligned with international conservation principles. Three main groups of solutions are identified: (1) structural reinforcement, stabilization, and safety assurance; (2) preservation of authenticity and extension of the structure's lifespan; and (3) improvement of management mechanisms and sustainable utilization associated with tourism and education.

The findings contribute to the scientific foundation for applying advanced technologies to the conservation of underground heritage in Vietnam, while also opening the way for a sustainable approach that respects original values and adapts to contemporary conditions.

Keywords: Cu Chi Tunnels; heritage conservation; treated soil technology; underground architecture; sustainable tourism; heritage education.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Công tác bảo tồn và trùng tu di tích kiến trúc giữ vai trò quan trọng trong chiến lược gìn giữ di sản văn hóa của mỗi quốc gia (Jokilehto, 2005). Các di tích không chỉ mang giá trị thẩm mỹ, không gian và kỹ thuật xây dựng mà còn là "tư liệu sống" phản ánh đời sống văn hóa, tôn giáo, tín ngưỡng và lịch sử cộng đồng (Phan Huy Lê, 2012). Tuy nhiên, dưới tác động của điều kiện tự nhiên, biến đổi khí hậu, đô thị hóa nhanh và những can thiệp chưa phù hợp, nhiều di tích địa đạo khu vực phía Nam - đặc biệt là Địa đạo Củ Chi - đang xuống cấp nghiêm trọng (Sở Văn hóa và Thể thao TP.HCM, 2020). Sự suy yếu nền móng và môi trường địa chất là nguyên nhân chính gây mất ổn định kết cấu và nguy cơ sụp đổ.

Các phương pháp gia cố nền móng truyền thống như cọc bê tông, khoan phụt vữa, tường vây thường mang tính xâm lấn, tác động lớn đến cấu trúc gốc và có thể làm sai lệch hiện trạng, đi ngược nguyên tắc bảo tồn quốc tế như tính nguyên gốc và can thiệp tối thiểu (ICOMOS, 1964; Feilden, 2003). Thực tế cho thấy các phương pháp này đôi khi không đáp ứng hiệu quả trong điều kiện đất yếu phức tạp hoặc không gian thi công chật hẹp.

Trong bối cảnh đó, công nghệ đất đông cứng được xem là giải pháp kỹ thuật tiềm năng trong bảo tồn di tích Địa đạo Củ Chi. Công nghệ này sử dụng tác nhân làm lạnh để biến đất tự nhiên thành khối đất có cường độ cao, ổn định và khả năng chống thấm tốt (Andersland & Ladanyi, 2004; Schubert, 2002). Ưu điểm nổi bật là không cần đào bới, không làm biến dạng nền móng và không can thiệp trực tiếp vào vật liệu di tích, qua đó đảm bảo giữ gìn tối đa giá trị nguyên trạng.

Mặc dù đã được ứng dụng rộng rãi trên thế giới, tại Việt Nam công nghệ này vẫn còn hạn chế trong lĩnh vực bảo tồn di tích, chủ yếu áp dụng trong các công trình hạ tầng kỹ thuật hoặc thi công ngầm đô thị (Lê Văn Năm, 2017). Các nghiên cứu chuyên sâu về điều kiện áp dụng, hiệu quả kỹ thuật và khả năng tương thích với môi trường di tích còn chưa nhiều, chưa hình thành quy trình tiêu chuẩn.

Do đó, "Sử dụng công nghệ cao trong công tác trùng tu và khai thác bền vững gắn với du lịch, giáo dục của di sản Địa đạo Củ Chi" có ý nghĩa khoa học và thực tiễn quan trọng. Qua đó góp phần mở rộng ứng dụng công nghệ cao trong bảo tồn, cung cấp giải pháp xử lý nền móng hiệu quả, ít xâm lấn, đáp ứng yêu cầu bảo tồn nguyên trạng, đồng thời thúc đẩy xu hướng ứng dụng khoa học - công nghệ phù hợp với bối cảnh chuyển đổi số và phát triển bền vững (UNESCO, 2021).

2. THỰC TRẠNG DI SẢN KIẾN TRÚC ĐỊA ĐẠO VÀ CÔNG TÁC BẢO TỒN

2.1. Khái quát lịch sử hình thành

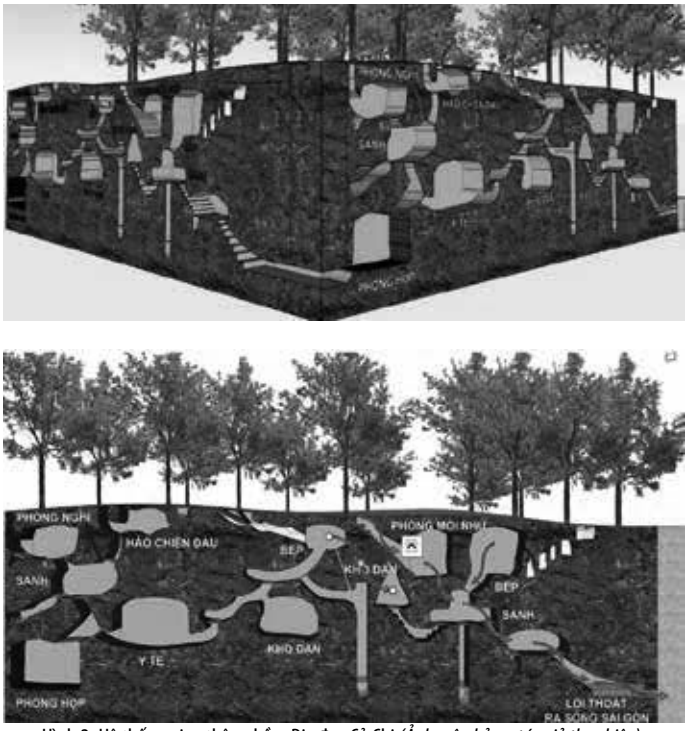
Địa đạo Củ Chi hình thành sau Cách mạng Tháng Tám 1945 trong bối cảnh kháng chiến chống Pháp. Trước yêu cầu tránh bom pháo, giữ bí mật lực lượng và duy trì cơ sở cách mạng, người dân các xã như Tân Phú Trung, Phước Vĩnh An, Nhuận Đức đã đào các hầm bí mật nhỏ. Ban đầu chỉ là hố ẩn nấp, sau đó các hầm được nối lại thành những đoạn đường hầm ngắn giữa các hộ gia đình, hình thành tiền đề cho hệ thống địa đạo phát triển về sau.

Hình 1. Dân quân tự vệ đào chiến hào (Nguồn: Tạp chí lịch sử Đảng, 2025)

Công tác bảo tồn và trùng tu di tích kiến trúc giữ vai trò quan trọng trong việc gìn giữ di sản văn hóa (Jokilehto, 2005). Di tích không chỉ có giá trị thẩm mỹ, kỹ thuật mà còn là "tư liệu sống" phản ánh văn hóa, tôn giáo và lịch sử cộng đồng (Phan Huy Lê, 2012). Tuy nhiên, nhiều di tích địa đạo phía Nam, đặc biệt là Địa đạo Củ Chi, đang xuống cấp nghiêm trọng do khí hậu, nước ngầm, đô thị hóa và tác động của con người (Sở Văn hóa và Thể thao TP.HCM, 2020). Suy yếu nền móng là nguyên nhân chính gây mất ổn định kết cấu.

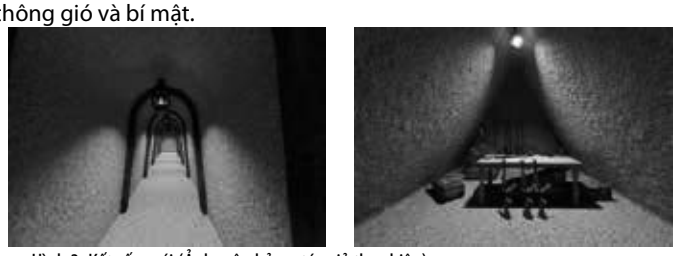
Các phương pháp gia cố truyền thống mang tính xâm lấn, dễ làm sai lệch hiện trạng và không phù hợp với nguyên tắc bảo tồn (ICOMOS, 1964). Trong khi đó, công nghệ đất đông cứng cho phép gia cố, ổn định, chống thấm mà không can thiệp trực tiếp vào di tích. Dù phổ biến trên thế giới, công nghệ này ở Việt Nam còn hạn chế.

Nghiên cứu góp phần đề xuất giải pháp bảo tồn hiệu quả, ít xâm lấn và phù hợp với phát triển bền vững.



Hình 2. Hệ thống giao thông hầm Địa đạo Củ Chi *(Ảnh mô phỏng, tác giả thực hiện)*

Giai đoạn 1965 - 1968 là thời kỳ phát triển hoàn chỉnh nhất của Địa đạo Củ Chi, với chiều dài khoảng 250 km, sâu 3-10 m, gồm 2-3 tầng liên thông. Mỗi khu vực có hầm hội họp, bệnh xá, kho vũ khí, bếp Hoàng Cầm và lối thoát hiểm ra sông Sài Gòn (Nguyễn Văn Huyên, 2016). Hệ thống đóng vai trò quan trọng trong việc bảo vệ lực lượng du kích và hỗ trợ Chiến dịch Mậu Thân 1968. Kết cấu sử dụng đất sét pha laterit có độ kết dính cao, chống sụt lở (Lê Văn Năm, 2017), kết hợp thông hơi ngụy trang dạng ụ mối để đảm bảo thông gió và bí mật.



Hình 3. Kết cấu mái (Ảnh mô phỏng, tác giả thực hiện)

2.2. Ý nghĩa lịch sử, văn hóa và giá trị đặc biệt của di sản

Địa đạo Củ Chi là biểu tượng tiêu biểu của chiến tranh du kích ở miền Nam Việt Nam, thể hiện trí tuệ quân sự và ý chí kiên cường của quân dân. Đây không chỉ là căn cứ kháng chiến mà còn là di sản vật thể gắn với ký ức cộng đồng và bản sắc văn hóa vùng Nam Bộ trong thời kỳ chiến tranh (Phan Huy Lê, 2012).

Về giá trị lịch sử, địa đạo có mối liên hệ trực tiếp với các sự kiện quan trọng, phản ánh quá trình phát triển chính trị - xã hội và lưu giữ dấu ấn sinh hoạt, kinh tế, tôn giáo của cộng đồng qua từng thời kỳ. Di tích trở thành "tư liệu vật chất" quý giá, thay thế cho nhiều nguồn sử liệu thành văn, đồng thời là minh chứng cho tinh thần đoàn kết, ý chí bất khuất của dân tộc.

Về giá trị kiến trúc - nghệ thuật, hệ thống địa đạo thể hiện trình độ tổ chức không gian, tỷ lệ công trình và kỹ thuật xây dựng phù hợp với điều kiện địa chất và môi trường. Các giải pháp thoát nước được thiết kế thụ động nhưng hiệu quả, tận dụng địa hình tự nhiên và kinh nghiệm dân gian. Hệ thống thông gió sử dụng nguyên lý đối

lưu nhiệt tự nhiên, với các lỗ thông hơi nhỏ được ngụy trang tinh vi như ụ mối, gốc cây, đảm bảo thông khí mà không bị phát hiện (Nguyễn Văn Huyên, 2016).

Về giá trị kỹ thuật - công nghệ, địa đạo chứa đựng nhiều giải pháp kết cấu và phương pháp xây dựng độc đáo, sử dụng vật liệu truyền thống và kỹ thuật thủ công đặc thù. Những kinh nghiệm này phản ánh tri thức bản địa quý báu, vẫn có giá trị tham khảo đối với khoa học hiện đại (Lê Văn Năm, 2017).

Về giá trị văn hóa - biểu tượng, địa đạo là biểu tượng tinh thần của cộng đồng, gắn với tín ngưỡng, phong tục và bản sắc địa phương. Di tích góp phần quan trọng trong giáo dục truyền thống cách mạng và lòng yêu nước cho các thế hệ (Bộ Văn hóa, Thể thao và Du lịch, 2010).

Ngoài ra, Địa đạo Củ Chi còn mang giá trị cảnh quan đặc thù với sự hài hòa giữa kiến trúc và môi trường tự nhiên (Jokilehto, 2005), cùng với giá trị xã hội - cộng đồng, giá trị kinh tế thông qua du lịch bền vững (Dallen & Boyd, 2003) và giá trị giáo dục - truyền cảm hứng cho thế hệ trẻ (UNESCO, 2021).

2.3. Thực trạng công tác bảo tồn và phát huy giá trị

Hiện nay, một số đoạn địa đạo bị xuống cấp do xói mòn, ngập úng trong mùa mưa và xuất hiện vết nứt ở tường hầm, cần được gia cố. Việc bê tông hóa một số lối đi phục vụ du lịch đã làm thay đổi phần nào cảm quan nguyên gốc của di tích (Sở Văn hóa và Thể thao TP.HCM, 2020).

Công tác quản lý còn phân tán, thiếu sự phối hợp liên vùng và chưa đồng bộ. Nguồn lực tài chính cho bảo tồn còn hạn chế, chủ yếu dựa vào ngân sách địa phương và doanh thu du lịch; việc huy động nguồn lực xã hội hóa chưa hiệu quả. Nhân lực chuyên môn về bảo tồn kiến trúc ngầm còn thiếu; nhiều cán bộ chưa được đào tạo bài bản trong điều kiện môi trường đặc thù của công trình hầm (Nguyễn Quốc Hùng, 2014).

Về phát huy giá trị, Địa đạo Củ Chi thu hút hàng triệu lượt khách mỗi năm và là điểm đến nổi bật của du lịch chiến tranh. Các hoạt động "về nguồn" được tổ chức thường xuyên, nhất là vào dịp lễ. Tuy nhiên, nội dung và hình thức còn đơn điệu, thiếu yếu tố tương tác và trải nghiệm sâu. Hoạt động quảng bá vẫn mang tính truyền thống, chưa tận dụng mạnh mẽ công nghệ số, mạng xã hội hoặc các nền tảng tham quan ảo 3D để tiếp cận du khách trẻ và quốc tế (Dallen & Boyd, 2003; Addison, 2000).

2.4. Tồn tại, hạn chế và nguyên nhân

Hệ thống địa đạo với quy mô lớn và thời gian tồn tại lâu dài đang chịu nhiều tác động tiêu cực. Khí hậu nhiệt đới ẩm, mưa lớn theo mùa gây sạt lở, xói mòn và sụt lún, làm biến dạng hoặc thu hẹp tiết diện hầm (ISO 13822:2010). Lượng khách tham quan đông tạo ra rung động cơ học, làm thay đổi vi khí hậu bên trong, ảnh hưởng đến độ bền của kết cấu đất sét pha laterit. Sự xâm thực của rễ cây, côn trùng và động vật nhỏ cũng góp phần phá vỡ kết cấu.

Thông tin tại các điểm tham quan còn đơn giản, thiếu chiều sâu và cập nhật. Việc ứng dụng công nghệ như thực tế ảo (VR), thực tế tăng cường (AR) và mô phỏng 3D còn hạn chế (Addison, 2000). Sản phẩm truyền thông chưa đa dạng, chưa giúp du khách hiểu sâu về giá trị di tích. Bên cạnh đó, việc khai thác du lịch quá mức và thiên về thương mại có nguy cơ làm giảm giá trị lịch sử cốt lõi, trong khi các dịch vụ xung quanh chưa được quản lý đồng bộ, ảnh hưởng đến cảnh quan (Dallen & Boyd, 2003).

Nguyên nhân khách quan xuất phát từ đặc tính vật liệu tự nhiên như đất nén, gỗ, tre dễ bị ảnh hưởng bởi khí hậu nóng ẩm. Nhiệt độ cao gây co ngót, nứt; mưa lớn và độ ẩm cao gây xói mòn, sạt lở (Andersland & Ladanyi, 2004). Sự phân hủy vật liệu hữu cơ dưới tác động của vi sinh vật, côn trùng và nấm mốc là không thể tránh khỏi, làm suy giảm độ bền kết cấu. Ngoài ra, di tích vốn chịu tác động của chiến tranh nên nhiều đoạn đã bị phá hủy hoặc biến dạng (Harris & Pritchard, 2005). Quá trình đô thị hóa và phát triển hạ tầng xung quanh cũng tạo áp lực lên không gian di tích.

Nguyên nhân chủ quan bao gồm nhận thức chưa đầy đủ của một bộ phận cộng đồng và du khách về giá trị di sản, dẫn đến ý thức bảo vệ chưa cao. Một số hoạt động ưu tiên lợi ích kinh tế trước mắt hơn là bảo tồn lâu dài. Ngân sách bảo tồn còn hạn chế, cơ chế huy động nguồn lực xã hội chưa hiệu quả. Sự phối hợp giữa các cơ quan quản lý chưa chặt chẽ, thiếu quy hoạch vùng đệm rõ ràng. Nguồn nhân lực chuyên môn còn thiếu cả về số lượng và chất lượng, trong khi việc ứng dụng công nghệ mới như quét 3D, phân tích vật liệu hay hệ thống cảnh báo chưa được triển khai đồng bộ (Nguyễn Quốc Hùng, 2014).

3. BÀN LUẬN, TRÙNG TU VÀ PHÁT HUY GIÁ TRỊ DI SẢN

3.1. Định hướng

• Giai đoạn ngắn hạn (2026 - 2030):

Tập trung hoàn thiện hệ thống gia cố và chống xuống cấp cho các đoạn hầm, đặc biệt ở khu vực dễ sạt lở và ngập úng. Ưu tiên áp dụng các kỹ thuật gia cố thân thiện nhằm giữ nguyên cấu trúc và cảm quan gốc của di tích. Giải pháp sử dụng đất trộn hóa chất gốc natri được lựa chọn do tính phù hợp trong trùng tu Địa đạo Củ Chi (Schubert, 2002).

• Giai đoạn trung hạn (2030 - 2035):

Mở rộng không gian phục vụ du lịch bằng cách xây dựng các tuyến tham quan liên vùng, kết nối với hệ thống giao thông thuận tiện và phát triển sản phẩm du lịch đồng bộ. Tăng cường trải nghiệm cho du khách thông qua việc tái hiện bối cảnh lịch sử và không gian hầm nguyên trạng nhưng không tác động trực tiếp đến di tích. Đồng thời, bổ sung hệ thống chiếu sáng an toàn, lối đi hướng dẫn, biển chỉ dẫn đa ngữ và khu trưng bày hiện đại (Dallen & Boyd, 2003).

• Giai đoạn dài hạn (sau 2035):

Hoàn thiện hồ sơ đề cử UNESCO công nhận cụm Địa đạo Củ Chi là Di sản Thế giới theo tiêu chí (iv) và (vi), nhấn mạnh giá trị kiến trúc - kỹ thuật và ý nghĩa lịch sử - văn hóa toàn cầu. Đồng thời, tích hợp di sản vào mạng lưới các di sản chiến tranh thế giới, tăng cường hợp tác quốc tế trong nghiên cứu và bảo tồn công trình ngầm (UNESCO, 2021).

3.2. Ứng dụng đất xử lý công nghệ cao trong trùng tu

• Trùng tu vách hầm:

Trước khi gia cố, cần kiểm tra và nghiệm thu hệ chống đỡ tạm, kết cấu gia cường theo yêu cầu kỹ thuật (Bộ Xây dựng, 2012). Nội dung nghiệm thu bao gồm hình thái không gian, kích thước tiết diện và điều kiện bề mặt nhằm đảm bảo hiệu quả gia cố và hạn chế tác động đến vật liệu gốc (Feilden, 2003).

Đối với các đoạn hầm nhỏ, gia cố được thực hiện liên tục trong một đợt để đảm bảo tính đồng nhất. Với các đoạn phức tạp, quá trình gia cố tiến hành theo từng lớp, kiểm soát chiều dày nhằm tránh phân tầng và mất ổn định (Bộ Xây dựng, 2016). Với đoạn hầm lớn hoặc địa chất phức tạp, thi công theo giai đoạn, bố trí hợp lý các mặt gián đoạn để đảm bảo liên kết kết cấu.

Vật liệu gia cố được vận chuyển bằng phương tiện thủ công hoặc cơ giới nhẹ phù hợp với không gian chật hẹp. Ở những khu vực cho phép, thiết bị nâng hạ nhỏ được sử dụng nhằm giảm rung chấn và bảo vệ kết cấu nguyên gốc (Harris & Pritchard, 2005). Quá trình thi công được thực hiện theo từng lớp, kiểm tra độ ổn định và hình học sau mỗi lớp, đồng thời theo dõi và điều chỉnh hệ chống đỡ tạm nhằm đảm bảo độ chính xác kết cấu (Lê Văn Năm, 2017).

Với các đoạn hầm hư hại nghiêm trọng, cần thiết kế hệ giằng chống tạm thời nhiều lớp, gồm các văng ngang và chéo bằng thép

chịu lực, kết hợp cọc định vị để đảm bảo ổn định tổng thể. Giải pháp này được lựa chọn dựa trên đánh giá hiện trạng và yêu cầu bảo tồn, nhằm hạn chế tối đa tác động đến cấu trúc nguyên gốc (Andersland & Ladanyi, 2004).

• Trùng tu trần hầm:

Trần hầm chịu tải trọng đất phía trên và ảnh hưởng của nước mưa, nước ngầm, dẫn đến các dạng hư hỏng như thấm nước, nứt và suy giảm khả năng chịu lực (ISO 13822:2010). Vì vậy, chống thấm kết hợp gia cố là nội dung kỹ thuật trọng tâm.

Nguyên tắc trùng tu là can thiệp tối thiểu, sử dụng vật liệu tương thích với đất nguyên gốc và phù hợp với điều kiện vi khí hậu ngầm (Feilden, 2003; Jokilehto, 2005). Trước khi thi công, cần khảo sát chi tiết hiện trạng, xác định mức độ hư hỏng và phạm vi can thiệp. Các lớp đất rời, tạp chất và vết nứt được xử lý để khôi phục tính liên tục của kết cấu.

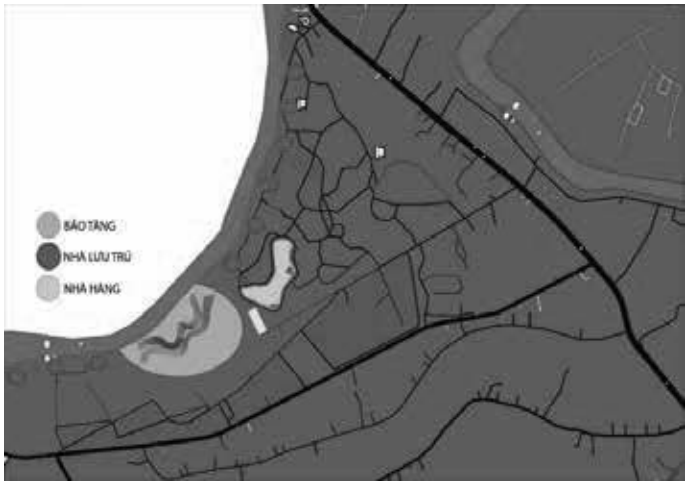
Giải pháp chống thấm sử dụng vật liệu có khả năng thẩm thấu sâu, được thi công bằng phương pháp phun, quét hoặc bơm áp lực thấp để đảm bảo phân bố đều và không làm thay đổi hình thái di tích (Schubert, 2002). Song song đó, trần hầm được gia cố bằng lớp đất xử lý, thi công theo lớp mỏng, kết hợp đầm nén và kiểm soát hình học (Andersland & Ladanyi, 2004).

Sau trùng tu, cần bảo dưỡng trong điều kiện nhiệt - ẩm phù hợp và thực hiện quan trắc nhằm đánh giá hiệu quả chống thấm, độ ổn định và khả năng thích ứng trong quá trình khai thác.

3.3. Giải pháp phát huy giá trị

Đề xuất xây dựng công trình phụ trợ phục vụ trải nghiệm, tiêu biểu là bảo tàng chiến tích gắn với Địa đạo Củ Chi, bố trí gần sông Sài Gòn. Công trình sử dụng vật liệu đất đã xử lý bằng công nghệ cao làm vỏ bao che, tạo sự hài hòa với cảnh quan tự nhiên và tăng tính bền vững.

Các phương án thiết kế vỏ bao che bằng đất nén được đề xuất nhằm tận dụng đặc tính vật liệu, hình thành không gian kiến trúc độc đáo, thân thiện với môi trường và phù hợp với bối cảnh di sản. Giải pháp này không chỉ góp phần nâng cao giá trị thẩm mỹ mà còn hỗ trợ truyền tải nội dung lịch sử, tạo trải nghiệm sâu sắc cho du khách, đồng thời kết nối hiệu quả giữa bảo tồn và phát triển du lịch bền vững.



Hình 4. Xây dựng bảo tàng chiến tích chiến tranh bằng vật liệu đất được xử lý bằng công nghệ cao

Phương án thứ nhất là tường đất nén phẳng đơn giản, phù hợp với các không gian trưng bày cần tính trung lập về thị giác. Phương án này đảm bảo sự tối giản, không gây phân tán chú ý, giúp làm nổi bật nội dung trưng bày. Phương án thứ hai là tường đất nén cong, sử dụng các khối tường vòm hoặc đường cong mềm mại, gợi lên hình ảnh dòng chảy liên tục của hệ thống địa đạo. Giải pháp này không chỉ tạo nên không gian nội thất độc đáo, mở rộng cảm giác không gian mà còn nâng cao khả năng chịu lực của kết cấu, góp phần tăng độ bền công trình, đặc biệt phù hợp với các không gian triển lãm nghệ thuật hoặc khu vực tham quan chuyên đề (Minke, 2006). Phương án thứ ba là tường đất nén kết hợp với các vật liệu tự nhiên khác như tre, gỗ, lá dừa nước. Sự kết hợp này giúp tăng tính thẩm mỹ, thích ứng tốt với điều kiện khí hậu địa phương, đồng thời tạo nên sự hài hòa với cảnh quan thiên nhiên và văn hóa bản địa. Giải pháp này phù hợp với các không gian bán mở, khu vực nghỉ chân hoặc sân trong của bảo tàng.

Việc sử dụng đất làm vỏ bao che cho bảo tàng được xem là một hướng tiếp cận sáng tạo và có tiềm năng lớn. Vách đất mang lại vẻ đẹp tự nhiên, mộc mạc và gần gũi, phản ánh chân thực đời sống và môi trường sinh thái đặc trưng của khu vực. Bên cạnh đó, vật liệu đất có khả năng cách nhiệt và cách âm tốt, góp phần điều hòa vi khí hậu bên trong công trình, giảm phụ thuộc vào các hệ thống cơ điện, từ đó tiết kiệm năng lượng và thân thiện với môi trường (Houben & Guillaud, 1994). Ngoài ra, đất là vật liệu sẵn có tại địa phương, chi phí thấp, giúp giảm đáng kể chi phí xây dựng. Khi được ứng dụng hợp lý, công trình không chỉ đạt hiệu quả kỹ thuật mà còn tạo nên dấu ấn kiến trúc riêng biệt, có khả năng thu hút khách tham quan và trở thành biểu tượng đặc trưng của vùng. Tuy nhiên, để triển khai hiệu quả, cần có sự nghiên cứu kỹ lưỡng về vật liệu, công nghệ và giải pháp thi công, đồng thời đòi hỏi sự phối hợp chặt chẽ giữa các nhà thiết kế, nhà khoa học và cơ quan quản lý nhằm đảm bảo tính khả thi và bền vững.

3.4. Giáo dục di sản chương trình

"Tuần lễ học tập tại di tích" được đề xuất tổ chức định kỳ dành cho học sinh và sinh viên. Chương trình kết hợp giữa nội dung giảng dạy lịch sử với các hoạt động trải nghiệm thực tế như tham quan địa đạo, tọa đàm với nhân chứng lịch sử và thực hành kỹ năng sinh tồn trong môi trường hầm (Copeland, 2006). Cách tiếp cận này giúp người học tiếp cận kiến thức một cách trực quan, sinh động và sâu sắc hơn, từ đó nâng cao nhận thức và ý thức bảo tồn di sản. Song song đó, việc xây dựng hệ thống học liệu số như video, bài giảng điện tử và mô hình 3D về lịch sử và kiến trúc địa đạo là cần thiết. Các học liệu này có thể được tích hợp vào chương trình giáo dục lịch sử và văn hóa ở nhiều cấp học, góp phần mở rộng phạm vi tiếp cận, đặc biệt đối với học sinh ở vùng xa hoặc cộng đồng quốc tế (Addison, 2000; UNESCO, 2021).

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã hệ thống hóa một cách tương đối toàn diện cơ sở lý luận về bảo tồn di sản kiến trúc, tập trung vào các nguyên tắc được thừa nhận rộng rãi trong hệ thống văn kiện quốc tế như tôn trọng yếu tố gốc, đảm bảo tính xác thực và tính toàn vẹn của di sản, cũng như tiếp cận quản trị theo mô hình cụm di sản và vùng liên kết (ICOMOS, 1964; Jokilehto, 2005). Đây là cơ sở lý thuyết quan trọng để phân tích và đề xuất các giải pháp bảo tồn đối với hệ thống di tích kiến trúc ngầm.

Kết quả nghiên cứu khẳng định Địa đạo Củ Chi là sản phẩm tiêu biểu của chiến tranh nhân dân Việt Nam, phản ánh sinh động chiến lược du kích, kỹ thuật tác chiến và tổ chức đời sống dưới lòng đất trong các giai đoạn kháng chiến. Mô hình "thành phố ngầm" với quy mô lớn và cấu trúc phân tầng phức tạp thể hiện trình độ tổ chức không gian và tư duy quân sự đặc sắc, mang giá trị nổi bật trong lịch sử chiến tranh thế kỷ XX. Các giá trị kiến trúc - kỹ thuật đặc thù của hệ thống địa đạo cũng được làm rõ, bao gồm việc sử dụng vật liệu tại chỗ, kỹ thuật đào thủ công hạn chế rung chấn, hệ thống thông gió ngụy trang tinh vi và giải pháp thoát nước thích ứng với khí hậu nhiệt đới gió mùa. Những yếu tố này là minh chứng quan trọng cho tính xác thực và nguyên bản của di tích.

Tuy nhiên, khảo sát hiện trạng cho thấy di tích đang đối mặt với nhiều vấn đề như xói mòn, ngập úng, sạt lở, xâm nhập của rễ cây và sinh vật, cùng tình trạng ẩm ướt kéo dài. Công tác quản lý còn phân tán, nguồn lực tài chính hạn chế, nhân lực chuyên môn chưa đáp ứng yêu cầu. Một số can thiệp trước đây chưa phù hợp, như bê tông hóa cục bộ, đã ảnh hưởng đến tính nguyên gốc và giá trị biểu đạt của di tích (Sở Văn hóa và Thể thao TP.HCM, 2020).

Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất hệ thống giải pháp bảo tồn đồng bộ kết hợp với phát huy giá trị di sản thông qua phát triển du lịch và giáo dục theo các giai đoạn. Địa đạo Củ Chi không chỉ là chứng tích lịch sử mà còn là nguồn lực văn hóa quan trọng, góp phần phát triển bền vững trong các lĩnh vực giáo dục, du lịch và nghiên cứu khoa học (UNESCO, 2021).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Addison, A. C. Emerging trends in virtual heritage. IEEE Multimedia, 7(2), 22-25, 2000. https://doi.org/10.1109/93.848421.

[2] Andersland, O. B., & Ladanyi, B. Frozen ground engineering (2nd ed.). John Wiley & Sons, 2004.

[3] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 6187-1:2019: Chất lượng đất - Xác định hàm lượng kim loại nặng, 2019.

[4] Bộ Văn hóa, Thể thao và Du lịch. Luật Di sản văn hóa Việt Nam (sửa đổi, bổ sung năm 2009). NXB Chính trị Quốc gia, 2010.

[5] Bộ Xây dựng. QCVN 01:2012/BXD: Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về quy hoạch xây dựng, 2012.

[6] Bộ Xây dựng. QCVN 18:2014/BXD: Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về an toàn trong thi công xây dựng, 2016.

[7] Copeland, T. European democratic citizenship, heritage education and identity. Council of Europe Publishing, 2006.

[8] Feilden, B. M. Conservation of historic buildings (3rd ed.). Architectural Press, 2003.

[9] Houben, H., & Guillaud, H. Earth construction: A comprehensive guide. Intermediate Technology Publications, 1994.

[10] ICOMOS. International charter for the conservation and restoration of monuments and sites (The Venice Charter), 1964.

[11] International Organization for Standardization. ISO 13822:2010: Bases for design of structures - Assessment of existing structures, 2010.

[12] Jokilehto, J. A history of architectural conservation. Butterworth-Heinemann, 2005.

[13] Lê, V. N. Kỹ thuật xây dựng công trình ngầm. NXB Xây dựng, 2017.

[14] Minke, G. Building with earth: Design and technology of a sustainable architecture. Birkhäuser, 2006.

[15] Nguyễn, Q. H. Bảo tồn và trùng tu di tích kiến trúc. NXB Xây dựng, 2014.

[16] Phan, H. L. Di sản văn hóa và bảo tồn di tích ở Việt Nam. NXB Khoa học Xã hội, 2012.

[17] Sở Văn hóa và Thể thao TP.HCM. Báo cáo hiện trạng bảo tồn và khai thác Di tích Địa đạo Củ Chi, 2020.

[18] Sở Văn hóa, Thể thao và Du lịch tỉnh Bà Rịa - Vũng Tàu. Hồ sơ Di tích lịch sử Địa đạo Long Phước, 2019.

[19] Timothy, D. J., & Boyd, S. W. Heritage tourism. Prentice Hall, 2003.

[20] UNESCO. Operational guidelines for the implementation of the World Heritage Convention. https://whc.unesco.org/en/guidelines/, 2021.

■Ngày nhận bài: 16/3/2026 ■Ngày sửa bài: 23/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 02/4/2026

Kiểm soát ô nhiễm môi trường tại công trường xây dựng nhà cao tầng: Kinh nghiệm quốc tế và khả năng áp dụng tại Việt Nam

Environmental pollution control at high-rise building construction sites: International Experience and Applicability in Vietnam

> THS PHẠM THỊ THANH NHÀN[1,2], PGS.TS NGUYỄN ANH DŨNG[1,*]
[1]Trường Đại học Thủy lợi
[2]Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
[*]Email: dung.kcct@tlu.edu.vn

TÓM TẮT

Quá trình đô thị hóa nhanh chóng tại Việt Nam đã thúc đẩy sự bùng nổ các dự án nhà cao tầng, kéo theo những thách thức nghiêm trọng về ô nhiễm bụi, tiếng ồn và chất thải. Bài báo tiến hành tổng quan các giải pháp công nghệ và quản lý xây dựng xanh từ kinh nghiệm quốc tế, từ đó đánh giá tính khả thi khi áp dụng vào điều kiện thi công đặc thù trong nước. Kết quả phân tích chỉ ra xu hướng chuyển dịch toàn cầu từ các biện pháp kiểm soát thụ động sang phòng ngừa chủ động tại nguồn. Tuy nhiên, việc áp dụng các công nghệ tiên tiến tại Việt Nam hiện gặp rào cản lớn về chi phí đầu tư, áp lực cạnh tranh giá thầu và hạn chế của hạ tầng giao thông đô thị đối với giải pháp lắp ghép. Do đó, nghiên cứu đề xuất lộ trình áp dụng ưu tiên các giải pháp quản lý và tổ chức chi phí thấp (như tối ưu hóa quy hoạch mặt bằng, phân loại chất thải 3R) trong ngắn hạn, tạo nền tảng trước khi đầu tư các giải pháp công nghệ chuyên sâu.

Từ khóa: Xây dựng xanh; quản lý xây dựng xanh; kiểm soát ô nhiễm; nhà cao tầng.

ABSTRACT

Rapid urbanization in Vietnam has catalyzed a surge in high-rise construction, leading to severe environmental challenges from dust, noise, and waste pollution. This paper reviews green construction technologies and management solutions derived from international experience to assess their feasibility in Vietnam's specific construction context. The analysis reveals a global paradigm shift from passive control measures to active at-source prevention. However, the implementation of advanced technologies in Vietnam currently faces significant barriers, including investment costs, competitive bidding pressures, and limitations in urban transport infrastructure for prefabrication solutions. Consequently, the study proposes an implementation roadmap that prioritizes low-cost management and organizational solutions, such as optimizing site layout planning and 3R waste segregation in the short term, thereby establishing a foundation before investing in intensive technological solutions.

Keywords: Green construction; green construction management; pollution control; high-rise buildings.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tốc độ đô thị hóa nhanh chóng ở Việt Nam đã dẫn đến sự bùng nổ các dự án nhà cao tầng tại các đô thị lớn. Sự phát triển này, mặc dù góp phần tái thiết đô thị, nhưng đồng thời cũng gây áp lực nghiêm trọng lên môi trường sống và sức khỏe cộng đồng, đặc biệt là các vấn đề ô nhiễm bụi mịn, tiếng ồn và chất thải rắn xây dựng [1]. Mặc dù Luật Bảo vệ môi trường 2020 và các quy chuẩn kỹ thuật quốc gia đã có hiệu lực, việc tuân thủ tại nhiều dự án vẫn mang tính đối phó, thiếu các giải pháp đồng bộ.

Trong bối cảnh hội nhập quốc tế, các quốc gia phát triển đã chuyển dịch chiến lược kiểm soát ô nhiễm từ các biện pháp che chắn thụ động sang kiểm soát chủ động bằng công nghệ xây dựng xanh (Green Building Technologies) [2] và quy trình xây dựng tinh gọn (Lean Construction) [3], [4]. Tại Việt Nam, khái niệm "công trình xanh" (Green Building) đang dần phổ biến với các hệ thống đánh giá như LOTUS, LEED hay EDGE. Tuy nhiên, các nghiên cứu và ứng dụng thực tiễn về vấn đề này còn khá rời rạc, chủ yếu tập trung vào giai đoạn thiết kế kiến trúc xanh mà chưa chú trọng đến giải pháp xanh trong giai đoạn thi công. Do đó, xuất phát từ thực tiễn trên, bài báo tiến hành tổng hợp, phân tích các bài học kinh nghiệm về giải pháp công nghệ "xây dựng xanh" và giải pháp "quản lý dự án xanh" từ các nghiên cứu đã có, từ đó đánh giá tính phù hợp với điều kiện thi công nhà cao tầng tại các đô thị ở Việt Nam, góp phần thúc đẩy sự phát triển bền vững của ngành xây dựng.

"**Xây dựng xanh**" (Green Construction - GC) đề cập đến các hoạt động xây dựng nhằm tối đa hóa việc bảo tồn tài nguyên và giảm

thiểu tác động tiêu cực đến môi trường hướng tới 5 mục tiêu cốt lõi: tiết kiệm năng lượng, đất, nước, vật liệu và bảo vệ môi trường trong suốt giai đoạn thi công của dự án [5], [6]. Khác với các đánh giá công trình xanh tập trung bào hiệu suất vận hành theo vòng đời của công trình, GC chú trọng trực tiếp vào các giải pháp kỹ thuật tại công trường nhằm kiểm soát ngay lập tức tiếng ồn, bụi, khí thải và chất thải rắn [7].

Để việc thực hiện GC hiệu quả, "**Quản lý xây dựng xanh**" (Green Construction Management - GCM) được áp dụng thông qua việc tích hợp các mục tiêu môi trường vào quy trình quản lý dự án truyền thống, thúc đẩy phát triển bền vững thông qua việc quản lý có trách nhiệm các dự án đầu tư nhằm mục đích đạt được các công trình thân thiện với môi trường [8]. Bản chất của GCM là các giải pháp tập trung vào khía cạnh quản trị, con người và quy trình, bao gồm việc lập kế hoạch quản lý môi trường (EMP), đào tạo nhận thức cho công nhân, và thiết lập chuỗi cung ứng vật liệu xanh.

2. TỔNG QUAN CÁC NGHIÊN CỨU VỀ GIẢI PHÁP KIỂM SOÁT Ô NHIỄM PHÁT SINH TỪ HOẠT ĐỘNG XÂY DỰNG

2.1. Giải pháp kiểm soát bụi và khí thải phát sinh từ hoạt động xây dựng

Việc kiểm soát bụi và khí thải trong quá trình thi công đòi hỏi sự phối hợp đồng bộ giữa ba nhóm giải pháp chính: (1) Giảm thiểu phát sinh tại nguồn; (2) Kỹ thuật ngăn chặn phát tán bụi; (3) Lập kế hoạch quản lý và giám sát minh. Chi tiết các biện pháp kỹ thuật và quản lý được tổng hợp tại Bảng 1.

Bảng 1. Tổng hợp các biện pháp kiểm soát bụi và khí thải trong thi công xây dựng

Nhóm giải pháp	Biện pháp cụ thể	Diễn giải	Nguồn tham khảo
1. Giảm phát sinh tại nguồn	**Đổi mới công nghệ & Vật liệu**	Sử dụng cấu kiện đúc sẵn; Sử dụng vật liệu các-bon thấp, vật liệu tái chế (cốp pha thép), vật liệu thay thế xi măng (tro bay, zeolite).	[9], [10], [11], [12]
	Quản lý máy móc thi công	Bảo trì định kỳ, tối ưu công suất; Ưu tiên thiết bị năng lượng sạch (điện, mặt trời) hoặc phát thải thấp.	[9], [13]
2. Kỹ thuật ngăn chặn phát tán bụi	**Phun ẩm & Dập bụi**	- Phun nước thường xuyên (đặc biệt mùa khô). - Hệ thống phun sương (trên hàng rào, súng phun, xe chuyên dụng). - Kết hợp hệ thống hút bụi cục bộ (LEV).	[11], [14], [15], [16]
	Che chắn & Cô lập	- Hàng rào tôn kín bao quanh (cao trên 1,8 m - 2 m). - Che phủ bạt/lưới cho đất trống và vật liệu rời.	[9], [11], [14]
	Kiểm soát hạ tầng & Vận chuyển	- Cứng hóa đường nội bộ, trồng cây xanh; - Rửa xe tại cổng ra vào, che kín thùng xe, kiểm soát tốc độ.	[9], [11], [14]
3. Lập kế hoạch quản lý và giám sát	**Ứng dụng BIM**	- Tối ưu hóa mặt bằng: Bố trí nguồn bụi cuối hướng gió, khu văn phòng đầu hướng gió.	[17]
	Giám sát thông minh	- Quan trắc thời gian thực bằng cảm biến/mạng không dây để phát hiện nồng độ vượt ngưỡng.	[11], [16], [18]
	Chính sách & Con người	- Đào tạo nâng cao nhận thức cho quản lý và công nhân. - Áp dụng phí ô nhiễm, phạt vi phạm, kiểm soát niên hạn máy móc. - Thực hiện đánh giá tác động môi trường (EIA).	[9], [11], [13], [18], [19]

2.2. Giải pháp giảm thiểu tiếng ồn và rung chấn

Giải pháp kiểm soát tiếng ồn và rung chấn được tiếp cận dựa trên nguyên lý truyền âm, bao gồm: kiểm soát tại nguồn, kiểm soát trên trên đường truyền và kiểm soát tại nơi tiếp nhận, kết hợp các biện pháp tổ chức thi công và giám sát đo đạc tiếng ồn. Chi tiết các giải pháp được tổng hợp tại Bảng 2.

Bảng 2. Tổng hợp các biện pháp kiểm soát tiếng ồn và rung chấn trong thi công xây dựng

Nhóm giải pháp	Biện pháp cụ thể	Diễn giải	Nguồn tham khảo
1. Tại nguồn phát sinh	**Lựa chọn & Thay thế thiết bị**	- Ưu tiên thiết bị có tính năng giảm ồn. - Thay thế máy cũ bằng máy mới để giảm ồn và tối ưu chi phí vận hành.	[20], [21]
	Bảo trì	- Thực hiện bảo trì định kỳ (bôi trơn, siết bu lông, cân bằng) để tránh tiếng ồn do hao mòn và hỏng hóc.	[20]
	Cải tiến kỹ thuật (Giảm rung)	- Lắp bộ giảm thanh cho hệ thống xả. - Dùng lớp lót cao su giảm va đập/cộng hưởng. - Dùng bánh răng nhựa.	[20], [21]
	Công nghệ chủ động (ANC)	- Tạo sóng âm ngược pha để triệt tiêu tiếng ồn gốc. - Hiệu quả cao với tần số thấp (<1000 Hz) như máy xúc, xe tải (giảm 7.0 -10.1 dBA).	[22]
2. Trên đường truyền	**Rào chắn & Bao che**	- Lắp đặt tường chắn ồn, lớp vỏ cách âm quanh máy móc hoặc khu vực thi công.	[20], [21]
	Vật liệu cách âm	- Sử dụng vật liệu có khả năng hấp thụ âm thanh.	[20]
3. Tại nơi tiếp nhận	**Bảo vệ thính giác cá nhân**	- Trang bị nút tai/chụp tai cho người làm việc trong môi trường >85 dBA.	[20], [21]

	Thiết bị chuyên dụng	- Sử dụng thiết bị bảo hộ tích hợp tai nghe giao tiếp cho cấp quản lý.	[23]
4. Tổ chức thi công và giám sát đo đạc tiếng ồn	**Quy hoạch mặt bằng**	- Tối đa hóa khoảng cách giữa nguồn ồn và khu vực nhạy cảm. - Sử dụng mô hình tối ưu hóa đa mục tiêu (tiếng ồn - an toàn - chi phí).	[24], [25]
	Tiến độ	- Tránh vận hành đồng thời nhiều máy - Thi công khung giờ ít nhạy cảm, phân vùng kiểm soát	[20], [21], [22]
	Quan hệ cộng đồng	- Thông báo trước kế hoạch thi công với cộng đồng, phối hợp với chính quyền để giảm khiếu nại.	[21]
	Giám sát & Đo đạc	- Xây dựng quy trình đo đạc phù hợp, hiệu chuẩn thiết bị thường xuyên. - Quan trắc định kỳ để đảm bảo tuân thủ tiêu chuẩn.	[21], [26]

2.3. Giải pháp về quản lý chất thải rắn xây dựng

Quản lý chất thải xây dựng hiệu quả đòi hỏi cách tiếp cận toàn diện xuyên suốt vòng đời dự án từ tối ưu hóa thiết kế, ứng dụng công nghệ BIM cùng triết lý xây dựng tinh gọn (Lean construction với hệ thống 5S và JIT) đến kiểm soát thi công tại hiện trường và đào tạo nâng cao nhận thức cho đội ngũ nhân sự. Tổng hợp các nhóm giải pháp được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Tổng hợp các biện pháp quản lý và giảm thiểu chất thải rắn xây dựng

Nhóm giải pháp	Biện pháp cụ thể	Diễn giải	Nguồn tham khảo
1. Thiết kế	**Tối ưu hóa thiết kế**	- Áp dụng thiết kế sinh thái, chuẩn hóa kích thước cấu kiện. - Chuyển hóa mục tiêu giảm thải thành tiêu chí đánh giá phương án thiết kế.	[27], [28], [29], [30]
	Kiểm soát thay đổi thiết kế & sử dụng cấu kiện lắp ghép	- Tăng cường thẩm tra để hạn chế thay đổi thiết kế. - Tăng tỷ lệ sử dụng cấu kiện lắp ghép để giảm chất thải tại chỗ.	[31], [32], [33], [34]
2. Ứng dụng công nghệ hiện đại (BIM)	**Kiểm soát xung đột & ước tính chính xác lượng chất thải**	- Phát hiện sớm xung đột (ngăn ngừa 4,3% - 15,2% lượng chất thải do làm lại) - Ước tính chính xác lượng chất thải để lập kế hoạch phòng ngừa (giảm tới 40-45%).	[31], [35]
	Hỗ trợ đo bóc khối lượng	- Xác định chính xác khối lượng, tránh đặt hàng dư thừa.	[36]
3. Quản lý thi công	**Quản lý kho bãi & Vật tư**	- Áp dụng 5S và JIT (Giao hàng đúng lúc) để tránh lưu kho lâu gây hư hỏng. - Tuân thủ nguyên tắc FIFO (Nhập trước - Xuất trước).	[28], [37]
	Kiểm soát chất lượng	- Giám sát chặt chẽ, sử dụng nhân lực lành nghề để hạn chế thi công sai quy trình phải phá dỡ.	[28], [30], [33]
4. Kiểm soát tại nguồn & Quản lý chất thải trên công trường	**Phân loại & tuân thủ nguyên tắc 3R**	- Phân loại tại nguồn để tối đa hóa tái chế. - Tuân thủ 3R: Giảm thiểu, Tái sử dụng, Tái chế.	[27], [28], [38], [39]
	Vận chuyển nội bộ	- Lập kế hoạch vận chuyển, che chắn và bốc dỡ đúng quy trình để tránh nứt vỡ vật liệu.	[40]
5. Nhân sự & Chính sách	**Đào tạo & Nhận thức**	- Đào tạo định kỳ về kỹ năng và trách nhiệm nghề nghiệp cho các bên liên quan.	[27], [33], [37], [41]
	Cơ chế Hợp đồng & Pháp lý	- Tích hợp tiêu chuẩn giảm thải vào hồ sơ thầu/hợp đồng. - Áp dụng thưởng/phạt hợp đồng. - Bắt buộc có Kế hoạch quản lý chất thải (WMP).	[33], [39], [40], [41]

2.4. Giải pháp về kiểm soát nước thải xây dựng

Các nghiên cứu về các giải pháp kiểm soát nước thải từ hoạt động xây dựng còn khá hạn chế và chưa được quan tâm nhiều so với bụi và chất thải rắn xây dựng. Kiểm soát nước thải xây dựng là sự kết hợp chặt chẽ giữa các giải pháp kỹ thuật xử lý tại chỗ, phân kỳ thi công và cơ chế phối hợp đa bên. Chi tiết các biện pháp được tổng hợp tại Bảng 4.

Bảng 4. Tổng hợp các biện pháp về kiểm soát nước thải xây dựng

Nhóm giải pháp	Biện pháp cụ thể	Diễn giải	Nguồn tham khảo
1. Kỹ thuật & Xử lý tại chỗ	**Quản lý nước rửa máy móc thiết bị & Bảo dưỡng bê tông**	- Thiết lập hố thu gom có lớp lót chống thấm để ngăn thẩm thấu vào đất. - Xử lý sơ bộ (trung hòa pH, lắng lọc) trước khi xả thải hoặc tái sử dụng.	[42]
	Kiểm soát Cơ - Hóa học	- Sử dụng rào chắn trầm tích, hàng rào vải địa kỹ thuật. - Kết hợp phương pháp đông tụ, kết tủa, hấp phụ để xử lý cặn lơ lửng.	[43]

	Bảo vệ nước ngầm	- Hạn chế đào rãnh sâu, xáo trộn địa chất không cần thiết để giảm nguy cơ rò rỉ chất ô nhiễm.	[42]
2. Kế hoạch thi công	**Phân kỳ thi công**	- Sắp xếp trình tự thi công hợp lý để rút ngắn thời gian và diện tích đất trống bị lộ thiên (giảm xói mòn). - Ưu tiên đào đắp lớn vào mùa khô.	[44]
3. Phối hợp quản lý đa bên	**Cơ chế phối hợp liên ngành**	- Thống nhất quy trình hướng dẫn, giám sát giữa Nhà thầu, Chủ đầu tư, Cơ quan môi trường, Chính quyền địa phương.	[42]
	Nâng cao năng lực & Giám sát	- Đào tạo thường xuyên cho nhà thầu về quy định xả thải. - Tăng cường vai trò giám sát của chính quyền địa phương và đơn vị cấp thoát nước.	[42]

3. PHÂN TÍCH VÀ THẢO LUẬN

3.1. Xu hướng kiểm soát ô nhiễm trong hoạt động xây dựng: từ thụ động đến chủ động

Tổng quan các nghiên cứu cho thấy sự chuyển dịch trong chiến lược kiểm soát ô nhiễm xây dựng: từ xử lý thụ động (như phun nước, che chắn) sang phòng ngừa chủ động tại nguồn. Các biện pháp truyền thống về bản chất là xử lý hậu quả, chỉ can thiệp khi chất ô nhiễm đã phát sinh, mang tính đối phó ngắn hạn và không giải quyết được gốc rễ vấn đề lãng phí tài nguyên. Ngược lại, xu hướng hiện đại tập trung triệt tiêu phát thải ngay từ đầu thông qua áp dụng công nghệ thi công mới (cấu kiện đúc sẵn, máy móc năng lượng sạch, kiểm soát ồn chủ động ANC), tích hợp mục tiêu môi trường vào giai đoạn lập kế hoạch và ứng dụng công nghệ số như BIM đóng vai trò then chốt. BIM không chỉ giúp tối ưu hóa quy hoạch mặt bằng để giảm tác động bụi, ồn mà còn phát hiện xung đột thiết kế nhằm ngăn ngừa chất thải rắn từ sớm. Sự chuyển dịch này là sự thay đổi tất yếu để ngành Xây dựng không chỉ đáp ứng các quy chuẩn môi trường ngày càng khắt khe mà còn hướng tới phát triển bền vững.

3.2. Những rào cản và khả năng áp dụng thực tiễn tại Việt Nam

Dựa trên thực tế thi công nhà cao tầng tại các đô thị, việc áp dụng các giải pháp kiểm soát ô nhiễm tại Việt Nam đang đối mặt với ba nhóm rào cản chính.

Thứ nhất là chi phí đầu tư và áp lực cạnh tranh. Công nghệ tiên tiến (thiết bị thi công sử dụng năng lượng sạch, công nghệ kiểm soát tiếng ồn chủ động (ANC), quan trắc thời gian thực) đòi hỏi chi phí đầu tư ban đầu lớn. Do đó, các giải pháp kỹ thuật chi phí thấp (phun sương, che chắn) và phân loại chất thải theo nguyên tắc 3R có tính khả thi cao và phù hợp với năng lực tài chính của nhà thầu.

Thứ hai là hạ tầng đô thị và không gian thi công. Việc vận chuyển cấu kiện lắp ghép khổ lớn bị hạn chế do vướng quy định tiếng ồn (thường không được vượt quá 55dBA theo QCVN 26:2010/BTNMT). Đồng thời, mặt bằng thi công chật hẹp trong nội đô gây khó khăn cho việc bố trí các hạng mục phụ trợ môi trường (khu vực phân loại rác, bể lắng, vùng đệm cây xanh) đúng quy chuẩn.

Thứ ba là năng lực công nghệ. Dù các nhà thầu lớn đã tiếp cận BIM, rào cản lớn nhất nằm ở việc chuyển đổi tư duy sử dụng BIM từ một công cụ thiết kế sang công cụ quản lý môi trường để ước tính chất thải.

Từ những rào cản trên, nghiên cứu đề xuất lộ trình áp dụng các giải pháp kiểm soát ô nhiễm theo ba giai đoạn phù hợp cho Việt Nam nhằm cân bằng giữa bảo vệ môi trường và hiệu quả kinh tế. Đó là sự tích hợp ưu tiên các giải pháp quản lý và tổ chức trong giai đoạn ngắn hạn và thúc đẩy chuyển đổi số (BIM) trong giai đoạn trung hạn trước khi tiến tới hiện đại hóa toàn diện về công nghệ thi công và thiết bị trong dài hạn.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Bài báo đã tổng hợp kinh nghiệm quốc tế về kiểm soát ô nhiễm xây dựng và đánh giá tính phù hợp với thực tiễn thi công nhà cao tầng tại Việt Nam. Kết quả cho thấy sự chuyển dịch tất yếu trong kiểm soát ô nhiễm xây dựng từ thụ động xử lý hậu quả sang phòng ngừa chủ động kiểm soát tại nguồn thông qua Quản lý xây dựng Xanh (GCM) và ứng dụng công nghệ BIM ngay từ giai đoạn lập kế hoạch. Trong bối cảnh Việt Nam hiện nay, do những rào cản lớn về chi phí đầu tư và áp lực cạnh tranh cùng với không gian thi công chật hẹp tại các thành phố lớn các giải pháp tổ chức và quản lý chi phí thấp như tối ưu hóa mặt bằng và phân loại chất thải tại nguồn, hiện là hướng đi phù hợp và hiệu quả nhất để áp dụng đại trà trong ngắn hạn.

Để thúc đẩy mục tiêu phát triển bền vững, bài báo đề xuất các kiến nghị.

- Đối với cơ quan quản lý nhà nước: Sớm xây dựng và ban hành các quy định cụ thể về định mức chi phí cho các giải pháp công nghệ môi trường tiên tiến, nhằm tạo cơ sở pháp lý cho việc lập và quản lý chi phí đầu tư; đồng thời xây dựng lộ trình cụ thể để bắt buộc áp dụng BIM trong quản lý môi trường đối với các dự án có quy mô lớn.

- Đối với chủ đầu tư: Chuyển đổi tiêu chí đấu thầu từ giá thấp nhất sang đánh giá năng lực quản lý môi trường, bắt buộc đưa Kế hoạch quản lý môi trường (EMP) và các chỉ tiêu giảm thải tích hợp vào hồ sơ mời thầu và hợp đồng xây dựng như những điều khoản bắt buộc, với chế tài thưởng phạt nghiêm minh.

- Đối với nhà thầu thi công: Ưu tiên thực hiện lộ trình "xanh hóa" từ quản lý nội tại, bắt đầu bằng việc chuẩn hóa quy trình 3R và tối ưu hóa quy hoạch mặt bằng thi công để giảm thiểu tác động bụi và tiếng ồn ngay từ giai đoạn lập kế hoạch thi công.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Tài nguyên và Môi trường, "Báo cáo hiện trạng môi trường quốc gia giai đoạn 2016-2020", 2021. Internet: https://moit.gov.vn/upload/2005517/fck/files/20211108_Bao_cao_HTMT_2016-2020_F_a4980.pdf.

[2] A. P. C. Chan, A. Darko, and E. E. Ameyaw, "Strategies for Promoting Green Building Technologies Adoption in the Construction Industry-An International Study," Sustainability, vol. 9, no. 6, p. 969, Jun. 2017, doi: 10.3390/su9060969.

[3] R. Sacks, L. Koskela, B. A. Dave, and R. Owen, "Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction," Journal of Construction Engineering and Management, vol. 136, no. 9, pp. 968-980, Sep. 2010, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000203.

[4] S. Li, Y. Fang, and X. Wu, "A systematic review of lean construction in Mainland China," Journal of Cleaner Production, vol. 257, p. 120581, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120581.

[5] L. Chen et al., "Green construction for low-carbon cities: a review," Environ Chem Lett, vol. 21, no. 3, pp. 1627–1657, Jun. 2023, doi: 10.1007/s10311-022-01544-4.

[6] Y. Liu, Y. Xiao, and Y. Zhang, "Information Management and Green Construction Evaluation," 6th International Conference on Energy and Environmental Protection (ICEEP 2017), Atlantis Press, Jun. 2017, pp. 1484-1490. doi: 10.2991/iceep-17.2017.263.

[7] R. T. Masyhur, A. H. Alias, Z. Zulkafli, and N. A. Haron, "A Review on Green Building vs. Green Construction: Key Differences, Benefits, Challenges, Rating, and Future OutlookGreen Building vs. Green Construction: Exploring Key Differences and Challenges for a More Sustainable Industry (A Narrative Review)," International Journal of Built Environment and Sustainability, vol. 12, no. 3, pp. 31-48, Sep. 2025, doi: 10.11113/ijbes.v12.n3.1423.

[8] X. Wu, W. Zhao, and T. Ma, "Improving the Impact of Green Construction Management on the Quality of Highway Engineering Projects," Sustainability, vol. 11, no. 7, p. 1895, Jan. 2019, doi: 10.3390/su11071895.

[9] V. H. S. Pham and T. D. Dau, "Analyzing Factors of Environmental Pollution from Construction Sites and Proposing Solutions", ijscet, vol. 15, no. 3, pp. 21-30, Dec. 2024, Accessed: Jan. 21, 2026. [Online]. Internet: https://publisher.uthm.edu.my/ojs/index.php/IJSCET/article/view/19846.

[10] M. Marzouk, E. M. Abdelkader, and K. Al-Gahtani, "Building information modeling-based model for calculating direct and indirect emissions in construction projects," Journal of Cleaner Production, vol. 152, pp. 351-363, May 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.138.

[11] Z. Wu, X. Zhang, and M. Wu, "Mitigating construction dust pollution: state of the art and the way forward," Journal of Cleaner Production, vol. 112, pp. 1658–1666, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.01.015.

[12] L. T. Huyền, Đinh T. P. Lan, và N. T. Trung, "Hướng tới tòa nhà phát thải ròng bằng '0' tại Việt Nam", JOMC, vol 15, số 01, tr 47-54, tháng 2, 2025, doi.org/10.54772/jomc.01.2025.848.

[13] N. T. Trung, N. S. Thành, và L. V. Tuấn, "Đánh giá thực trạng và đề xuất giải pháp giảm nguy cơ gây ô nhiễm môi trường không khí đối với máy móc thi công trong các dự án đầu tư xây dựng dân dụng", JOMC, vol 14, số 05, tr 123 –127, tháng 9, 2024.4, doi: 10.54772/jomc.5.2024.777.

[14] M. Kaluarachchi, A. Waidyasekara, R. Rameezdeen, and N. Chileshe, "Mitigating Dust Pollution from Construction Activities: A Behavioural Control Perspective," Sustainability, vol. 13, no. 16, Art. no. 16, Jan. 2021, doi: 10.3390/su13169005.

[15] Q. Luo et al., "Occupational health risk assessment based on dust exposure during earthwork construction," Journal of Building Engineering, vol. 44, p. 103186, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103186.

[16] D. Cheriyan and J. Choi, "A review of research on particulate matter pollution in the construction industry," Journal of Cleaner Production, vol. 254, p. 120077, May 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120077.

[17] G. Tao, J. Feng, H. Feng, H. Feng, and K. Zhang, "Reducing Construction Dust Pollution by Planning Construction Site Layout," Buildings, vol. 12, no. 5, Art. no. 5, May 2022, doi: 10.3390/buildings12050531.

[18] J. Hong et al., "An empirical analysis of environmental pollutants on building construction sites for determining the real-time monitoring indices," Building and Environment, vol. 170, p. 106636, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106636.

[19] J. Zuo, R. Rameezdeen, M. Hagger, Z. Zhou, and Z. Ding, "Dust pollution control on construction sites: Awareness and self-responsibility of managers," Journal of Cleaner Production, vol. 166, pp. 312-320, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.027.

[20] B. Barkokébas Jr., B. M. Vasconcelos, E. M. G. Lago, and A. F. P. Alcoforador, "Analysis of noise on construction sites of high-rise buildings," WORK, vol. 41, no. S1, pp. 2982-2990, Mar. 2012, doi: 10.3233/WOR-2012-0553-2982.

[21] H. H. Shaikh, N. Y. Zainun, and S. H. Khahro, "Impact of Noise Pollution at Construction Sites of Sindh Pakistan," E3S Web Conf., vol. 437, p. 02003, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202343702003.

[22] N. Kwon, M. Park, H.-S. Lee, J. Ahn, and M. Shin, "Construction Noise Management Using Active Noise Control Techniques," Journal of Construction Engineering and Management, vol. 142, p. 04016014, Jan. 2016, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001121.

[23] S. C. Lee, J. H. Kim, and J. Y. Hong, "Characterizing perceived aspects of adverse impact of noise on construction managers on construction sites," Building and Environment, vol. 152, pp. 17-27, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.02.005.

[24] A. W. A. Hammad, A. Akbarnezhad, and D. Rey, "A multi-objective mixed integer nonlinear programming model for construction site layout planning to minimise noise pollution and transport costs," Automation in Construction, vol. 61, pp. 73–85, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.autcon.2015.10.010.

[25] X. Ning, J. Qi, C. Wu, and W. Wang, "Reducing noise pollution by planning construction site layout via a multi-objective optimization model," Journal of Cleaner Production, vol. 222, pp. 218-230, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.018.

[26] M. J. Ballesteros, M. D. Fernández, S. Quintana, J. A. Ballesteros, and I. González, "Noise emission evolution on construction sites. Measurement for controlling and assessing its impact on the people and on the environment," Building and Environment, vol. 45, no. 3, pp. 711-717, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.08.011.

[27] Department of Project Management, Ho Chi Minh City Open University (HCMCOU), Ho Chi Minh City, Vietnam and P. Et Al., "Key factors affecting construction wastes in Vietnam," Int. j. adv. appl. sci., vol. 6, no. 10, pp. 19-24, Oct. 2019, doi: 10.21833/ijaas.2019.10.004.

[28] Lê Hồng Dương, "Các yếu tố ảnh hưởng đến phát sinh chất thải xây dựng trong quá trình thi công và đề xuất giải pháp giảm thiểu", JOMC, vol 15, số 02, tr 113-118, tháng 4 2025, doi: 10.54772/jomc.02.2025.864.

[29] A. Parisi Kern, M. Ferreira Dias, M. Piva Kulakowski, and L. Paulo Gomes, "Waste generated in high-rise buildings construction: A quantification model based on statistical multiple regression," Waste Management, vol. 39, pp. 35–44, May 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2015.01.043.

[30] C. Luangcharoenrat, S. Intrachooto, V. Peansupap, and W. Sutthinarakorn, "Factors Influencing Construction Waste Generation in Building Construction: Thailand's Perspective," Sustainability, vol. 11, no. 13, Art. no. 13, Jan. 2019, doi: 10.3390/su11133638.

[31] J. Won, J. C. P. Cheng, and G. Lee, "Quantification of construction waste prevented by BIM-based design validation: Case studies in South Korea," Waste Management, vol. 49, pp. 170-180, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2015.12.026.

[32] V. Chellappa, A. Lincy, and K. Ramakrishnan, "Factors influencing construction waste generation: perspectives from India," Waste and Resource Management, vol. 177, Aug. 2023, doi: 10.1680/jwarm.23.00006.

[33] K. K. Naji, M. Gunduz, and M. F. Hamaidi, "Major Factors Affecting Construction Waste Management in Infrastructure Projects Using Structural Equation Model," Journal of Construction Engineering and Management, vol. 148, no. 10, p. 04022101, Oct. 2022, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002358.

[34] T. Meng, X. Shan, Z. Ren, and Q. Deng, "Analysis of Influencing Factors on Solid Waste Generation of Public Buildings in Tropical Monsoon Climate Region," Buildings, vol. 14, no. 2, Art. no. 2, Feb. 2024, doi: 10.3390/buildings14020513.

[35] R. Hasan, Md. F. Rakib, and M. Rahman, "Quantification of Construction Waste through BIM," Journal of Technology Management and Business, vol. 9, Jun. 2022, doi: 10.30880/jtmb.2022.09.01.007.

[36] T.-Q. Nguyen, E. C. W. Lou, and B. N. Nguyen, "A theoretical BIM-based framework for quantity take-off to facilitate progress payments: the case of high-rise building projects in Vietnam," International Journal of Building Pathology and Adaptation, vol. 42, no. 4, pp. 704-728, Jan. 2022, doi: 10.1108/IJBPA-10-2021-0139.

[37] H. Yuan, "Key indicators for assessing the effectiveness of waste management in construction projects," Ecological Indicators, vol. 24, pp. 476-484, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.ecolind.2012.07.022.

[38] E. Manowong, "Investigating factors influencing construction waste management efforts in developing countries: an experience from Thailand," Waste Manag Res, vol. 30, no. 1, pp. 56-71, Jan. 2012, doi: 10.1177/0734242X10387012.

[39] J. Liu, Y. Yi, and X. Wang, "Exploring factors influencing construction waste reduction: A structural equation modelling approach," Journal of Cleaner Production, vol. 276, p. 123185, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123185.

[40] W. Lu and H. Yuan, "Exploring critical success factors for waste management in construction projects of China," Resources, Conservation and Recycling, vol. 55, no. 2, pp. 201-208, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.resconrec.2010.09.010.

[41] M. S. Bajjou and A. Chafi, "Exploring the critical waste factors affecting construction projects," Engineering Construction & Architectural Management, vol. 29, no. 6, pp. 2268–2299, Jun. 2021, doi: 10.1108/ECAM-12-2020-1097.

[42] G. Karunasena, W. Wijeratne, A. Gajanayake, N. Udawatta, and S. Perera, "Stakeholder analysis of construction liquid waste management in Victoria, Australia," International Journal of Construction Management, pp. 1-12, Feb. 2025, doi: 10.1080/15623599.2025.2461353.

[43] G. Karunasena et al., "Liquid waste management in the construction sector: a systematic literature review," International Journal of Construction Management, vol. 24, no. 1, pp. 86-96, Jan. 2024, doi: 10.1080/15623599.2023.2211416.

[44] S. Belayutham, V. A. González, and T. W. Yiu, "A cleaner production-pollution prevention based framework for construction site induced water pollution," Journal of Cleaner Production, vol. 135, pp. 1363-1378, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.07.003.

■Ngày nhận bài: 26/02/2026 ■Ngày sửa bài: 05/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 12/3/2026

Nghiên cứu định hướng xây dựng tiêu chuẩn ray cho đường sắt Việt Nam

Research oriented to developing rail standards for Vietnam railways

> KS ĐÀO QUỐC ĐAO[1,*], TS NGUYỄN VĂN ĐĂNG[2]
[1]Tổng công ty Đường sắt Việt Nam
[2]Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
[*]Email: dao1944@gmail.com

TÓM TẮT

Ray là bộ phận chịu tải trực tiếp của kết cấu tầng trên đường sắt, có vai trò quyết định đối với an toàn chạy tàu, chi phí bảo trì và tuổi thọ khai thác của tuyến đường. Hiện nay, hệ thống đường sắt Việt Nam đang sử dụng nhiều loại ray có thông số kỹ thuật được quy định theo các tiêu chuẩn nước ngoài khác nhau như tiêu chuẩn châu Âu, Trung Quốc, Nga và Nhật Bản. Sự tồn tại đồng thời của nhiều hệ tiêu chuẩn dẫn đến những khó khăn nhất định trong công tác thiết kế, sản xuất, kiểm tra và quản lý chất lượng ray.

Bài báo trình bày tổng quan và phân tích so sánh các tiêu chuẩn ray điển hình trên thế giới, bao gồm EN 13674, TB/T 2344, GOST R 51685 và JIS E 1101, JIS E 1103. Nội dung nghiên cứu tập trung vào phạm vi áp dụng, các yêu cầu kỹ thuật chủ yếu, đặc tính vật liệu, dung sai kích thước và các quy định về kiểm tra chất lượng. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đánh giá mức độ phù hợp của các tiêu chuẩn này đối với điều kiện khai thác và định hướng phát triển của đường sắt Việt Nam. Kết quả nghiên cứu là cơ sở khoa học quan trọng cho việc đề xuất định hướng xây dựng tiêu chuẩn quốc gia về ray nhằm nâng cao tính thống nhất, độ tin cậy và hiệu quả khai thác của hệ thống đường sắt Việt Nam.

Từ khóa: Ray đường sắt; tiêu chuẩn ray quốc tế; kết cấu tầng trên đường sắt; tiêu chuẩn quốc gia TCVN; đường sắt Việt Nam.

ABSTRACT

Rails are the primary load-bearing components of the railway track superstructure and play a crucial role in ensuring operational safety, maintenance efficiency and the service life of railway infrastructure. In Vietnam, various rail types with technical specifications defined by different foreign standards are currently used, including those developed in Europe, China, Russia and Japan. The coexistence of multiple standards leads to certain inconsistencies in rail design, manufacturing, inspection, and quality management.

This paper presents a comprehensive review and comparative analysis of major rail standards applied worldwide, including EN 13674, TB/T 2344, GOST R 51685, and JIS E 1101 and JIS E 1103. The study focuses on their scope of application, key technical requirements, material properties, dimensional tolerances and quality control provisions. Based on this analysis, the suitability of these standards for the operational conditions and future development of Vietnam's railway system is evaluated. The findings provide important technical insights and serve as a scientific basis for proposing orientations for the development of a unified national rail standard, contributing to improved reliability, compatibility and long-term modernization of Vietnam's railway infrastructure.

Keywords: Railway rail; international rail standards; railway track superstructure; national standard (TCVN); Vietnam railway.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Mạng lưới đường sắt quốc gia có tổng chiều dài khoảng 3.143 km (trong đó 2.703 km đường chính tuyến, 612 km đường ga và đường nhánh), bao gồm 3 loại khổ đường, chủ yếu là khổ đường 1.000 mm chiếm 85%, khổ đường 1.435 mm chiếm 6% và khổ đường lồng 1.435/1.000 mm chiếm 9%. Hệ thống đường ray trên các tuyến của đường sắt Việt Nam đang sử dụng nhiều loại ray khác nhau như: Ray 24 kg/m, ray 25 kg/m, ray 30 kg/m, ray 38 kg/m, ray 43 kg/m, ray 50 kg/m, trong đó phổ biến là loại ray 43 kg/m và 50 kg/m. Theo nghiên cứu, hiện nay Việt Nam chưa sản xuất được ray mà phải mua từ nước ngoài như châu Âu, Trung Quốc, Nga, Nhật Bản và phải sử dụng các tiêu chuẩn ray của nước cung cấp, như Tiêu chuẩn EN 13674 của châu Âu, Tiêu chuẩn TB/T 2344 của Trung Quốc, Tiêu chuẩn JIS E 1011 của Nhật Bản, Tiêu chuẩn GOST R 51685 của Nga.

Việc tồn tại trên đường sắt Việt Nam nhiều hệ tiêu chuẩn ray khác nhau gây ra những khó khăn nhất định như: Thiếu tính thống

nhất trong thiết kế và lựa chọn ray, gây khó khăn trong công tác kiểm tra chất lượng và nghiệm thu và hạn chế khả năng tiêu chuẩn hóa thiết bị và phụ kiện.

Trong bối cảnh Việt Nam đang triển khai các dự án hiện đại hóa đường sắt, xây dựng đường sắt tốc độ cao và phát triển hệ thống đường sắt đô thị, việc xây dựng một hệ thống tiêu chuẩn kỹ thuật thống nhất cho ray đường sắt là yêu cầu cấp thiết.

2. TỔNG QUAN VỀ CÁC TIÊU CHUẨN RAY CỦA MỘT SỐ QUỐC GIA TRÊN THẾ GIỚI

2.1. Tiêu chuẩn ray châu Âu EN 13674

EN 13674 là tiêu chuẩn châu Âu quy định các yêu cầu kỹ thuật đối với ray kiểu Vignole (ray đế bằng), dùng cho hệ thống đường sắt. Tiêu chuẩn này do CEN ban hành và được áp dụng rộng rãi tại các quốc gia châu Âu cho cả đường sắt thông thường và đường sắt tốc độ cao.

Tiêu chuẩn EN 13674 bao quát đầy đủ các nội dung từ vật liệu, kích thước hình học, chế tạo, kiểm tra, nghiệm thu đến truy xuất nguồn gốc, nhằm đảm bảo ray đạt các yêu cầu về độ bền cơ học, khả năng chịu mỏi, chống mài mòn và độ an toàn khi khai thác lâu dài.

EN 13674 hiện là một trong những tiêu chuẩn ray có mức độ hoàn thiện cao nhất trên thế giới, thường được các nước dùng làm chuẩn tham chiếu quốc tế khi xây dựng tiêu chuẩn quốc gia như GOST (Nga), TB/T (Trung Quốc)…

2.2. Tiêu chuẩn ray Trung Quốc TB/T 2344

TB/T 2344 là tiêu chuẩn ngành Đường sắt Trung Quốc quy định các yêu cầu kỹ thuật đối ray dùng cho đường sắt. Tiêu chuẩn này được ban hành và quản lý bởi Bộ Đường sắt Trung Quốc (trước đây) và hiện do các cơ quan kế thừa quản lý trong hệ thống tiêu chuẩn đường sắt quốc gia.

TB/T 2344 được xây dựng dựa trên thực tiễn khai thác mạng lưới đường sắt lớn nhất thế giới của Trung Quốc, với đặc trưng: Tải trọng trục lớn, mật độ chạy tàu cao, mạng lưới gồm cả đường sắt thường, đường sắt tải nặng và đường sắt tốc độ cao và điều kiện khí hậu rất đa dạng (lạnh - nóng - khô - ẩm - sa mạc - cao nguyên). Vì vậy, Tiêu chuẩn TB/T 2344 mang đậm tính thực dụng kỹ thuật, nhấn mạnh đến khả năng chịu tải, độ bền lâu dài và tính ổn định trong khai thác hơn là tối ưu hóa hình học theo kiểu châu Âu.

Tiêu chuẩn TB/T 2344 khi biên soạn có tham khảo Tiêu chuẩn châu Âu EN 13674.

2.3. Tiêu chuẩn ray Nga GOST R 51685

GOST R 51685 là tiêu chuẩn quốc gia của Liên bang Nga quy định các yêu cầu kỹ thuật đối với ray dùng cho đường sắt. Tiêu chuẩn này được xây dựng trên cơ sở kinh nghiệm lâu dài trong khai thác mạng lưới đường sắt có quy mô lớn, tải trọng trục cao, chiều dài tuyến rất lớn và điều kiện khí hậu khắc nghiệt (biên độ nhiệt lớn, mùa đông lạnh sâu). Mục tiêu cốt lõi của GOST R 51685 là bảo đảm độ bền lâu dài, độ tin cậy và an toàn vận hành trong điều kiện khắc nghiệt, hơn là tối ưu hóa theo tiêu chí hình học - động lực học như tiêu chuẩn châu Âu. Do đó, tiêu chuẩn này mang đậm tính "bền vững kỹ thuật" và "an toàn".

GOST R 51685 là tiêu chuẩn có giá trị kỹ thuật cao trong lĩnh vực ray chịu tải nặng và khai thác dài hạn. Tiêu chuẩn GOST R 51685 khi biên soạn có tham khảo tiêu chuẩn châu Âu về ray EN 13674.

2.4. Tiêu chuẩn ray Nhật JIS E1101 và JIS E 1103

JIS E 1101 là tiêu chuẩn công nghiệp Nhật Bản quy định các yêu cầu kỹ thuật đối với ray thép dùng cho đường sắt, nội dung biên soạn tập trung chủ yếu vào yêu cầu về vật liệu, thành phần hóa học, tính chất cơ học và quy định kiểm tra - thử nghiệm. Trong hệ thống tiêu chuẩn JIS, các yêu cầu về hình dạng, kích thước và dung sai hình học của ray thường được quy định trong tiêu chuẩn liên quan là JIS E 1103. Vì vậy, trên thực tế, JIS E 1101 và JIS E 1103 được sử dụng song song để hình thành bộ yêu cầu kỹ thuật đầy đủ cho ray đường sắt.

Tiêu chuẩn JIS E 1101 phản ánh đặc trưng của hệ thống đường sắt Nhật Bản: Yêu cầu rất cao về độ tin cậy, tính ổn định dài hạn và khả năng kiểm soát chất lượng trong sản xuất, nhằm bảo đảm an toàn cho các hệ thống đường sắt có mật độ chạy tàu lớn, đặc biệt là đường sắt đô thị và cao tốc.

3. ĐỊNH HƯỚNG XÂY DỰNG TIÊU CHUẨN RAY CHO ĐƯỜNG SẮT VIỆT NAM

3.1. Sự cần thiết xây dựng tiêu chuẩn

Ray là bộ phận chịu tải trực tiếp và có vai trò quyết định đến an toàn, độ bền và chất lượng khai thác của kết cấu tầng trên đường sắt. Trong quá trình khai thác, ray chịu tác động đồng thời của tải trọng tĩnh, tải trọng động, lực va đập, lực dẫn hướng cũng như các tác động môi trường. Do đó, việc quy định thống nhất các yêu cầu kỹ thuật đối với ray là điều kiện tiên quyết nhằm bảo đảm an toàn chạy tàu, kéo dài tuổi thọ công trình và nâng cao hiệu quả khai thác.

Hiện nay, hệ thống tiêu chuẩn quốc gia Việt Nam liên quan đến ray còn thiếu đồng bộ, chưa cập nhật đầy đủ các tiến bộ kỹ thuật quốc tế, đặc biệt đối với ray xử lý nhiệt và ray sử dụng trong điều kiện khai thác hiện đại. Trong khi đó, Việt Nam đang từng bước cải tạo, nâng cấp mạng lưới đường sắt hiện hữu và nghiên cứu phát triển các tuyến mới, đặt ra yêu cầu cấp thiết phải xây dựng một tiêu chuẩn quốc gia thống nhất, hiện đại và phù hợp với điều kiện trong nước.

3.2. Hệ thống các cơ sở pháp lý và khoa học làm căn cứ xây dựng tiêu chuẩn ray cho đường sắt Việt Nam

Việc xây dựng tiêu chuẩn ray cho đường sắt Việt Nam được thực hiện trên các cơ sở: Tuân theo Luật Tiêu chuẩn và Quy chuẩn kỹ thuật, chiến lược phát triển đường sắt Việt Nam, tham khảo các tiêu chuẩn quốc tế và tiêu chuẩn nước ngoài liên quan.

Kế thừa các kết quả nghiên cứu về ray sử dụng ở Việt Nam và nước ngoài; phân tích, đánh giá các tiêu chuẩn về ray hiện có ở Việt Nam và trên thế giới, qua đó nghiên cứu lựa chọn xây dựng tiêu chuẩn ray cho Việt Nam, áp dụng cho công tác sản xuất, mua sắm, bảo trì ray phục vụ cho đường sắt hiện có cũng như chuẩn bị cho công tác xây dựng các tuyến đường sắt mới

- *Hệ thống tiêu chuẩn hiện hành của Việt Nam về ray* chưa đồng bộ, chưa có tiêu chuẩn quốc gia riêng về ray đường sắt, mới chỉ có Tiêu chuẩn cơ sở TCCS 04:2022/VNRA - Vật tư, vật liệu, phụ kiện sử dụng trong công tác bảo trì công trình đường sắt. Tiêu chuẩn này quy định về các loại vật tư dùng cho công tác bảo trì đường sắt như: Ray, ghi, tà vẹt, phụ kiện... Với nội dung liên quan đến ray đường sắt, TCCS 04:2022 chỉ quy định các dung sai kích thước hình học, thành phần hóa học, độ cứng đầu ray của một số loại ray 43 kg/m, 50 kg/m, 50 N kg/m của Trung Quốc, Nga, Nhật Bản.

- *Hệ thống các tiêu chuẩn nước ngoài về ray đường sắt:*

Tiêu chuẩn ray châu Âu EN 13674-1:2011+A1:2017, Railway applications - Track - Rail - Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above (Ứng dụng đường sắt - Đường ray - Ray - Phần 1: Ray dùng cho đường sắt từ 46 kg/m và lớn hơn).

Tiêu chuẩn ray châu Âu EN 136742:2019, Railway applications - Track - Rail - Part 2: Switch and crossing rails used in conjunction with Vignole railway rails 46 kg/m and bove (Ứng dụng đường sắt - Đường ray - Ray - Phần 2: Ray ghi và giao cắt dùng ray đường sắt từ 46/kgm và lớn hơn).

Tiêu chuẩn ray châu Âu EN 13674-3:2006+A1:2010 Railway applications. Track. Rail - Check rails (Ứng dụng đường sắt - Đường

ray - Ray - Phần 3: Ray hộ bánh).

Tiêu chuẩn ray châu Âu BS EN 136744:2019, Railway một số applications - Track - Rail - Part 4: Vignole railway rails from 27 kg/m to, but excluding 46 kg/m (Ứng dụng đường sắt - Đường ray - Ray - Phần 4: Ray dùng cho đường sắt từ 27 kg/m đến ray nhỏ hơn 46 kg/m).

Tiêu chuẩn ray Trung Quốc TB/T 2344.1:2020, Rails-Part 1: 43 kg/m to 75 kg/m rails (Ray đường sắt - Phần 1: Ray từ 43 kg/m đến 75 kg/m).

Tiêu chuẩn ray Trung Quốc TB/T 2344.2:2020, Rails-Part 2: Rails-Part 2: Switch and crossing rails (Ray đường sắt - Phần 2: Ray dùng cho ghi và giao cắt).

Tiêu chuẩn ray Trung Quốc TB/T 2344.3-2018, Rails - Part 3: Specification of compromise rail (Ray đường sắt - Phần 3: Yêu cầu kỹ thuật của ray hình dạng đặc biệt).

Tiêu chuẩn ray Trung Quốc TB/T 3110-2018, 33 kg/m channel for guardrails (Ray hộ bánh 33 kg/m).

Tiêu chuẩn ray Nga GOST R 51685, Railway Rails - Genaral specification (Ray đường sắt - Yêu cầu kỹ thuật chung).

Tiêu chuẩn ray Liên xô GOST 7173-54, Rail P43 (Ray 43 kg/m).

Tiêu chuẩn ray Nhật Bản JIS E 1101, Flat bottom railway rails and special rails for switches and crossings of non-treated steel (Ray đường sắt đế bằng và ray đặc biệt không nhiệt luyện dùng cho ghi và giao cắt).

3.3. Lựa chọn tiêu chuẩn làm cơ sở chính để biên soạn và đề xuất cấu trúc của tiêu chuẩn ray đường sắt Việt Nam

Trên cơ sở nghiên cứu, phân tích và so sánh 4 hệ tiêu chuẩn ray chủ yếu đang được áp dụng trên thế giới cũng như ở Việt Nam gồm: EN 13674 (châu Âu), TB/T 2344 (Trung Quốc), JIS E1101 và JIS E1103 (Nhật Bản) và GOST R 51685 (Liên bang Nga), có thể rút ra một số nhận định tổng quát sau:

Việc lựa chọn tiêu chuẩn làm cơ sở để xây dựng tiêu chuẩn quốc gia cần đáp ứng các tiêu chí: Tính hiện đại của tiêu chuẩn, phạm vi áp dụng, mức độ phổ biến quốc tế, khả năng phù hợp với định hướng phát triển của Việt Nam

Trên cơ sở các tiêu chí trên, có thể rút ra một số nhận xét sau:

Thứ nhất, EN 13674 là hệ thống tiêu chuẩn ray có cấu trúc hoàn chỉnh nhất hiện nay, bao gồm nhiều phần quy định cho các loại ray khác nhau như ray đế bằng, ray dùng cho ghi, ray hộ bánh và ray dùng cho đường sắt đô thị.

Thứ hai, tiêu chuẩn này được áp dụng rộng rãi trong các hệ thống đường sắt tiên tiến tại châu Âu và nhiều quốc gia khác trên thế giới.

Thứ ba, các yêu cầu kỹ thuật trong EN 13674 được xây dựng phù hợp với xu hướng phát triển của đường sắt hiện đại, bao gồm đường sắt tải trọng lớn và đường sắt tốc độ cao.

Thứ tư, việc sử dụng EN 13674 làm cơ sở xây dựng tiêu chuẩn quốc gia sẽ tạo điều kiện thuận lợi cho việc nhập khẩu ray, thiết bị và công nghệ từ các quốc gia phát triển.

Vì các lý do trên, việc lựa chọn EN 13674 làm cơ sở chính để xây dựng tiêu chuẩn quốc gia về ray cho đường sắt Việt Nam là hợp lý và có cơ sở khoa học, đồng thời có tham khảo các tiêu chuẩn về ray: TB/T 2344, GOST R 51685, JIS E 1101/JIS E 1103.

Dự kiến tên và bố cục của tiêu chuẩn quốc gia về ray dùng cho đường sắt Việt Nam như sau:

- Tên tiêu chuẩn: TCVN Ray đường sắt - Yêu cầu kỹ thuật và phương pháp thử.

- Bố cục: đề xuất gồm 3 phần với nội dung như sau:

+ *Phần 1 - Ray từ 43 kg/m và lớn hơn,* phần này quy định các yêu cầu kỹ thuật và phương pháp thử đối với các loại ray có khối lượng từ 43 kg/m trở lên, sử dụng cho đường sắt (bao gồm cả đường sắt thông thường, đường sắt đô thị và đường sắt tốc độ cao).

+ *Phần 2 - Ray dùng cho ghi và giao cắt*, phần này quy định các yêu cầu kỹ thuật và phương pháp thử đối với các loại ray sử dụng trong ghi và giao cắt đường sắt.

+ *Phần 3 - Ray hộ bánh,* phần này quy định các yêu cầu kỹ thuật và phương pháp thử đối với các loại ray sử dụng làm ray hộ bánh trong đường sắt.

4. KẾT LUẬN

Hệ thống đường sắt Việt Nam hiện đang sử dụng nhiều loại ray được sản xuất theo các tiêu chuẩn khác nhau của nước ngoài như EN 13674, TB/T 2344, GOST R 51685 và JIS E 1101, JIS E 1103, dẫn đến sự không đồng bộ nhất định về thông số kỹ thuật và gây khó khăn trong công tác quản lý, khai thác và bảo trì. Nghiên cứu so sánh các hệ tiêu chuẩn ray của châu Âu, Trung Quốc, Nga và Nhật Bản cho thấy các tiêu chuẩn này có nền tảng kỹ thuật tương đồng, bao gồm các yêu cầu cơ bản về vật liệu, cơ tính, hình học, kiểm tra và nghiệm thu, nhưng có sự khác biệt về triết lý xây dựng tiêu chuẩn và điều kiện áp dụng.

Bài báo đề xuất định hướng xây dựng tiêu chuẩn quốc gia về ray đường sắt Việt Nam theo hướng lấy Tiêu chuẩn EN 13674 làm khung cấu trúc và hệ thống yêu cầu kỹ thuật chủ đạo, đồng thời tham khảo các tiêu chuẩn TB/T 2344, GOST R 51685 và JIS để bổ sung các nội dung phù hợp với điều kiện khai thác và định hướng phát triển của đường sắt Việt Nam.

Nhóm nghiên cứu đã hoàn thành dự thảo TCVN: "Ray đường sắt - Yêu cầu kỹ thuật và phương pháp thử" theo Thuyết minh đề tài nghiên cứu khoa học và công nghệ: "Nghiên cứu định hướng xây dựng tiêu chuẩn ray dùng cho đường sắt Việt Nam" - Mã số DT 25313, đã được Bộ Giao thông vận tải (nay là Bộ Xây dựng) phê duyệt ngày 15/7/2024.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] EN 13674-1:2011+A1:2017 Railway applications - Track - Rail - Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above.

[2] EN 136742:2019 Railway applications - Track - Rail - Part 2: Switch and crossing rails used in conjunction with Vignole railway rails 46 kg/m and above.

[3] EN 13674-3:2006+A1:2010 Railway applications. Track. Rail - Check rails.

[4] EN 136744:2019 Railway applications - Track - Rail - Part 4: Vignole railway rails from 27 kg/m to, but excluding 46 kg/m.

[5] TB/T 2344.1:2020 Rails-Part 1: 43 kg/m to 75 kg/m rails.

[6] TB/T 2344.2:2020 Rails-Part 2: Rails-Part 2: Switch and crossing rails.

[7] TB/T 2344.3-2018 Rails- Part 3: Specification of compromise rail.

[8] TB/T 3110-2018 33 kg/m channel for guardrails.

[9] GOST R 51685 Railway Rails - Genaral specification.

[10] GOST 7173-54 Rail P43.

[11] JIS E 1101 Flat bottom railway rails and special rails for switches and crossings of non-treated steel.

[12] Tiêu chuẩn cơ sở TCCS 04:2022/VNRA: Vật tư, vật liệu, phụ kiện sử dụng trong công tác bảo trì công trình đường sắt.

■Ngày nhận bài: 06/3/2026 ■Ngày sửa bài: 15/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 23/3/2026

Sử dụng năng lượng tái tạo cho chiếu sáng tại Việt Nam

The use of renewable energy for lighting in Vietnam

> PGS.TS NGUYỄN HỒNG TIẾN
Nguyên Cục trưởng Cục Hạ tầng kỹ thuật, Bộ Xây dựng
Chủ tịch Hội Chiếu sáng Việt Nam

TÓM TẮT

Năng lượng tái tạo, hay còn gọi là năng lượng tái sinh, là nguồn năng lượng sạch được tạo ra từ các nguồn thiên nhiên hoặc các quá trình tự nhiên diễn ra liên tục như gió, ánh sáng mặt trời, thủy triều, sóng biển... Việc sử dụng năng lượng tái tạo hoặc năng lượng mới, đặc biệt là năng lượng mặt trời, đang trở thành xu hướng tất yếu trong chiếu sáng tại Việt Nam, góp phần giảm tiêu thụ điện, giảm chi phí vận hành và giảm phát thải CO_2, hướng tới xây dựng đô thị bền vững. Sử dụng năng lượng tái tạo trong chiếu sáng không chỉ là thay đổi nguồn điện, mà còn là chuyển sang một hệ thống chiếu sáng xanh hơn, thông minh hơn và hiệu quả hơn. Bài viết khái quát về thực trạng cũng như các giải pháp sử dụng năng lượng tái tạo cho chiếu sáng tại Việt Nam trong ngắn hạn và dài hạn.

Từ khóa: Năng lượng tái tạo; năng lượng mặt trời; năng lượng gió; điện rác.

ABSTRACT

Renewable energy, also known as regenerative energy, is a clean energy source generated from natural resources or natural processes that are continuously replenished, such as wind, sunlight, tides, and ocean waves. The use of renewable/new energy, particularly solar energy, is becoming an inevitable trend in lighting within Vietnam, reducing electricity consumption, lowering operational costs, and decreasing emissions, contributing to the construction of sustainable cities. Utilizing renewable energy in lighting is not merely replacing a power source; it is shifting to a greener, smarter, and more efficient lighting system. This article provides an overview of the current situation and solutions for using renewable energy in lighting in Vietnam, both in the short and long term".

Keywords: Renewable energy; solar energy; wind energy; waste-to-energy.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Năng lượng tái tạo được hiểu là các nguồn năng lượng được khai thác từ các quá trình tự nhiên, có khả năng tái tạo liên tục; đặc biệt, chúng không bị cạn kiệt theo thời gian mà có thể tái sinh. Nguồn năng lượng này được coi là giải pháp thay thế cho năng lượng hóa thạch, góp phần giảm thiểu ô nhiễm môi trường do việc khai thác và sử dụng năng lượng hóa thạch gây ra. Tuy các nguồn năng lượng này còn khá mới, nhưng chúng được kỳ vọng sẽ mang lại những chuyển biến tích cực trong tương lai. Chính vì thế mà năng lượng tái tạo ngày càng được triển khai rộng rãi ở nhiều quy mô khác nhau, đồng thời dần thay thế các nguồn nhiên liệu truyền thống trong các lĩnh vực như phát điện, sưởi ấm/làm mát và nhiên liệu động cơ.

Việc sử dụng năng lượng tái tạo/mới, đặc biệt là năng lượng mặt trời (NLMT) đang trở thành xu hướng trong chiếu sáng tại Việt Nam nhằm giảm tiêu thụ điện, giảm chi phí vận hành và giảm phát thải CO_2 góp phần xây dựng đô thị bền vững. Sử dụng năng lượng tái tạo trong chiếu sáng không chỉ là thay nguồn điện, mà là chuyển sang một hệ thống chiếu sáng xanh hơn, thông minh hơn và hiệu quả hơn. Giải pháp có hiệu quả nhất hiện nay thường là kết hợp đèn LED, năng lượng tái tạo đặc biệt là điện mặt trời ở vị trí phù hợp cùng với điều khiển thông minh để vừa tiết kiệm năng lượng, vừa nâng cao chất lượng không gian đô thị.

2. LỢI ÍCH CỦA VIỆC SỬ DỤNG NĂNG LƯỢNG TÁI TẠO CHO CHIẾU SÁNG

- Lợi ích kinh tế: Giảm điện tiêu thụ và chi phí vận hành.
- Lợi ích môi trường: Giảm phát thải khí nhà kính, góp phần vào mục tiêu Net Zero của Việt Nam.
- Lợi ích quản lý: Hệ thống chiếu sáng hiện đại có thể giám sát từ xa, phát hiện hỏng hóc nhanh hơn và giảm chi phí bảo trì. Hệ thống an toàn hơn và hoạt động độc lập, không bị ảnh hưởng khi lưới điện quốc gia gặp sự cố.
- Phát triển Đô thị văn minh: Ánh sáng chất lượng cao, thân thiện với môi trường, không gây chói, cải thiện mỹ quan đô thị.

3. THÁCH THỨC CỦA VIỆC SỬ DỤNG NĂNG LƯỢNG TÁI TẠO CHO CHIẾU SÁNG

- Chi phí đầu tư ban đầu cao: Hệ thống NLMT bao gồm pin, tấm pin năng lượng, bộ điều khiển đắt hơn đèn truyền thống.
- Tuổi thọ pin lưu trữ: Pin lưu trữ năng lượng (Lithium, Ắc quy) có tuổi thọ hạn chế, gây khó khăn trong bảo trì và xử lý rác thải công nghiệp.
- Chất lượng sản phẩm: Thị trường còn nhiều sản phẩm chất lượng hạn chế gây tâm lý lo ngại cho người sử dụng.

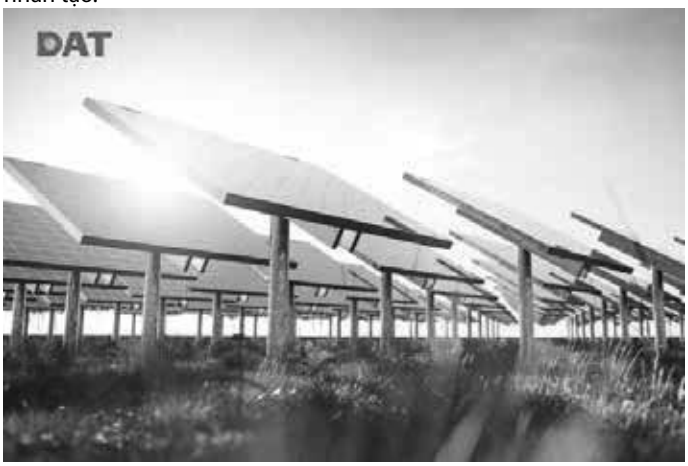
- Hạ tầng kỹ thuật: Chưa có hệ thống đồng bộ để quản lý hệ thống chiếu sáng thông minh quy mô lớn.

4. MỘT SỐ DẠNG NĂNG LƯỢNG TÁI TẠO CHO CHIẾU SÁNG

Hiện nay, Việt Nam đang phát triển đa dạng năng lượng tái tạo với mục đích đáp ứng nhu cầu năng lượng ngày càng tăng cũng như giảm thiểu tác động tiêu cực tới môi trường. Sau đây là một số dạng năng lượng mới cho chiếu sáng ở Việt Nam:

- Năng lượng mặt trời:

Năng lượng mặt trời là nguồn năng lượng sạch được nhiều người biết đến. Nguồn năng lượng mặt trời này có thể khai thác nhờ vào công nghệ hiện đại như quang điện, sưởi ấm và quang hợp nhân tạo.



Hình 1. Năng lượng mặt trời - nguồn năng lượng sạch, thân thiện môi trường

Hình 2. Điện mặt trời mái nhà giải pháp xanh hoá nguồn năng lượng

Hạn chế của năng lượng mặt trời là chi phí đầu tư ban đầu khá cao do giá của các tấm pin mặt trời và các thiết bị liên quan vẫn còn đắt đỏ. Ngoài ra, năng lượng mặt trời cũng chiếm diện tích lớn cho các nhà máy năng lượng mặt trời quy mô lớn, có thể gây xung đột với các mục đích sử dụng đất khác.

Điện mặt trời mái nhà sử dụng nguồn năng lượng mặt trời và không gây ra khí thải nhà kính hay ô nhiễm môi trường. Là nguồn năng lượng độc lập, không phụ thuộc vào lưới điện quốc gia hay các nguồn nhập khẩu. Hệ thống này thường được lắp đặt trên mái các công trình như nhà ở, nhà xưởng, tòa nhà văn phòng, trường học... để để khai thác nguồn năng lượng mặt trời và chuyển hóa thành điện năng sử dụng trực tiếp. Với ưu điểm không chiếm diện tích đất, dễ lắp đặt, tuổi thọ hệ thống kéo dài đến 20 - 25 năm, giải pháp này ngày càng được nhiều hộ dân và tổ chức quan tâm. Việc sử dụng điện mặt trời mái nhà giúp tăng tính chủ động, giảm rủi ro và phụ thuộc vào các nguồn điện truyền thống

- Năng lượng gió

Năng lượng gió có nhiều ưu điểm nổi bật: (1) Là nguồn năng lượng xanh, không gây ô nhiễm môi trường; (2) Có khả năng tái tạo, góp phần đảm bảo nguồn cung cấp năng lượng bền vững; (3) Có thể tiết kiệm chi phí vận hành và bảo trì so với các nguồn năng lượng khác; (4) Có tiềm năng phát triển lớn trên toàn thế giới, đặc biệt ở những vùng có điều kiện gió thuận lợi.

Tuy nhiên, năng lượng gió cũng có một số nhược điểm: (1) Là nguồn năng lượng không ổn định và phụ thuộc vào thời tiết; khi không có gió hoặc gió yếu, tuabin gió hoạt động kém hiệu quả; (2) Việc xây dựng và vận chuyển tuabin gió đòi hỏi chi phí đầu tư ban đầu cao; (3) Các tuabin gió có thể gây tiếng ồn, ảnh hưởng đến đời sống con người và động vật xung quanh; (4) Có thể gây ảnh hưởng đến cảnh quan tự nhiên.

- Năng lượng từ đốt rác sinh hoạt để chiếu sáng

Việc sử dụng năng lượng từ đốt rác sinh hoạt (điện rác) để chiếu sáng là một giải pháp bền vững, biến rác thải thành tài nguyên, giúp xử lý ô nhiễm môi trường và tạo ra điện năng tái tạo. Công nghệ này đốt rác ở nhiệt độ cao để tạo nhiệt, quay tua-bin phát điện, sau đó điện được hòa vào lưới quốc gia để phục vụ chiếu sáng công cộng hoặc dân dụng.

Ưu điểm của việc đốt rác phát điện chiếu sáng: (1) Xử lý rác hiệu quả - Giảm thiểu tối đa việc chôn lấp rác, tiết kiệm diện tích đất; (2) Tạo ra năng lượng sạch: Sản xuất điện từ nguồn rác thải tái tạo, giảm sự phụ thuộc vào than và dầu; (3) Thân thiện môi trường: Công nghệ hiện đại xử lý khí thải tốt, giảm phát thải khí metan (từ việc chôn lấp) ra môi trường; (4) An ninh năng lượng: Tận dụng nguồn rác tại chỗ để phát điện phục vụ chiếu sáng, giảm chi phí năng lượng.

Thách thức của việc đốt rác làm điện chiếu sáng: (1) Chi phí đầu tư cao: Xây dựng nhà máy điện rác đòi hỏi vốn đầu tư ban đầu lớn; (2) Yêu cầu kỹ thuật cao: Cần công nghệ tiên tiến để xử lý rác không phân loại và lọc khí thải hiệu quả; (3) Phân loại rác tại nguồn: Rác cần được phân loại tốt (đặc biệt là loại bỏ rác vô cơ khó cháy) để đạt hiệu quả đốt tối ưu.

Tại Việt Nam, các nhà máy điện rác như ở Hà Nội (Sóc Sơn) và TP.HCM đã và đang đi vào hoạt động, góp phần quan trọng vào việc chuyển hóa rác thải thành điện năng.

- Năng lượng thủy triều

Tương tự các dạng năng lượng sạch khác, năng lượng thủy triều được khai thác để sản xuất điện thông qua quá trình chuyển đổi năng lượng. Tuy nhiên, việc sử dụng loại năng lượng này hiện vẫn còn hạn chế. Nguyên nhân chủ yếu là do chi phí đầu tư cao, đồng thời chỉ có thể triển khai tại các khu vực có vận tốc dòng chảy lớn hoặc biên độ thủy triều đủ lớn.

5. KHÁI QUÁT THỰC TRẠNG PHÁT TRIỂN NĂNG LƯỢNG TÁI TẠO TẠI VIỆT NAM

Trong những năm gần đây, Việt Nam đã đạt được những bước tiến đáng kể trong việc phát triển năng lượng tái tạo, đặc biệt là điện mặt trời và điện gió. Theo Báo cáo "Triển vọng Năng lượng Việt Nam - Đường đến phát thải ròng bằng không" do Bộ Công Thương phối hợp với Cục Năng lượng Đan Mạch công bố năm 2024, tổng công suất lắp đặt năng lượng tái tạo của Việt Nam đã vượt mốc 25 GW vào cuối năm 2023, chiếm khoảng 27% tổng công suất điện quốc gia. Sự gia tăng này phản ánh cam kết mạnh mẽ của Việt Nam trong việc chuyển đổi sang các nguồn năng lượng sạch và bền vững.

Năng lượng điện mặt trời: Công suất lắp đặt điện mặt trời đạt 17,2 GW vào năm 2023, tăng từ 16,6 GW năm 2022. Trong đó, điện

mặt trời áp mái chiếm hơn 60%, chủ yếu được triển khai tại các khu công nghiệp và hộ gia đình. Sự phổ biến của điện mặt trời áp mái cho thấy xu hướng tận dụng không gian sẵn có để sản xuất điện sạch, giảm phụ thuộc vào lưới điện quốc gia và góp phần bảo vệ môi trường.

Năng lượng điện gió: Công suất điện gió đạt 5,2 GW vào năm 2023 và dự kiến sẽ tăng lên 7 GW vào cuối năm 2024, nhờ vào các dự án mới tại Bình Thuận, Ninh Thuận và khu vực Tây Nguyên. Báo cáo của Bộ Công Thương năm 2024 cũng nhấn mạnh tiềm năng điện gió ngoài khơi của Việt Nam có thể đạt tới 160 GW, mở ra cơ hội lớn cho việc phát triển các dự án điện gió quy mô lớn trong tương lai.

Năng lượng sinh khối được khai thác từ nhiều nguồn khác nhau như gỗ, củi, phế thải nông nghiệp và rác thải đô thị. Đây là một yếu tố quan trọng góp phần giải quyết bài toán bảo đảm an ninh năng lượng quốc gia, giảm thiểu ô nhiễm môi trường, đồng thời tối ưu chi phí và nâng cao hiệu quả sản xuất - kinh doanh. Tại Việt Nam, các nhà máy điện rác như ở Hà Nội (Sóc Sơn) và TP.HCM đã và đang đi vào hoạt động, góp phần quan trọng trong việc chuyển hóa rác thải thành điện năng.

Hình 3. Năng lượng mặt trời và năng lượng gió *(Nguồn: Ảnh sưu tầm)*

6. TIỀM NĂNG NĂNG LƯỢNG TÁI TẠO TẠI VIỆT NAM

Việt Nam có tiềm năng lớn trong phát triển năng lượng tái tạo nhờ điều kiện tự nhiên thuận lợi và các chính sách hỗ trợ từ Chính phủ. Các tiềm năng nổi bật bao gồm:

• Nguồn tài nguyên phong phú: Việt Nam sở hữu nguồn tài nguyên tự nhiên đa dạng, tạo điều kiện thuận lợi cho việc khai thác và phát triển năng lượng tái tạo hiệu quả.

• Chính sách và cam kết mạnh mẽ từ Chính phủ: Việc ban hành nhiều chính sách ưu đãi đã khuyến khích các doanh nghiệp đầu tư vào lĩnh vực năng lượng tái tạo.

• Khả năng thu hút đầu tư quốc tế: Việt Nam đang trở thành điểm đến hấp dẫn đối với các nhà đầu tư trong lĩnh vực năng lượng tái tạo, đặc biệt là các doanh nghiệp đến từ châu Âu, Nhật Bản và Hàn Quốc.

Xu hướng chuyển đổi năng lượng và nhu cầu thị trường: Nhu cầu tiêu thụ điện của Việt Nam tăng trung bình 8 - 10% mỗi năm. Trong khi nguồn cung điện từ nhiên liệu hóa thạch ngày càng cạn kiệt.

Cơ hội phát triển công nghệ và nguồn nhân lực: Việt Nam đang từng bước phát triển các công nghệ lưu trữ điện, sản xuất hydro xanh và đào tạo nguồn nhân lực chất lượng cao.

7. SỬ DỤNG NĂNG LƯỢNG TÁI TẠO TẠI MỘT SỐ DOANH NGHIỆP CHIẾU SÁNG

(1). Giải pháp chiếu sáng thông minh sử dụng kết hợp đèn LED và năng lượng mặt trời của Công ty Cổ phần Bóng đèn Phích nước Rạng Đông được Bộ Công Thương trao tặng Giải thưởng Giải pháp công nghệ hiệu quả năng lượng đổi mới, sáng tạo năm 2025.

Trong lĩnh vực chiếu sáng, Công ty đã nghiên cứu, tạo ra một loạt sản phẩm chiếu sáng thông minh và hiệu quả sử dụng kết hợp đèn LED và năng lượng mặt trời (NLMT). Các sản phẩm này được chế tạo trên các dây chuyền tự động hóa cao dựa trên công nghệ sản xuất linh hoạt FMS (Flexible Manufacturing System) có tích hợp số CIM (Computer Integrated Manufacturing) và sử dụng phần mềm điều hành sản xuất - kinh doanh ERP/PLM/MES cho phép tối ưu hoá quy trình sản xuất.

Hình 4. Đèn LED năng lượng mặt trời của Rạng Đông *(Nguồn: Ảnh sưu tầm)*

Giải pháp chiếu sáng thông minh sử dụng kết hợp đèn LED và NLMT mang lại hiệu quả tiết kiệm năng lượng vượt trội so với các loại đèn chiếu sáng truyền thống nhờ hoàn toàn không tiêu thụ điện từ lưới điện quốc gia. Với hệ mô-đun LED hiệu suất cao (130 - 180 lm/W) kết hợp pin lưu trữ và tấm NLMT phù hợp, một bộ đèn LED-NLMT có thể thay thế hoàn toàn một bộ đèn cao áp sodium hoặc đèn compact đang lấy từ lưới điện quốc gia khoảng 60 - 250W công suất điện mỗi bóng.

Trong chu kỳ 10 năm, một hệ thống đèn LED-NLMT có công suất 30 - 100W có thể giúp tiết kiệm khoảng 1.000 - 2.500 kWh điện năng mỗi vị trí chiếu sáng (tùy công suất đèn truyền thống được thay thế), tương đương giảm 800 - 2.000 kg CO_2 phát thải ra môi trường. Như vậy, việc ứng dụng đèn LED-NLMT không chỉ mang lại hiệu quả tiết kiệm năng lượng rất cao mà còn có tác động tích cực đối với chi phí vận hành lâu dài và mục tiêu giảm phát thải carbon"

(2). Signify Việt Nam là một trong những đơn vị dẫn đầu trong việc thúc đẩy sử dụng năng lượng mới tại Việt Nam, đặc biệt là năng lượng mặt trời và các giải pháp chiếu sáng thông minh (IoT) giúp tối ưu hiệu suất điện năng.

Chiến lược sử dụng năng lượng mới của Signify Việt Nam tập trung vào 3 trụ cột chính: (i) Chiếu sáng năng lượng mặt trời (Solar Lighting); (ii) Hệ thống chiếu sáng kết nối (IoT) & Tiết kiệm năng lượng; (iii) Cam kết Phát triển Bền vững: Đạt danh hiệu "Thương hiệu chiếu sáng hiệu suất năng lượng cao nhất" trong nhiều năm liên tiếp tại Việt Nam và hướng tới mục tiêu Net Zero vào năm 2040, với 100% điện năng sử dụng trong sản xuất từ nguồn năng lượng tái tạo.

(3). Điện Quang xây dựng chiến lược phát triển bền vững trong kỷ nguyên Net Zero

Điện Quang chủ động đầu tư vào các nguồn năng lượng tái tạo, trong đó có năng lượng mặt trời, nhằm giảm sự phụ thuộc vào nguồn điện truyền thống. Nhằm thực hiện các mục tiêu phát triển bền vững gắn liền với tiêu chí an toàn - tiết kiệm - thân thiện môi trường, doanh nghiệp đã phát triển mảng kinh doanh cung cấp trọn gói các dịch vụ thiết kế, thi công, lắp đặt, vận hành và bảo trì hệ thống điện mặt trời áp mái. Đây là lĩnh vực có nhu cầu cao và được dự báo sẽ tiếp tục tăng trưởng mạnh trong những năm tới. Đồng thời, Điện Quang chú trọng phát triển các sản phẩm sử dụng năng lượng tái tạo nhằm giảm phát thải carbon và hỗ trợ quá trình chuyển đổi sang nguồn năng lượng xanh. Các sản phẩm này không chỉ đáp ứng nhu cầu sử dụng, mà còn được tích hợp các tính năng và ứng dụng công nghệ nhằm khuyến khích người dùng hình thành lối sống bền vững, tiết kiệm tài nguyên, giảm lượng chất thải và nâng cao nhận thức về bảo vệ môi trường.

Các sản phẩm/giải pháp tiêu biểu bao gồm: Hệ thống Điện Quang Solar: Giải pháp năng lượng xanh cho nhà ở và nhà máy. Đèn pha năng lượng mặt trời 60W: Thiết kế chống chói, tiêu chuẩn IP65 và Đèn LED Bulb thông minh Apollo: Kết nối Bluetooth/Wi-Fi, điều khiển sắc màu linh hoạt và tiết kiệm điện.

8. MỘT SỐ GIẢI PHÁP THÚC ĐẨY VIỆC SỬ DỤNG NĂNG LƯỢNG TÁI TẠO CHO CHIẾU SÁNG TẠI VIỆT NAM

Để thúc đẩy việc sử dụng năng lượng tái tạo trong chiếu sáng tại Việt Nam, các tổ chức, cơ quan và doanh nghiệp cần tập trung thực hiện đồng bộ các giải pháp về công nghệ thông minh, hoàn thiện chính sách khuyến khích đầu tư và nâng cao nhận thức cộng đồng, nhằm giảm dần sự phụ thuộc vào điện lưới, đặc biệt trong lĩnh vực chiếu sáng công cộng và dân dụng. Các giải pháp đề xuất bao gồm:

Thứ nhất, giải pháp công nghệ và kỹ thuật tập trung vào: (i) Chiếu sáng thông minh (IoT/AI): Tích hợp công nghệ trí tuệ nhân tạo (AI) và Internet of Things (IoT) để quản lý và điều chỉnh độ sáng của hệ thống đèn NLMT một cách tự động, nhằm tối ưu hóa tiêu thụ năng lượng; (ii) Lưu trữ năng lượng (BESS): Đẩy mạnh phát triển hệ thống pin lưu trữ (BESS) nhằm đảm bảo chiếu sáng ổn định vào ban đêm hoặc trong những ngày ít hoặc không có bức xạ mặt trời; (iii) Nội địa hóa thiết bị: Khuyến khích sản xuất trong nước để giảm giá thành đèn LED và pin năng lượng mặt trời; (iv) Cải tạo hệ thống chiếu sáng công cộng hiện có sang công nghệ LED và tích hợp năng lượng mặt trời từng phần.

Thứ hai, giải pháp về chính sách và tài chính: (i) Xây dựng cơ chế đặc thù, hỗ trợ tài chính, giảm thuế cho các doanh nghiệp, hộ gia đình đầu tư hệ thống đèn năng lượng mặt trời; (ii) Thúc đẩy điện mặt trời mái nhà: Khuyến khích phát triển điện mặt trời áp mái tự sản tự tiêu, đặc biệt trong khu công nghiệp, công sở; (iii) Khuyến khích sử dụng đèn năng lượng mặt trời trong các dự án công viên, đường phố, chiếu sáng công cộng mới; (iv) Xây dựng các tiêu chuẩn chất lượng đối với đèn năng lượng mặt trời nhập khẩu và sản xuất trong nước.

Thứ ba, giải pháp về tuyên truyền và nâng cao nhận thức: (i) Tiếp tục phổ biến tuyên truyền về lợi ích của việc tiết kiệm năng lượng, bảo vệ môi trường và giảm khí thải carbon; (ii) Nhân rộng các mô hình chiếu sáng dùng năng lượng mặt trời tại các đô thị.

9. KẾT LUẬN

Sử dụng năng lượng tái tạo trong chiếu sáng không chỉ là xu thế mà là trách nhiệm để xây dựng đô thị Việt Nam thông minh và bền vững. Việc kết hợp chặt chẽ giữa công nghệ hiện đại và chính sách hỗ trợ kịp thời sẽ giúp giải quyết bài toán chi phí và nâng cao hiệu quả sử dụng. Để khai thác hiệu quả nguồn năng lượng tái tạo và giải quyết các thách thức hiện tại, chúng ta cần một chiến lược phát triển tổng thể, bao gồm cải thiện chính sách hỗ trợ, giảm chi phí đầu tư, đẩy mạnh phát triển công nghệ, xây dựng hệ thống truyền dẫn, đào tạo phát triển nguồn nhân lực và tiếp tục tuyên truyền, nâng cao nhận thức sử dụng tiết kiệm năng lượng. Việc triển khai đồng bộ các giải pháp này không chỉ đảm bảo an ninh năng lượng, mà còn đóng góp vào mục tiêu giảm phát thải khí nhà kính và phát triển bền vững.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Mai Anh, "Chiếu sáng thông minh sử dụng đèn LED và năng lượng mặt trời giúp tiết kiệm năng lượng vượt trội", Chương trình Quốc gia sử dụng năng lượng tiết kiệm và hiệu quả, 2026.

[2] Trung Anh, "Điện Quang xây dựng chiến lược phát triển bền vững trong kỷ nguyên Net Zero", Tạp chí Thương trường, 20/02/2026.

[3] Hoàng Thị Hà, Công ty Cổ phần Sáng tạo Xanh Việt Nam (GREEN IN), "Khái quát về năng lượng tái tạo ở Việt Nam: Thực trạng, tiềm năng".

[4] Phan Thị Sông Thương, Nguyễn Tất Trường, "Một số vấn đề phát triển năng lượng tái tạo ở Việt Nam hiện nay: Thực trạng, tiềm năng và hàm ý giải pháp", Tạp chí Cộng sản, ISSN 2734-9071, 2024.

[5] Vũ Thành Long, "Giải pháp khai thác nguồn năng lượng tái tạo tại Việt Nam", Tạp chí Công Thương, số 11, 2025.

■Ngày nhận bài: 05/3/2026 ■Ngày sửa bài: 13/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 23/3/2026

Đề xuất bộ tiêu chí quản lý cấp nước các khu vực đô thị tỉnh Quảng Ninh bảo đảm cấp nước an toàn

Proposed set of criteria for urban water supply management in Quang Ninh province to ensure water safety

> THS PHẠM NGỌC CHÍNH
Cục Kết cấu hạ tầng Xây dựng, Bộ Xây dựng
Email: chinhphamngoc.dhkt@gmail.com

TÓM TẮT

Nước sạch đóng vai trò thiết yếu đối với sức khỏe cộng đồng, góp phần phòng ngừa các bệnh truyền nhiễm qua đường nước và nâng cao chất lượng sống của người dân. Quản lý cấp nước sạch hiệu quả sẽ góp phần giảm thiểu ô nhiễm nguồn nước, nâng cao khả năng thích ứng với biến đổi khí hậu và giảm thiểu rủi ro trong vận hành hệ thống cấp nước.

Việc xây dựng bộ tiêu chí và chỉ tiêu quản lý cấp nước an toàn nhằm thiết lập một khung đo lường thống nhất, cho phép lượng hóa mức độ an toàn, tin cậy và bền vững của hệ thống. Bộ tiêu chí này đồng thời là công cụ hỗ trợ cơ quan quản lý và đơn vị cấp nước trong việc đánh giá năng lực quản lý, giám sát hoạt động, qua đó kịp thời điều chỉnh chính sách, đầu tư và vận hành, góp phần bảo đảm an ninh nguồn nước, an toàn cấp nước và nâng cao chất lượng dịch vụ.

Từ khóa: Biến đổi khí hậu; quản lý rủi ro; an ninh nguồn nước; cấp nước an toàn.

ABSTRACT

Clean water plays a vital role in public health, contributing to the prevention of waterborne diseases and enhancing the residents' quality of life. Effective clean water supply management significantly contributes to mitigating water source pollution, improving climate change resilience, and minimizing risks to ensure safety in water supply operations. The development of a set of criteria and indicators for water supply management aims to establish a unified measurement framework capable of quantifying the safety, reliability, and sustainability of water supply systems. This set of criteria also serves as a strategic tool for regulatory authorities and water utilities to evaluate management capacity and monitor operations, facilitating timely adjustments in policies, investments, and operational practices. Consequently, it contributes to strengthening water security, ensuring water safety, and enhancing the overall quality of water supply services.

Keywords: Climate change; risk management; water security; safe water supply.

1. KHÁI QUÁT VỀ TỈNH QUẢNG NINH VÀ CÁC KHU VỰC ĐÔ THỊ THUỘC TỈNH

Quảng Ninh là một tỉnh thuộc khu vực miền Bắc Việt Nam, có vị trí địa chính trị - kinh tế, đối ngoại và quốc phòng, an ninh quan trọng. Phía Bắc giáp nước Cộng hòa Nhân dân Trung Hoa; phía Nam, Tây và Tây Nam giáp TP Hải Phòng; phía Đông giáp biển; phía Tây và Tây Bắc giáp tỉnh Lạng Sơn và Bắc Ninh.

Với vị trí chiến lược trong vùng đồng bằng sông Hồng, Quảng Ninh có nhiều điều kiện thuận lợi cho phát triển kinh tế - xã hội, đóng vai trò là một trong những cực tăng trưởng quan trọng trong tiến trình công nghiệp hóa, hiện đại hóa đất nước.

Sau ngày 01/7/2025, tỉnh Quảng Ninh có 54 đơn vị hành chính cấp xã, gồm 22 xã, 30 phường và 02 đặc khu, với tổng dân số là 1.497.447 người. Trong đó, dân số tại các phường (khu vực đô thị) sau sắp xếp chiếm khoảng 1.147.000 người, tương ứng 76,6%. Các khu vực đô thị như Đông Triều, Uông Bí, Quảng Yên, Hạ Long, Cẩm Phả và Móng Cái (trước đây là các thành phố, thị xã trước ngày 01/7/2025) đã và đang được đầu tư xây dựng hệ thống cấp nước tương đối hoàn chỉnh và đồng bộ, đặc biệt là khu vực đô thị Hạ Long. Hiện nay, Công ty Cổ phần Nước sạch Quảng Ninh là đơn vị chủ lực trong việc cung cấp nước sạch cho các khu vực đô thị trên địa bàn tỉnh.

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh và nhu cầu sử dụng nước gia tăng, hệ thống cấp nước sạch cho các khu vực đô thị của tỉnh đóng vai trò quan trọng đối với hoạt động sản xuất, du lịch và sức khỏe cộng đồng. Tuy nhiên, hệ thống này đang phải đối mặt với nhiều thách thức như suy giảm và ô nhiễm nguồn nước, tác động của biến đổi khí hậu, thiên tai cực đoan, dẫn đến nguy cơ gián đoạn cấp nước. Những yếu tố trên đặt ra yêu cầu cấp thiết phải bảo đảm an toàn cấp nước. Mặc dù đã có nhiều giải pháp nhằm nâng cao độ tin cậy

của hệ thống và kiểm soát chất lượng nước, hiện vẫn thiếu một bộ tiêu chí và hệ thống chỉ tiêu thống nhất để đánh giá năng lực và hiệu quả quản lý cấp nước. Chính vì vậy, việc đề xuất bộ tiêu chí và hệ thống chỉ tiêu quản lý cấp nước là cần thiết.

2. MỤC ĐÍCH XÂY DỰNG BỘ TIÊU CHÍ ĐÁNH GIÁ QUẢN LÝ CẤP NƯỚC ĐÔ THỊ BẢO ĐẢM CẤP NƯỚC AN TOÀN

Việc xây dựng bộ tiêu chí đánh giá quản lý cấp nước đô thị bảo đảm cấp nước an toàn nhằm thiết lập một khung đánh giá khoa học, thống nhất và có khả năng lượng hóa, qua đó đo lường một cách toàn diện năng lực quản lý của cơ quan nhà nước và hiệu quả vận hành của các đơn vị cấp nước. Bộ tiêu chí được xây dựng nhằm làm cơ sở theo dõi, giám sát và đánh giá định kỳ mức độ an toàn, tin cậy và bền vững của hệ thống cấp nước góp phần tăng sức cạnh tranh, tạo động lực để thu hút đầu tư, bảo đảm cung cấp nước an toàn, đồng thời qua đó nhận diện các tồn tại, hạn chế và các yếu tố rủi ro trong toàn bộ chuỗi hoạt động cung cấp nước. Bên cạnh đó, bộ tiêu chí còn là công cụ quan trọng phục vụ công tác lập quy hoạch, kế hoạch đầu xây dựng và phát triển cấp nước, phân bổ nguồn lực và hoàn thiện cơ chế, chính sách quản lý theo hướng tiếp cận quản lý rủi ro, góp phần nâng cao chất lượng dịch vụ, tăng cường an ninh nguồn nước và bảo đảm cấp nước an toàn, liên tục, bền vững trong dài hạn.

3. NGUYÊN TẮC, YÊU CẦU XÂY DỰNG BỘ TIÊU CHÍ

3.1. Bộ tiêu chí phải đảm bảo các nguyên tắc

(1) Bền vững, hiệu quả, linh hoạt, thuận lợi và kết nối thông minh; (2) Thúc đẩy sự phát triển, nâng cao chất lượng dịch vụ, đáp ứng nhu cầu của người dân và phát triển lâu dài; (3) Khoa học và thực tiễn; (4) Thống nhất và đồng bộ; (5) Toàn diện, bảo đảm cấp nước an toàn phải dựa trên tiêu chuẩn, quy chuẩn kỹ thuật và bảo vệ khách hàng sử dụng nước.

3.2. Xây dựng bộ tiêu chí cần đảm bảo các yêu cầu

(1)Thể hiện được mức độ và trình độ quản lý; (2) Khách quan và có tính kế thừa; các chỉ tiêu được lựa chọn không chỉ dựa trên nghiên cứu hiện trạng mà còn dựa vào các quy định của pháp luật có liên quan đến quản lý; (3) Có thể lượng hoá được và dễ so sánh các chỉ tiêu cần được xác định rõ ràng, đảm bảo khả năng có thể tính toán được tránh chung chung, trùng lặp; (4) Đơn giản và dễ sử dụng các tiêu chí được xây dựng dựa vào thành tựu khoa học, công nghệ và chuyển đổi số, đảm bảo độ tin cậy, đơn giản, dễ sử dụng để hỗ trợ cho các cơ quan có liên quan trong việc đánh giá quản lý; (5) Có khả năng phát triển trong tương lai các tiêu chí cần được xây dựng với khả năng có thể tiếp tục hoàn thiện trong tương lai.

4. CƠ SỞ XÂY DỰNG BỘ TIÊU CHÍ VÀ CÁC CHỈ TIÊU CỤ THỂ

a) Căn cứ vào các quy định của pháp luật có liên quan đến quản lý cấp nước bảo đảm cấp nước an toàn bao gồm:

- Các mục tiêu cụ thể trong các quyết định của Thủ tướng Chính phủ:

+ Quyết định số 1566/QĐ-TTg ngày 9/8/2016 của Thủ tướng Chính phủ phê duyệt chương trình quốc gia bảo đảm cấp nước an toàn giai đoạn 2016 - 2025;

+ Quyết định số 2502/QĐ-TTg ngày 22/12/2016 về phê duyệt điều chỉnh định hướng phát triển cấp nước đô thị và khu công nghiệp Việt Nam đến năm 2025 tầm nhìn đến 2050.

- Các yêu cầu cụ thể về bảo đảm cấp nước an toàn trong Thông tư số 08/2012/TT-BXD ngày 21/11/2012 của Bộ Xây dựng về hướng dẫn thực hiện bảo đảm cấp nước an toàn.

- Các chỉ tiêu cụ thể về chất lượng nước theo quy định về kiểm tra, giám sát chất lượng nước sạch sử dụng mục đích sinh hoạt trong Thông tư 52/2024/TT-BYT ngày 31/12/2024 của Bộ Y tế ban hành quy chuẩn kỹ thuật quốc gia QCVN 01-1:2024/BYT.

- Một số chỉ tiêu trong Thông tư số 01/2018/TT-BXD ngày 05/1/2018 của Bộ Xây dựng về chỉ tiêu xây dựng đô thị tăng trưởng xanh.

- TCVN 13606:2023 là tiêu chuẩn quốc gia về Cấp nước - Mạng lưới đường ống và công trình - Yêu cầu thiết kế.

b) Tham khảo về xây dựng bộ tiêu chí đánh giá quản lý có liên quan trong các đề tài nghiên cứu của Hội Cấp thoát nước Việt Nam, Viện Quy hoạch Xây dựng Hà Nội và các nghiên cứu khác có liên quan.

c) Căn cứ vào điều kiện cụ thể của tỉnh Quảng Ninh:

- Các chỉ tiêu trong Quyết định số 4988/QĐ-UBND ngày 25/12/2017 của UBND tỉnh Quảng Ninh về Ban hành kế hoạch cấp nước an toàn tỉnh Quảng Ninh.

- Năng lực, nguồn lực, tổ chức, bộ máy của UBND các cấp và Công ty Cổ phần nước sạch Quảng Ninh.

5. ĐỀ XUẤT BỘ TIÊU CHÍ VÀ CÁC CHỈ TIÊU VỀ QUẢN LÝ CẤP NƯỚC ĐÔ THỊ BẢO ĐẢM CẤP NƯỚC AN TOÀN

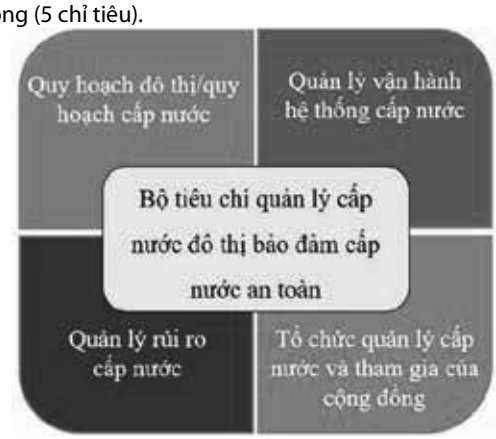
a) Bộ tiêu chí bao gồm 4 nhóm tiêu chí chính với 27 chỉ tiêu

- Nhóm tiêu chí về Quy hoạch đô thị/quy hoạch cấp nước và thực hiện quy hoạch (5 chỉ tiêu);

- Nhóm tiêu chí về Quản lý vận hành hệ thống cấp nước (9 chỉ tiêu);

- Nhóm tiêu chí về Quản lý rủi ro (8 chỉ tiêu);

- Nhóm tiêu chí về Tổ chức quản lý cấp nước và tham gia của cộng đồng (5 chỉ tiêu).



Hình 1. Bộ tiêu chí quản lý cấp nước đô thị bảo đảm cấp nước an toàn

b) Ý nghĩa của các nhóm tiêu chí

- *Nhóm tiêu chỉ về quy hoạch đô thị/quy hoạch cấp nước* (QH) và thực hiện quy hoạch nhằm đánh giá việc quy hoạch và tổ chức thực hiện theo quy hoạch (trong đó có đầu tư xây dựng hệ thống cấp nước) để bảo đảm việc cung cấp ổn định và đủ số lượng nước sạch cho người dân.

- *Nhóm tiêu chí về quản lý vận hành* (VH) hệ thống cấp nước nhằm đánh hiệu quả quản lý, số hoá hạ tầng và cơ sở dữ liệu để giám sát, kiểm soát lưu lượng, áp lực, chất lượng nước, dịch vụ chăm sóc khách hàng…

- *Nhóm tiêu chí về quản lý rủi ro cấp nước* (RR) nhằm nhận diện các nguy cơ, phân tích và đánh giá nguy cơ có thể xảy ra trong quá trình sản xuất và cung cấp nước sạch từ nguồn đến khách hàng sử dụng và đề xuất xử lý nhằm bảo đảm ổn định và an toàn trong cấp nước.

- *Nhóm tiêu chí về tổ chức quản lý cấp nước và tham gia của cộng đồng* (TC) nhằm đánh giá về công tác quản lý, chỉ đạo, phối hợp, điều hành của các cơ quan, đơn vị có liên quan đối với công tác quản lý cấp nước bảo đảm cấp nước an toàn.

Bộ tiêu chí và các chỉ tiêu Bảng 1.

6. TỔ CHỨC ĐÁNH GIÁ THEO BỘ TIÊU CHÍ

- UBND cấp tỉnh giao cho Sở Xây dựng (SXD) chủ trì, phối hợp với các cơ quan chuyên môn có liên quan tổ chức thực hiện việc đánh giá bộ tiêu chí và chỉ tiêu quản lý cấp nước bảo đảm cấp nước an toàn trên địa bàn.

- Đơn vị cấp nước tổ chức việc đánh giá bộ tiêu chí, chỉ tiêu liên quan đến quản lý vận hành, khai thác hệ thống cấp nước được giao và báo cáo UBND tỉnh.

Bảng 1. Đề xuất bộ tiêu chí và các chỉ tiêu quản lý cấp nước đô thị bảo đảm cấp nước an toàn

TT	Nhóm tiêu chí	Mã chỉ tiêu	Các chỉ tiêu	Đơn vị tính	Tần suất thu thập	Cơ quan chịu trách nhiệm	Ghi chú
I	**Quy hoạch đô thị/cấp nước và thực hiện quy hoạch**	**QH.01**	Mức độ tiêu thụ nước bình quân	(l/người/ngày)	Hằng năm	SXD	Kế thừa
		QH.02	Tỷ lệ người dân đô thị được cung cấp nước sạch	%	Hằng năm	SXD	Kế thừa
		QH.03	Tỷ lệ thất thoát nước sạch	%	Hằng năm	SXD	Kế thừa
		QH.04	Số nhà máy, trạm xử lý nước, công trình đầu mối hoàn thành việc xây dựng mới, nâng cấp đưa vào khai thác theo Quy hoạch, kế hoạch	Công trình	Hằng năm	SXD	**Đề xuất**
		QH.05	Số km đường ống cấp nước hoàn thành việc xây dựng mới đưa vào khai thác sử dụng theo Quy hoạch, kế hoạch	km	Hằng năm	SXD	**Đề xuất**
II	**Quản lý vận hành hệ thống cấp nước**	**VH.01**	Tỷ lệ số lượng nguồn nước được giám sát mực nước, trữ lượng và quan trắc chất lượng theo thời gian thực bằng các thiết bị giám sát tự động	%	Hằng năm	Đơn vị cấp nước	Kế thừa
		VH.02	Tỷ lệ người dân sử dụng dịch vụ uống nước trực tiếp tại vòi	%	Hằng năm	Đơn vị cấp nước	**Đề xuất**
		VH.03	Số giờ cấp nước trung bình trong ngày	h	Hằng năm	Đơn vị cấp nước	Kế thừa
		VH.04	Thời gian ngừng cấp nước để sửa chữa đường ống, bảo dưỡng, thay thế thiết bị	h	Hằng năm	Đơn vị cấp nước	Kế thừa
		VH.05	Tỷ lệ khách hàng hài lòng với dịch vụ cấp nước	%	Hằng năm	Đơn vị cấp nước	**Đề xuất**
		VH.06	Tỷ lệ hệ thống cấp nước khu vực đô thị được lập và thực hiện kế hoạch cấp nước an toàn (%)	%	Hằng năm	SXD Đơn vị cấp nước	Kế thừa
		VH.07	Sử dụng hệ thống SCADA để giám sát, tự động điều khiển hệ thống sản xuất, cung cấp nước từ nhà máy đến mạng lưới cấp nước	Có/không	Hằng năm	Đơn vị cấp nước	**Đề xuất**
		VH.08	Sử dụng hệ thống thông tin địa lý GIS để quản lý cơ sở dữ liệu, số hóa mạng lưới, quản lý tài sản, quản lý sự cố, quản lý và chăm sóc khách hàng.	Có/không	Hằng năm	Đơn vị cấp nước	**Đề xuất**
		VH.09	Phòng thí nghiệm theo TCVN ISO/IEC 17025.	Có/không		Đơn vị cấp nước	Kế thừa
III	**Quản lý rủi ro cấp nước**	**RR.01**	Tỷ lệ các trường hợp rò rỉ, thất thoát nước được thông báo bằng thiết bị giám sát tự động	%	Hằng năm	Đơn vị cấp nước	Kế thừa
		RR.02	Tỷ lệ giảm thiểu nước thải chưa qua xử lý trước khi xả thải ra môi trường.	%	Hằng năm	SXD	Kế thừa
		RR.03	Tần xuất ngoại kiểm chất lượng nước sạch theo quy định	(1 lần/tháng)		Đơn vị cấp nước	Kế thừa
		RR.04	Tần suất nội kiểm chất lượng nước sạch theo quy định	(1 lần/6 tháng)		Đơn vị cấp nước	Kế thừa
		RR.05	Tỷ lệ số lượng nguồn nước (hồ, sông, kênh) được cắm mốc giới hành lang bảo vệ nguồn nước theo quy định (%)	(%)	Hằng năm	Sở Nông nghiệp và Môi trường	Kế thừa
		RR.06	Số lượng trạm quan trắc khí tượng thuỷ văn và xâm nhập mặn được xây dựng	Trạm	Hằng năm	Sở Nông nghiệp và Môi trường	Kế thừa

		RR.07	Tỷ lệ % các hồ chứa nước trên địa bàn được đầu tư hệ thống cảnh báo sớm thiên tai	Công trình	Hằng năm	Sở Nông nghiệp và Môi trường	Kế thừa
		RR.08	Số lượng các công trình thuỷ lợi được xây dựng mới nhằm ứng phó với nước biển dâng, hạn hán và xâm nhập mặn theo kế hoạch	Công trình	Hằng năm	Sở Nông nghiệp và Môi trường	Kế thừa
IV	**Tổ chức quản lý cấp nước và sự tham gia của cộng đồng**	**TC.01**	Thành lập Ban Chỉ đạo Chương trình cấp tỉnh và Ban Cấp nước an toàn tại đơn vị cấp nước và ban hành quy chế hoạt động	Quyết định		UBND tỉnh, Đơn vị cấp nước	Kế thừa
		TC.02	Ban hành kế hoạch cấp nước an toàn (cấp tỉnh và đơn vị cấp nước) và tổ chức thực hiện	Kế hoạch		UBND tỉnh, Đơn vị cấp nước	Kế thừa
		TC.03	Tổ chức việc kiểm tra, giám sát đánh giá kết quả thực hiện kế hoạch cấp nước an toàn (1 lần/năm)	(1 lần/năm)	Hằng năm	UBND tỉnh	Đề xuất
		TC.04	Công bố hợp quy về chất lượng nước sạch theo quy định	Văn bản		Đơn vị cấp nước	Kế thừa
		TC.05	Tỷ lệ người dân tham gia bảo vệ, sử dụng nước và giám sát thực hiện các hoạt động sản xuất, cung cấp, tiêu thụ nước sạch	%	Hằng năm	UBND cấp Xã	Kế thừa

Các chỉ tiêu kế thừa được lựa chọn từ các quy định của pháp luật (các chỉ tiêu này được thu thập, thống kê, xử lý và báo cáo từ các tổ chức và cơ quan có liên quan) hoặc trong một số nghiên cứu (đã trình bày tại điểm 4).

Các chỉ tiêu đề xuất: Có 7 chỉ tiêu đề xuất là các chỉ tiêu chưa được quy định trong các văn bản hiện hành mà thông qua nghiên cứu, tổng kết và thống kê từ thực tiễn cũng như mục tiêu nghiên cứu của luận án.

Trong số 27 chỉ tiêu có 20 chỉ tiêu được định lượng và 7 chỉ tiêu định tính.

7. KẾT LUẬN

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh và những thách thức ngày càng gia tăng đối với tài nguyên nước, công tác quản lý cấp nước đô thị tại Quảng Ninh đóng vai trò quan trọng trong bảo đảm phát triển kinh tế - xã hội của địa phương. Việc xây dựng và áp dụng bộ tiêu chí đánh giá quản lý cấp nước theo hướng bảo đảm cấp nước an toàn không chỉ góp phần chuẩn hóa công tác giám sát, đánh giá mà còn nâng cao tính minh bạch và hiệu quả trong quản lý. Bộ tiêu chí này tạo cơ sở khoa học cho việc so sánh, đề xuất các nội dung, mục tiêu trong quy hoạch, đầu tư và vận hành hệ thống cấp nước, đồng thời hỗ trợ kiểm soát rủi ro trong toàn bộ hoạt động cấp nước. Qua đó, góp phần nâng cao chất lượng dịch vụ cấp nước, tăng cường khả năng thích ứng với biến đổi khí hậu và bảo đảm an ninh cấp nước đô thị theo hướng bền vững, ổn định lâu dài.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Viện Quy hoạch xây dựng Hà Nội. Đề xuất hệ thống tiêu chí cơ bản về hạ tầng kỹ thuật đô thị thông minh hỗ trợ công tác đánh giá quy hoạch đô thị trên địa bàn thành phố Hà Nội đến năm 2030, 2022.

[2] Bộ Y tế. Thông tư số 52/2024/TT-BYT ngày 31/12/2024 ban hành Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia và quy định kiểm tra, giám sát chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt, 2024.

[3] Trần Thục và cộng sự. Bộ chỉ số trong hệ thống giám sát và đánh giá thích ứng với biến đổi khí hậu. NXB Tài nguyên Môi trường và Bản đồ Việt Nam, 2021.

[4] Bộ Xây dựng. Thông tư số 08/2012/TT-BXD ngày 21/11/2012 hướng dẫn thực hiện bảo đảm cấp nước an toàn, 2012.

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

[6] Công ty Cổ phần Nước sạch Quảng Ninh. Báo cáo hiện trạng và đề xuất giải pháp nâng cao tỷ lệ người dân sử dụng nước sạch thực hiện Nghị quyết Đại hội đại biểu Đảng bộ tỉnh Quảng Ninh lần thứ XVI, nhiệm kỳ 2025–2030, 2025.

[7] Ủy ban Thường vụ Quốc hội. Nghị quyết số 1679/NQ-UBTVQH15 về việc sắp xếp các đơn vị hành chính cấp xã của tỉnh Quảng Ninh năm 2025, 2025.

[8] Sở Xây dựng tỉnh Quảng Ninh. Báo cáo tổng kết triển khai thực hiện điều chỉnh định hướng phát triển cấp nước đô thị và khu công nghiệp Việt Nam; Chương trình quốc gia bảo đảm cấp nước an toàn; Chương trình quốc gia chống thất thoát, thất thu nước sạch, 2025.

[9] UBND tỉnh Quảng Ninh. Quyết định số 4988/QĐ-UBND ngày 25/12/2017 ban hành Kế hoạch cấp nước an toàn tỉnh Quảng Ninh, 2017.

[10] Chính phủ. Nghị định số 117/2007/NĐ-CP ngày 11/7/2007 về sản xuất, cung cấp và tiêu thụ nước sạch, 2007.

■Ngày nhận bài: 16/3/2026 ■Ngày sửa bài: 23/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 02/4/2026

Phân tích phân bố mưa lớn và nguy cơ sạt lở đến tuyến Quốc lộ 6 khu vực Sơn La - Hòa Bình

Analysis of heavy rainfall distribution and potential impacts on National Highway 6 in the Son La - Hoa Binh region

> **TS DOÃN THỊ NỘI**
Trường Đại học Giao thông vận tải
Email: dtnoi@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Lượng mưa lớn là một trong những tác nhân quan trọng gây ra sạt lở đất và ảnh hưởng đến hệ thống hạ tầng giao thông tại khu vực miền núi phía Bắc Việt Nam. Nghiên cứu này sử dụng số liệu mưa ngày tại 11 trạm khí tượng trong khu vực Sơn La - Hòa Bình để phân tích đặc điểm phân bố không gian của lượng mưa và tần suất xuất hiện các trận mưa lớn. Các bản đồ phân bố lượng mưa trung bình và số ngày mưa lớn với các ngưỡng >25 mm/ngày, >50 mm/ngày và >100 mm/ngày được xây dựng bằng phương pháp nội suy không gian (IDW) trong môi trường GIS. Đồng thời, hành lang tuyến Quốc lộ 6 được xác định bằng phương pháp vùng đệm nhằm đánh giá khu vực có nguy cơ chịu tác động của các trận mưa lớn. Kết quả cho thấy các trận mưa lớn và mưa cực đoan tập trung chủ yếu tại khu vực Mộc Châu - Mai Châu - Hòa Bình dọc theo hành lang Quốc lộ 6. Kết quả nghiên cứu góp phần cung cấp cơ sở khoa học cho việc đánh giá nguy cơ thiên tai và hỗ trợ quản lý hạ tầng giao thông tại các khu vực miền núi.

Từ khóa: Mưa lớn; mưa cực đoan; Quốc lộ 6; sạt lở đất; nội suy GIS; Sơn La; Hòa Bình.

ABSTRACT

Heavy rainfall is one of the major triggering factors of landslides and infrastructure damage in mountainous regions of northern Vietnam. This study aims to analyze the spatial distribution of rainfall and the frequency of heavy rainfall events along the National Highway 6 corridor using daily rainfall data from 11 meteorological stations located in the Son La - Hoa Binh region. Spatial rainfall distribution maps were generated using the inverse distance weighting (IDW) interpolation method in a GIS environment. The results indicate that heavy rainfall events (>50 mm/day) and extreme rainfall events (>100 mm/day) are mainly concentrated in the Moc Chau - Mai Chau - Hoa Binh area. These zones coincide with mountainous road sections that are prone to landslides and slope instability. The findings provide useful information for natural hazard risk assessment and support the management and maintenance of transportation infrastructure in mountainous regions.

Keywords: Heavy rainfall; landslide risk; spatial analysis; GIS interpolation; mountainous transportation infrastructure; National Highway 6.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khu vực miền núi phía Bắc Việt Nam thường xuyên chịu ảnh hưởng của các trận mưa lớn và mưa cực đoan trong mùa mưa. Các sự kiện mưa cường độ lớn không chỉ gây ra lũ quét và ngập lụt cục bộ mà còn là một trong những nguyên nhân chính kích hoạt các hiện tượng sạt lở đất và trượt mái dốc ở các khu vực địa hình đồi núi [1, 2]. Những hiện tượng thiên tai này có thể gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến hệ thống hạ tầng giao thông, đặc biệt là các tuyến đường giao thông miền núi có địa hình phức tạp.

Nhiều nghiên cứu trên thế giới đã chỉ ra rằng lượng mưa lớn trong thời gian ngắn là yếu tố quan trọng làm gia tăng nguy cơ mất ổn định mái dốc và kích hoạt sạt lở đất. Các nghiên cứu về ngưỡng mưa gây sạt lở cho thấy các trận mưa có cường độ lớn hoặc kéo dài thường đóng vai trò quyết định trong việc khởi phát các quá trình trượt đất [1, 6] và [7]. Ngoài ra, các phương pháp phân tích địa hình kết hợp với hệ thống thông tin địa lý (GIS) cũng đã được áp dụng rộng rãi để đánh giá nguy cơ sạt lở đất tại các khu vực miền núi [5]. Do đó, việc phân tích đặc điểm phân bố không gian và tần suất xuất hiện của các trận mưa lớn có ý nghĩa quan trọng trong việc đánh giá nguy cơ thiên tai tại các khu vực đồi núi.

Tại Việt Nam, các nghiên cứu gần đây cũng đã chỉ ra rằng các sự kiện mưa cực đoan có xu hướng gia tăng trong khu vực miền núi phía Bắc, đặc biệt trong bối cảnh biến đổi khí hậu toàn cầu [3, 4]. Các trận mưa lớn có thể gây ra nhiều hiện tượng thiên tai như lũ quét, sạt lở đất và phá hủy cơ sở hạ tầng, ảnh hưởng trực tiếp đến đời sống kinh tế - xã hội của khu vực [10]. Đối với hệ thống giao thông miền núi, các sự kiện mưa lớn có thể làm mất ổn định ta-luy đường, gây sạt lở đất đá và làm gián đoạn giao thông trên các tuyến đường quan trọng.

Quốc lộ 6 là tuyến giao thông huyết mạch kết nối Hà Nội với các tỉnh Tây Bắc như Hòa Bình và Sơn La (cũ). Tuyến đường này đi qua nhiều khu vực có địa hình đồi núi dốc, nơi thường xuyên xảy ra các hiện tượng sạt lở đất trong mùa mưa. Theo Báo cáo từ Bộ Giao thông vận tải (2020) [8], Niên giám từ Tổng cục Khí tượng Thủy văn (2021) [9], các trận mưa lớn kéo dài có thể làm gia tăng nguy cơ mất ổn định mái dốc và gây ảnh hưởng đến nền đường cũng như an toàn giao thông trên tuyến. Vì vậy, việc phân tích đặc điểm phân bố của mưa lớn trong khu vực dọc hành lang Quốc lộ 6 có ý nghĩa quan trọng trong việc đánh giá nguy cơ thiên tai và hỗ trợ công tác quản lý hạ tầng giao thông.

Trong nghiên cứu này, số liệu mưa ngày tại 11 trạm khí tượng thuộc khu vực Sơn La - Hòa Bình được sử dụng để phân tích đặc điểm phân bố không gian của lượng mưa và tần suất xuất hiện các trận mưa lớn. Các bản đồ phân bố lượng mưa và số ngày mưa lớn được xây dựng bằng phương pháp nội suy không gian trong môi trường GIS nhằm xác định các khu vực có nguy cơ chịu tác động của mưa lớn dọc theo hành lang Quốc lộ 6.

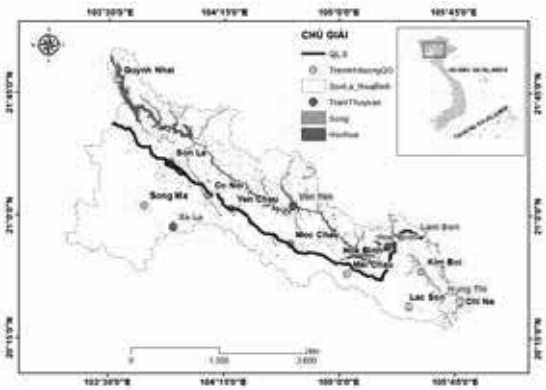
2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Dữ liệu mưa và địa hình

Dữ liệu mưa ngày tại 11 trạm khí tượng gồm: Quỳnh Nhai, Sơn La, Cò Nòi, Yên Châu, Mộc Châu, Mai Châu, Hòa Bình, Kim Bôi, Lạc Sơn, Chi Nê và Sông Mã.

Khu vực nghiên cứu nằm dọc tuyến Quốc lộ 6, kéo dài từ tỉnh Hòa Bình (cũ) đến tỉnh Sơn La (cũ), thuộc vùng núi phía Bắc Việt Nam (Hình 1). Đây là tuyến giao thông huyết mạch kết nối khu vực Tây Bắc với thủ đô Hà Nội, có vai trò quan trọng trong phát triển kinh tế - xã hội và vận tải hàng hóa.

Địa hình khu vực chủ yếu là đồi núi cao, độ dốc lớn và mạng lưới sông suối dày đặc, bao gồm các hệ thống sông chính như sông Đà và các phụ lưu. Điều kiện địa hình phức tạp kết hợp với lượng mưa lớn trong mùa mưa làm cho khu vực này thường xuyên xảy ra các hiện tượng thiên tai như lũ quét, sạt lở đất và ngập cục bộ, gây ảnh hưởng đáng kể đến hoạt động giao thông trên tuyến Quốc lộ 6.



Hình 1. Khu vực nghiên cứu, hệ thống sông suối và vị trí các trạm khí tượng - thủy văn trong lưu vực nghiên cứu dọc Quốc lộ 6

Trong nghiên cứu này, dữ liệu mưa được thu thập từ các trạm khí tượng và thủy văn thuộc khu vực tỉnh Hòa Bình (cũ) và Sơn La (cũ), bao gồm các trạm như Hòa Bình, Kim Bôi, Lạc Sơn, Chi Nê, Mai Châu, Mộc Châu, Sơn La, Quỳnh Nhai, Cò Nòi, Yên Châu và Sông Mã. Các trạm này phân bố dọc theo hành lang Quốc lộ 6 và đại diện cho các điều kiện khí hậu - địa hình khác nhau trong khu vực nghiên cứu.

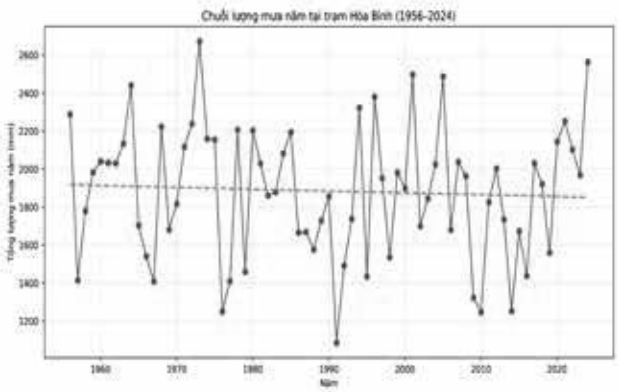
Vị trí các trạm khí tượng và thủy văn cùng với hệ thống sông suối và tuyến Quốc lộ 6 được thể hiện trong Hình 1.

2.2. Phân tích mưa lớn

Trong nghiên cứu này, các ngưỡng mưa lớn được lựa chọn bao gồm >25 mm/ngày, >50 mm/ngày và >100 mm/ngày nhằm phản ánh các cấp độ mưa từ trung bình đến cực đoan. Đồng thời, việc phân cấp này được tham chiếu với quy định về cấp độ rủi ro thiên tai do mưa lớn theo Quyết định 18/2021/QĐ-TTg [11], qua đó đảm bảo tính liên kết giữa kết quả nghiên cứu và khung đánh giá rủi ro thiên tai hiện hành tại Việt Nam.

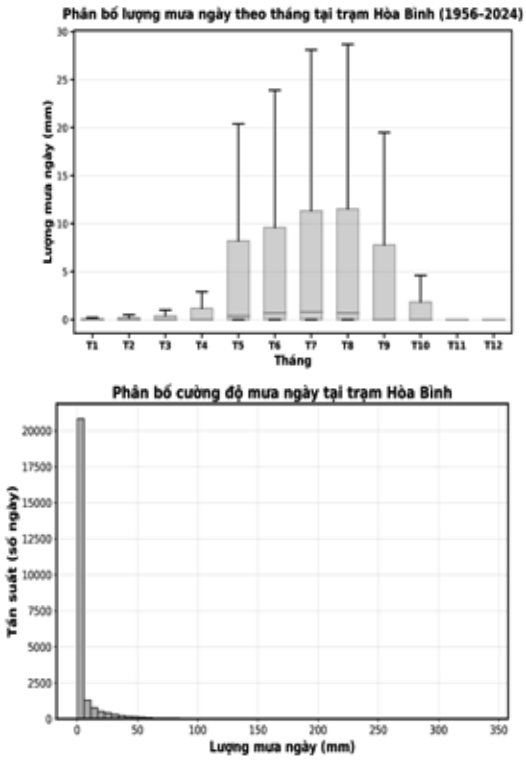
Bảng 1. Thống kê đặc trưng mưa ngày và số ngày mưa lớn tại các trạm khí tượng (Nguồn: Tổng cục Khí tượng Thủy văn)

Trạm	Thời gian	Lượng mưa ngày lớn nhất (mm)	Số ngày có lượng mưa (ngày)		
			>25 mm	>50 mm	>100 mm
Hòa Bình	1956-2024	340,6	1.631	602	120
Kim Bôi	1963-2024	360,5	1.418	548	119
Lạc Sơn	1961-2024	530,0	1.566	610	108
Mai Châu	1961-2024	925,0	1.376	498	126
Chi Nê	1973-2024	393,7	1.182	480	144
Yên Châu	1961-2013	286,7	717	193	26
Mộc Châu	1961-2013	1601,0	1.093	343	91
Sơn La	1961-2024	368,4	972	268	27
Sông Mã	1970-2024	219,0	708	147	11
Cò Nòi	1970-2024	313,5	853	198	17
Quỳnh Nhai	2001-2006	170,8	403	116	11



Hình 2. Chuỗi lượng mưa năm tại trạm Hòa Bình giai đoạn 1956 - 2024

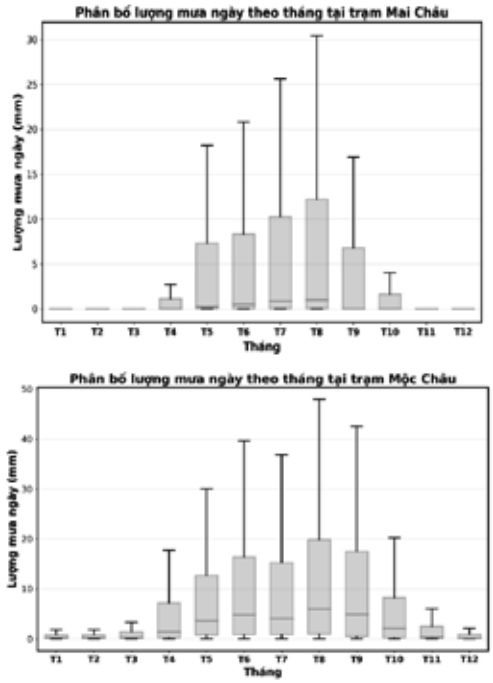
Phân bố lượng mưa theo tháng cho thấy mùa mưa tại khu vực nghiên cứu tập trung chủ yếu từ tháng 5 đến tháng 9, với mức biến động lớn nhất trong các tháng 7 - 8. Đây cũng là thời kỳ thường xảy ra các hiện tượng lũ quét và sạt lở đất trong khu vực miền núi phía Bắc.



Hình 3. a) - Phân bố lượng mưa ngày theo tháng tại trạm Hòa Bình; b) - Phân bố cường độ mưa ngày tại trạm Hòa Bình

Kết quả mô tả ở Hình 3a và Hình 4 cho thấy sự khác biệt về phân bố lượng mưa ngày giữa các vùng địa hình khác nhau dọc tuyến Quốc lộ 6:

- Hòa Bình: Vùng thấp, chế độ mưa ổn định hơn.
- Mai Châu: Thung lũng, biến động mưa lớn.
- Mộc Châu: Cao nguyên, xuất hiện nhiều ngày mưa lớn.



Hình 4. Phân bố lượng mưa ngày theo tháng tại trạm Mai Châu và Mộc Châu

Do số lượng trạm lớn (11 trạm trong khu vực nghiên cứu), việc phân tích về phân bố lượng mưa ngày theo tháng và phân bố cường độ mưa ngày ở tất cả các trạm là không cần thiết, ở khía cạnh này, bài báo tiến hành lựa chọn các trạm đại diện dựa trên việc phân vùng theo độ cao và điều kiện về khí hậu như Bảng 2, để tiến hành thêm các biểu đồ. Việc vẽ thêm phân bố cường độ mưa ngày tại các trạm còn lại cũng sẽ để ở các nghiên cứu tiếp theo.

Bảng 2. Các trạm đại diện cho các khu vực địa hình

Khu vực	Trạm	Ý nghĩa
Hạ lưu	Hòa Bình	Khí hậu vùng thấp
Trung lưu	Mai Châu	Vùng chuyển tiếp
Thượng lưu	Mộc Châu	Vùng núi cao

Kết quả so sánh cho thấy sự khác biệt đáng kể về phân bố lượng mưa ngày giữa các trạm đại diện, phản ánh ảnh hưởng của điều kiện địa hình và vị trí không gian đối với chế độ mưa trong khu vực nghiên cứu.

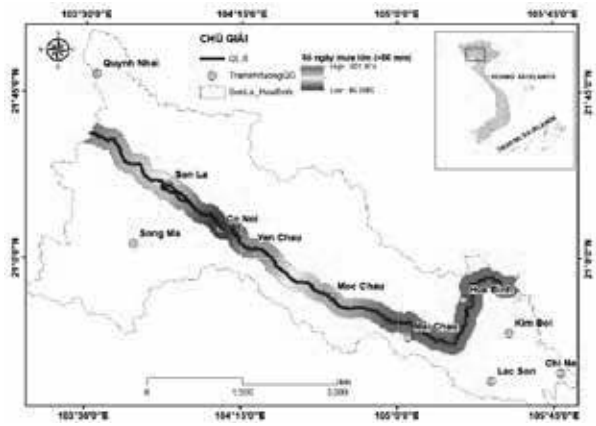
Để tiến hành xây dựng vùng ảnh hưởng dọc Quốc lộ 6 trong khu vực nghiên cứu, bài báo lựa chọn bán kính vùng đệm sang hai bên đường là 5 km, nhằm đánh giá được khu vực có khả năng bị ảnh hưởng bởi mưa lớn gây sạt lở đất.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

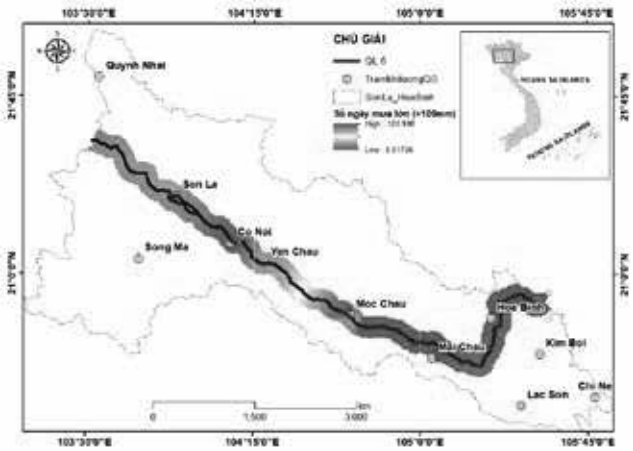
Bản đồ phân bố tần suất các trận mưa lớn (>50 mm/ngày) và mưa cực đoan (>100 mm/ngày), được xây dựng bằng phương pháp nội suy IDW trong môi trường GIS, cho thấy sự khác biệt rõ rệt về không gian mưa dọc theo hành lang Quốc lộ 6. Khu vực Mộc Châu - Mai Châu - Hòa Bình nổi bật là vùng có tần suất xuất hiện mưa lớn cao nhất (Hình 5 và Hình 6), trong khi các khu vực khác có tần suất thấp hơn.

Sự phân bố này phản ánh vai trò quan trọng của địa hình trong việc chi phối quá trình hình thành mưa. Các khu vực có độ cao lớn và địa hình đón gió như Mộc Châu và Mai Châu có xu hướng xuất hiện nhiều trận mưa lớn hơn so với vùng thấp như Hòa Bình. Điều này phù hợp với đặc điểm khí hậu khu vực miền núi phía Bắc, nơi mưa đối lưu và hiệu ứng địa hình đóng vai trò chủ đạo.

Phân tích theo thời gian tại trạm Hòa Bình cho thấy lượng mưa tập trung chủ yếu trong mùa mưa từ tháng 5 đến tháng 9, với đỉnh mưa vào tháng 7 - 8 (Hình 3a). Đồng thời, phân bố mưa ngày (Hình 3b) cho thấy các trận mưa lớn (>50 mm/ngày) xuất hiện với tần suất đáng kể trong giai đoạn này, làm gia tăng nguy cơ lũ quét và sạt lở đất.



Hình 5. Phân bố các trận mưa to (>50 mm/ngày) trong hành lang Quốc lộ 6 khu vực Sơn La - Hòa Bình



Hình 6. Phân bố các trận mưa rất to (>100 mm/ngày) trong hành lang Quốc lộ 6 khu vực Sơn La - Hòa Bình

Kết quả phân tích boxplot tại các trạm đại diện (Hòa Bình, Mai Châu và Mộc Châu) cho thấy sự khác biệt rõ rệt về đặc điểm mưa giữa các vùng địa hình. Trong khi trạm Hòa Bình có phân bố mưa tương đối ổn định, các trạm Mai Châu và đặc biệt là Mộc Châu thể hiện độ biến động lớn hơn, với nhiều giá trị cực trị trong mùa mưa. Điều này cho thấy ảnh hưởng rõ rệt của độ cao và điều kiện địa hình đến cường độ và tính biến động của mưa.

Từ góc độ ứng dụng giao thông, các khu vực có tần suất mưa lớn cao trùng với các đoạn đường đèo dốc quan trọng trên tuyến Quốc lộ 6, như Thung Khe và khu vực Mộc Châu. Trong điều kiện địa hình dốc và nền địa chất yếu, các trận mưa lớn có thể làm gia tăng nguy cơ sạt lở taluy, xói lở nền đường và gây gián đoạn giao thông cục bộ. Do đó, các khu vực này cần được ưu tiên trong công tác gia cố mái dốc, thiết kế hệ thống thoát nước và giám sát ổn định công trình trong mùa mưa.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã phân tích đặc điểm phân bố lượng mưa và tần suất xuất hiện các trận mưa lớn tại khu vực Sơn La - Hòa Bình dựa trên số liệu mưa ngày tại 11 trạm khí tượng. Kết quả cho thấy, các trận mưa lớn (>50 mm/ngày) và mưa cực đoan (>100 mm/ngày) tập trung chủ yếu tại khu vực Mộc Châu - Mai Châu - Hòa Bình dọc theo hành lang Quốc lộ 6. Đây là khu vực có địa hình đồi núi dốc, do đó các trận mưa lớn có thể làm gia tăng nguy cơ sạt lở đất, trượt ta-luy và mất ổn định nền đường.

Bản đồ phân bố mưa lớn cho thấy nhiều đoạn tuyến Quốc lộ 6 đi qua các khu vực có tần suất mưa lớn cao, đặc biệt tại các đoạn đèo và khu vực địa hình phức tạp. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc đánh giá nguy cơ thiên tai và hỗ trợ công tác quy hoạch, thiết kế và quản lý hạ tầng giao thông miền núi.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải, Hà Nội, Việt Nam theo Đề tài có mã số T2025-CT-005TĐ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] F Guzzetti, S Peruccacci, M Rossi and C Stark. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. Meteorology and Atmospheric Physics, vol. 98, pp. 239-267, 2007.

[2] D Petley. Global patterns of rainfall-induced landslides. Geology, vol. 40, no. 10, pp. 927-930, 2012.

[3] T Ngo-Duc, J Matsumoto, H Kamimera and H Bui. Monthly adjustment of GSMaP rainfall over Vietnam using rain gauge observations. Journal of Hydrometeorology, vol. 15, pp. 1231-1245, 2014.

[4] T T Nguyen, V H Pham and T Q Tran. Extreme rainfall characteristics in northern Vietnam. Natural Hazards, vol. 95, pp. 749-767, 2019.

[5] F C Dai and C F Lee. Terrain-based mapping of landslide susceptibility using a geographical information system. Geomorphology, vol. 42, pp. 33-50, 2001.

[6] T Glade, M Crozier and P Smith. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an antecedent daily rainfall model. Pure and Applied Geophysics, vol. 157, pp. 1059-1079, 2000.

[7] G B Crosta and P Frattini. Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow. Natural Hazards and Earth System Sciences, vol. 1, pp. 135-142, 2001.

[8] Bộ Giao thông vận tải. Báo cáo hiện trạng và định hướng phát triển mạng lưới giao thông khu vực miền núi phía Bắc. Hà Nội, 2020.

[9] Tổng cục Khí tượng Thủy văn. Niên giám Khí tượng thủy văn Việt Nam. Hà Nội, 2021.

[10] T T Nguyen, Q H Nguyen and D T Pham. Landslide susceptibility mapping in mountainous regions of northern Vietnam using GIS and statistical methods. Environmental Earth Sciences, vol. 79, 2020.

[11] Quyết định 18/2021/QĐ-TTg Quy định về các cấp độ rủi ro thiên tai do mưa lớn, 2021. Internet: https://thuvienphapluat.vn/chinh-sach-phap-luat-moi/vn/ho-tro-phap-luat/tu-van-phap-luat/70763/quy-dinh-ve-cac-cap-do-rui-ro-thien-tai-do-mua-lon.

■Ngày nhận bài: 05/3/2026 ■Ngày sửa bài: 13/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 23/3/2026

Giải pháp thiết kế đoạn chuyển tiếp giữa nền đất và công trình nhân tạo trong đường sắt tốc độ cao

Design solutions for transition zones between earthworks and structures in high-speed railways

> KS NGUYỄN MẠNH TIẾN[1,*], TS LÊ CÔNG THÀNH[1], KS PHẠM VĂN CHƯ[2]
[1]Trường Cao đẳng Đường sắt
[2]Công ty CP Đường sắt Hà Ninh
[*]Email: tienman77@gmail.co

TÓM TẮT

Đoạn chuyển tiếp giữa nền đất (nền đắp, nền đào) và công trình nhân tạo (mố cầu, cầu cạn, cửa hầm) là vị trí nhạy cảm nhất của tuyến đường sắt tốc độ cao (HSR) do biến thiên nhanh độ cứng, khác biệt cơ chế biến dạng theo thời gian và khuếch đại đáp ứng động lực học. Thực tiễn quốc tế cho thấy chi phí bảo trì và suy giảm hình học tuyến tập trung chủ yếu tại khu vực này nếu không được thiết kế "êm" theo phương dọc tuyến.

Bài báo đề xuất khung thiết kế theo tư duy hiệu năng gồm: (i) Rải đều độ cứng (stiffness ramp), (ii) khống chế lún tổng và lún không đều, (iii) kiểm soát nước, (iv) nghiệm thu định lượng bằng EV2 và quản lý vòng đời. Ví dụ tính toán đoạn chuyển tiếp với điều kiện địa chất khu vực gần cầu Lục Nam được sử dụng để minh họa cách lựa chọn phương án đạt yêu cầu HSR.

Từ khóa: Nền đường sắt; đoạn chuyển tiếp; lún nền đường sắt; lún từ biến; lún do tải trọng lặp.

ABSTRACT

The transition zone between earthworks (embankment or cutting) and structures (bridge abutments, viaducts, tunnel portals) is the most sensitive location along a High-Speed Railway (HSR) line due to the abrupt variation in stiffness, differences in time-dependent deformation mechanisms and amplification of dynamic response. International practice indicates that maintenance costs and track geometry deterioration are largely concentrated in this area if it is not longitudinally designed with a smooth structural transition.

This paper proposes a performance-based design framework comprising: (i) longitudinal stiffness ramping, (ii) control of total and differential settlement, (iii) drainage and water management, and (iv) quantitative acceptance through EV2 testing and life-cycle management. A design example for a transition section under geological conditions similar to those near Luc Nam Bridge is presented to illustrate the selection of a solution that satisfies HSR performance requirements.

Keywords: Railway subgrade; transition zone; railway subgrade settlement; creep settlement; settlement due to cyclic loading.

1. ĐẶC THÙ CƠ HỌC CỦA ĐOẠN CHUYỂN TIẾP TRONG HSR

Trong đường sắt tốc độ cao (HSR), nền đường là một phần của hệ đàn hồi tổng thể "tàu - ray - kết cấu đường - nền đất". Ở các đoạn tuyến thông thường, độ cứng và điều kiện biến dạng thay đổi dần theo phương dọc tuyến nên đáp ứng động lực học tương đối ổn định. Tuy nhiên, tại đoạn chuyển tiếp giữa nền đất và công trình nhân tạo như mố cầu hoặc cửa hầm, độ cứng nâng đỡ thay đổi đột ngột, làm cho đây trở thành vị trí nhạy cảm nhất của tuyến HSR [1, 2].

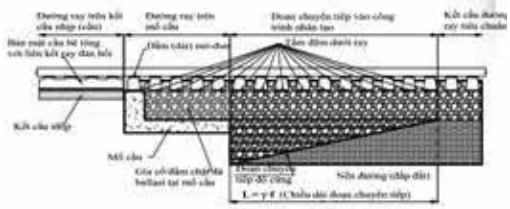
Về cơ học đất, nền đất có biến dạng phụ thuộc thời gian, gồm lún tức thời, lún cố kết và lún từ biến (đã trình bày ở các mục trước). Ngược lại, công trình bê tông gần như không lún. Sự khác biệt này dẫn đến lún vi sai theo thời gian giữa hai phía chuyển tiếp. Nếu không rải đều độ cứng và khống chế lún theo hiệu năng, sai lệch hình học sẽ tích lũy trong khai thác [5].

Ngoài ra, khi đoàn tàu tốc độ cao đi qua vùng đổi cứng, sự phản xạ và tập trung sóng ứng suất làm tăng hệ số khuếch đại động tại vị trí tiếp giáp. Độ dốc lún càng lớn thì ứng suất động và biến dạng tích lũy do tải lặp càng tăng [1], [4]. Vì vậy, đoạn chuyển tiếp thường xuất hiện chuỗi cơ chế bất lợi: đổi cứng → lún vi sai → tăng tải động → tăng lún tích lũy.

Đặc thù cơ học của đoạn chuyển tiếp do đó không chỉ là bài toán ổn định hay lún tĩnh mà là bài toán tổng hợp giữa độ cứng,

biến dạng theo thời gian và đáp ứng động lực học. Thiết kế phải bảo đảm độ cứng biến thiên "êm" theo phương dọc tuyến, lún tổng và lún không đều nằm trong giới hạn khai thác, đồng thời kiểm soát điều kiện thủy văn để duy trì ổn định dài hạn (Hình 1).

Trong điều kiện địa chất Việt Nam với nhiều khu vực nền đất yếu, mực nước ngầm cao và biến động theo mùa, việc tiếp cận theo hiệu năng, lấy lún tổng và lún vi sai làm chỉ tiêu trung tâm là đặc biệt cần thiết đối với thiết kế nền đường HSR [2, 5].



Hình 1. Các biện pháp đề xuất để tăng cường ổn định đường sắt tại vùng nối giữa cầu và nền đường

2. TIÊU CHÍ KỸ THUẬT CHO ĐOẠN CHUYỂN TIẾP HSR

2.1. Chiều dài chuyển tiếp và mô-đun EV2

Một trong những nguyên tắc cốt lõi khi thiết kế đoạn chuyển tiếp trong đường sắt tốc độ cao là bảo đảm sự thay đổi độ cứng theo phương dọc tuyến diễn ra một cách "êm" và có kiểm soát. Thay vì để mô-đun nền thay đổi đột ngột giữa nền đất và công trình nhân tạo, cần bố trí một vùng chuyển tiếp với chiều dài đủ lớn để rải đều độ cứng, hạn chế tập trung ứng suất và giảm nguy cơ lún vi sai. Nguyên lý này thường được gọi là "ramp độ cứng" trong thực hành quốc tế [2, 6].

Nguyên lý thiết kế là "ramp độ cứng":

$$L_{tr} \geq \frac{E_{V2,2} - E_{v2,1}}{\left(\frac{dE_{V2}}{dx}\right)_{max}} \quad (1)$$

Về mặt định lượng, chiều dài chuyển tiếp tối thiểu có thể xác định theo quan hệ biến thiên mô-đun dọc tuyến, như đã nêu trong công thức (1). Công thức này thể hiện yêu cầu khống chế độ dốc thay đổi của mô-đun EV2 theo phương dọc, nhằm tránh xuất hiện "bậc cứng" trong kết cấu nền-móng đường. Trong đó, $E_{v,1,1}$, $E_{v2,2}$ là mô-đun biến dạng đại diện ở hai phía chuyển tiếp (nền đất và công trình hoặc nền thường và nền đã gia cố), còn ($E_{v,1,1}$, $E_{v2,2}$) max là độ dốc biến thiên cho phép theo thiết kế.

Việc sử dụng EV2 làm chỉ tiêu kiểm soát độ cứng xuất phát từ yêu cầu nghiệm thu định lượng nền đường trong HSR, bảo đảm tính đồng đều và khả năng làm việc đàn hồi của lớp móng trên nền. Theo kinh nghiệm thiết kế và khai thác tại châu Âu và Nhật Bản, chiều dài chuyển tiếp đối với mố cầu thường nằm trong khoảng 20 - 30 m mỗi phía và mô-đun EV2 cần tăng dần về phía công trình, đạt giá trị không nhỏ hơn 150 - 200 MPa tại vị trí tiếp giáp [2, 6]. Các giá trị này không phải là con số cứng nhắc mà cần được hiệu chỉnh theo điều kiện địa chất, cấp tốc độ và loại kết cấu đường (ballast hoặc slab track).

Trong điều kiện Việt Nam, nơi nền đất có tính phân lớp phức tạp và độ bão hòa cao ở nhiều khu vực, việc xác định chiều dài chuyển tiếp không nên chỉ dựa vào kinh nghiệm mà cần kết hợp với phân tích lún và kiểm tra biến dạng theo hiệu năng. Như đã phân tích ở mục trước về đặc thù cơ học của đoạn chuyển tiếp, nếu độ dốc thay đổi mô đun quá lớn sẽ làm tăng độ dốc lún, từ đó làm gia tăng hệ số khuếch đại động và biến dạng tích lũy theo thời gian. Do đó, thiết kế chiều dài chuyển tiếp theo nguyên lý "ramp độ cứng" cần được xem là bước đầu tiên để khống chế lún không đều và duy trì ổn định hình học lâu dài của tuyến HSR.

2.2. Khống chế lún tổng

Trong thực hành thiết kế nền đường sắt tốc độ cao, lún tổng của nền đường không phải là một đại lượng đơn nhất mà là kết quả tổng hợp của nhiều cơ chế biến dạng khác nhau, xảy ra ở các giai đoạn khác nhau trong suốt vòng đời công trình. Việc phân tách rõ các thành phần lún không chỉ có ý nghĩa về mặt tính toán mà còn là cơ sở để lựa chọn giải pháp xử lý nền, kiểm soát hình học tuyến và đánh giá độ ổn định lâu dài của kết cấu đường.

Lún tổng theo vòng đời được biểu diễn:

$$S_{tot}(t, N) = S_i + S_c(t) + S_\alpha(t) + S_d(N) \quad (2)$$

Theo cơ học đất cổ điển và nền-móng đường [3, 5], trong đó: S_i là lún tức thời; S_c là lún cố kết; (Terzaghi); S_α là lún từ biến; S_d là lún do tải trọng lặp.

2.3. Khống chế lún không đều

$$\Delta S = S(x_2) - S(x_1) \quad (3)$$

$$i = \frac{\Delta S}{L} \quad (4)$$

Theo yêu cầu khai thác HSR [1, 6]:

- Lún dư slab track ≤15 mm;
- Lún vi sai cục bộ ≤5 mm;
- Độ dốc lún i≤1/1000~1/1.500.

3. CƠ SỞ TÍNH TOÁN CÁC THÀNH PHẦN LÚN

3.1. Lún tức thời

Lún tức thời (ký hiệu (S_i)) là thành phần lún xuất hiện ngay khi nền đất chịu tác dụng của tải trọng, bao gồm tải trọng bản thân nền đắp, kết cấu đường và tải trọng đoàn tàu. Thành phần lún này chủ yếu do biến dạng đàn hồi và biến dạng dẻo tức thời của đất nền, xảy ra trong điều kiện chưa kịp thoát nước đối với đất dính hoặc gần như tức thời đối với đất rời.

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} \frac{\Delta\sigma_j H_j}{E_j} I_j \quad (5)$$

Trong đó:

- Δσj là gia tăng ứng suất thẳng đứng trung bình trong lớp đất thứ jjj;
- H_j là chiều dày lớp đất thứ jjj;
- E_j là mô-đun biến dạng đàn hồi của lớp đất thứ jjj;
- I_j là hệ số ảnh hưởng, xét đến điều kiện phân bố ứng suất, hình dạng tải và điều kiện biên.

3.2. Lún cố kết

Lún cố kết dài hạn là thành phần lún phát triển theo thời gian do quá trình tiêu tán áp lực nước lỗ rỗng dư trong đất dính bão hòa dưới tác dụng của tải trọng lâu dài từ nền đắp và kết cấu đường. Khác với lún tức thời xảy ra gần như đồng thời với việc đặt tải, lún cố kết diễn ra chậm, có thể kéo dài trong nhiều năm, thậm chí hàng chục năm, tùy thuộc vào điều kiện địa chất, chiều dày lớp đất yếu, hệ số thấm và sơ đồ thoát nước của nền.

Đối với một lớp đất dính có chiều dày H, lún cố kết cuối cùng $S_{c,\alpha}$ có thể được xác định theo biểu thức:

$$S_{c,\infty} = \frac{C_c}{1+e_0} H \log\left(\frac{\sigma_0' + \Delta\sigma'}{\sigma_0'}\right) \quad (6)$$

Trong đó:

- C_c là chỉ số nén của đất;
- e_o là hệ số rỗng ban đầu;
- σ'_o là ứng suất hữu hiệu ban đầu tại tâm lớp đất;
- Δσ' là gia tăng ứng suất hữu hiệu do tải trọng nền đắp và kết cấu đường.

3.3. Lún từ biến

Sau khi quá trình lún tức thời và lún cố kết sơ cấp cơ bản đã hoàn thành, nền đất vẫn có thể tiếp tục biến dạng theo thời gian dưới tác dụng của tải trọng không đổi. Thành phần biến dạng này được gọi là lún từ biến (hay lún thứ cấp), ký hiệu là $S_\alpha(t)$. Đây là dạng lún không gắn trực tiếp với quá trình thoát nước, mà chủ yếu liên quan đến đặc tính vật liệu và cấu trúc của đất.

Về bản chất, lún từ biến phát sinh do sự tái sắp xếp chậm của khung hạt đất, sự trượt nhớt giữa các hạt và sự suy giảm dần các liên kết cấu trúc trong đất dưới tác dụng của ứng suất hữu hiệu gần như không đổi. Hiện tượng này đặc biệt rõ rệt đối với đất sét mềm, đất yếu có chỉ số dẻo lớn, đất hữu cơ hoặc đất có cấu trúc, là những loại đất thường gặp trong nền đường sắt tại Việt Nam.

Đối với đất sét và các loại đất yếu có cấu trúc nhạy cảm với thời gian, lún từ biến thường được mô tả bằng quan hệ logarit với thời gian, trên cơ sở các thí nghiệm cố kết dài hạn trong phòng. Dạng biểu diễn phổ biến của lún từ biến cho một lớp đất i có thể viết như sau:

$$S_{\alpha,i}(t) = C_{\alpha,i} H_i \log\left(\frac{t}{t_{p,i}}\right) \quad (7)$$

Trong đó:

- $S_{\alpha,i}(t)$ là độ lún từ biến lớp đất i tích lũy tại thời điểm t;
- $C_{\alpha,i}$ là chỉ số từ biến của lớp đất thứ i, phản ánh mức độ biến dạng nhớt của đất;
- H_i là chiều dày lớp đất I chịu lún từ biến;
- $t_{p,i}$ là thời điểm bắt đầu xét lún từ biến (thường lấy khi kết thúc cố kết sơ cấp);
- t là thời gian xét lún.

3.4. Lún do tải trọng lặp

Trong quá trình khai thác đường sắt tốc độ cao, nền đường không chỉ chịu tải trọng tĩnh do trọng lượng bản thân kết cấu và đoàn tàu, mà còn chịu tải trọng lặp với tần suất rất lớn do các đoàn tàu liên tục chạy qua ở vận tốc cao. Dưới tác dụng của tải trọng lặp này, nền đất và các lớp vật liệu nền có thể phát sinh biến dạng dư tích lũy, dẫn đến một dạng lún riêng biệt gọi là lún do tải trọng lặp, ký hiệu $S_r(N,t)$.

Trong thực hành thiết kế, lún do tải trọng lặp thường được mô tả bằng các quan hệ thực nghiệm theo số chu kỳ tải. Một dạng biểu thức đơn giản và thường được sử dụng là:

$$S_d(N) = a.N^b \quad (8)$$

hoặc ở dạng logarit:

$$S_d(N) = A.\log(N) + B \quad (9)$$

Trong đó:

- $S_d(N)$ là độ lún dư tích lũy sau NNN chu kỳ tải;
- N là số chu kỳ tải trọng lặp;
- a, b, A,B là các hệ số thực nghiệm, phụ thuộc vào loại đất, trạng thái ứng suất và điều kiện nền.

4. NHÓM GIẢI PHÁP THIẾT KẾ

Trên cơ sở các đặc thù cơ học đã phân tích ở các mục trước, đặc biệt là yêu cầu rải đều độ cứng, khống chế lún tổng và lún không đều, giải pháp thiết kế đoạn chuyển tiếp trong HSR không thể dựa vào một biện pháp đơn lẻ mà cần tổ hợp nhiều giải pháp theo nguyên tắc "đồng bộ độ cứng - ổn định dài hạn - kiểm soát vòng đời". Các giải pháp dưới đây cần được lựa chọn và kết hợp tùy theo điều kiện địa chất, cấp tốc độ và loại kết cấu đường (ballast hoặc slab track).

4.1. Lớp chuyển tiếp

Lớp chuyển tiếp bằng vật liệu hạt chọn lọc được bố trí giữa nền đất và công trình nhân tạo nhằm tạo vùng đệm cơ học, giúp mô-đun biến dạng tăng dần về phía công trình. Chiều dày lớp này thường trong khoảng 0,5 - 1,0 m, tùy theo điều kiện nền và yêu cầu khai thác. Nguyên lý làm việc của lớp chuyển tiếp là cải thiện phân bố ứng suất và giảm độ dốc thay đổi mô-đun dọc tuyến, phù hợp với yêu cầu "ramp độ cứng" đã nêu tại Mục 2.1 và thực hành thiết kế HSR quốc tế [2, 6].

4.2. Gia cố nền

Khi nền tự nhiên có sức chịu tải và mô-đun thấp, cần áp dụng các biện pháp gia cố như cọc xi măng-đất, cọc bê tông, cọc cát hoặc gia tải trước. Mục tiêu là nâng cao mô-đun nền và giảm lún lâu dài. Nguyên tắc thiết kế là mô-đun E_{V2} sau gia cố không được thấp hơn mô-đun của nền thường liền kề, tức:

$$E_{V2,sau\ gia\ cố} \geq E_{V2,nền\ thường} \quad (10)$$

Nguyên lý chia tải giữa cọc và đất nền, cũng như cơ sở lựa chọn giải pháp cải thiện nền đã được trình bày trong phần "Gia cố nền bằng cọc" và tài liệu về xử lý nền đất yếu [3]. Trong thiết kế HSR, cần đặc biệt lưu ý xử lý mềm tại ranh giới kết thúc gia cố để tránh hình thành "bậc độ cứng".

4.3. Gia cường bằng vật liệu địa kỹ thuật (geogrid)

Việc bố trí một hoặc hai lớp geogrid trong lớp móng trên nền có tác dụng tăng khả năng phân bố tải, hạn chế biến dạng cắt và giảm lún tích lũy do tải trọng lặp. Cơ chế làm việc của geogrid dựa trên tương tác ma sát và khóa chặt cơ học giữa vật liệu hạt và lưới, qua đó cải thiện độ cứng tương đương của lớp nền-móng [5]. Giải pháp này đặc biệt hiệu quả trong các đoạn chuyển tiếp ngắn hoặc kết hợp với gia cố cọc.

4.4. Bản chuyển tiếp

Đối với kết cấu không đá ballast (slab track), bản chuyển tiếp thường được bố trí giữa cầu và nền đất nhằm giảm độ dốc lún và hạn chế khuếch đại động tại vị trí tiếp giáp. Theo các nghiên cứu về chuyển tiếp cầu-nền trong HSR [1, 4], bản chuyển tiếp có tác dụng làm "mềm hóa" sự thay đổi độ cứng, qua đó giảm ứng suất động và cải thiện điều kiện hình học khai thác.

4.5. Kiểm soát nước

Điều kiện thủy văn có ảnh hưởng trực tiếp đến độ cứng và lún lâu dài của nền. Nước ngầm cao hoặc thoát nước kém có thể làm suy giảm ứng suất hữu hiệu, kích hoạt lún nhanh và tăng biến dạng tích lũy. Do đó, thiết kế đoạn chuyển tiếp phải đồng thời bố trí hệ thống thoát nước mặt và thoát nước ngầm hợp lý, bảo đảm duy trì ổn định lâu dài của mô-đun nền.

4.6. Quan trắc và quản lý vòng đời

Trong HSR, thiết kế không kết thúc ở giai đoạn thi công mà phải gắn với quản lý vòng đời. Theo kinh nghiệm quản lý nền-móng đường [5, 6], cần thiết lập hệ thống quan trắc lún và biến dạng tại đoạn chuyển tiếp. Khi tốc độ lún vượt ngưỡng kiểm soát, ví dụ: $\frac{dS}{dt}$ > 0,5 mm/năm thì phải thực hiện kiểm tra, đánh giá lại điều kiện khai thác và đề xuất biện pháp can thiệp. Việc theo dõi tốc độ lún theo thời gian giúp phát hiện sớm xu hướng bất lợi, đặc biệt trong các tuyến slab track có yêu cầu hình học nghiêm ngặt.

5. VÍ DỤ TÍNH TOÁN THIẾT KẾ KHÔNG CHẾ LÚN TỔNG VÀ LÚN KHÔNG ĐỀU CHO ĐOẠN CHUYỂN TIẾP CÓ ĐIỀU KIỆN ĐỊA CHẤT GIỐNG ĐOẠN CẦU LỤC NAM

5.1. Số liệu đầu vào

- Phạm vi: L = 30 m, chia 3 đoạn.
- Điều kiện nền đại diện: Es = 20.000 kPa; hs = 10 m.
- Ba phương án so sánh: PA1 - đá cấp phối; PA2 - đá + geogrid; PA3 - cọc + geogrid.
- Giả thiết tải trọng quy đổi xuống mặt nền sau khi phân bố qua kết cấu trên: Δσ = 70 kPa.

Mục tiêu kiểm soát đối với tuyến sử dụng slab track theo thực hành HSR quốc tế [1, 6]:

- Lún dư sau thi công ≤ 15 mm;
- Lún vi sai cục bộ ≤ 5 mm;
- Độ dốc lún i≤ 1/1.000~1/1.500.

5.2. Tính lún tổng theo vòng đời (chưa xử lý)

Theo công thức (2):

$$S_{tot}(t,N) = S_i + S_c(t) + S_\alpha(t) + S_d(N)$$

Trong ví dụ minh họa này, để so sánh phương án về mặt cơ học cơ bản, giả thiết:

5.2.1. Lún tức thời

Theo công thức (5), giả sử nền tương đối đồng nhất:

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} \frac{\Delta\sigma_j H_j}{E_j} = \frac{\Delta\sigma H}{E_s} = \frac{70.10}{20.000} = 0{,}035\ m = 35\ mm$$

Giá trị này vượt xa giới hạn cho phép đối với HSR theo [1, 6].

5.2.2. Lún cố kết Sc

Giả thiết đại diện đất sét mềm vùng Bắc Giang c_c = 0,25; e_0 = 1,0, ứng suất hữu hiệu ban đầu tại giữa lớp σ'_0 = 100 kPa theo lý thuyết Terzaghi và công thức (6):

$$S_{c,\infty} = \frac{C_c}{1+e_0} H \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}\right) = \frac{0{,}25}{1+1}.10.\log\left(\frac{100+70}{100}\right) = 0{,}2875\ m = 288\ mm$$

5.2.3. Lún từ biến Sα

Với giả thiết Cα = 0,015, t_p = 1 năm; t = 30 năm, theo công thức (7) có thể viết thành:

$$S_{\alpha,i}(t) = C_\alpha . H . log\left(\frac{t}{t_p}\right) = 0{,}015.10.log\left(\frac{30}{1}\right) = 0{,}0222\ m \approx 222\ mm.$$

5.2.4. Lún do tải trọng lặp Sd

Giả thiết tuyến HSR khai thác 30 năm: N ≈ 10^8 chu kỳ tải; với hệ số thực nghiệm đại diện đất yếu: A=1 mm, B = 2,0 mm:

$$S_d = 2 + 1{,}0.log(10^8) = 2 + 8 = 10\ mm$$

Giá trị này phù hợp nghiên cứu thực nghiệm về tích lũy biến dạng nền dưới tải lặp [4, 6].

5.2.5. Tổng hợp lún vòng đời (không xử lý)

$$S_{tot} = 35 + 288 + 222 + 10 = 455\ mm$$

Giá trị này lớn hơn nhiều so với giới hạn cho phép HSR. Kết luận là nếu không xử lý nền, đoạn chuyển tiếp sẽ phát sinh lún lớn và lún vi sai nguy hiểm.

5.3. Tính lún sau xử lý theo phương án geogrid

5.3.1. Giả thiết kỹ thuật cho PA3 (cọc + geogrid)

Áp dụng nguyên lý chia tải cọc-đất [3]:

$$\Delta\sigma_s = (1 - \eta)\Delta\sigma$$

Trong đó: η là hệ số chia tải cho cọc; $\Delta\sigma_s$ là ứng suất truyền xuống đất giữa cọc.

Với đoạn chuyển tiếp L = 30 m, chia 3 đoạn 10 m, lựa chọn η giảm dần theo đúng tinh thần "ramp độ cứng": Đoạn 0-10 m: η_1 = 0,085; đoạn 10-20 m: η_2 = 0,75; đoạn 20 - 30 m: η_2 = 0,60.

5.3.2. Tính lún tức thời sau xử lý Si

Theo công thức (5), với mỗi đoạn k:

$$S_{i,k} = \frac{\Delta\sigma_{s,k}H}{E_s}$$

- Đoạn 0 - 10 m:

$$\Delta\sigma_{s,1} = (1 - \eta_1).\Delta\sigma = (1 - 0{,}85).70 = 10{,}5\ kPa$$

$$S_{i,1} = \frac{10{,}5.10}{20000} = 0{,}00525\ m = 5{,}3\ mm$$

- Tương tự, đoạn 10-20 m: $\Delta\sigma_{s,2}$ = 17,5 kPa; $S_{i,2}$ = 8,8 mm.
- Tương tự, đoạn 20-30 m: $\Delta\sigma_{s,3}$ = 28,0 kPa; $S_{i,2}$ = 14,0 mm.

5.3.3. Lún cố kết sau xử lý Sc

Theo công thức (6), thay Δσ bằng $\Delta\sigma_{s,k}$ [3]:

$$S_{c,k} = \frac{C_c}{1 + e_0} H \log\left(\frac{\sigma_0' + \Delta\sigma_{s,k}}{\sigma_0'}\right)$$

Với C_c = 0,25; e_o = 1,0; H = 10 m; σ'_o = 100 kPa;

Đoạn 0-10 m:

Đoạn 0–10 m:

$$S_{c,1} = \frac{0{,}25}{1+1{,}0}.10\log\left(\frac{100+10{,}5}{100}\right) = 53{,}8\ \text{mm}$$

- Tương tự, đoạn 10-20 m: $S_{c,2}$ = 87,5 mm.
- Tương tự, đoạn 20-30 m: $S_{c,2}$ = 133,8 mm.

5.3.4. Lún từ biến sau xử lý Sα

Theo công thức (7) [5], giả thiết lún từ biến tỷ lệ với mức ứng suất tác dụng. Một cách viết gọn khác dùng trong tính toán là:

$$S_{\alpha,k}(t) = \lambda_\alpha . S_{c,k}. log\left(\frac{t}{t_p}\right)$$

Trong đó: λ_α là tỷ lệ giữa lún từ biến và lún cố kết (thực tế phụ thuộc đất; dùng để minh họa). Chọn λ_α = 0,3 (đất sét mềm, mức vừa) [5]. Với t=30 năm; tp=1 năm:

$$S_{\alpha,k} = 0{,}443.S_{c,k}.$$

Thay số ta có: Đoạn 0-10 m: $S_{\alpha,1}$ = 23,8 mm; đoạn 10-20 m: $S_{\alpha,2}$ = 33,8 mm; đoạn 20-30 m: $S_{\alpha,1}$ = 59,3 mm.

5.3.5. Lún do tải trọng lặp sau xử lý Sd

Theo quan hệ thực nghiệm dạng logarit (9). Để phản ánh hiệu quả của cọc + geogrid làm giảm biến dạng tích lũy, giả thiết B giảm theo mức chia tải (giảm ứng suất động trong đất) [4], [6]. Chọn: Đoạn 0-10 m: B1=0,3 mm; đoạn 10-20 m: B2=0,5 mm; đoạn 20-30 m: B3=0,8 mm; A=1 mm.

Thay số ta có $S_{d,1}$ = 3,4 mm; $S_{d,2}$ = 5,0 mm; $S_{d,3}$ = 7,4 mm.

5.4. Tổng hợp lún vòng đời sau xử lý và kiểm tra "mức đạt" HSR

Tổng lún từng đoạn:

- Đoạn 0-10 m: $S_{tot,1}$ = 86,3 mm.
- Đoạn 10-20 m: $S_{tot,2}$ = 140,1 mm.
- Đoạn 20-30 m: $S_{tot,3}$ = 214,5 mm.

Nếu chỉ "lắp cọc" mà không có biện pháp gia tải trước/đợi cố kết, lún vòng đời vẫn rất lớn do S_c , S_α còn chiếm ưu thế. Điều này phản ánh đúng thực tế: Cọc chia tải làm giảm lún, nhưng không triệt tiêu hoàn toàn cố kết và từ biến nếu vẫn còn tải đáng kể truyền vào đất.

Để đạt tiêu chí "lún dư sau thi công ≤ 15 mm" của slab track [1, 6], bắt buộc phải đưa vào quy trình xử lý theo hiệu năng gồm: Gia tải trước và/hoặc tăng thoát nước để "lấy" phần lớn S_c trước khi lắp tấm bản; Kiểm soát chặt mực nước và chất lượng đầm chặt lớp chuyển tiếp; vuốt mềm cuối vùng xử lý (tăng dần $E_{v,2}$, giảm dần η) để khống chế lún không đều.

Khi áp dụng đúng quy trình thi công-chờ lún, tiêu chí kiểm soát nên chuyển từ "lún tổng vòng đời" sang "lún dư sau thi công":

$$S_r = S_{tot} - S_{pre}$$

Trong đó: S_{pre} là lún đã được gây ra và ổn định trong giai đoạn gia tải/thi công. Với HSR, mục tiêu là làm cho S_{pre} (≈ mm) trước khi đưa vào khai thác [6].

Kiểm soát lún không đều: Do S_{tot} biến thiên mạnh theo đoạn, nếu đoạn chuyển tiếp không đủ dài sẽ xuất hiện "điểm gãy" lún ở ranh giới kết thúc xử lý. Do đó, giải pháp thiết kế đoạn chuyển tiếp chỉ đạt yêu cầu HSR khi: Có "taper" η là giải pháp giảm dần mức chia tải của hệ cọc theo phương dọc tuyến nhằm rải đều độ cứng, làm êm độ dốc lún và hạn chế khuếch đại động tại ranh giới kết thúc xử lý; vùng taper thường kéo dài thêm 10 - 20 m ngoài chiều dài xử lý chính để tránh hình thành bậc độ cứng cũng như kết hợp lớp chuyển tiếp và geogrid để làm êm độ dốc lún [4, 6].

6. KẾT LUẬN

- Đoạn chuyển tiếp giữa nền đất và công trình nhân tạo trong đường sắt tốc độ cao là vị trí nhạy cảm nhất của tuyến do tồn tại sự biến thiên đột ngột về độ cứng, khác biệt cơ chế biến dạng theo thời gian và khuếch đại đáp ứng động lực học. Nếu không được thiết kế theo tư duy "ramp độ cứng" và kiểm soát lún theo hiệu năng, khu vực này sẽ tập trung lún vi sai và gia tăng tải trọng động, dẫn đến suy giảm nhanh hình học tuyến và tăng chi phí bảo trì.

- Kết quả ví dụ tính toán với điều kiện địa chất tương tự đoạn cầu Lục Nam cho thấy: Nếu không xử lý nền, lún vòng đời có thể đạt hàng trăm milimét, vượt xa giới hạn khai thác HSR. Giải pháp gia cố bằng cọc kết hợp lớp chuyển tiếp và geogrid giúp giảm đáng kể ứng suất truyền xuống đất yếu. Tuy nhiên, để đạt tiêu chí lún dư ≤ 15 mm đối với slab track, bắt buộc phải kết hợp gia tải trước, kiểm soát thoát nước và thiết kế "taper" mức gia cố nhằm làm êm độ dốc lún và hạn chế "bậc độ cứng".

- Thiết kế đoạn chuyển tiếp HSR trong điều kiện địa chất Việt Nam cần được tiếp cận theo tư duy hiệu năng và vòng đời, trong đó lún tổng, lún không đều, độ dốc lún và sự đồng đều độ cứng là các chỉ tiêu trung tâm. Việc tích hợp giải pháp kết cấu, kiểm soát thi công và quan trắc khai thác là điều kiện tiên quyết để bảo đảm ổn định hình học lâu dài và khai thác bền vững tuyến đường sắt tốc độ cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Esveld, C. Modern Railway Track, 2001.
[2] Kützner, C. High-Speed Railway Infrastructure, 2019.
[3] Moseley, M.P., Kirsch, K. Ground Improvement, 2004.
[4] Paixão, A., Fortunato, E., Calçada, R. Bridge-Embankment Transition Zones in High-Speed Railways, 2014.
[5] Selig, E.T., Waters, J.M. Track Geotechnology and Substructure Management, 1994.
[6] UIC IRS 70722 - Ballastless Track and Substructure Maintenance and Improvement, 2023.

■Ngày nhận bài: 16/3/2026 ■Ngày sửa bài: 25/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 03/4/2026

Đánh giá ổn định hố đào và nội lực kết cấu ga S11 thi công top-down trong điều kiện mực nước ngầm cao

Assessment of excavation stability and structural internal forces of S11 underground station constructed by the top-down method under high groundwater conditions

> THS TRẦN THỊ THU HIỀN
Trường Đại học Giao thông vận tải
Email: tranhiennxht@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Thi công ga ngầm trong điều kiện đô thị có mực nước ngầm cao đặt ra nhiều thách thức về ổn định hố đào và an toàn kết cấu khi áp dụng công nghệ top-down. Bài báo trình bày đánh giá đồng thời ổn định địa kỹ thuật và nội lực kết cấu của ga ngầm S11 thông qua mô hình phân tích liên hợp đất-kết cấu có xét đến điều kiện địa chất, tải trọng thi công, áp lực nước ngầm và trình tự thi công theo giai đoạn. Hai kịch bản mực nước ngầm, gồm mực nước tự nhiên và hạ đến cao độ đáy, được so sánh để xác định ảnh hưởng đến ổn định đáy, chuyển vị tường vây và nội lực trong hệ sàn-tường. Kết quả cho thấy mực nước ngầm cao làm giảm hệ số an toàn bùng đáy, tăng chuyển vị ngang và gia tăng mô-men uốn trong các bản sàn, đặc biệt ở sàn đáy, trong khi biện pháp hạ nước giúp cải thiện rõ rệt ổn định và giảm nội lực kết cấu. Nghiên cứu cung cấp cơ sở cho thiết kế và kiểm soát nước ngầm trong các dự án tương tự.

Từ khóa: Hố đào sâu; ổn định địa kỹ thuật; nội lực kết cấu; thi công top-down; mực nước ngầm.

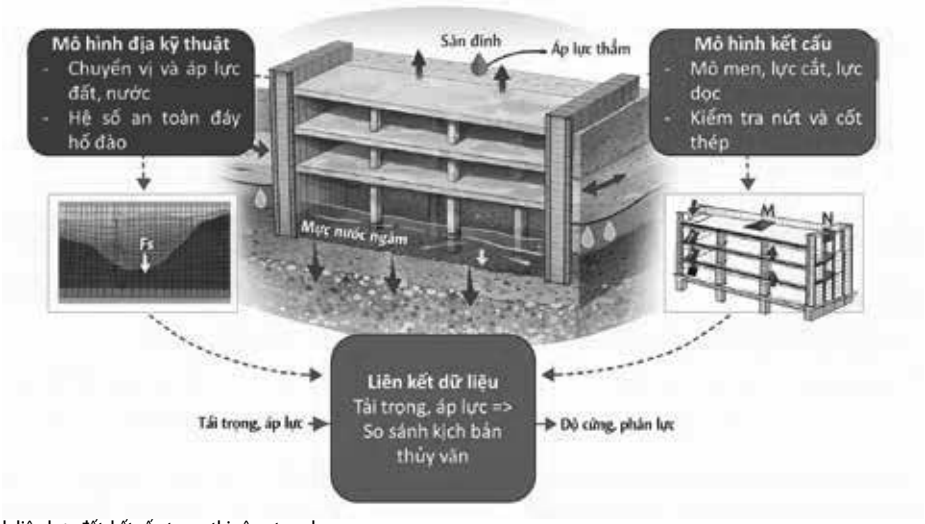
ABSTRACT

The construction of underground stations in urban areas with high groundwater levels poses significant challenges to excavation stability and structural safety when using the top-down method. This study provides an integrated assessment of geotechnical stability and structural internal forces for Station S11 using a coupled soil-structure numerical model that accounts for geological conditions, construction loads, groundwater pressure and staged construction sequences. Two groundwater scenarios, including the natural level and a lowered level to the base slab, were compared to evaluate their effects on basal stability, diaphragm wall displacement and internal forces within the slab-wall system. The results show that high groundwater levels considerably reduce basal safety factors, increase lateral wall deformation and amplify bending moments in structural slabs, particularly in the base slab, whereas lowering groundwater levels significantly improves stability and reduces structural demand. The findings offer practical guidance for groundwater control and structural design optimization for underground stations constructed under similar geotechnical and hydrogeological conditions.

Keywords: Deep excavation; geotechnical stability; structural internal forces; top-down construction; groundwater level.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong những năm gần đây, hệ thống đường sắt đô thị đang được phát triển mạnh tại các thành phố lớn nhằm giảm ùn tắc giao thông và nâng cao năng lực vận tải hành khách. Phần lớn các nhà ga trung tâm được bố trí ngầm trong khu vực đô thị mật độ xây dựng cao, không gian thi công hạn chế và điều kiện địa chất-thủy văn phức tạp. Trong bối cảnh đó, phương pháp thi công top-down được áp dụng rộng rãi nhờ ưu điểm giảm chiếm dụng mặt bằng, hạn chế ảnh hưởng giao thông bề mặt, tận dụng các bản sàn như hệ chống tạm và tăng độ cứng tổng thể của hệ tường vây-sàn, từ đó kiểm soát chuyển vị và lún nền hiệu quả hơn so với nhiều phương án đào mở truyền thống. Tuy nhiên, đối với các hố đào sâu trong đất bão hòa nước, mực nước ngầm cao có thể gây mất ổn định đáy hố đào, gia tăng áp lực thấm và lực đẩy nổi, đồng thời làm tăng chuyển vị tường vây và nội lực trong hệ kết cấu chống đỡ, tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn trong thi công cũng như khai thác lâu dài [1].



Hình 1. Khung phân tích liên hợp đất-kết cấu trong thi công top-down

Nhiều nghiên cứu trước đây đã tập trung đánh giá ứng xử của hố đào sâu và hệ tường vây thông qua quan trắc thực địa hoặc mô phỏng số, trong đó các chỉ tiêu thường được xem xét bao gồm chuyển vị ngang tường, lún bề mặt, mô-men uốn tường và lực trong hệ chống. Các kết quả cho thấy công nghệ top-down có khả năng giảm biến dạng đáng kể nhờ sự tham gia sớm của các bản sàn như các tầng chống cứng. Bên cạnh đó, các nghiên cứu địa kỹ thuật cũng chỉ ra rằng trong điều kiện nền bão hòa, hiện tượng bùng đáy, xói ngầm và phá hoại thủy lực do dòng thấm hướng lên là những cơ chế mất ổn định quan trọng, đặc biệt khi chênh lệch cột nước giữa trong và ngoài hố đào lớn [2]. Các giải pháp như hạ mực nước ngầm, tăng chiều sâu ngàm tường vây hoặc gia cố nền đất thường được đề xuất nhằm cải thiện hệ số an toàn và hạn chế rủi ro thi công.

Mặt khác, trong thực hành thiết kế, bài toán kết cấu bê tông cốt thép của hệ sàn-tường vây thường được kiểm toán riêng rẽ thông qua các tổ hợp tải trọng ULS/SLS, xét đến tải trọng đất, nước, hoạt tải và động đất. Cách tiếp cận này giúp đảm bảo khả năng chịu lực của kết cấu, song chưa phản ánh đầy đủ sự tương tác giữa biến dạng nền đất và nội lực kết cấu trong từng giai đoạn thi công. Thực tế cho thấy sự thay đổi mực nước ngầm không chỉ ảnh hưởng đến ổn định đáy hố đào mà còn làm thay đổi đáng kể phân bố nội lực, mô-men uốn và yêu cầu cốt thép trong các bản sàn, đặc biệt đối với sàn đáy chịu lực đẩy nổi lớn [3, 4]. Do đó, xu hướng nghiên cứu gần đây nhấn mạnh việc sử dụng mô hình phân tích liên hợp đất-kết cấu (soil-structure interaction) nhằm đánh giá đồng thời ổn định địa kỹ thuật và ứng xử kết cấu theo trình tự thi công thực tế [5, 6]. Trong hồ sơ thiết kế ga ngầm S11, hệ kết cấu bên trong đã được mô hình hóa bằng khung 2D và 3D với các tổ hợp tải trọng chi tiết, cung cấp cơ sở dữ liệu phù hợp cho các phân tích tích hợp dạng này [7].

Mặc dù vậy, các nghiên cứu trường hợp áp dụng cách tiếp cận liên hợp cho điều kiện địa chất - thủy văn đặc trưng của Việt Nam vẫn còn hạn chế, đặc biệt đối với các ga ngầm thi công top-down trong môi trường mực nước ngầm cao. Xuất phát từ khoảng trống đó, bài báo này thực hiện nghiên cứu trường hợp tại Ga Văn Miếu (ga S11) của tuyến đường sắt đô thị Hà Nội nhằm đánh giá đồng thời ổn định hố đào và nội lực kết cấu dưới các kịch bản mực nước ngầm khác nhau. Cụ thể, một mô hình mô phỏng số liên hợp đất-kết cấu được xây dựng có xét đến điều kiện địa chất, áp lực nước, tải trọng thi công và trình tự đào theo giai đoạn; các chỉ tiêu như hệ số an toàn bùng đáy, chuyển vị tường vây và nội lực trong hệ sàn-tường được phân tích và so sánh giữa các trường hợp. Kết quả nghiên cứu kỳ vọng cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn giải pháp kiểm soát nước ngầm và tối ưu thiết kế kết cấu trong thi công các nhà ga ngầm tương tự.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU VÀ MÔ HÌNH PHÂN TÍCH

2.1. Khung phân tích liên hợp đất-kết cấu

Nghiên cứu áp dụng phương pháp phân tích liên hợp đất-kết cấu (soil-structure interaction) nhằm đánh giá đồng thời ổn định địa kỹ thuật của hố đào và nội lực trong hệ kết cấu chống đỡ khi thi công top-down. Thay vì tách riêng bài toán địa kỹ thuật và kết cấu, cách tiếp cận này xem xét sự tương tác hai chiều giữa biến dạng nền đất, áp lực nước ngầm và độ cứng của hệ tường vây-sàn theo từng giai đoạn thi công. Quy trình thực hiện gồm: (i) Mô phỏng địa kỹ thuật để xác định chuyển vị và áp lực đất-nước; (ii) sử dụng các tải trọng và phản lực thu được cho mô hình kết cấu và (iii) so sánh các chỉ tiêu ổn định và nội lực giữa các kịch bản mực nước ngầm.

2.2. Mô hình tính toán nền đất và kết cấu

Mô hình địa kỹ thuật được xây dựng bằng phương pháp phần tử hữu hạn trong môi trường biến dạng phẳng (2D plane strain), phù hợp với hình dạng kéo dài của nhà ga ngầm. Nền đất được chia thành nhiều lớp theo điều kiện địa chất khảo sát, mỗi lớp được đặc trưng bởi các thông số cơ học và thấm như dung trọng tự nhiên, dung trọng bão hòa, mô-đun biến dạng, lực dính, góc ma sát trong và hệ số thấm theo phương ngang và phương đứng. Ứng xử đất được giả thiết theo mô hình đàn hồi-dẻo Mohr-Coulomb nhằm mô tả đồng thời biến dạng và trạng thái phá hoại cắt của đất trong quá trình đào.

Điều kiện biên của mô hình được thiết lập với đáy cố định theo cả hai phương và biên bên hạn chế chuyển vị ngang nhằm giảm ảnh hưởng biên. Tường vây được mô phỏng bằng phần tử dầm hoặc tấm có độ cứng tương đương, liên kết với nền đất thông qua phần tử tiếp xúc. Áp lực nước ngầm được xét đến thông qua trường áp lực lỗ rỗng và phân tích thấm ổn định. Các chỉ tiêu địa kỹ thuật được theo dõi bao gồm hệ số an toàn ổn định đáy (basal stability safety factor), chuyển vị ngang đỉnh tường, phân bố mô-men trong tường và áp lực nước thấm tại đáy hố đào.

Trình tự thi công top-down được mô phỏng theo từng giai đoạn: Thi công tường vây, đào đến cao độ bản đỉnh, đổ sàn đỉnh, tiếp tục đào và thi công các bản sàn trung gian, sau cùng đào đến đáy và thi công sàn đáy. Việc kích hoạt hoặc vô hiệu hóa phần tử đất và kết cấu theo từng bước cho phép phản ánh đúng quá trình thay đổi trạng thái ứng suất - biến dạng của nền đất.

2.3. Mô hình kết cấu và các kịch bản tính toán

Song song với phân tích địa kỹ thuật, hệ kết cấu bên trong

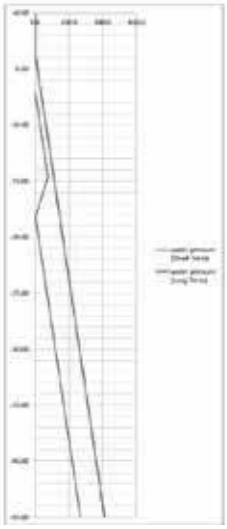
nhà ga được mô hình hóa bằng khung bê tông cốt thép gồm tường vây, sàn đỉnh, sàn trung gian và sàn đáy. Các cấu kiện được giả thiết liên kết ngàm hoàn toàn tại các nút giao tường-sàn nhằm mô tả cơ chế làm việc đồng thời của hệ kết cấu vĩnh cửu trong công nghệ top-down. Mô hình khung 2D được sử dụng cho tính toán tổng thể theo phương ngang, trong khi mô hình 3D được áp dụng tại các vị trí đặc biệt như khu vực có lỗ mở hoặc khu vực máy đào TBM ra vào.

Tải trọng tác dụng lên kết cấu bao gồm trọng lượng bản thân, tải trọng đất, áp lực nước ngầm, tải trọng thi công, hoạt tải sử dụng và tải trọng động đất giả tĩnh. Các tổ hợp tải trọng được xét theo trạng thái giới hạn cực hạn (ULS) và trạng thái giới hạn sử dụng (SLS) theo hệ tiêu chuẩn châu Âu. Kết quả tính toán bao gồm mô-men uốn, lực cắt, lực dọc, kiểm tra ứng suất bê tông-cốt thép và kiểm soát độ rộng vết nứt của các bản sàn. Cách mô hình hóa và kiểm toán nội lực này tương thích với hệ thống tính toán đã được áp dụng trong hồ sơ thiết kế kỹ thuật của ga S11. Để đánh giá ảnh hưởng của nước ngầm, hai kịch bản chính được xem xét: (i) Mực nước tự nhiên và (ii) hạ mực nước đến cao độ đáy hố đào. Kết quả giữa các trường hợp được so sánh nhằm xác định tác động của nước ngầm đến ổn định địa kỹ thuật và nhu cầu chịu lực của kết cấu.

3. PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ ỔN ĐỊNH GA S11 THI CÔNG TOP-DOWN TRONG ĐIỀU KIỆN NƯỚC NGẦM CAO

3.1. Giới thiệu ga S11

Ga Văn Miếu (S11) [8] thuộc tuyến đường sắt đô thị Hà Nội, thi công theo công nghệ đào hở top-down với hệ tường vây bê tông cốt thép kết hợp các bản sàn làm kết cấu chống đỡ tạm và vĩnh cửu. Khoảng cách giữa hai tường vây thay đổi từ 22,5 - 26,5 m, bao gồm sàn đỉnh, sàn trung gian và sàn đáy liên kết ngàm hoàn toàn với tường, tạo thành hệ khung không gian có độ cứng lớn.



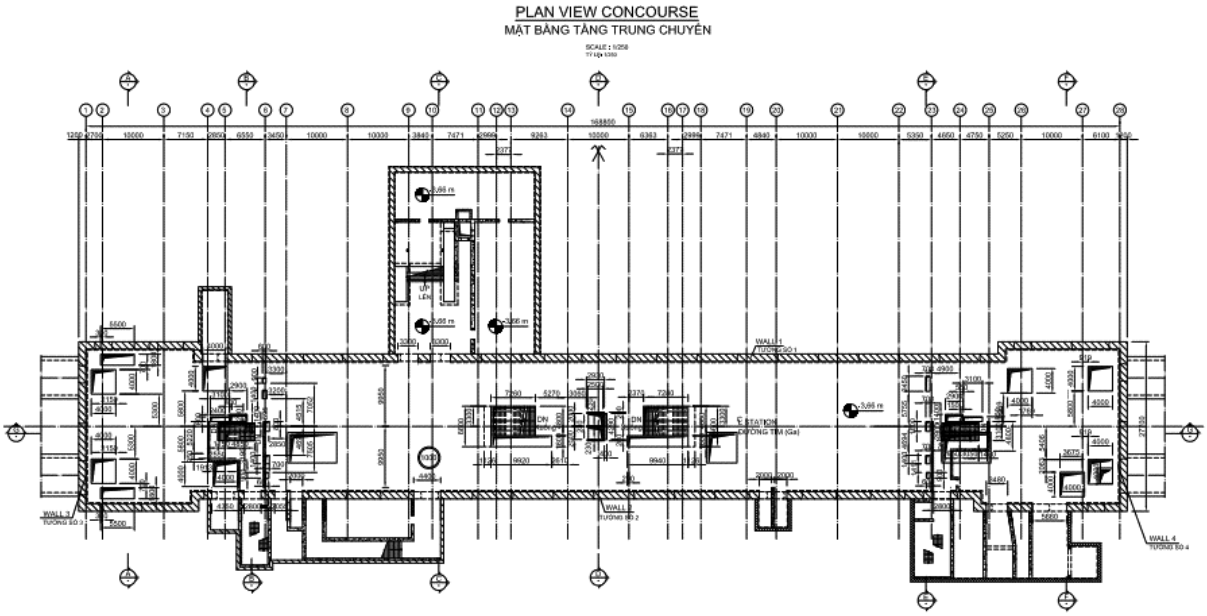
Type of Water Level	Upper aquifer	Lower aquifer
Short-term water level	-0.7	-11.7
Long-term water level	[illegible]	[illegible]

Hình 3. Biểu đồ áp lực nước cho ga 11

Hai kịch bản thủy văn được xem xét: (i) Mực nước ngầm tự nhiên và (ii) hạ mực nước đến dưới cao độ sàn đáy trong quá trình thi công, nhằm đánh giá mức độ ảnh hưởng của nước ngầm đến ổn định và nội lực kết cấu.

3.2. Phân tích và đánh giá

Mô hình tính toán số của công trình được xây dựng dưới dạng mô hình phần tử hữu hạn ba chiều (3D finite element model), trong đó toàn bộ hệ tường vây, bản sàn và khối đất nền xung quanh được rời rạc hóa bằng lưới phần tử không gian. Hình học mô hình phản ánh đầy đủ kích thước thực tế của nhà ga, bao gồm tường vây hai

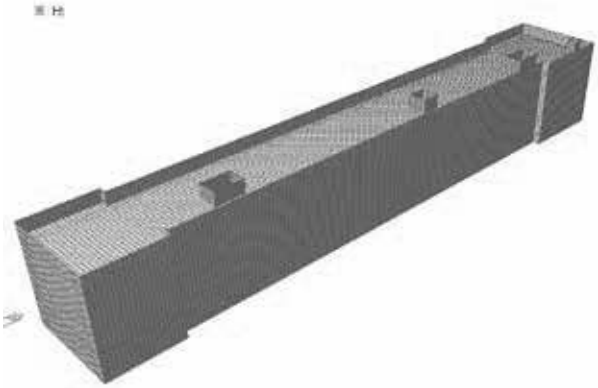


Hình 2. Mặt bằng kết cấu ga S11

Điều kiện nền gồm nhiều lớp đất sét và cát bão hòa nước với hệ số thấm thay đổi theo chiều sâu; mực nước ngầm tự nhiên ở cao độ nông so với đáy hố đào. Tải trọng tác dụng bao gồm trọng lượng bản thân kết cấu, áp lực đất, áp lực nước ngầm, tải trọng thi công, hoạt tải sử dụng và tải trọng động đất giả tĩnh. Các tổ hợp tải trọng và thông số vật liệu được xác định theo hệ tiêu chuẩn châu Âu và hồ sơ thiết kế kỹ thuật của dự án.

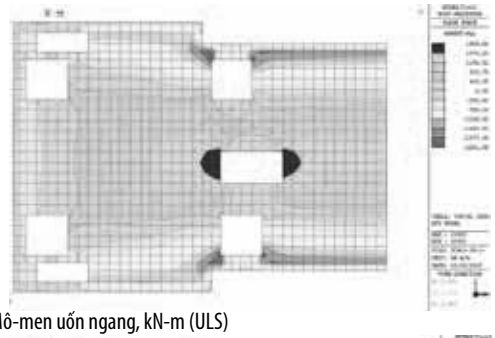
bên, các bản sàn trung gian, sàn đáy và các khu vực mở cục bộ. Nền đất được mô phỏng như môi trường liên tục với các lớp địa chất khác nhau, cho phép xét đến sự phân bố ứng suất, biến dạng và áp lực nước lỗ rỗng trong quá trình đào. Hệ kết cấu bê tông cốt thép được liên kết tương tác với đất thông qua các phần tử tiếp xúc nhằm mô phỏng cơ chế làm việc đồng thời giữa đất và kết cấu. Lưới tính được tinh chỉnh tại các vùng quan trọng như chân tường và đáy hố đào để tăng độ chính xác của kết quả. Mô hình 3D này cho phép

đánh giá chi tiết chuyển vị không gian của tường vây cũng như nội lực trong hệ sàn - tường theo từng giai đoạn thi công top-down.

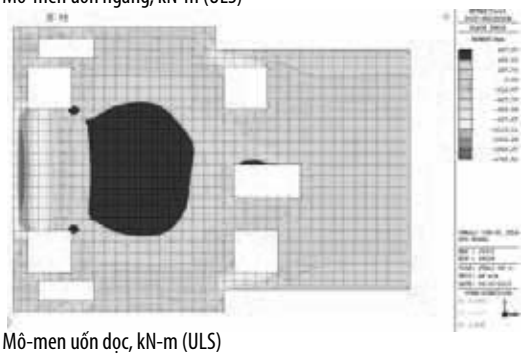


Hình 4. Mô hình 3D ga S11

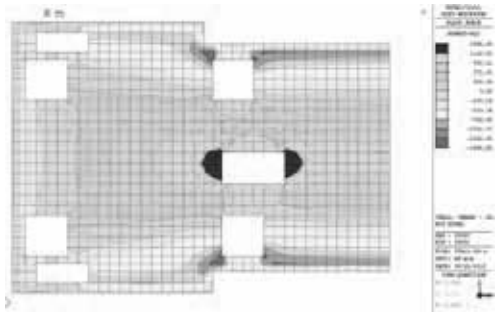
Kết quả mô phỏng địa kỹ thuật cho thấy mực nước ngầm có ảnh hưởng rõ rệt đến trạng thái ứng suất và biến dạng của nền đất. Ở kịch bản mực nước tự nhiên, áp lực nước thấm hướng lên làm giảm ứng suất hữu hiệu tại đáy hố đào, dẫn đến giảm hệ số an toàn ổn định đáy và gia tăng nguy cơ bùng nền. Đồng thời, chuyển vị ngang của tường vây tăng đáng kể, đặc biệt tại giai đoạn đào sâu cuối cùng khi hệ chống chưa hoàn thiện.



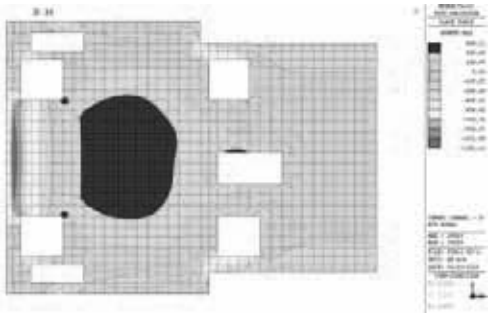
Mô-men uốn ngang, kN-m (ULS)



Mô-men uốn dọc, kN-m (ULS)



Mô-men uốn ngang, kN-m (SLS - đặc trưng)



Mô-men uốn dọc, kN-m (SLS-đặc trưng)

Hình 5. Nội lực tại mặt cắt nguy hiểm theo các kịch bản kiểm tra

Sự thay đổi điều kiện nước ngầm dẫn đến biến thiên đáng kể nội lực trong hệ sàn-tường. Trong trường hợp mực nước cao, mô-men uốn và lực cắt trong các bản sàn tăng rõ rệt do tác động đồng thời của áp lực nước và chuyển vị tường vây. Nội lực lớn nhất tập trung tại sàn đáy, nơi chịu ảnh hưởng của lực đẩy nổi và phản lực đất nền, với giá trị mô-men uốn lớn hơn đáng kể so với sàn trung gian. Xu hướng này phù hợp với kết quả kiểm toán kết cấu trong hồ sơ thiết kế.

So sánh giữa hai kịch bản cho thấy việc hạ mực nước giúp giảm đáng kể mô-men uốn và yêu cầu cốt thép của sàn, đồng thời hạn chế nguy cơ nứt và thấm nước trong giai đoạn khai thác. Điều này chứng tỏ rằng kiểm soát nước ngầm không chỉ có ý nghĩa về mặt địa kỹ thuật mà còn góp phần tối ưu hóa thiết kế kết cấu và giảm chi phí gia cường.

Tổng hợp các kết quả cho thấy mực nước ngầm là yếu tố chi phối đồng thời cả ổn định hố đào và nội lực kết cấu. Do đó, việc phân tích liên hợp đất-kết cấu là cần thiết để đánh giá chính xác mức độ an toàn và lựa chọn giải pháp thi công phù hợp cho các ga ngầm thi công top-down trong điều kiện địa chất-thủy văn tương tự.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã phát triển mô hình phân tích liên hợp đất-kết cấu để đánh giá đồng thời ổn định hố đào và nội lực kết cấu cho ga ngầm thi công top-down, áp dụng cho trường hợp Ga Văn Miếu (S11). Kết quả cho thấy mực nước ngầm ảnh hưởng đáng kể đến trạng thái làm việc của công trình: Mực nước cao làm giảm ổn định đáy hố đào, tăng chuyển vị tường vây và gia tăng nội lực trong các bản sàn, đặc biệt tại sàn đáy. Hạ mực nước ngầm giúp cải thiện an toàn địa kỹ thuật và giảm yêu cầu chịu lực của kết cấu. Phương pháp đề xuất cung cấp cơ sở tin cậy cho việc lựa chọn giải pháp kiểm soát nước ngầm và tối ưu thiết kế các ga ngầm trong điều kiện địa chất-thủy văn tương tự.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Trần Thanh Giám, Tạ Tiến Đạt. Tính toán thiết kế công trình ngầm. NXB. Xây dựng, Hà Nội, 2002.

[2] Nghiêm Hữu Hạnh. Cơ học đá. NXB. Xây dựng, Hà Nội, 2004.

[3] Nghiêm Hữu Hạnh, nnk. Báo cáo đề tài: Nghiên cứu các giải pháp kỹ thuật để hạn chế ảnh hưởng tới công trình lân cận khi xây dựng công trình ngầm bằng phương pháp đào hở tại Hà Nội. Hà Nội, 2010.

[4] Ivacnhuc V.A. Thiết kế và xây dựng công trình ngầm và công trình đào sâu. NXB. Xây dựng, Hà Nội, 2004.

[5] Nguyễn Bá Kế. Xây dựng công trình ngầm đô thị theo phương pháp đào mở. NXB. Xây dựng, Hà Nội, 2006.

[6] Nguyễn Thế Phùng, Nguyễn Quốc Hùng. Thiết kế công trình hầm giao thông. NXB. Giao thông vận tải, Hà Nội, 2004.

[7] Nguyễn Văn Quảng, Nguyễn Đức Nguôn. Tổ chức khai thác không gian ngầm. NXB. Xây dựng, Hà Nội, 2006.

[8] Hồ sơ ga ngầm S11 thuộc tuyến đường sắt đô thị thí điểm thành phố Hà Nội.

■Ngày nhận bài: 06/3/2026 ■Ngày sửa bài: 14/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 28/3/2026

Đánh giá mô hình quản lý bảo trì hệ thống quốc lộ Việt Nam sau phân cấp, phân quyền

Assessing Vietnam's national highway maintenance management model in the context of decentralization and delegation of authority

> PGS.TS BÙI NGỌC TOÀN[1,*], KS NGUYỄN XUÂN ẢNH[2]
[1]Trường Đại học Giao thông vận tải
[2]Bộ Xây dựng
[*]Email: bntoan@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Trước khi thực hiện phân cấp, phân quyền, công tác quản lý bảo trì hệ thống quốc lộ ở Việt Nam được vận hành theo mô hình quản lý tập trung, thống nhất từ Trung ương xuống địa phương. Sau khi thực hiện phân cấp, phân quyền, công tác quản lý bảo trì hệ thống quốc lộ ở Việt Nam được chuyển đổi từ mô hình quản lý tập trung sang mô hình quản trị đa cấp, gắn trách nhiệm với quyền hạn của từng cấp quản lý.

Từ khóa: Mô hình quản lý; bảo trì; phân cấp; phân quyền.

ABSTRACT

Before the decentralization and delegation of authority, the maintenance management of the national highway system in Vietnam operated under a centralized, unified management model from the central committee level down to the local level. After decentralization and delegation of authority, the maintenance management of the national highway system in Vietnam shifted from a central committee management model to a multi-level management model, linking responsibility with the authority of each local management level.

Keywords: Management model; maintenance; decentralization; delegation.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sau khi phân cấp, phân quyền, công tác quản lý bảo trì hệ thống quốc lộ ở Việt Nam bước sang một giai đoạn phát triển mới. Cơ sở pháp lý của quá trình chuyển đổi này được hình thành bởi một loạt văn bản quy phạm pháp luật mới, trong đó nòng cốt là Luật Đường bộ năm 2024 ban hành ngày 27/6/2024 [1], Nghị định số 165/2024/NĐ-CP [4], Nghị định số 144/2025/NĐ-CP [5] và Thông tư số 41/2024/TT-BGTVT [7]. Sự phân cấp, phân quyền này thể hiện trước hết trong mô hình quản lý với sự chuyển đổi từ quản lý tập trung sang quản trị đa cấp, gắn trách nhiệm với quyền hạn của từng cấp.

2. NỘI DUNG

2.1. Khái niệm, nội dung, đặc điểm công quản lý bảo trì hệ thống quốc lộ

2.1.1. Khái niệm bảo trì, quản lý bảo trì

Theo Thông tư số 41/2021/TT-BGTVT, "Bảo trì công trình đường bộ là tập hợp các công việc nhằm bảo đảm và duy trì sự làm việc bình thường, an toàn của công trình đường bộ theo quy định của thiết kế trong quá trình khai thác sử dụng. Nội dung bảo trì công trình đường bộ có thể bao gồm một, một số hoặc toàn bộ các công việc sau: Kiểm tra, quan trắc, kiểm định chất lượng, bảo dưỡng và sửa chữa công trình đường bộ; bổ sung, thay thế hạng mục, thiết bị để việc khai thác sử dụng công trình đường bộ đảm bảo an toàn nhưng không bao gồm các hoạt động làm thay đổi công năng, quy mô công trình".

2.1.2. Nội dung công tác quản lý bảo trì

Theo quy định tại Nghị định số 06/2021/NĐ-CP của Chính phủ [3], hoạt động quản lý bảo trì công trình giao thông bao gồm 3 nội dung chủ yếu:

- Kiểm tra, đánh giá hiện trạng và lập kế hoạch bảo trì;
- Tổ chức thực hiện, giám sát và nghiệm thu công việc bảo trì;
- Quản lý hồ sơ, cơ sở dữ liệu, nguồn lực và đánh giá hiệu quả công tác bảo trì.

2.1.3. Đặc điểm của công tác quản lý bảo trì hệ thống quốc lộ

Công tác quản lý bảo trì hệ thống quốc lộ có các đặc điểm như sau:

- Tính quy mô và phân tán: Hệ thống quốc lộ trải dài khắp cả nước, đi qua nhiều vùng địa hình phức tạp (đồng bằng, miền núi, ven biển), đòi hỏi quản lý bảo trì vừa có tính tập trung về tiêu chuẩn, vừa có tính phân tán trong tổ chức thực hiện.
- Tính liên tục: Không giống như xây dựng mới (một lần), bảo trì là quá trình lặp lại định kỳ và liên tục, từ kiểm tra hàng ngày, bảo dưỡng thường xuyên, đến sửa chữa định kỳ, đại tu.
- Tính phụ thuộc vào nguồn lực: Công tác bảo trì cần ngân sách

lớn, nhân lực kỹ thuật và thiết bị hiện đại.

- Tính pháp lý: Mọi hoạt động bảo trì quốc lộ đều tuân thủ Luật Đường bộ, các Nghị định, Thông tư hướng dẫn dưới Luật của các bộ, ban, ngành có liên quan.

2.2. Cơ sở pháp lý hình thành mô hình quản lý bảo trì hệ thống quốc lộ Việt Nam

Về phương diện pháp lý, mô hình quản lý bảo trì hệ thống quốc lộ của Việt Nam được xây dựng dựa trên các nguyên tắc của Luật Xây dựng 2014 (sửa đổi 2020), Luật Quản lý tài sản công 2017, Luật Ngân sách Nhà nước 2015 [2] và được cụ thể hóa qua các nghị định, thông tư chuyên ngành như Nghị định 06/2021/NĐ-CP về quản lý chất lượng và bảo trì công trình xây dựng; cùng các Thông tư 37/2018/TT-BGTVT [9] và 41/2021/TT-BGTVT quy định chi tiết về hoạt động bảo trì, vận hành khai thác công trình đường bộ.

2.3. Mô hình quản lý hệ thống quốc lộ ở Việt Nam trước phân cấp, phân quyền

Trước khi thực hiện phân cấp, phân quyền, công tác quản lý, bảo trì hệ thống quốc lộ ở Việt Nam được vận hành theo mô hình quản lý tập trung, thống nhất từ Trung ương xuống địa phương, trong đó Bộ GTVT (nay là Bộ Xây dựng) đóng vai trò là cơ quan chủ quản, Cục Đường bộ Việt Nam (ĐBVN) là cơ quan chuyên môn giúp Bộ thực hiện chức năng quản lý nhà nước (QLNN) trong lĩnh vực đường bộ, còn các khu quản lý đường bộ là đơn vị trực thuộc, chịu trách nhiệm trực tiếp điều hành và giám sát công tác quản lý, bảo trì trên thực địa.

Cụ thể, Bộ GTVT (nay là Bộ Xây dựng) là cơ quan trực thuộc Chính phủ thực hiện QLNN thống nhất về kết cấu hạ tầng giao thông đường bộ trên phạm vi toàn quốc. Bộ chịu trách nhiệm ban hành chiến lược, quy hoạch, kế hoạch trung hạn và dài hạn, đồng thời trực tiếp phê duyệt kế hoạch bảo trì hàng năm của hệ thống quốc lộ. Bộ cũng là cơ quan ban hành các văn bản quy phạm pháp luật, tiêu chuẩn, quy chuẩn kỹ thuật quốc gia và định mức kinh tế kỹ thuật cho công tác bảo trì, bảo dưỡng. Ngoài ra, Bộ GTVT (nay là Bộ Xây dựng) là cơ quan giao dự toán chi ngân sách nhà nước cho công tác bảo trì quốc lộ, phê duyệt danh mục, quy mô, khối lượng công việc và các hạng mục ưu tiên đầu tư, sửa chữa. Trong mô hình tập trung này, mọi kế hoạch bảo trì đều được khởi nguồn từ Bộ GTVT (nay là Bộ Xây dựng), thông qua hệ thống chỉ tiêu, hướng dẫn và kế hoạch hàng năm. Điều này đảm bảo tính thống nhất về quản lý, nhưng cũng khiến quá trình điều hành kéo dài do phải qua nhiều cấp xét duyệt.

Cục ĐBVN (trước năm 2022 là Tổng cục ĐBVN) chịu trách nhiệm trực tiếp về tổ chức, quản lý, khai thác, bảo trì, kiểm định và giám sát toàn bộ hệ thống quốc lộ trên cả nước. Cục đóng vai trò là cầu nối giữa Bộ GTVT (nay là Bộ Xây dựng) và các đơn vị quản lý trực tiếp, đồng thời là đầu mối triển khai các chủ trương, kế hoạch của Bộ tới các khu quản lý đường bộ.

Dưới Cục ĐBVN, hệ thống khu quản lý đường bộ là các đơn vị chuyên môn thực hiện nhiệm vụ quản lý, kiểm tra hiện trạng, giám sát bảo trì, tổ chức khắc phục hư hỏng và đề xuất phương án sửa chữa.

Chính quyền địa phương (UBND tỉnh, Sở GTVT - nay là Sở Xây dựng) tham gia với vai trò phối hợp quản lý, đặc biệt ở các tuyến quốc lộ đi qua khu dân cư hoặc khu đô thị.

Mô hình quản lý bảo trì hệ thống quốc lộ trước khi phân cấp có nhiều ưu điểm nổi bật: Bảo đảm tính thống nhất, đồng bộ về tiêu chuẩn kỹ thuật, dễ kiểm soát chất lượng, hạn chế sai sót trong sử dụng vốn. Đây là cơ sở giúp hệ thống quốc lộ Việt Nam phát triển tương đối ổn định trong giai đoạn 2010 - 2020, góp phần duy trì năng lực khai thác, an toàn giao thông và kết nối vùng miền.

Tuy nhiên, mô hình này cũng bộc lộ nhiều hạn chế về tính linh hoạt, hiệu quả quản lý và khả năng huy động nguồn lực xã hội. Quy trình ra quyết định nhiều tầng nấc, phụ thuộc vào Trung ương khiến việc triển khai chậm trễ, trong khi nhu cầu duy tu, sửa chữa phát sinh liên tục ở cấp địa phương. Cơ cấu tổ chức khép kín của Bộ GTVT - Cục ĐBVN - Khu QLĐB giúp quản lý chặt chẽ về mặt kỹ thuật, nhưng lại làm giảm vai trò và trách nhiệm của địa phương, dẫn tới tình trạng "người biết không được quyết, người quyết không trực tiếp giám sát". Tổng thể, đây là mô hình phù hợp với giai đoạn đầu của quá trình phát triển hạ tầng quốc gia, khi yêu cầu cao nhất là đảm bảo tính thống nhất, an toàn và kiểm soát chất lượng. Khi mạng lưới quốc lộ mở rộng, khối lượng bảo trì tăng mạnh, nhu cầu phát huy tính chủ động của địa phương ngày càng lớn, mô hình quản lý tập trung này trở nên cồng kềnh và kém hiệu quả, đòi hỏi phải được điều chỉnh sang hướng phân cấp, phân quyền hợp lý hơn - tiền đề cho những thay đổi quan trọng ở giai đoạn sau.

2.4. Mô hình quản lý bảo trì hệ thống quốc lộ sau phân cấp, phân quyền

Sau khi thực hiện phân cấp, phân quyền, công tác quản lý và bảo trì hệ thống quốc lộ ở Việt Nam bước sang một giai đoạn phát triển mới - giai đoạn chuyển đổi từ mô hình quản lý tập trung sang mô hình quản trị đa cấp, gắn trách nhiệm với quyền hạn của từng cấp quản lý. Cơ sở pháp lý của quá trình chuyển đổi này được hình thành bởi một loạt văn bản quy phạm pháp luật mới, trong đó nòng cốt là Luật Đường bộ ban hành ngày 27/6/2024, Nghị định số 165/2024/NĐ-CP, Nghị định số 144/2025/NĐ-CP và Thông tư số 41/2024/TT-BGTVT.

Mô hình tổ chức quản lý công tác bảo trì hệ thống quốc lộ ở Việt Nam đã có bước chuyển đổi căn bản, phản ánh tư duy "trao quyền gắn với trách nhiệm". Nếu như trước đây, công tác quản lý bảo trì được điều hành theo mô hình dọc tập trung thì nay cơ cấu này được tái cấu trúc theo hướng phân tán hợp lý, gắn với năng lực quản lý của từng địa phương nhưng vẫn duy trì sự thống nhất về quy chuẩn kỹ thuật và quản lý chất lượng trên phạm vi toàn quốc.

2.4.1. Trách nhiệm của Bộ GTVT (nay là Bộ Xây dựng)

Bộ GTVT (nay là Bộ Xây dựng) tiếp tục giữ vai trò đầu mối thống nhất QLNN về kết cấu hạ tầng giao thông đường bộ, song chức năng của Bộ được chuyển dần từ "trực tiếp điều hành" sang "định hướng - kiểm tra - giám sát".

Theo quy định mới, Bộ GTVT (nay là Bộ Xây dựng) chịu trách nhiệm thanh tra, kiểm tra quốc lộ phân cấp bảo đảm quy mô, chất lượng; bảo đảm kết nối giao thông; chấp hành quy chuẩn, tiêu chuẩn kỹ thuật trong lĩnh vực đường bộ, bàn giao tuyến, đoạn tuyến quốc lộ cho UBND cấp tỉnh.

2.4.2. Trách nhiệm của Cục ĐBVN

Cục ĐBVN được định vị là cơ quan chuyên môn trực thuộc Bộ GTVT (nay là Bộ Xây dựng), có nhiệm vụ thực hiện QLNN, hướng dẫn nghiệp vụ, giám sát và hỗ trợ kỹ thuật cho các địa phương.

Trong mô hình phân cấp mới, Cục ĐBVN không trực tiếp quản lý từng tuyến đường như trước, mà tập trung vào các chức năng quản lý thống nhất cơ sở dữ liệu hạ tầng đường bộ quốc gia; đánh giá năng lực các địa phương để trình Bộ quyết định giao quyền quản lý quốc lộ và hướng dẫn, giám sát kỹ thuật, kiểm tra hiện trường và đánh giá kết quả thực hiện công tác bảo trì của các địa phương.

2.4.3. Trách nhiệm của UBND cấp tỉnh

Trách nhiệm của UBND cấp tỉnh tập trung vào đầu tư, xây dựng quốc lộ được phân cấp, quản lý, vận hành, khai thác, bảo trì, bảo vệ kết cấu và tài sản kết cấu hạ tầng đường bộ là quốc lộ được phân cấp, bảo đảm kết nối giao thông đồng bộ với các tuyến đường khác trong khu vực…

Sự khác biệt rõ rệt nhất của mô hình mới là việc UBND các tỉnh,

thành phố trực thuộc Trung ương được giao trách nhiệm trực tiếp tổ chức quản lý, bảo trì quốc lộ hoặc đoạn tuyến quốc lộ đi qua địa bàn. Các sở GTVT là cơ quan chuyên môn giúp UBND tỉnh thực hiện nhiệm vụ này, mà trước kia, nhiệm vụ đó thuộc về Cục ĐBVN.

2.5. Đánh giá mô hình quản lý bảo trì sau phân cấp, phân quyền

2.5.1. So sánh mô hình quản lý bảo trì trước và sau phân cấp, phân quyền về cấp quản lý và hình thức quản lý

Sau khi thực hiện phân cấp, phân quyền, mô hình quản lý bảo trì hệ thống quốc lộ đã có bước chuyển căn bản từ khung quản lý tập trung sang mô hình quản trị đa cấp, có giám sát. Các quy định pháp lý mới đã xác định rõ quyền hạn, trách nhiệm, cũng như cơ chế hậu kiểm của từng cấp. Nếu trước đây, mọi hoạt động điều hành được chỉ đạo trực tiếp từ Bộ GTVT (nay là Bộ Xây dựng) và Cục ĐBVN thì nay UBND cấp tỉnh được trao quyền chủ động, còn Trung ương chuyển sang vai trò hướng dẫn, giám sát và đánh giá kết quả.

Mô hình mới này giúp tăng tính linh hoạt, rút ngắn chu trình ra quyết định, đồng thời vẫn duy trì sự thống nhất, kiểm soát chặt chẽ về chất lượng và hiệu quả vốn đầu tư công trong toàn hệ thống quốc lộ.

Bảng 1. So sánh mô hình quản lý bảo trì hệ thống quốc lộ Việt Nam trước và sau phân cấp, phân quyền về phân cấp quản lý và hình thức quản lý

Tiêu chí	**Trước phân cấp, phân quyền**	**Sau phân cấp, phân quyền**	**Đánh giá xu hướng chuyển đổi về QLNN**
Cơ quan chủ trì	Bộ GTVT (nay là Bộ Xây dựng), Tổng cục ĐBVN	Bộ GTVT (nay là Bộ Xây dựng), Cục ĐBVN, UBND tỉnh, Sở Xây dựng	Từ quản lý tập trung sang phân cấp đa tầng
Phạm vi trách nhiệm	Trung ương quản lý toàn bộ quốc lộ, địa phương quản lý đường tỉnh, huyện	Trung ương quản lý quốc lộ chiến lược, địa phương quản lý quốc lộ đi qua địa bàn, trừ quốc lộ Trung ương quản lý	Phân cấp quản lý, rõ trách nhiệm, chức năng
Cơ chế pháp lý	Hành chính, giấy tờ, xin - cấp	Pháp lý số hóa, báo cáo điện tử, xây dựng cơ sở dữ liệu chung là xu hướng tất yếu	Minh bạch
Hình thức giám sát	Thanh tra nội bộ, báo cáo định kỳ	Giám sát số hóa, kiểm toán độc lập, công khai dữ liệu	Giám sát theo kết quả và trách nhiệm
Bản chất quản lý	Hành chính - kỹ thuật, tập trung dọc	Hành chính, phân cấp phân quyền đi đôi với phân bổ nguồn lực	Quản lý theo nguyên tắc Nhà nước kiến tạo, bền vững

2.5.2. Về cấu trúc quản lý và thẩm quyền quản lý

Bên cạnh sự thay đổi về phân cấp quản lý, phân cấp thẩm quyền trong công tác bảo trì hệ thống quốc lộ là yếu tố phản ánh rõ quá trình chuyển đổi tư duy QLNN trong lĩnh vực hạ tầng giao thông từ mô hình quản lý hành chính - mệnh lệnh sang mô hình quản trị đa cấp - điều tiết và giám sát, trong đó quyền hạn được phân bổ hợp lý giữa trung ương và địa phương, gắn với trách nhiệm và năng lực thực thi.

Bảng 2. So sánh mô hình quản lý bảo trì hệ thống quốc lộ Việt Nam trước và sau phân cấp, phân quyền về cấu trúc quản lý và thẩm quyền quản lý

Tiêu chí	**Trước phân cấp, phân quyền**	**Sau phân cấp, phân quyền**	**Đánh giá xu hướng chuyển đổi**
Cấu trúc tổ chức	Quản lý theo ngành dọc: Bộ → Tổng cục → Cục → Sở GTVT	Quản lý đa tầng: Bộ/UBND tỉnh → Cục ĐBVN/Sở Xây dựng	Phân cấp thực chất, liên thông
Vai trò Bộ GTVT (nay là Bộ Xây dựng)	Quyết định toàn bộ kế hoạch, vốn, kỹ thuật	Hoạch định chính sách, kiểm tra, giám sát	Tập trung vai trò điều tiết
Cơ quan điều hành kỹ thuật	Tổng cục/Cục QLĐB khu vực trực tiếp làm	Cục ĐBVN/Sở Xây dựng địa phương	Giảm hành chính, tăng chuyên môn
Địa phương (UBND, Sở GTVT - nay là Sở Xây dựng)	Phối hợp, chịu giám sát, kiểm tra của Tổng cục ĐBVN và Bộ GTVT (nay là Bộ Xây dựng)	Được giao quản lý, chịu trách nhiệm, báo cáo kết quả	Tăng quyền, gắn trách nhiệm
Quan hệ giữa các cấp	Mệnh lệnh - hành chính, một chiều	Hợp tác - giám sát, hai chiều	Liên kết, tương tác liên tục
Phản ứng thực tế	Chậm, phụ thuộc cấp trên	Nhanh, sát thực tế địa phương	Tăng tính linh hoạt

Theo quy định mới, Bộ GTVT (nay là Bộ Xây dựng) không trực tiếp điều hành từng tuyến quốc lộ như trước, mà đóng vai trò hoạch định chiến lược, ban hành tiêu chuẩn, hướng dẫn chuyên môn, đồng thời kiểm tra và giám sát chung trên phạm vi cả nước. Cục ĐBVN trở thành cơ quan đầu mối kỹ thuật và điều phối, có nhiệm vụ kiểm tra, tổng hợp dữ liệu, đánh giá và hỗ trợ địa phương trong công tác bảo trì.

UBND cấp tỉnh được giao quản lý, tổ chức bảo trì và bố trí nguồn vốn cho các tuyến quốc lộ được ủy thác hoặc giao quyền quản lý trực tiếp. Sở Xây dựng là cơ quan chuyên môn của tỉnh, chịu trách nhiệm thực thi, lựa chọn nhà thầu, nghiệm thu, lập hồ sơ và báo cáo định kỳ về Bộ GTVT (nay là Bộ Xây dựng) qua hệ thống điện tử.

2.5.3. So sánh về cơ chế tài chính và quản lý nguồn lực bảo trì

Trước khi phân cấp, kinh phí bảo trì quốc lộ được điều tiết tập trung thông qua Quỹ Bảo trì đường bộ Trung ương thành lập theo Nghị định số 18/2012/NĐ-CP và vận hành theo hướng "Bộ GTVT lập kế hoạch - Tổng cục ĐBVN phân bổ - Cục/Sở GTVT thực hiện". Nguồn thu của quỹ chủ yếu đến từ phí sử dụng đường bộ thu theo đầu phương tiện và ngân sách trung ương hỗ trợ. Tất cả các tuyến quốc lộ, dù nằm hoàn toàn trong phạm vi một tỉnh đều do Trung ương cấp kinh phí hàng năm. Quy trình quản lý mang tính "xin - cấp": Địa phương hoặc Cục khu vực đề xuất kế hoạch, Tổng cục tổng hợp, Bộ GTVT (nay là Bộ Xây dựng) thẩm định và Bộ Tài chính phê duyệt. Cơ chế này giúp Nhà nước kiểm soát chặt chẽ chi tiêu, nhưng cũng làm giảm tính linh hoạt, đặc biệt trong trường hợp thiên tai, lũ lụt hoặc hư hỏng bất thường.

Sau phân cấp, cơ chế tài chính mới cho công tác bảo trì hệ thống quốc lộ theo hướng đa dạng hóa nguồn lực, phân quyền sử dụng vốn và minh bạch hóa quy trình chi tiêu công.

Nguồn kinh phí bảo trì đường bộ được quy định gồm:

- Ngân sách Trung ương: Chi cho các tuyến quốc lộ chiến lược, cao tốc, các dự án đặc thù hoặc liên vùng;
- Ngân sách địa phương: Chi cho các tuyến quốc lộ được ủy thác hoặc giao cho địa phương quản lý;
- Các nguồn hợp pháp khác: Xã hội hóa, hợp tác công tư (PPP).

Cơ chế mới cho phép địa phương chủ động bố trí, điều tiết nguồn vốn bảo trì, đồng thời lập kế hoạch trung hạn 5 năm, thay vì kế hoạch năm như trước. Bộ GTVT và Bộ Tài chính chỉ còn vai trò thẩm định, tổng hợp và giám sát việc thực hiện kế hoạch.

Nhờ đó, ngân sách bảo trì không còn mang tính "xin - cấp" mà trở thành "phân bổ theo kết quả và năng lực quản lý." Các địa phương được phép linh hoạt điều chỉnh chi phí bảo trì thường xuyên, xử lý sự cố khẩn cấp mà không cần chờ phê duyệt từ Trung ương.

Bảng 3. So sánh mô hình quản lý bảo trì hệ thống quốc lộ Việt Nam trước và sau phân cấp, phân quyền về cơ chế tài chính và quản lý nguồn lực bảo trì

Tiêu chí	Trước phân cấp, phân quyền	Sau phân cấp, phân quyền	Đánh giá xu hướng chuyển đổi
Nguồn vốn	Trung ương cấp phát qua Quỹ bảo trì Trung ương (trước 2020), vốn sự nghiệp chi hoạt động kinh tế đường bộ thuộc vốn ngân sách nhà nước	Vốn sự nghiệp chi hoạt động kinh tế đường bộ thuộc vốn ngân sách nhà nước, vốn Trung ương, địa phương, xã hội hóa	Đa nguồn, linh hoạt
Lập kế hoạch	Hằng năm, theo đề xuất của Tổng cục	Bộ Xây dựng/Cục ĐBVN - UBND cấp tỉnh	Ổn định, dài hạn
Quy trình cấp phát	Bộ Tài chính phân bổ vốn cho Bộ GTVT	Bộ Tài chính phân bổ vốn trực tiếp xuống Bộ Xây dựng/ UBND tỉnh	Giảm thủ tục hành chính

Sự thay đổi cơ chế tài chính không chỉ dừng ở việc "giao quyền chi", mà quan trọng hơn là thay đổi cách Nhà nước giám sát đồng tiền công. Trước đây, quản lý tài chính tập trung theo "đầu vào" quan tâm đến đúng quy trình, đúng định mức, mà chưa chú trọng hiệu quả đầu ra. Nay, cơ chế mới hướng đến quản lý theo kết quả: Cơ quan Trung ương kiểm soát bằng dữ liệu kỹ thuật, khối lượng hoàn thành và chất lượng mặt đường, thay vì bằng hồ sơ giấy tờ.

2.5.4. Đánh giá mô hình quản lý bảo trì hệ thống quốc lộ sau phân cấp, phân quyền

Sự chuyển đổi mô hình quản lý không chỉ là thay đổi "ai làm", mà còn là thay đổi cách thức Nhà nước điều hành. Trước đây, Bộ GTVT (nay là Bộ Xây dựng) đóng vai trò "người thực hiện", còn nay trở thành "người điều tiết và giám sát", nâng cao vai trò địa phương quyết, địa phương làm, địa phương chịu trách nhiệm.

Điểm khác biệt then chốt của mô hình mới là phân quyền đi đôi với kiểm soát. Địa phương được trao quyền, nhưng vẫn chịu sự giám sát kỹ thuật và kiểm toán từ Cục ĐBVN. Việc phân cấp không "buông lỏng" mà hướng đến cộng quản lý, vừa tạo quyền chủ động cho địa phương, vừa duy trì tiêu chuẩn kỹ thuật thống nhất toàn quốc.

3. KẾT LUẬN

Nhìn tổng thể, sự thay đổi mô hình quản lý bảo trì hệ thống quốc lộ thể hiện quá trình chuyển từ mô hình hành chính tập trung sang mô hình quản trị đa cấp, trong đó Trung ương định hướng chính sách, địa phương thực thi và chịu trách nhiệm, còn Nhà nước đóng vai trò kiến tạo, giám sát và bảo đảm công bằng phát triển vùng.

Từ góc nhìn QLNN, đây là bước tiến phù hợp với xu thế "chính phủ kiến tạo và điều hành theo kết quả". Nhà nước không còn trực tiếp làm thay mà định hình hệ thống, đặt ra chuẩn mực, giám sát tuân thủ và khuyến khích sáng kiến của địa phương. Qua đó, mô hình mới không chỉ giúp nâng cao hiệu quả bảo trì quốc lộ, mà còn thúc đẩy tính tự chủ, sáng tạo và trách nhiệm công vụ trong hệ thống hành chính Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Luật Giao thông đường bộ số 23/2008/QH12 ngày 13 tháng 11 năm 2008.

[2] Luật Ngân sách Nhà nước số 83/2015/QH13 ngày 25 tháng 6 năm 2015 của Quốc hội.

[3] Nghị định số 06/2021/NĐ-CP ngày 26 tháng 01 năm 2021 của Chính phủ, quy định chi tiết về quản lý chất lượng, thi công xây dựng và bảo trì công trình xây dựng.

[4] Nghị định số 165/2024/NĐ-CP ngày 15 tháng 4 năm 2024 của Chính phủ, quy định chi tiết và hướng dẫn thi hành một số điều của Luật Đường bộ năm 2024 và Điều 77 của Luật Trật tự, an toàn giao thông đường bộ.

[5] Nghị định số 144/2025/NĐ-CP ngày 10 tháng 01 năm 2025 của Chính phủ, quy định về phân cấp, phân quyền trong lĩnh vực QLNN của Bộ Xây dựng.

[6] Thông tư số 37/2018/TT-BGTVT ngày 07 tháng 6 năm 2018 của Bộ Giao thông vận tải, quy định về quản lý, bảo dưỡng thường xuyên đường bộ, hướng dẫn quy trình lập kế hoạch, giám sát và nghiệm thu công tác bảo trì.

[7] Thông tư số 41/2021/TT-BGTVT ngày 31 tháng 12 năm 2021 của Bộ Giao thông vận tải, sửa đổi, bổ sung một số điều của Thông tư 37/2018/TT-BGTVT, quy định về quản lý, bảo trì và kiểm tra hiện trạng công trình đường bộ.

■Ngày nhận bài: 06/3/2026 ■Ngày sửa bài: 10/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 28/3/2026

Nghiên cứu hiện trạng chất lượng nước và đánh giá khả năng tiếp nhận nước thải của lưu vực sông Vu Gia - Thu Bồn đoạn chảy qua trung tâm TP Đà Nẵng đến năm 2030

Study on the current status of water quality and assessment of the wastewater reception capacity of the Vu Gia - Thu Bon river basin section flowing through the central area of Da Nang City, toward 2030

> TS ĐỖ HỒNG ANH*, TS NGUYỄN LAN HƯƠNG, GS.TS TRẦN THỊ VIỆT NGA
Khoa Kỹ thuật Môi trường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
*Email: anhdh@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Kết quả nghiên cứu đánh giá khả năng tiếp nhận nước thải của nguồn nước theo phương pháp bảo toàn khối lượng (gián tiếp) với 5 đoạn sông chính của lưu vực sông Vu Gia - Thu Bồn đoạn chảy qua trung tâm TP Đà Nẵng cho thấy, 03 đoạn sông phía thượng nguồn gồm Tuý Loan, Yên, Cẩm Lệ, hàm lượng các chất ô nhiễm BOD_5, COD và Coliform đã vượt qúa khả năng tiếp nhận của dòng sông, đối với chất dinh dưỡng N-NH_4^+, sông Yên và sông Cẩm Lệ khả năng tiếp nhận hạn chế lần lượt là 30 kg/ngày và 711 kg/ngày. Đối với sông Vĩnh Điện và sông Hàn (hạ lưu sông Vu Gia) có 01 thông số ô nhiễm vượt quá khả năng chịu tải là BOD_5 với giá trị lần lượt là -5.081 kg/ngày và -20.803 kg/ngày, đối với thông số COD và N-NH_4^+ các sông này vẫn còn khả năng chịu tải nhất định với giá trị lần lượt là 38.946 kg/ngày và 107.172 kg/ngày; 182 kg/ngày và 1.605 kg/ngày. Đối với thông số về vi sinh vật gây bệnh sông Hàn không còn khả năng tiếp nhận nước thải trong khi đó sông Vĩnh Điện vẫn còn khả năng tiếp nhận tải lượng ô nhiễm theo Coliform với giá trị lần lượt là $-4*10^8$kg/ngày và $9*10^6$kg/ngày. Do đó cần có những biện pháp kịp thời như kiểm soát tối đa các nguồn thải để cải thiện chất lượng nước sông đầu nguồn duy trì an ninh nguồn nước cho thành phố.

Từ khóa: Sông Vu Gia - Thu Bồn; khả năng tiếp nhận; khả năng chịu tải; chất lượng nước; phương pháp gián tiếp.

ABSTRACT

The study assessed the wastewater receiving capacity of water sources using the indirect mass conservation method for five main river sections of the Vu Gia – Thu Bon River basin flowing through the center of Da Nang city. The results showed that in the three upstream sections where the river begins flowing into Da Nang city (Tuy Loan, Yen, and Cam Le), the concentrations of pollutants such as BOD_5, COD, and Coliform exceeded the river's receiving capacity. Regarding the nutrient N-NH_4^+, the Yen and Cam Le rivers still have limited receiving capacity, at 30 kg/day and 711 kg/day respectively. For the Vinh Dien and Han rivers (downstream of the Vu Gia Han river), one pollution parameter exceeds the river's carrying capacity: BOD_5, with values of -5,081 kg/day and -20,803 kg/day respectively. For COD and N-NH_4^+, these rivers still have a certain carrying capacity with values of 38,946 kg/day and 107,172 kg/day; 182 kg/day and 1,065 kg/day respectively. Regarding the parameters of pathogenic microorganisms, the Han River is no longer capable of receiving wastewater, while the Vinh Dien River still has the capacity to receive wastewater, with values of $-4*10^8$ and $9*10^6$ respectively. Therefore, timely measures are needed, such as maximizing control of wastewater sources to improve the water quality of the upstream river and maintain water security for the city.

Keywords: Vu Gia - Thu Bon river; receiving capacity; carrying capacity; water quality; indirect methods.

1. MỞ ĐẦU

Hệ thống sông Vu Gia - Thu Bồn được bắt nguồn từ vùng núi Ngọc Lĩnh sườn phía Đông của dãy Trường Sơn, có độ dài của sông ngắn và độ dốc lòng sông lớn, hướng dốc chủ yếu là Tây Nam - Đông Bắc. Sông Vu Gia - Thu Bồn gồm 2 nhánh chính là Vu Gia và Thu Bồn [1]. Theo báo cáo tổng hợp Đồ án điều chỉnh quy hoạch xử lý chất thải rắn TP Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045, giai đoạn từ 2010 - 2023, chất lượng nước trên hệ thống sông Vu Gia có thay đổi với xu hướng cải thiện dần kể từ năm 2014. Từ năm 2010 đến 2013, tại một số điểm quan trắc trên sông Vu Gia, chân cầu Tuyên Sơn (sông Hàn) hàm lượng chất rắn lơ lửng vượt quá tiêu chuẩn cho phép đối với nguồn B1 từ 1,1 đến 2,62 lần, tuy nhiên từ năm 2014 đến 2019 thông số này đã giảm, trong giới hạn quy chuẩn cho phép. Giai đoạn từ 2010 đến 2015, giá trị Coliform vượt quy chuẩn cho phép từ 1,7 đến 4,25 lần tại một số vị trí quan trắc ở một vài thời điểm trong năm 2010, 2011, 2014 và 2015. Chất lượng nước sông theo một số chỉ tiêu đặc trưng khác như COD, NH_4-N, PO_4-P đều nằm trong mức cho phép của QCVN 08:2023/BTNMT, ngoại trừ một số vị trí quan trắc tại chân cầu Tứ Câu và cầu sông Hàn vào một số thời điểm đo vượt quy chuẩn cho phép đối với chỉ tiêu N-NH_4^+ từ 1,02 - 1,04 lần. Tại vị trí quan trắc tại cầu Tứ Câu (S9) và cầu sông Hàn (S8) tại một vài thời điểm quan trắc có chỉ số hữu cơ theo COD và N-NH_4^+ vượt quy chuẩn, tuy nhiên tình hình này đã được cải thiện trong 5 năm gần đây [2]. Trong tương lai, quá trình phát triển của đô thị theo quy hoạch được phê duyệt tại quyết định số 1287/QĐ-TTg ngày 2/11/2023 kèm theo những thay đổi về quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng môi trường xung quanh được ban hành theo thông tư số 01:2023/BTNTM ngày 13/3/2023 đối với chất lượng môi trường nước mặt cần thiết phải có những đánh giá lại về khả năng chịu tải của môi trường nước khu vực TP Đà Nẵng và bài báo này hướng tới mục tiêu tính toán sức chịu tải của một số con sông thuộc hệ thống sông Vu Gia chảy qua trung tâm TP Đà Nẵng và đưa ra các khuyến nghị về các giải pháp công trình và phi công trình nhằm duy trì và cải thiện chất lượng nguồn nước đảm bảo cấp nước bền vững cho thành phố.

Khả năng chịu tải của môi trường là giới hạn chịu đựng của môi trường đối với các nhân tố tác động để môi trường có thể tự phục hồi. Khả năng tiếp nhận nước thải (KNTNNT) của nguồn nước là khả năng nguồn nước có thể tiếp nhận thêm một tải lượng ô nhiễm nhất định nhưng vẫn bảo đảm mục đích sử dụng của nguồn nước, đáp ứng các quy chuẩn chất lượng liên quan. Đã có nhiều quốc gia trên thế giới áp dụng phương pháp đánh giá khả năng chịu tải của nguồn nước để đưa ra các bảo vệ sự cân bằng cho hệ sinh thái dưới nước như Trung Quốc, Ấn Độ, Iran [3], [4], [5]. Tại Việt Nam khả năng tiếp nhận nước thải của sông hồ đã được nghiên cứu phổ biến cho nhiều lưu vực sông như sông Vàm Cỏ [6], sông Cầu hay nghiên cứu giới hạn các thông số xả nước thải vào vùng nước ven biển, đầm, vịnh, như đầm Thị Nại, [7] khu vực ven đảo Cát Bà và sông Bạch Đằng (hữu cơ, dinh dưỡng, kim loại nặng) [8] v.v. Tuy nhiên, đối với hệ thống sông Vu Gia trên địa bàn TP Đà Nẵng, các nghiên cứu về khả năng chịu tải nguồn nước còn hạn chế và chưa được công bố một cách hệ thống, đầy đủ.

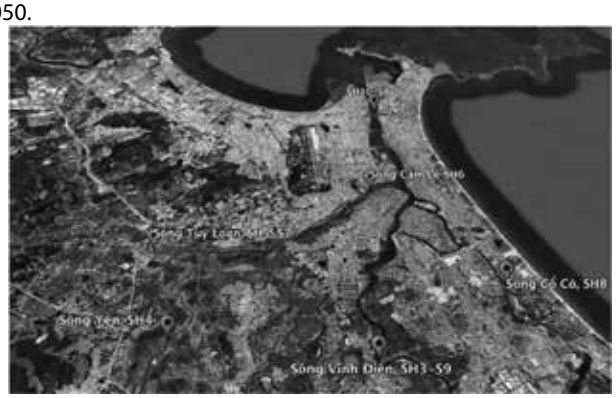
2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Số liệu quan trắc chất lượng môi trường nước mặt, bao gồm COD, BOD_5, N-NH_4^+ và Coliform.

2.2. Phạm vi nghiên cứu

Hệ thống sông Vu Gia - Thu Bồn đoạn chảy qua trung tâm TP Đà Nẵng bao gồm các nhánh sông chính: (1) sông Túy Loan có chiều dài 10,2 km, bắt nguồn từ tại ngã ba sông Yên và sông Cẩm Lệ; (2) sông Yên đoạn đi qua Đà Nẵng có chiều dài 5,5 km; (3) sông Vĩnh Điện có chiều dài 11,1 km, tuyến sông này được tính từ cầu Tứ Câu và kéo dài đến ngã ba sông Cái; (4) sông Cẩm Lệ có chiều dài 9,3 km, bắt nguồn từ hợp lưu của hai con sông là sông Yên và sông Túy Loan đổ ra ngã ba sông Cái; (5) sông Hàn nằm trong nội thành TP Đà Nẵng với chiều dài 8,8 km. Sông Túy Loan mặc dù là sông nội tỉnh nhưng chế độ thuỷ văn của nó chịu ảnh hưởng của hệ thống sông Vu Gia do đó vẫn được chọn là đối tượng của nghiên cứu. Trong giai đoạn 2015 - 2023, nhóm nghiên cứu lựa chọn 05 điểm quan trắc trong hệ thống quan trắc trên lưu vực sông Vu Gia (Hình 1) để tiến hành đánh giá khả năng chịu tải của 05 đoạn sông chính gồm sông Túy Loan (S7), sông Yên (SH4), sông Vĩnh Điện (SH3-S9), sông Cẩm Lệ (SH6) và sông Hàn (SH10-S8) tới năm 2030 bởi các hoạt động phát triển của thành phố theo đồ án quy hoạch đã được phê duyệt tại quyết định số 1287/QĐ-TTg ngày 02/11/2023 về việc Phê duyệt Quy hoạch TP Đà Nẵng thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050.



Hình 1. Sơ đồ các mặt cắt tính toán đánh giá khả năng chịu tải

2.3. Đánh giá khả năng tiếp nhận nước thải của nguồn tiếp nhận

Đánh giá được tác động của việc xả nước thải vào nguồn nước được nhóm nghiên cứu thực hiện theo các bước như Hình 2

Hình 2. Sơ đồ các bước tính toán khả năng chịu tải của nguồn tiếp nhận

Nhóm nghiên cứu đã thu thập số liệu quan trắc hiện trạng môi trường nước giai đoạn từ 2015 - 2019 và 2020 - 2023 từ các báo cáo hiện trạng môi trường hằng năm được Chi cục Bảo vệ Môi trường, Sở Nông nghiệp Môi trường TP Đà Nẵng ban hành. Các chỉ tiêu quan trắc gồm: BOD_5, COD, N-NH_4, và Coliform. Theo Dự thảo báo cáo tổng hợp quy hoạch tổng hợp lưu vực sông Vu Gia - Thu Bồn và vùng phụ cận thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050, sông Vu Gia được chia thành 03 đoạn, và có 02 đoạn chảy qua trung tâm TP Đà Nẵng và 02 đoạn này đều được quy hoạch đến năm 2030 là

nguồn cung cấp nước cho sinh hoạt, nông nghiệp, công nghiệp, thuỷ điện, bảo tồn hệ sinh thái thuỷ sinh, tương đương với nguồn loại A theo QCVN 08:2023/BTNMT, ngoại trừ đoạn sông Hàn chảy qua trung tâm thành phố là nguồn loại B theo QCVN 08:2023/BTNMT [9]. Theo quy hoạch nguồn cấp nước của thành phố tại Quyết định số 1287/QĐ-TTg ngày 02/11/2023 về việc Phê duyệt Quy hoạch TP Đà Nẵng thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050 sông Hàn và sông Vĩnh Điện được quy hoạch sử dụng cho việc cấp nước thuỷ lợi và tưới tiêu, nguồn loại B theo QCVN 08:2023/BTNMT [10].

Việc đánh giá khả năng tiếp nhận nước thải của nguồn nước đối với chất ô nhiễm thực hiện bằng phương pháp bảo toàn khối lượng, phương án đánh giá gián tiếp, chất lượng nước sông tại vị trí mặt cắt cuối của đoạn sông được sử dụng để đánh giá tải lượng ô nhiễm sẵn có trong nước nguồn. Quy trình tính toán đánh giá khả năng tiếp nhận nước thải của nguồn nước như sau:

Khả năng tiếp nhận của nguồn nước đối với chất ô nhiễm ≈ Tải lượng ô nhiễm tối đa của chất ô nhiễm -- Tải lượng sẵn có trong nguồn nước của chất ô nhiễm

Bảng 1. Tổng hợp thông tin các đoạn sông phục vụ đánh giá khả năng tiếp nhận nguồn thải

STT	Đoạn sông đánh giá	Lưu lượng trung bình mùa kiệt (m^3/s)	Kq	Kf	Chiều dài (km)	Mô tả
1	Sông Túy Loan	10,5	0,9	0,9	10,2	Nguồn loại A
2	Sông Yên	21	0,9	0,9	5,5	
3	Sông Cầu Đỏ - Cẩm Lệ	55	0,9	0,9	9,3	
4	Sông Vĩnh Điện	106	1,0	0,9	11,1	Nguồn loại B
5	Sông Hàn	310	1,1	0,9	8,8	

a. Tải lượng tối đa của thông số chất lượng nước mặt

$Ltđ = C_{qc} \times Q_S \times 86,4$ (1)

Trong đó: C_{qc} là giá trị giới hạn của thông số chất lượng nước mặt theo quy chuẩn kỹ thuật về chất lượng nước mặt ứng với mục đích sử dụng nước của đoạn sông, đơn vị tính là mg/l; Q_S: lưu lượng dòng chảy của đoạn sông đánh giá, đơn vị tính là m^3/s; 86,4 là hệ số chuyển đổi thứ nguyên (chuyển đổi từ đơn vị tính là mg/l, m^3/s thành đơn vị tính là kg/ngày).

b. Tải lượng của thông số chất lượng nước hiện có trong nguồn nước

$Lnn = C_{nn} \times Q_S \times 86,4$ (2)

Trong đó: C_{nn} là kết quả phân tích thông số chất lượng nước mặt, đơn vị tính là mg/l; Q_S là lưu lượng dòng chảy của đoạn sông đánh giá, đơn vị tính là m_3/s.

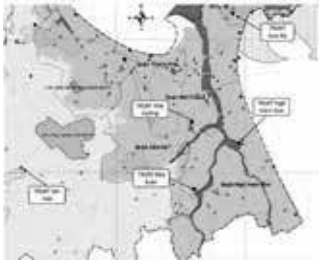
c. Tải lượng của thông số ô nhiễm có trong nguồn thải

Theo nội dung đồ án quy hoạch TP Đà Nẵng thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050 tại Quyết định số 1287/QĐ-TTg, các nguồn thải điểm từ các trạm xử lý nước thải sinh hoạt tập trung, các khu công nghiệp hiện trạng và theo quy hoạch tới năm 2030 dự kiến sẽ được trình bày trong Bảng 2. Tiêu chuẩn thải nước tính theo diện tích KCN, CCN được lấy theo TCVN 33-2006/BXD là $45m^3/ha/ngày$ [11].

Bảng 2. Thống kê nguồn thải từ hoạt động công nghiệp và đô thị xả vào các đoạn sông nghiên cứu

	Diện tích		Lưu lượng nước thải (m^3/ngày)		Nguồn tiếp nhận	Mức độ xử lý
	2020	2030	2020	2030		
Tổng diện tích KCN/CCN	2.271	2.741	4.750	31.975		
KCN Hòa Cầm QH mở rộng	149.84	269.86	2,000	12.144	Cầu Đỏ- Cẩm Lệ	Xử lý đạt A
KCN Hòa Nhơn QH mới	0	360.59	-	16.227	Túy Loan	Xử lý đạt A
KCN Đà Nẵng (đưa ra khỏi quy hoạch)	50.1	0	250	-	Hàn	Xử lý đạt B
KCN Dịch vụ thuỷ sản Đà Nẵng	50.63	26.26	2,500	1.182	Hàn	Xử lý đạt B
CCN Cẩm Lệ	0	29.09	-	1.309	Hàn	Xử lý đạt B
CCN Hòa Nhơn	0	24.75	-	1.114	Túy Loan	Xử lý đạt A
Lưu lượng nước thải đô thị			121.000	310.000		
Nhà máy XLNT QH mới tại Hoà Nhơn			-	80.000	Túy Loan	Xử lý đạt A
Nhà máy XLNT Hòa Xuân			60.000	120.000	Vĩnh Điện	Xử lý đạt A
Nhà máy XLNT Hòa Cường			36.000	-	Cầu Đỏ- Cẩm Lệ	Xử lý đạt A
Nhà máy XLNT Sơn Trà			25.000	65.000	Hàn	Xử lý đạt A
Các trạm phân tán phía Tây nam TP				45.000	Yên	Xử lý đạt A
Nhà máy TXLNT Ngũ Hành Sơn*			30.000	30.000	Cổ Cò	Xử lý đạt B

Ghi chú: TXLNT Ngũ Hành Sơn xả vào sông Cổ Cò do đó không nằm trong phạm vi đánh giá của nghiên cứu



Hình 3. Sơ đồ vị trí các TXLNT sinh hoạt hiện trạng và quy hoạch tới năm 2030 [12]

d. Khả năng tiếp nhận nước thải

Theo thông tư số 95/2025/TT-BNNMT ngày 31/12/2025 quy định về đánh giá khả năng tiếp nhận nước thải, sức chịu tải của nguồn nước sông, hồ thì khả năng tiếp nhận nước thải, sức chịu tải của sông xác định theo công thức:

$L_{tn} = L_{td} - L_{nn} - L_{tt} + NP_{td}$ (3)

Trong đó: L_{tt}: tải lượng của thông số ô nhiễm có trong nguồn nước thải, đơn vị tính là kg/ngày; NP_{td}: tải lượng cực đại của thông số ô nhiễm mất đi do các quá trình biến đổi xảy ra trong đoạn sông, đơn vị tính là kg/ngày. Giá trị NP_{td} phụ thuộc vào từng chất ô nhiễm

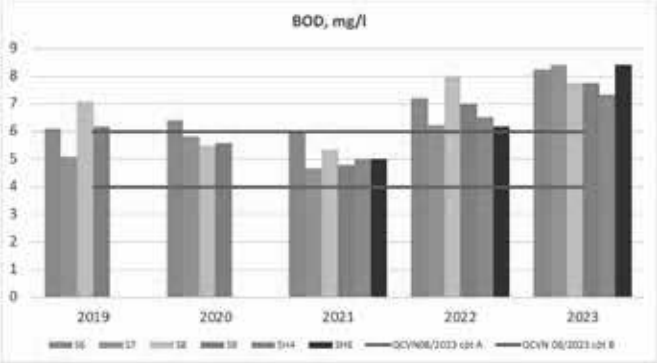
và có thể chọn giá trị bằng 0 đối với chất ô nhiễm có phản ứng làm giảm chất ô nhiễm này, giá trị $NP_{td} = 0$.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

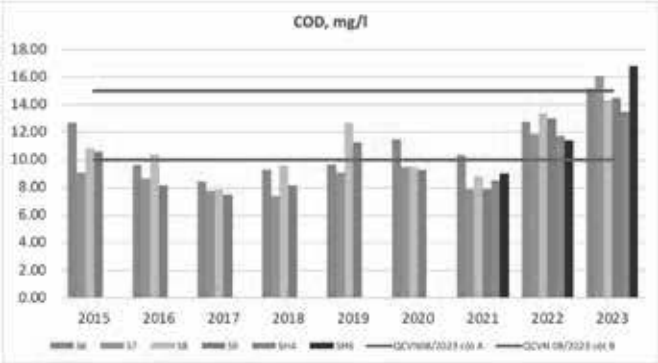
Giải pháp chính về nguồn cấp nước cho TP Đà Nẵng theo Quy hoạch thành phố được phê duyệt tại Quyết định số 1287/QĐ-TTg ngày 02/11/2023 được phân theo các giai đoạn như sau: trước năm 2030: sử dụng nguồn nước từ sông Cu Đê, sông Yên và sông Cầu Đỏ; từ năm 2030 - 2035: sử dụng nguồn nước sông Cu Đê, sông Yên, sông Thu Bồn; cấp nước cho TP Đà Nẵng tầm nhìn đến năm 2045 định hướng là nguồn nước mặt từ các con sông chính như sông Yên, Cầu Đỏ - Cẩm Lệ, Sông Túy Loan, Sông Vĩnh Điện, Sông Cu Đê.

3.1. Hiện trạng chất lượng nước sông Vu Gia đoạn chảy qua trung tâm TP Đà Nẵng

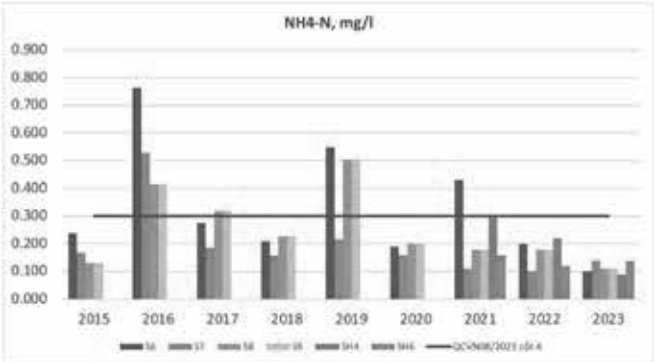
Hiện trạng chất lượng nguồn nước sông Vu Gia đoạn chảy qua trung tâm TP Đà Nẵng trong giai đoạn 2015 - 2023 được thể hiện ở Hình 4, 5, 6, 7.



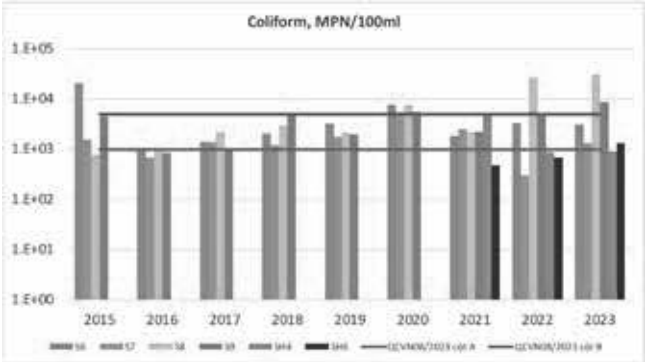
Hình 4. Diễn biến chất lượng nước sông Vu Gia theo chỉ tiêu BOD_5



Hình 5. Diễn biến chất lượng nước sông Vu Gia theo chỉ tiêu COD



Hình 6. Diễn biến chất lượng nước sông Vu Gia theo chỉ tiêu NH_4-N



Hình 7. Diễn biến chất lượng nước sông Vu Gia theo chỉ tiêu chỉ tiêu Coliform

Nhận xét chung:

Giai đoạn 2015 - 2023, chất lượng nước các sông trong hệ thống Vu Gia nhìn chung có xu hướng suy giảm, đặc biệt trong 2-3 năm gần đây. Các thông số BOD_5, COD và vi sinh (Coliform, *E.coli*) có xu hướng tăng và nhiều điểm đã vượt quy chuẩn QCVN 08:2023/BTNMT, nhất là đối với nguồn loại A.

• Sông Túy Loan (S7): Chất lượng nước tương đối ổn định và khá tốt do chưa chịu áp lực lớn từ nguồn thải; các chỉ tiêu hữu cơ có xu hướng tăng nhẹ gần đây, *E.coli* thường xuyên vượt chuẩn. Tương lai cần kiểm soát tốt nguồn thải khi tiếp nhận nước thải từ KCN và nhà máy XLNT.

• Sông Yên (SH4): Là nguồn cấp nước sinh hoạt quan trọng, chất lượng nhìn chung đạt quy chuẩn nhưng một số thông số (DO, BOD_5, *E.coli*) vượt chuẩn trong nhiều đợt. Năm 2023, phần lớn mẫu vẫn đáp ứng yêu cầu cấp nước sinh hoạt sau xử lý.

• Sông Cầu Đỏ - Cẩm Lệ (SH6): Chất lượng nước kém hơn sông Yên, nhiều thông số (DO, TSS, BOD_5, *E.coli*) vượt chuẩn do chịu tác động tổng hợp từ thượng nguồn và nguồn thải đô thị, KCN.

• Sông Vĩnh Điện (S9): Có xu hướng xấu đi rõ rệt trong 2 năm gần đây; vi sinh vật vượt chuẩn phổ biến, song đa số chỉ tiêu vẫn đạt nguồn loại B.

• Sông Hàn (S8): Chất lượng nước chủ yếu phù hợp cho tưới tiêu và giao thông thủy; vi sinh vượt chuẩn nhiều đợt nhưng năm 2023 có dấu hiệu cải thiện rõ rệt.

Nhìn chung, thông số NH_4-N có xu hướng cải thiện, song trong tương lai, chất lượng nước sẽ phụ thuộc lớn vào quản lý, giám sát chặt chẽ nguồn thải, đặc biệt từ khu dân cư và các KCN, nhằm duy trì và cải thiện chất lượng nước sông.

3.2. Khả năng tiếp nhận của các đoạn sông thuộc lưu vực sông Vu Gia chảy qua trung tâm TP Đà Nẵng

3.2.1. Đánh giá khả năng tiếp nhận nước thải của sông Túy Loan

Khả năng tiếp nhận nước thải của sông Túy Loan được tính toán và thống kê ở Bảng 3 dưới đây. Trong đó hàm lượng các chất ô nhiễm hữu cơ, dinh dưỡng và vi sinh vật gây bệnh đều đã vượt quá khả năng tiếp nhận của sông. Mặc dù sông Tuý Loan là 1 nhánh sông phía thượng nguồn của lưu vực sông Vu Gia nhưng đang nằm trong mức báo động về ô nhiễm, với những hoạt động phát triển của công nghiệp và đô thị của TP Đà Nẵng tới năm 2030 và với chất lượng nước sông tại thời điểm hiện tại thì dòng sông này không còn khả năng tiếp nhận các nguồn thải, khả năng chịu tải đối với 04 thông số nghiên cứu đều mang giá trị âm. Do đó cần có các biện pháp kịp thời trong thời gian tới để cải thiện chất lượng nguồn nước giúp làm tăng khả năng tiếp nhận của sông Túy Loan đảm bảo chất lượng nguồn nước cấp cho sinh hoạt của thành phố.

Bảng 3. Khả năng tiếp nhận nước thải của sông Túy Loan

	Q_s	K_q	K_f	L_{td}	C_{nn}	C_t	Q_t	L_{nn}	L_t	L_{tn}
	m^3/s			kg/ngày	mg/l	mg/l	m^3/s	kg/ngày	kg/ngày	kg/ngày
BOD_5	10,5	0,9	0,9	3.629	6,28	20,97	1,13	5.694	2.041	-4.107
COD	10,5	0,9	0,9	9.072	11,25	48,60	1,13	10.206	4.731	-5.865
NH_4-N	10,5	0,9	0,9	272	0,20	3,38	1,13	184	329	-242
Coliform	10,5	0,9	0,9	9.E+05	2.E+03	2.E+03	1,13	2.E+06	2.E+05	-3.E+07

3.2.2. Đánh giá khả năng tiếp nhận nước thải của sông Yên

Sông Yên là nguồn cung cấp nước chính cho máy nước Cầu Đỏ, tuy nhiên theo số liệu chất lượng nước hiện trạng và đánh giá khả năng chịu tải của các hoạt động phát triển tới năm 2030, tải lượng chất ô nhiễm có thể tiếp nhận đã vượt quá khả năng của dòng sông đối với thành phần chất hữu cơ (BOD_5, COD) và vi sinh vật gây bệnh (Coliorm), các giá trị tải lượng mang dấu âm chỉ rõ mức độ quá tải hay dòng sông không còn khả năng tiếp nhận đối với các chất ô nhiễm nói trên. Ngoại trừ các chất dinh dưỡng (N-NH_4^+) có khả năng tiếp nhận rất hạn chế, với giá trị là 30 kg/ngày. Điều này cho thấy sức ép của quá trình phát triển đang gây ra những mối nguy dẫn tới mức độ an toàn của dòng chảy trên phương diện bảo vệ chất lượng nguồn nước.

Bảng 4. Khả năng tiếp nhận nước thải của sông Yên

	Q_s	K_q	K_f	L_{td}	C_{nn}	C_t	Q_t	L_{nn}	L_t	L_{tn}
	m^3/s			kg/ngày	mg/l	mg/l	m^3/s	kg/ngày	kg/ngày	kg/ngày
BOD	21	0,9	0,9	7.258	6,28	20,25	0,52	11.388	911	-5.042
COD	21	0,9	0,9	18.144	11,25	48,60	0,52	20.412	2.187	-4.455
NH_4-N	21	0,9	0,9	544	0,20	3,24	0,52	369	146	30
Coliform	21	0,9	0,9	7.258	2.E+03	2.E+03	0,52	3.E+06	1.E+05	-2.E+06

3.2.3. Đánh giá khả năng tiếp nhận nước thải của sông Cẩm Lệ

Tương tự như sông Yên và sông Túy Loan (thượng nguồn của sông Cẩm Lệ), phần lớn các thông số ô nhiễm đánh giá đều đã vượt quá khả năng tiếp nhận nguồn thải của sông, giá trị tải lượng tính toán đối với BOD_5, COD, Coliform lần lượt là -15.953, -20.121, -4*10^6 kg/ngày, khả năng tiếp nhận đối với chất dinh dưỡng, N-NH_4^+ rất hạn chế, khoảng 711 kg/ngày. Mức độ quá tải của sông Cẩm Lệ cao gấp từ 3 - 4,5 lần so với sông Túy Loan và sông Yên. Kết quả đánh giá chi tiết khả năng tiếp nhận nước thải của sông Cẩm Lệ được thể hiện ở Bảng 5.

Bảng 5. Khả năng tiếp nhận nước thải của sông Cẩm Lệ

	Q_s	K_q	K_f	L_{td}	C_{nn}	C_t	Q_t	L_{nn}	L_t	L_{tn}
	m^3/s			kg/ngày	mg/l	mg/l	m^3/s	kg/ngày	kg/ngày	kg/ngày
BOD_5	55	0,9	0,9	19.008	7,30	24,30	0,14	34.666	295	-15.953
COD	55	0,9	0,9	47.520	14,11	48,60	0,14	67.051	590	-20.121
NH_4-N	55	0,9	0,9	1.426	0,14	4,05	0,14	665	49	711
Coliform	55	0,9	0,9	5.E+06	2.E+03	2.430	0,14	9.E+06	3.E+04	-4.E+06

Như vậy có thể thấy mức độ ô nhiễm của đoạn sông Cẩm Lệ chảy qua trung tâm TP Đà Nẵng đã phải gánh chịu những tác động tiêu cực không nhỏ về mặt môi trường. Điều này báo động thực trạng diễn biến chất lượng nước trong lưu vực sông Vu Gia đang xấu đi và cần có giải pháp kịp thời và phù hợp để kiểm soát, ngăn ngừa các dòng thải chứa hàm lượng cao các chất gây ô nhiễm.

3.2.4. Đánh giá khả năng tiếp nhận nước thải của sông Vĩnh Điện

Vĩnh Điện là một nhánh sông nối từ hạ lưu sông Thu Bồn với sông Vu Gia trước khi sông này đổ vào sông Hàn để ra biển. Theo đánh giá khả năng chịu tải của sông Vĩnh Điện (nguồn loại B) được trình bày trong Bảng 6.

Bảng 6. Khả năng tiếp nhận nước thải của sông Vĩnh Điện

	Q_s	K_q	K_f	L_{td}	C_{nn}	C_t	Q_t	L_{nn}	L_t	L_{tn}
	m^3/s			kg/ngày	mg/l	mg/l	m^3/s	kg/ngày	kg/ngày	kg/ngày
BOD_5	106	1	0,9	54.950	6,26	22,50	1,39	57.332	2.700	-5.081
COD	106	1	0,9	137.376	10,04	54,0	1,39	91.950	6.480	38.946
NH_4-N	106	1	0,9	2.748	0,23	3,60	1,39	2.134	432	182
Coliform	106	1	0,9	5.E+07	4.E+03	3.E+03	1,39	4.E+07	3.E+05	9.E+06

Tải lượng chất ô nhiễm theo BOD_5 trong sông hiện đã vượt quá tải lượng tối đa cho phép của nguồn với giá trị lần lượt là 57.332 kg/ngày và 54.950kg/ngày, khả năng tiếp nhận nước thải bởi các hoạt động phát triển của quy hoạch thành phố tới năm 2030 theo chỉ tiêu BOD_5 mang giá trị âm - 5.081kg/ngày. Khả năng tiếp nhận nước thải của sông Vĩnh Điện theo các thông số COD, N-NH_4^+, Coliform vẫn còn đáng kể với giá trị lần lượt là 38.946 kg/ngày, 182 kg/ngày và 9*10^6 kg/ngày. Điều đó cho thấy, trong quá trình thực hiện quy hoạch khi các dự án thu gom và xử lý nước thải khu vực đô thị và nông thôn được triển khai thì chất lượng nước sông Vĩnh Điện có thể nhanh chóng được cải thiện và làm tăng khả năng chịu tải của dòng sông, đặc biệt là khả năng chịu tải đối với chất hữu cơ.

3.2.5. Đánh giá khả năng tiếp nhận nước thải của sông Hàn

Sông Hàn là đoạn sông hạ lưu của lưu vực sông Vu Gia, sông này tiếp nhận hầu hết các nguồn thải phát sinh trong TP Đà Nẵng cùng với sông Phú Lộc (một nhánh sông nội tỉnh không thuộc lưu vực sông Vu Gia). Khả năng tiếp nhận nước thải theo một số chỉ tiêu đánh giá của sông Hàn được thể hiện tại Bảng 7.

Bảng 7. Khả năng tiếp nhận nước thải của sông Hàn

	Q_s	K_q	K_f	L_{td}	C_{nn}	C_t	Q_t	L_{nn}	F_s	L_t	L_{tn}
	m^3/s			kg/ngày	mg/l	mg/l	m^3/s	kg/ngày		kg/ngày	kg/ngày
BOD_5	310	1,1	0,9	160.704	6,70	30,43	0,78	179.453	0,7	2.054	-20.803
COD	310	1,1	0,9	401.760	10,80	78,83	0,78	289.267	0,7	5.321	107.172
NH_4-N	310	1,1	0,9	8.035	0,23	4,00	0,78	6.160	0,7	270	1.605
Coliform	310	1,1	0,9	1.E+08	2.E+04	3.E+03	0,78	5.E+08	0,7	2.E+05	-4.E+08

Tương tự như sông Vĩnh Điện, sông Hàn được TP Đà Nẵng quy hoạch là nguồn nước loại B cấp nước sản xuất công nghiệp và nông nghiệp. Sông Hàn hiện đã không còn khả năng tiếp nhận nguồn thải theo thông số BOD_5 và vi sinh vật gây bệnh, khi những hoạt động phát triển theo quy hoạch của thành phố tới năm 2030 được thực hiện thì khả năng chịu tải theo 02 thông số này lần lượt là -20.803 kg/ngày và -4*10^8 kg/ngày. Các chất hữu cơ và dinh dưỡng theo COD và N-NH_4^+ có khả năng được tiếp nhận khá hạn chế lần lượt là 107.172 kg/ngày và 1.605 kg/ngày. Tuy kết quả nghiên cứu cho thấy mức độ vượt quá khả năng chịu tải của sông Hàn thấp hơn so với sông Vĩnh Điện và các sông thượng nguồn nhưng nhìn chung vấn đề ô nhiễm trên hệ thống sông Vu Gia đoạn chảy qua trung tâm TP Đà Nẵng đang phản ánh thực trạng chất lượng nước sông đang có dấu hiệu suy giảm nghiêm trọng. Về lâu dài cần triển khai sớm các giải pháp về kỹ thuật và quản lý để cải thiện chất lượng nước sông hiện trạng, làm tăng khả năng chịu tải của dòng sông, bảo vệ môi trường nước, đặc biệt là các sông thượng nguồn là nguồn cung cấp nước sinh hoạt của thành phố.

3.3. Khuyến nghị đề xuất một số giải pháp bảo vệ và cải thiện chất lượng nước sông Vu Gia

Nguy cơ ô nhiễm nước mặt tại các khu vực tiếp nhận nước thải sinh hoạt, công nghiệp, làng nghề, chăn nuôi là rất lớn, để duy trì chất lượng các nguồn nước mặt trên địa bàn thành phố và phục hồi chất lượng nước đang bị ô nhiễm cần tăng cường các giải pháp sau:

- 100% nước thải sinh hoạt thành phố sẽ được thu gom xử lý phù hợp với QCVN 14:2025/BTNMT và QCVN 40:2025/BTNMT - Nước thải sinh hoạt trước khi thải ra môi trường; 100% nước thải công nghiệp sẽ được xử lý đạt QCVN 40:2025/BTNMT - Nước thải công nghiệp trước khi thải ra môi trường; 100% nước thải phát sinh từ các khu du lịch phải được thu và xử lý đạt quy chuẩn QCVN 14:2025/BTNMT - Nước thải sinh hoạt trước khi thải ra môi trường.

- Xây dựng hệ thống thu gom, xử lý nước thải sinh hoạt kết hợp với cải tạo, phục hồi các hồ ao, kênh mương bị ô nhiễm ở khu vực đô thị. Việc thu gom và xử lý nước thải đô thị cần tuân thủ các yêu cầu tại Quyết định 589/QĐ-TTg ngày 6/4/2016 Phê duyệt điều chỉnh định hướng phát triển thoát nước đô thị và khu công nghiệp Việt Nam đến năm 2025, tầm nhìn đến năm 2050. Duy trì vận hành đạt yêu cầu các hệ thống xử lý nước thải ở tất cả các khu đô thị và khu Công nghệ cao. Xây dựng các hệ thống xử lý nước thải phân tán đối với những khu vực chưa có điều kiện thu gom (ven đô, nông thôn).

- Cấp phép xả thải đối với những nguồn thải nước thải mới phải căn cứ vào khả năng chịu tải của nguồn tiếp nhận, ưu tiên chú ý đối với các nguồn nước được quy hoạch bảo vệ nghiêm ngặt để phục vụ cấp nước cho sinh hoạt.

- Trong quá trình thực hiện các dự án phát triển đô thị, công nghiệp, du lịch cụ thể TP Đà Nẵng cần tiến hành lên phương án và có các biện pháp về quy hoạch, để cải thiện chất lượng nguồn nước một cách tổng thể cũng như lựa chọn công nghệ xử lý nước thải phù hợp như (1) Xử lý nước thải khu công nghiệp và nước thải sinh hoạt tốt hơn cột A; (2) Khuyến khích tái sử dụng nhằm giảm lượng khai thác từ nguồn nước tự nhiên và giảm thiểu lượng xả thải ra nguồn tiếp nhận; (3) Phân bố lại vị trí các điểm xả, không cho xả vào các dòng sông A, mà chỉ vào các dòng sông B, quy hoạch lại điểm lấy nước cấp và điểm xả thải; (4) Áp dụng các biện pháp tăng cường khả năng tự làm sạch của nguồn tiếp nhận: điều tiết dòng chảy, tăng cường thực vật thuỷ sinh…

- Lên phương án, đưa ra lộ trình yêu cầu tất cả các nguồn thải khác nâng từ B lên A, để cải thiện chất lượng nước sông tốt hơn so với hiện nay. Nâng có lộ trình và tăng cường sản xuất sạch hơn kết hợp với tái sử dụng nước thải cho khu vực đã vượt ngưỡng.

4. KẾT LUẬN

Hệ thống sông Vu Gia có vai trò quan trọng trong phát triển kinh tế - xã hội đối với vùng kinh tế trọng điểm khu vực miền Trung nói chung và TP Đà Nẵng nói riêng. Trước những áp lực của phát triển kinh tế và xã hội trong 2 năm gần đây tình trạng chất lượng nước sông Vu Gia ngày càng bị suy giảm, ngay cả khu vực thượng lưu.

Theo phương pháp bảo toàn khối lượng kết quả đánh giá khả năng tiếp nhận của 05 sông thuộc lưu vực sông Vu Gia cho thấy các con sông thuộc địa bàn trung tâm TP Đà Nẵng đều không còn khả năng tiếp nhận nguồn thải theo từ 2 - 4 thông số nghiên cứu, phổ biến là chỉ tiêu BOD_5 và Coliform. Các sông ở phía hạ lưu gần cửa biển chất lượng có sự cải thiện nhất định. Các đoạn sông thượng nguồn là nguồn cung cấp nước quan trọng của hoạt động sản xuất và sinh hoạt của đô thị do đó trước mắt trong thời gian tới cần có những biện pháp can thiệp phù hợp như rà soát, phân loại và xác định những điểm nóng ô nhiễm, xây dựng những giải pháp ưu tiên bảo vệ chất lượng nguồn nước tại các khu vực khai thác để bảo vệ nghiêm ngặt và cải thiện chất lượng nguồn nước. Hoàn chỉnh hệ thống quan trắc chất lượng nước mặt, tăng tần suất quan trắc để kiểm soát chất lượng nguồn nước, tăng cường các hoạt động thanh tra kiểm tra ngăn chặn các nguồn gây ô nhiễm môi trường nước mới.

Lời cảm ơn: Tác giả chân thành cảm ơn nhóm nghiên cứu WASO Trường Đại học Xây dựng Hà Nội và sự hỗ trợ của Sở Nông nghiệp Môi trường TP Đà Nẵng trong khuôn khổ của dự án "Điều chỉnh quy hoạch xử lý chất thải rắn TP Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045" giữa liên danh Viện Quy hoạch và Kiến trúc đô thị (UAI), Công ty Cổ phần Đầu tư Smart Sollution Việt Nam (VISIN) và Sở Nông nghiệp Môi trường TP Đà Nẵng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Cục Quản lý Tài nguyên nước, Bộ Nông nghiệp và Môi trường. Dự thảo báo cáo tổng hợp: Lập quy hoạch tổng hợp lưu vực sông Vu Gia - Thu Bồn và vùng phụ cận thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050 (dự thảo). Việt Nam, 2025.

[2] Sở Tài nguyên và Môi trường Đà Nẵng. Báo cáo tổng hợp đồ án điều chỉnh quy hoạch xử lý chất thải rắn TP Đà Nẵng đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045. Chi cục Bảo vệ Môi trường Đà Nẵng, Đà Nẵng, 2024.

[3] Qin, J., Niu, J., & Niu, W. Research on water resource carrying capacity of capital water conservation functional zone. Frontiers in Environmental Science, 10, 1108631, 2023.

[4] Mortezazadeh, F., Pourmohammadi, M.H., Khoshnavaz, S., et al. Water resources carrying capacity to achieve a sustainable ecosystem using support vector regression. Water Supply, 24(3), 665-672, 2024.

[5] Khorsandi, M., Homayouni, S., & Van Oel, P. The edge of the petri dish for a nation: Water resources carrying capacity assessment for Iran. Science of the Total Environment, 817, 153038, 2022.

[6] Bá, L.H., et al. Đánh giá hiện trạng và dự báo ô nhiễm môi trường nước sông Vàm Cỏ Đông. Bảo vệ Môi trường Nông nghiệp và Nông thôn Việt Nam, 2010.

[7] Trang, C.T.T., & Vinh, V.D. Tính toán khả năng tiếp nhận chất ô nhiễm của đầm Thị Nại (tỉnh Bình Định). Tạp chí Khoa học và Công nghệ Biển, 2, 158-166, 2015.

[8] Trang, C.T.T., & Hoa, N.T.P. Đánh giá sức tải môi trường vùng nước ven đảo Cát Bà phục vụ phát triển bền vững. Viện Tài nguyên và Môi trường, 14, 2019.

[9] Bộ Tài nguyên và Môi trường. Thông tư số 01/2023/TT-BTNMT ngày 13/03/2023 ban hành quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng môi trường xung quanh, 2023.

[10] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 1287/QĐ-TTg ngày 02/11/2023 về việc phê duyệt Quy hoạch TP Đà Nẵng thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050, 2023.

[11] Bộ Xây dựng. TCXDVN 33:2006 - Cấp nước - Mạng lưới đường ống và công trình - Tiêu chuẩn thiết kế, 2006.

[12] UBND TP Đà Nẵng. Báo cáo tổng hợp quy hoạch TP Đà Nẵng thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050, 2022.

■Ngày nhận bài: 05/3/2026 ■Ngày sửa bài: 12/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 26/3/2026

Một số vấn đề về sửa chữa đường sắt không khe nối

Some issues related to the maintenance of continuous welded rail (CWR)

> THS PHẠM DUY HÒA
Trường Đại học Giao thông vận tải
Email: hoapd@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Kỹ thuật duy tu sửa chữa đường sắt không khe nối (ĐSKKN) ngoài những yêu cầu giống như đường sắt thông thường còn có những phương pháp duy tu sửa chữa khác với đường thông thường. Kỹ thuật duy tu sửa chữa cần xây dựng tiêu chuẩn quản lý và sửa chữa, hoàn thiện các thiết bị đo, tính toán, khám phá trạng thái kỹ thuật, dự đoán thương tổn các bộ phận đường, xây dựng kế hoạch sửa chữa đường trước mắt và lâu dài.

Để đảm bảo ĐSKKN có đủ cường độ và ổn định còn phải hết sức chú trọng phòng ray nở về mùa hạ, ray gãy về mùa đông. Vì vậy, cần nâng cao chất lượng kỹ thuật duy tu sửa chữa.

Từ khóa: Bảo dưỡng đường cong; kỹ thuật sửa chữa đường sắt không khe nối; các nguyên tắc yêu cầu cơ bản và điều kiện nhiệt độ trong duy tu sửa chữa; cơ sở khoa học để duy tu; phát tán và điều chỉnh ứng suất nhiệt.

ABSTRACT

Railway maintenance technology for continuously welded rail (CWR) lines, in addition to having requirements similar to conventional railways, also involves different maintenance methods compared to standard tracks. Maintenance technology requires the establishment of management and maintenance standards, improvement of measurement equipment, calculations, assessment of technical conditions, prediction of damage to track components, and the development of both short-term and long-term maintenance plans.

To ensure that CWR tracks have sufficient strength and stability, it is also essential to pay close attention to preventing rail buckling in summer and rail breakage in winter. Therefore, it is necessary to improve the technical quality of maintenance work.

Keywords: Curved track maintenance; maintenance techniques for continuously welded rail (CWR); fundamental principles and requirements; temperature conditions in maintenance work; scientific basis for maintenance; dispersion and adjustment of thermal stress.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Duy tu sửa chữa ĐSKKN có nhiệm vụ cơ bản là duy trì đồng thời chất lượng hình học tuyến và trạng thái ứng suất nhiệt ổn định trong ray dài, nhằm đảm bảo tàu chạy an toàn, êm thuận, liên tục và nâng cao tuổi thọ kết cấu tầng trên. Khác với đường có khe nối, ĐSKKN làm việc trong điều kiện ứng suất nhiệt tích lũy lớn, nên nguy cơ trồi ray vào mùa nóng và gãy ray vào mùa lạnh luôn tồn tại nếu không kiểm soát tốt nhiệt độ khóa ray và lực cản đường. Vì vậy, công tác duy tu không chỉ mang tính hình học mà còn phải dựa trên cơ sở cơ học - nhiệt học của ray hàn liền.

Bài báo tập trung làm rõ các nguyên tắc và điều kiện nhiệt độ trong duy tu sửa chữa, cơ sở khoa học của quá trình duy tu, cũng như phương pháp phát tán và điều chỉnh ứng suất nhiệt, qua đó góp phần nâng cao hiệu quả quản lý và khai thác an toàn ĐSKKN trong điều kiện Việt Nam.

2. CÁC NGUYÊN TẮC YÊU CẦU CƠ BẢN VÀ ĐIỀU KIỆN NHIỆT ĐỘ TRONG DUY TU SỬA CHỮA

2.1. Các nguyên tắc cơ bản

Bản chất duy tu ĐSKKN là đồng thời duy trì hình học tuyến và ổn định ứng suất nhiệt trong ray, bảo đảm đủ lực cản chống trồi ray mùa nóng và gãy ray mùa lạnh. Việc tổ chức duy tu cần tuân thủ các nguyên tắc sau:

(1) Ray dài phải được khóa trong phạm vi nhiệt độ khóa ray thiết kế (T_k). Sau khi khóa, các tác nghiệp duy tu không được làm thay đổi trạng thái này.

(2) Khi nhiệt độ khóa ray thực tế sai lệch hoặc vượt giới hạn thiết kế, phải tiến hành phát tán hoặc điều chỉnh ứng suất nhiệt để đưa về phạm vi cho phép.

(3) Mọi công tác duy tu phải phụ thuộc nhiệt độ ray thực tế, chỉ thực hiện trong điều kiện nhiệt độ phù hợp để không làm suy giảm ổn định đường.

(4) Duy tu tổng hợp cần thực hiện đồng bộ (chèn, sàng đá, thay tà vẹt, chỉnh hình học, xử lý ứng suất), ưu tiên vào thời kỳ nhiệt độ ổn định (mùa thu/xuân).

(5) Cần tăng cường duy tu các khu vực nhạy cảm như khu co giãn và khu điều chỉnh để đảm bảo ổn định lâu dài của ĐSKKN.

2.2. Các yêu cầu cơ bản về trạng thái ĐSKKN

Tráng thái của ĐSKKN đặc trưng với các yêu cầu sau:

(1) Ổn định nhiệt - ứng suất: Ray dài phải được khóa đúng nhiệt độ khóa ray thiết kế; khi sai lệch phải phát tán/điều chỉnh kịp thời. Không thi công khi nhiệt độ vượt giới hạn làm giảm lực cản đường.

(2) Hình học và đệm đường: Bình đồ, trắc dọc đạt chuẩn; mối hàn phẳng (≤0,5 mm/1 m), ray cong được nắn chỉnh. Đệm đá đủ, sạch, chèn chặt, đúng mặt cắt thiết kế.

(3) Liên kết và kết cấu: Liên kết ray - tà vẹt phải chặt (mô-men đúng quy định), dùng bu-lông cường độ cao tại khu điều chỉnh; tà vẹt bê tông sử dụng liên kết đàn hồi phù hợp.

(4) Quan trắc và kiểm soát: Bố trí cọc quan trắc chuyển vị hợp lý theo chiều dài tuyến; theo dõi trôi ray, ứng suất để phục vụ điều chỉnh.

(5) Nền đường và thoát nước: Xử lý kịp thời lún, phọt bùn, túi đá; đảm bảo thoát nước tốt để duy trì ổn định.

(6) Tổ chức duy tu và hồ sơ: Tổ chức duy tu theo điều kiện nhiệt độ và trạng thái đường; tăng cường tuần tra, kiểm tra trọng điểm; lập và cập nhật đầy đủ hồ sơ kỹ thuật.

(7) Khu vực nhạy cảm: Tăng cường duy tu khu co giãn và khu điều chỉnh - các vị trí quyết định ổn định ĐSKKN.

2.3. Đo nhiệt độ khóa ray thực tế trên ĐSKKN

Trong quá trình khai thác, dưới tác động của tải trọng đoàn tàu, tương tác bánh xe-ray và các tác nghiệp duy tu, trạng thái ứng suất trong ray dài bị phân bố lại, dẫn đến nhiệt độ khóa ray thực tế (T_k,t) khác với nhiệt độ khóa ray thiết kế ban đầu.

Nếu không xác định đúng T_k,t mà vẫn tổ chức duy tu theo nhiệt độ khóa ray thiết kế, có thể vô tình đưa ray vào trạng thái ứng suất nguy hiểm, gây trồi ray khi nhiệt độ cao hoặc gãy ray khi nhiệt độ thấp, dù điều kiện nhiệt độ bên ngoài tưởng như vẫn nằm trong giới hạn cho phép. Vì vậy, việc xác định chính xác nhiệt độ khóa ray thực tế là yêu cầu bắt buộc trong duy tu ĐSKKN.

Trong thực tế, chưa có phương pháp đo trực tiếp hoàn toàn chính xác T_k,t; phương pháp được sử dụng phổ biến là đo chuyển vị dọc của ray tại các cọc quan trắc kết hợp phân tích theo lý thuyết giãn nở nhiệt. Khi chuyển vị dọc phân bố đều giữa các điểm đo, có thể coi ứng suất nhiệt trong ray phân bố đồng đều; ngược lại, nếu xuất hiện chênh lệch chuyển vị, chứng tỏ ứng suất nhiệt đã phân bố lại không đều, dẫn đến T_k,tt khác nhau theo từng đoạn ray và cần được điều chỉnh.

Trị số thay đổi giữa nhiệt độ khóa ray thực tế so với nhiệt độ khóa ray lúc đặt ray có thể tính theo công thức:

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{\alpha . l} \quad (1)$$

Trong đó:

Dt: Chênh lệch nhiệt độ khóa ray thực tế so với nhiệt độ khóa ray khi đặt đường (°c).

Dl: Hiệu số ray trôi giữa hai cọc quan trắc(mm).

a: Hệ số giãn nở thép ray; a = 0,0118mm/(m.°c).

l: Cự ly giữa hai cột quan trắc (m).

3. DUY TU ĐSKKN

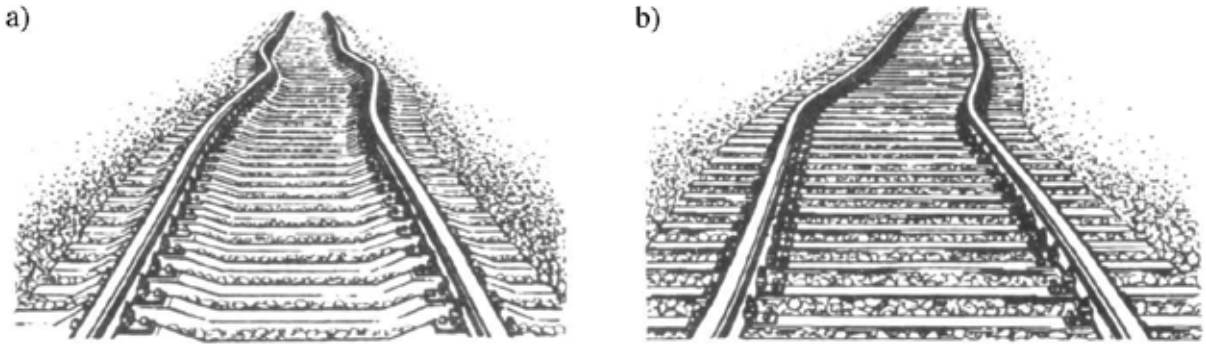
3.1. Phân loại và nội dung công tác duy tu

Công tác duy tu ĐSKKN được tổ chức theo ba cấp độ chính, gồm duy tu tổng hợp, duy tu bảo dưỡng thường xuyên và sửa chữa bổ sung tạm thời, phù hợp với trạng thái kỹ thuật và quy luật biến đổi của kết cấu đường. Việc phân cấp này phản ánh cách tiếp cận hiện đại trong quản lý ĐSKKN, trong đó cần kiểm soát đồng thời hình học tuyến, lực cản đệm đường và trạng thái ứng suất nhiệt của ray nhằm đảm bảo ổn định lâu dài và an toàn chạy tàu.

Duy tu tổng hợp là hình thức sửa chữa có tính chu kỳ và kế hoạch, nhằm khôi phục toàn diện trạng thái kỹ thuật của đường. Nội dung bao gồm chỉnh sửa hình học tuyến (bình đồ, trắc dọc, cao độ), chèn và sàng đá để phục hồi độ chặt và lực cản của đệm đường, thay thế hoặc sửa chữa tà vẹt và các liên kết hư hỏng, mài và chỉnh sửa mối hàn, đồng thời xử lý các bệnh hại như trôi đường, phọt bùn, thiếu đá. Đối với ĐSKKN, duy tu tổng hợp còn gắn với việc kiểm soát và khi cần thiết phải điều chỉnh hoặc phát tán ứng suất nhiệt, nhằm đảm bảo trạng thái làm việc ổn định của ray dài.

Duy tu bảo dưỡng thường xuyên được thực hiện liên tục trong quá trình khai thác, có trọng điểm theo tình trạng thực tế của tuyến đường. Nội dung chủ yếu là chỉnh sửa cục bộ các sai lệch hình học trong phạm vi cho phép, duy trì trạng thái ổn định của đệm đá và hệ liên kết, thay thế các cấu kiện hư hỏng, xử lý các khuyết tật mối hàn và ray, đồng thời theo dõi và điều chỉnh các hiện tượng trôi ray, phân bố lại ứng suất nhiệt khi cần thiết. Mục tiêu của cấp độ này là ngăn ngừa sự phát triển của hư hỏng và duy trì chất lượng khai thác ổn định giữa các chu kỳ duy tu tổng hợp.

Sửa chữa bổ sung tạm thời là các biện pháp xử lý nhanh, mang tính khắc phục trước mắt đối với những vị trí có sai lệch vượt quá giới hạn quản lý hoặc tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn chạy tàu. Nội dung chủ yếu là hiệu chỉnh tạm thời hình học tuyến, gia cố liên kết, bổ sung đá hoặc xử lý cục bộ nền đường nhằm khống chế sự phát



a) - Trên đường thẳng *b) - Trên đường cong*

Hình 1. Hiện tượng ray bị nở trên đường thẳng, cong

triển của biến dạng và đảm bảo điều kiện khai thác an toàn. Các vị trí này sau đó cần được đưa vào kế hoạch duy tu tổng hợp hoặc sửa chữa triệt để để đảm bảo ổn định lâu dài.

3.2. Cơ sở khoa học của công tác duy tu ĐSKKN

Kết cấu ĐSKKN làm việc dưới tác động đồng thời của tải trọng động đoàn tàu và ứng suất nhiệt trong ray dài, do đó có quy luật biến đổi theo thời gian rõ rệt. Sau khi thi công hoặc duy tu tổng hợp, đệm đá ở trạng thái rời, có độ rỗng lớn và khả năng chịu lực chưa ổn định; dưới tác dụng của tải trọng, các hạt đá dần sắp xếp lại, độ chặt tăng lên và biến dạng dư tích lũy nhanh, đây là giai đoạn không ổn định. Khi đệm đá đạt trạng thái chèn chặt, biến dạng giảm dần và kết cấu đường làm việc ổn định, là giai đoạn khai thác hiệu quả nhất của ĐSKKN. Sau một thời gian khai thác dài, đệm đá bị bẩn, kết cấu suy giảm, xuất hiện lún, trồi, mất ổn định cục bộ và khả năng kháng lực giảm, kết cấu chuyển sang giai đoạn suy thoái. Việc nhận diện đúng các giai đoạn này là cơ sở để lựa chọn chế độ duy tu phù hợp.

Các hư hỏng của ĐSKKN hình thành chủ yếu do tương tác giữa tải trọng động, điều kiện nền đường và sự phân bố lại ứng suất nhiệt trong ray. Những dạng hư hỏng điển hình gồm lún không đều, trôi ray, biến dạng hình học, bẩn và suy giảm chất lượng đệm đá, khuyết tật mối hàn và ray. Đặc biệt, khi lực cản của kết cấu đường giảm hoặc ứng suất nhiệt phân bố không đều, có thể dẫn đến mất ổn định như trồi ray vào mùa nóng hoặc gãy ray vào mùa lạnh. Quá trình này mang tính tích lũy và phát triển theo thời gian, do đó nếu không được kiểm soát kịp thời sẽ làm suy giảm nhanh chất lượng khai thác và an toàn chạy tàu.

Kiểm tra và đánh giá trạng thái kỹ thuật của ĐSKKN phải được thực hiện trên cả hai phương diện tĩnh và động. Ngoài các chỉ tiêu hình học truyền thống, cần sử dụng các phương pháp đo kiểm hiện đại để đánh giá độ không bằng phẳng, chất lượng chạy tàu và trạng thái làm việc của kết cấu đường. Đồng thời, việc quan trắc chuyển vị ray và đánh giá phân bố ứng suất nhiệt là nội dung quan trọng nhằm xác định nhiệt độ khóa ray thực tế và nguy cơ mất ổn định. Các số liệu kiểm tra là cơ sở để lập kế hoạch duy tu, lựa chọn biện pháp kỹ thuật phù hợp và nâng cao hiệu quả quản lý khai thác ĐSKKN.

3.3. Quản lý và điều chỉnh ứng suất nhiệt trong ĐSKKN

Khái niệm và vai trò của nhiệt độ khóa ray: Nhiệt độ khóa ray (T_k) là nhiệt độ tại đó ray dài ở trạng thái không có ứng suất nhiệt, được xác lập khi thi công hoặc sau khi điều chỉnh ứng suất. Trong ĐSKKN, T_k đóng vai trò quyết định đến mức ứng suất nén khi nhiệt độ tăng và ứng suất kéo khi nhiệt độ giảm. Việc duy trì T_k trong phạm vi thiết kế là điều kiện tiên quyết để đảm bảo ổn định chống trồi ray và phòng gãy ray, đồng thời duy trì chất lượng hình học tuyến và an toàn chạy tàu.

Các trường hợp cần phát tán/điều chỉnh ứng suất: Việc phát tán hoặc điều chỉnh ứng suất nhiệt được thực hiện khi nhiệt độ khóa ray thực tế sai lệch so với thiết kế, khi ứng suất phân bố không đều do trôi ray, lún nền hoặc thi công không phù hợp, khi xuất hiện biến dạng hình học bất thường, hoặc khi thay ray, sửa chữa làm thay đổi trạng thái kết cấu đường. Ngoài ra, các trường hợp không xác định được nhiệt độ khóa ray hoặc chênh lệch lớn giữa các đoạn ray cũng cần tiến hành điều chỉnh để đảm bảo làm việc an toàn.

Yêu cầu kỹ thuật khi phát tán ứng suất: Quá trình phát tán ứng suất phải đảm bảo phân bố ứng suất đều dọc ray, đưa ray về trạng thái gần tự do trước khi khóa lại. Nhiệt độ ray trong quá trình thực hiện phải nằm trong phạm vi cho phép, không vượt quá giới hạn thiết kế. Sau khi hoàn thành, nhiệt độ khóa ray thực tế phải nằm trong khoảng quy định và được kiểm chứng thông qua quan trắc chuyển vị, nếu chưa đạt yêu cầu cần tiếp tục điều chỉnh đến khi đảm bảo đồng đều.

Phương pháp phát tán ứng suất: Phát tán ứng suất là quá trình làm giảm lực dọc trong ray bằng cách nới lỏng liên kết và tạo điều kiện cho ray co giãn tự do, sau đó khóa lại ở trạng thái phù hợp. Việc thực hiện thường kết hợp các biện pháp cơ học như sử dụng con lăn, thiết bị kéo giãn và kiểm soát điều kiện nhiệt độ trong quá trình thi công.

Phương pháp khống chế nhiệt độ: Phương pháp này thực hiện bằng cách lựa chọn khoảng nhiệt độ ray phù hợp gần với nhiệt độ khóa ray thiết kế, nới lỏng liên kết để ray tự do co giãn và phát tán ứng suất, sau đó khóa lại tại nhiệt độ thực tế. Đây là phương pháp được áp dụng phổ biến do phản ánh đúng trạng thái làm việc thực tế của ray, tuy nhiên phụ thuộc nhiều vào điều kiện khí tượng và yêu cầu kiểm soát nhiệt độ nghiêm ngặt trong quá trình thi công.

Phương pháp khống chế chiều dài: Phương pháp này dựa trên tính toán lượng giãn dài hoặc co ngắn cần thiết của ray tương ứng với nhiệt độ khóa ray mục tiêu, từ đó điều chỉnh chiều dài ray khi phát tán. Ưu điểm là chủ động về kỹ thuật, nhưng độ chính xác phụ thuộc vào việc xác định đúng nhiệt độ khóa ray ban đầu và điều kiện thực tế, do đó thường áp dụng trong các trường hợp cần hiệu chỉnh có kiểm soát.

Phương pháp điều chỉnh ứng suất nhiệt: Điều chỉnh ứng suất nhiệt được thực hiện khi ứng suất phân bố không đều nhưng không cần thay đổi chiều dài ray. Biện pháp phổ biến là nới lỏng cục bộ hoặc toàn bộ liên kết trong khu vực cần xử lý, kết hợp tác động cơ học hoặc tải trọng đoàn tàu để phân bố lại ứng suất, sau đó xiết chặt lại theo tiêu chuẩn. Quá trình này phải được kiểm soát chặt chẽ để đảm bảo ứng suất được phân bố đều, tránh tạo ra các vùng tập trung ứng suất gây mất ổn định kết cấu đường.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã làm rõ rằng duy tu ĐSKKN không chỉ là duy trì hình học tuyến mà trọng tâm là kiểm soát trạng thái ứng suất nhiệt của ray dài và lực cản của kết cấu đường. Việc xác định đúng nhiệt độ khóa ray thực tế, tổ chức duy tu theo điều kiện nhiệt độ và áp dụng hợp lý các biện pháp phát tán, điều chỉnh ứng suất là yếu tố quyết định để phòng ngừa trồi ray và gãy ray.

Kết quả nghiên cứu cho thấy cần tiếp cận công tác duy tu theo hướng khoa học, đồng bộ giữa hình học - kết cấu - nhiệt học, kết hợp quan trắc và kiểm soát trạng thái đường trong suốt quá trình khai thác. Điều này có ý nghĩa quan trọng trong việc nâng cao an toàn, chất lượng khai thác và tuổi thọ kết cấu ĐSKKN trong điều kiện Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyễn Thanh Tùng, Bùi Thị Trí, Lê Văn Cử. Giáo trình kết cấu tầng trên đường sắt, NXB. Giao thông vận tải, 1996.

[2] Lê Văn Cử. Kỹ thuật sửa chữa đường sắt đô thị. NXB. Giao thông vận tải, 2020.

[3] Trương Trọng Vương. Bài giảng kỹ thuật sửa chữa đường sắt đô thị, 2018.

[4] N.F.Doyle BHP Melbourne Research Laboratories. Railway track design a review of current practice (bản tiếng Anh).

[5] PGS.TS Nguyễn Thanh Tùng. Kỹ thuật sửa chữa đường sắt. NXB. Giao thông vận tải, 2006.

■Ngày nhận bài: 03/3/2026 ■Ngày sửa bài: 16/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 26/3/2026

Đánh giá hiện trạng và định hướng công nghệ xử lý nước cho hệ thống cấp nước sinh hoạt nông thôn tỉnh Quảng Ninh

Assessment of the current status and water treatment technology orientation for rural domestic water supply systems in Quang Ninh province

> TS NGUYỄN PHƯƠNG THẢO
Khoa Kỹ thuật Môi trường, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
Email: thaonp@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Bảo đảm cấp nước sinh hoạt an toàn và bền vững cho khu vực nông thôn vẫn là một thách thức lớn, đặc biệt tại các địa phương có điều kiện địa lý đa dạng. Nghiên cứu này đánh giá hiện trạng hệ thống cấp nước sinh hoạt nông thôn tỉnh Quảng Ninh và đề xuất các định hướng công nghệ xử lý nước phù hợp với điều kiện địa phương. Phương pháp nghiên cứu kết hợp phân tích số liệu thứ cấp và khảo sát thực địa. Nội dung đánh giá tập trung vào mức độ bao phủ dịch vụ, tình trạng hạ tầng, công nghệ xử lý, mức độ đáp ứng QCVN 01-1:2024/BYT (Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt do Bộ Y tế ban hành) và mô hình quản lý vận hành tại các khu vực đồng bằng, ven đô, miền núi và hải đảo. Kết quả cho thấy chỉ 56,59% hộ dân nông thôn được sử dụng nước đạt quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt, với sự chênh lệch đáng kể giữa các khu vực. Nhiều công trình cấp nước quy mô nhỏ vẫn sử dụng công nghệ xử lý truyền thống, mức độ tự động hóa và năng lực vận hành còn hạn chế, dẫn đến chất lượng nước sau xử lý chưa ổn định. Các hệ thống do đơn vị chuyên nghiệp quản lý có mức độ tuân thủ quy chuẩn kỹ thuật và tính bền vững vận hành cao hơn so với các công trình do cộng đồng quản lý. Trên cơ sở đặc điểm nguồn nước và điều kiện không gian của địa phương, nghiên cứu đề xuất các định hướng lựa chọn công nghệ xử lý nước phù hợp đối với nguồn nước mặt, nước ngầm, nước mưa và các hệ thống xử lý quy mô hộ gia đình. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học phục vụ công tác quy hoạch và định hướng đầu tư phát triển hệ thống cấp nước nông thôn tại tỉnh Quảng Ninh và các địa phương có điều kiện tương đồng.

Từ khóa: Cấp nước nông thôn; nước sinh hoạt; công nghệ xử lý; tỉnh Quảng Ninh.

ABSTRACT

Ensuring safe and sustainable domestic water supply in rural areas remains a major challenge, particularly in provinces characterized by diverse geographical conditions. This study evaluates the current status of rural water supply systems in Quang Ninh Province and proposes appropriate water treatment technology options adapted to local conditions. The research applies a mixed-methods approach combining secondary data analysis and field surveys. The assessment focuses on service coverage, infrastructure condition, treatment technologies, compliance with QCVN 01-1:2024/BYT (National Technical Regulation on Domestic Water Quality), and operational management models across delta, peri-urban, mountainous, and island areas. The results show that only 56.59% of rural households have access to water meeting the national domestic water quality standard, with significant disparities among regions. Many small-scale water supply schemes rely on conventional treatment technologies with limited automation and operational capacity, leading to unstable water quality. Systems operated by professional organizations demonstrate higher compliance with technical regulations and better operational sustainability compared to community-managed schemes. Based on the characteristics of local water sources and spatial conditions, the study proposes appropriate water treatment technology options for surface water, groundwater, rainwater, and small-scale household systems. The findings provide scientific evidence to support rural water supply planning and investment strategies in Quang Ninh Province and other regions with similar conditions.

Keywords: Rural water supply; domestic water; water treatment technologies; Quang Ninh province, Vietnam.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cấp nước sạch nông thôn đóng vai trò nền tảng trong bảo vệ sức khỏe cộng đồng, nâng cao chất lượng sống và thúc đẩy phát triển kinh tế - xã hội bền vững. Trong những năm gần đây, Việt Nam đã đạt được nhiều kết quả tích cực trong việc cải thiện khả năng tiếp cận nước sạch khu vực nông thôn thông qua các chương trình mục tiêu quốc gia và các dự án đầu tư hạ tầng cấp nước. Theo báo cáo của Cục quản lý và xây dựng công trình thủy lợi (Bộ Nông nghiệp và Môi trường), tỷ lệ người dân nông thôn được sử dụng nước hợp vệ sinh và nước sạch ngày càng tăng, góp phần cải thiện điều kiện sống và giảm thiểu các rủi ro về sức khỏe liên quan đến nguồn nước. Tính đến năm 2025, trên toàn quốc có khoảng 68% hộ dân nông thôn được sử dụng nước đạt quy chuẩn, trong đó 60% hộ dân sử dụng nước từ các công trình cấp nước tập trung, còn 8% hộ dân được cấp nước từ hệ thống cấp nước hộ gia đình [8]. Tuy nhiên, cùng với yêu cầu ngày càng cao về chất lượng nước sinh hoạt, việc ban hành QCVN 01-1:2024/BYT đã đặt ra các tiêu chuẩn nghiêm ngặt hơn đối với hệ thống cấp nước, đặc biệt tại khu vực nông thôn - nơi điều kiện đầu tư, quản lý và vận hành còn nhiều hạn chế [1].

Trong nước đã có nhiều nghiên cứu liên quan đến cấp nước nông thôn, tập trung vào các nội dung như đánh giá hiện trạng công trình cấp nước tập trung, khả năng tiếp cận nước sạch của người dân, hiệu quả vận hành của hệ thống cấp nước và các mô hình quản lý khai thác công trình [3], [7]. Một số nghiên cứu cũng đề cập đến các yếu tố ảnh hưởng đến tính bền vững của công trình cấp nước nông thôn như điều kiện nguồn nước, năng lực vận hành, cơ chế tài chính và sự tham gia của cộng đồng [4], [5], [6]. Các kết quả nghiên cứu này đã cung cấp những cơ sở khoa học và thực tiễn quan trọng cho việc hoạch định chính sách và nâng cao hiệu quả quản lý các hệ thống cấp nước nông thôn tại Việt Nam.

Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện có vẫn còn một số hạn chế. Thứ nhất, phần lớn các nghiên cứu chủ yếu tập trung đánh giá hiện trạng cấp nước tại một số địa phương hoặc theo từng chương trình, dự án riêng lẻ, chưa có nhiều nghiên cứu phân tích hệ thống cấp nước nông thôn theo đặc điểm vùng sinh thái, trong khi điều kiện địa hình, nguồn nước và phân bố dân cư giữa các vùng có sự khác biệt đáng kể. Thứ hai, việc phân tích mối quan hệ giữa loại nguồn nước khai thác (nước mặt, nước ngầm hoặc nguồn nước khác) với công nghệ xử lý được áp dụng trong các công trình cấp nước còn chưa được nghiên cứu đầy đủ, dẫn đến hạn chế trong việc lựa chọn công nghệ phù hợp với điều kiện tự nhiên và quy mô phục vụ. Bên cạnh đó, các nghiên cứu về mô hình quản lý công trình cấp nước nông thôn thường được xem xét độc lập, chưa gắn kết chặt chẽ với đặc điểm công nghệ xử lý và điều kiện nguồn nước, trong khi đây là những yếu tố có ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả vận hành và tính bền vững của hệ thống cấp nước.

Quảng Ninh là tỉnh có điều kiện tự nhiên đa dạng, bao gồm khu vực ven đô, đồng bằng, miền núi và hải đảo, với đặc điểm phân bố dân cư không đồng đều và điều kiện nguồn nước khác nhau giữa các khu vực. Sự phân hóa không gian này tạo ra những thách thức đáng kể trong đầu tư, vận hành và quản lý hệ thống cấp nước sinh hoạt nông thôn. Mặc dù tỉnh đã triển khai nhiều chương trình và dự án nhằm cải thiện điều kiện cấp nước sinh hoạt cho người dân, mức độ tiếp cận nước sạch, tình trạng công trình và khả năng đáp ứng quy chuẩn chất lượng nước giữa các khu vực vẫn còn sự chênh lệch đáng kể.

Xuất phát từ những vấn đề nêu trên, nghiên cứu này được thực hiện nhằm: (i) đánh giá hiện trạng hệ thống cấp nước sinh hoạt khu vực nông thôn tỉnh Quảng Ninh theo các vùng không gian đặc thù; (ii) phân tích mối quan hệ giữa loại nguồn nước khai thác và công nghệ xử lý được áp dụng trong các công trình cấp nước; và (iii) đề xuất các định hướng lựa chọn công nghệ xử lý và mô hình cấp nước phù hợp với điều kiện tự nhiên và đặc điểm nguồn nước của địa phương nhằm nâng cao độ tin cậy và tính bền vững của hệ thống cấp nước nông thôn.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là hệ thống cấp nước sinh hoạt khu vực nông thôn tỉnh Quảng Ninh, bao gồm các công trình cấp nước tập trung và bán tập trung đã được đầu tư xây dựng và đang vận hành đến năm 2025. Phạm vi nghiên cứu bao phủ khu vực nông thôn thuộc 13 đơn vị hành chính của tỉnh, với các điều kiện địa hình đặc thù như miền núi, ven biển và hải đảo.

2.2. Nguồn số liệu

Số liệu nghiên cứu được tổng hợp từ Đề án cấp nước sạch nông thôn tỉnh Quảng Ninh đến năm 2025, các báo cáo chuyên ngành của cơ quan quản lý nhà nước và đơn vị cấp nước tại địa phương, cùng hệ thống quy chuẩn, tiêu chuẩn kỹ thuật và văn bản pháp luật hiện hành liên quan đến lĩnh vực cấp nước. Các số liệu được rà soát, đối chiếu nhằm bảo đảm tính thống nhất và độ tin cậy trước khi sử dụng trong phân tích.

2.3. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu áp dụng cách tiếp cận tổng hợp, kết hợp phân tích định lượng và định tính nhằm đánh giá toàn diện hiện trạng hệ thống cấp nước sinh hoạt nông thôn tỉnh Quảng Ninh và đề xuất định hướng lựa chọn công nghệ phù hợp.

Số liệu thứ cấp được thu thập từ cơ quan quản lý chuyên ngành, cơ quan y tế và chính quyền địa phương trong giai đoạn gần nhất, bao gồm: tỷ lệ hộ sử dụng nước đạt quy chuẩn, quy mô và hiện trạng công trình cấp nước tập trung, công nghệ xử lý, mô hình quản lý vận hành và kết quả quan trắc chất lượng nước. Đồng thời, khảo sát thực địa được thực hiện tại các công trình đại diện cho khu vực đồng bằng, ven đô, miền núi và hải đảo nhằm cập nhật tình trạng kỹ thuật và khả năng đáp ứng QCVN 01-1:2024/BYT.

Hiện trạng được đánh giá theo bốn nhóm tiêu chí: (i) mức độ tiếp cận nước sạch; (ii) quy mô và tình trạng kỹ thuật công trình; (iii) công nghệ xử lý và mức độ đáp ứng quy chuẩn; và (iv) mô hình quản lý, hiệu quả vận hành. Phân tích thống kê mô tả và so sánh liên vùng được sử dụng để xác định các hạn chế chính liên quan đến chất lượng nước, tính ổn định và tính bền vững của hệ thống.

Trên cơ sở kết quả phân tích, nghiên cứu đề xuất định hướng lựa chọn công nghệ xử lý phù hợp theo đặc điểm nguồn nước và quy mô phục vụ.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Hiện trạng tiếp cận nước sạch khu vực nông thôn tỉnh Quảng Ninh

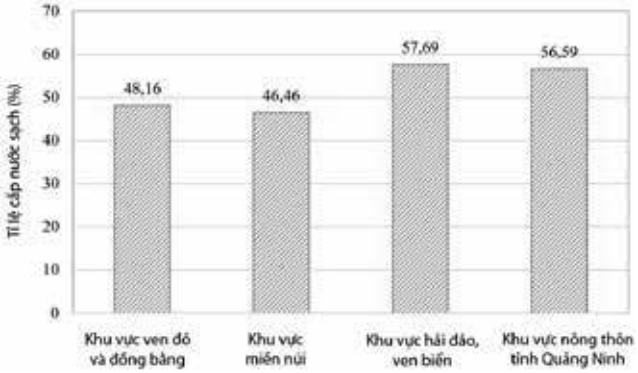
Tổng số dân toàn tỉnh Quảng Ninh là 1.375.727 người, trong đó dân nông thôn là 449.310 người chiếm tỉ lệ 32,66% tổng số dân toàn tỉnh. Tổng số hộ dân nông thôn trên toàn tỉnh: 118.464. Tổng số hộ dân nông thôn sử dụng nước sạch là: 67.432 hộ. Tỉ lệ sử dụng nước sạch theo QCVN 01-1:2024/BYTcủa tỉnh Quảng Ninh là 56,59% [2].

Kết quả tổng hợp và phân tích số liệu cho thấy hệ thống cấp nước sinh hoạt khu vực nông thôn tỉnh Quảng Ninh đã có những cải thiện đáng kể trong giai đoạn 2021-2024, thể hiện qua việc mở rộng phạm vi cấp nước và gia tăng tỷ lệ dân cư nông thôn được tiếp cận nước sạch từ các hệ thống cấp nước tập trung. Kết quả này chủ yếu đạt được nhờ đầu tư xây dựng mới, cải tạo các công trình cấp nước hiện có và mở rộng mạng lưới, đấu nối từ các hệ thống cấp nước đô thị. Tuy nhiên, mức độ tiếp cận nước sạch đáp ứng QCVN 01-1:2024/BYT giữa các địa phương vẫn còn sự chênh lệch rõ rệt (Hình 1).

Xét theo đặc điểm không gian và điều kiện tự nhiên, các địa phương nông thôn của tỉnh có thể phân thành ba nhóm chính: (i) khu vực ven đô và đồng bằng; (ii) khu vực miền núi; và (iii) khu vực hải đảo, ven biển. Nhóm các địa phương ven đô và đồng bằng, tiêu biểu khu vực Quảng Yên và một số xã giáp đô thị, có tỷ lệ tiếp cận nước sạch cao hơn so với mặt bằng chung. Nguyên nhân là do mật độ dân cư tương đối cao, phân bố tập trung và thuận lợi cho việc tích hợp cấp nước nông thôn với hệ thống cấp nước đô thị có công suất và công nghệ xử lý ổn định.

Ngược lại, tại các huyện miền núi như Bình Liêu, Ba Chẽ, tỷ lệ tiếp cận nước sạch còn thấp và thiếu ổn định. Địa hình đồi núi chia cắt, dân cư phân tán làm gia tăng chi phí đầu tư mạng lưới, trong khi nguồn nước cấp chủ yếu từ suối, khe nhỏ có lưu lượng biến động mạnh theo mùa, đặc biệt trong mùa khô. Những yếu tố này làm hạn chế khả năng mở rộng hệ thống cấp nước tập trung và ảnh hưởng đến việc đáp ứng yêu cầu của QCVN 01-1:2024/BYT.

Đối với các khu vực hải đảo và ven biển như Cô Tô, Vân Đồn, mặc dù đã được quan tâm đầu tư các công trình cấp nước tập trung, khả năng tiếp cận nước sạch vẫn chịu tác động lớn của điều kiện tự nhiên đặc thù. Việc thiếu nguồn nước ngọt ổn định, cùng với chi phí đầu tư và vận hành cao, khiến việc duy trì cấp nước bền vững gặp nhiều khó khăn, đặc biệt tại các khu vực có quy mô dân cư nhỏ và phân tán



Hình 1. Tỷ lệ cấp nước sạch khu vực nông thôn tỉnh Quảng Ninh [2]

(Ghi chú: Khu vực ven đô và đồng bằng bao gồm: Hạ Long, Uông Bí, Cẩm Phả, Móng Cái, Đông Triều, Quảng Yên; khu vực miền núi bao gồm: Tiên Yên, Ba Chẽ, Bình Liêu; khu vực hải đảo và ven biển bao gồm: Vân Đồn, Cô Tô, Đầm Hà, Hải Hà).

Nhìn chung, sự khác biệt về tỷ lệ tiếp cận nước sạch giữa các địa phương nông thôn trong tỉnh phản ánh rõ mối quan hệ giữa điều kiện địa hình, mật độ và phân bố dân cư, cũng như mức độ gắn kết giữa quy hoạch cấp nước nông thôn và quy hoạch phát triển hạ tầng đô thị. Các khu vực có điều kiện thuận lợi và dân cư tập trung đạt hiệu quả cấp nước cao hơn, trong khi các khu vực miền núi và hải đảo đòi hỏi cách tiếp cận linh hoạt, phù hợp với đặc thù không gian và nguồn nước.

3.2. Hiện trạng công trình cấp nước, công nghệ xử lý và chất lượng nước sinh hoạt

Hệ thống công trình cấp nước sinh hoạt nông thôn trên địa bàn tỉnh Quảng Ninh có sự đa dạng về quy mô, loại hình và điều kiện khai thác, phản ánh rõ đặc thù phân hóa không gian lãnh thổ của tỉnh. Phần lớn các công trình cấp nước tập trung nông thôn có quy mô nhỏ và trung bình, sử dụng nguồn nước mặt từ khe, suối, hồ chứa nhỏ; một số khu vực sử dụng nước ngầm hoặc kết hợp nhiều nguồn nước khác nhau. Các công trình này chủ yếu được đầu tư từ các giai đoạn trước, với công suất thiết kế hạn chế và công nghệ xử lý đơn giản, và khả năng vận hành không ổn định, đặc biệt trong mùa khô hoặc khi lưu lượng nguồn nước suy giảm.

Kết quả đánh giá cho thấy nhiều công trình cấp nước nông thôn hiện hữu vẫn áp dụng dây chuyền xử lý truyền thống, mức độ tự động hóa thấp, khả năng thích ứng với biến động chất lượng và lưu lượng nguồn nước còn hạn chế. Trong điều kiện mùa khô hoặc khi nguồn nước mặt suy giảm, một số công trình không bảo đảm đủ công suất cấp nước, đồng thời chất lượng nước sau xử lý thiếu ổn định. Các mẫu đảm bảo chất lượng nước theo QCVN 01-1:2024/BYT hầu hết là các mẫu sau xử lý tại các trạm cấp nước tập trung của các địa phương. Đa phần các mẫu phân tích chất lượng nước tại các hộ gia đình không có hệ thống xử lý nước không đảm bảo chất lượng nước theo QCVN 01-1:2024/BYT với chỉ tiêu về độ đục, chỉ số Pecmanganat, chỉ tiêu vi sinh Coliform và E.Coli [2].

Ở các khu vực ven đô và đồng bằng, việc mở rộng, đấu nối mạng lưới từ các nhà máy nước đô thị được đánh giá là giải pháp hiệu quả, giúp nâng cao độ bao phủ cấp nước và cải thiện đáng kể chất lượng nước sinh hoạt. Các hệ thống này thường có công nghệ xử lý đồng bộ, công suất lớn và quy trình kiểm soát chất lượng chặt chẽ, qua đó bảo đảm ổn định các chỉ tiêu chất lượng nước theo quy chuẩn. Ngược lại, tại các huyện miền núi và hải đảo, giải pháp đấu nối gặp nhiều hạn chế do địa hình chia cắt, khoảng cách xa và chi phí đầu tư mạng lưới lớn, khiến các công trình cấp nước độc lập quy mô nhỏ vẫn đóng vai trò chủ đạo.

Đánh giá chất lượng nước sau xử lý cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa các nhóm công trình, gắn liền với mô hình quản lý và năng lực vận hành hệ thống. Các công trình do doanh nghiệp hoặc đơn vị chuyên ngành quản lý nhìn chung đáp ứng tốt hơn các yêu cầu của QCVN 01-1:2024/BYT, nhờ áp dụng công nghệ xử lý phù hợp, duy trì chế độ vận hành ổn định và thực hiện kiểm soát chất lượng nước định kỳ. Trong khi đó, nhiều công trình do cộng đồng hoặc chính quyền cấp xã quản lý còn gặp khó khăn trong việc duy trì chất lượng nước ổn định, chủ yếu do hạn chế về nhân lực kỹ thuật, kinh phí vận hành và công tác bảo trì, nâng cấp thiết bị.

Kết quả này cho thấy chất lượng nước sinh hoạt nông thôn không chỉ phụ thuộc vào công nghệ xử lý mà còn chịu tác động mạnh mẽ từ mô hình quản lý và năng lực tổ chức vận hành. Công nghệ xử lý đơn giản, nếu không đi kèm với mô hình quản lý phù hợp và nguồn lực vận hành ổn định, sẽ khó bảo đảm chất lượng nước lâu dài. Ngược lại, các mô hình quản lý chuyên nghiệp có khả năng khai thác hiệu quả hơn năng lực công trình, nâng cao độ tin cậy của hệ thống cấp nước và kéo dài tuổi thọ đầu tư.

Như vậy, hiện trạng cấp nước nông thôn tỉnh Quảng Ninh cho thấy mối quan hệ chặt chẽ giữa lựa chọn công nghệ, mô hình quản lý và chất lượng nước sinh hoạt. Đây là cơ sở quan trọng để định hướng các giải pháp phát triển cấp nước nông thôn theo hướng bền vững, trong đó cần tiếp cận đồng bộ giữa đầu tư hạ tầng kỹ thuật và hoàn thiện cơ chế quản lý, vận hành hệ thống.

3.3. Đánh giá tổng hợp hệ thống cấp nước nông thôn tỉnh Quảng Ninh

3.3.1. Các tồn tại và hạn chế

Kết quả phân tích hiện trạng cho thấy hệ thống cấp nước nông thôn tỉnh Quảng Ninh đã có những cải thiện nhất định trong việc mở rộng phạm vi phục vụ, tuy nhiên vẫn tồn tại một số hạn chế chủ yếu liên quan đến điều kiện tự nhiên, tình trạng công trình, nguồn lực đầu tư và năng lực quản lý vận hành.

Thứ nhất, điều kiện địa hình và phân bố dân cư là yếu tố ảnh hưởng đáng kể đến hiệu quả đầu tư và vận hành hệ thống cấp nước. Quảng Ninh có địa hình phức tạp với nhiều khu vực miền núi và hải đảo, dân cư phân bố phân tán, làm gia tăng chi phí đầu tư tuyến ống truyền tải và phân phối, đồng thời làm giảm hiệu quả khai thác các công trình cấp nước tập trung.

Thứ hai, tình trạng kỹ thuật của nhiều công trình cấp nước nông thôn còn hạn chế. Một số công trình được đầu tư từ các giai đoạn trước với quy mô nhỏ và công nghệ xử lý đơn giản, đến nay đã

xuống cấp hoặc không còn đáp ứng đầy đủ yêu cầu của QCVN 01-1:2024/BYT. Đặc biệt, các công trình do cộng đồng quản lý thường gặp khó khăn trong công tác bảo trì, bảo dưỡng và duy trì chế độ vận hành ổn định.

Thứ ba, khó khăn trong huy động nguồn lực đầu tư cũng là một trong những trở ngại đối với phát triển cấp nước nông thôn. Tại nhiều khu vực có mật độ dân cư thấp, suất đầu tư hệ thống cấp nước cao trong khi khả năng thu hồi vốn hạn chế, làm giảm sức hấp dẫn đối với các doanh nghiệp tham gia đầu tư. Bên cạnh đó, quá trình triển khai một số dự án còn chậm do vướng mắc về quy hoạch, quỹ đất và cơ cấu nguồn vốn.

Thứ tư, công tác quản lý và vận hành sau đầu tư còn nhiều bất cập. Một số công trình thiếu nguồn kinh phí duy tu, bảo dưỡng định kỳ; giá bán nước chưa phản ánh đầy đủ chi phí sản xuất; nhân lực kỹ thuật vận hành còn thiếu và chưa được đào tạo bài bản. Ngoài ra, hệ thống mạng lưới được xây dựng qua nhiều giai đoạn với vật liệu không đồng bộ cũng làm gia tăng nguy cơ thất thoát nước.

Thứ năm, tỷ lệ đấu nối và thói quen sử dụng nước của người dân tại một số khu vực còn hạn chế. Nhiều hộ gia đình vẫn duy trì sử dụng nguồn nước tự khai thác như giếng khoan hoặc nước suối do chi phí thấp hoặc do thói quen sử dụng lâu dài, dẫn đến hiệu quả khai thác công trình cấp nước tập trung chưa cao.

3.3.2. Nguyên nhân của các hạn chế

Các tồn tại nêu trên xuất phát từ một số nguyên nhân chính. Trước hết, đặc điểm địa hình phức tạp và mật độ dân cư thấp tại nhiều khu vực nông thôn làm gia tăng chi phí đầu tư và vận hành hệ thống cấp nước tập trung. Bên cạnh đó, hạ tầng kỹ thuật chưa đồng bộ và công tác quản lý hành lang bảo vệ tuyến ống chưa chặt chẽ cũng làm tăng nguy cơ sự cố và thất thoát nước.

Ngoài ra, công nghệ xử lý nước tại nhiều công trình vẫn chủ yếu là các dây chuyền truyền thống, mức độ tự động hóa thấp và chưa được nâng cấp theo yêu cầu ngày càng cao của quy chuẩn chất lượng nước. Việc ứng dụng tiến bộ khoa học – công nghệ trong quản lý vận hành còn hạn chế, trong khi nguồn nhân lực kỹ thuật tại địa phương còn thiếu.

Mặt khác, cơ chế chính sách hỗ trợ phát triển cấp nước nông thôn chưa đủ hấp dẫn để thu hút doanh nghiệp tham gia đầu tư và khai thác công trình. Đồng thời, nhận thức và thói quen sử dụng nước của một bộ phận người dân chưa thay đổi, làm ảnh hưởng đến tỷ lệ đấu nối và hiệu quả khai thác hệ thống cấp nước.

3.3.3. Nhận xét tổng hợp

Tổng hợp các kết quả phân tích cho thấy hệ thống cấp nước nông thôn tỉnh Quảng Ninh đã đạt được một số kết quả trong việc mở rộng phạm vi phục vụ; tuy nhiên tính bền vững về kỹ thuật, tài chính và quản lý vận hành vẫn còn hạn chế. Những tồn tại này có mối liên hệ chặt chẽ với điều kiện tự nhiên, cơ chế chính sách và năng lực quản lý hệ thống. Do đó, việc lựa chọn công nghệ xử lý phù hợp, hoàn thiện mô hình quản lý và tăng cường nguồn lực cho vận hành, bảo trì công trình là những yếu tố quan trọng nhằm nâng cao hiệu quả và tính bền vững của hệ thống cấp nước nông thôn trong giai đoạn tới.

3.4 Định hướng lựa chọn công nghệ xử lý nước cấp nông thôn

Trên cơ sở các hạn chế về công nghệ xử lý và năng lực vận hành đã được xác định trong mục 3.2 và 3.3, nghiên cứu đề xuất định hướng lựa chọn công nghệ xử lý nước cấp nông thôn phù hợp với điều kiện nguồn nước và quy mô phục vụ tại tỉnh Quảng Ninh. Bên cạnh đó, trên cơ sở đánh giá hiện trạng nguồn nước, quy mô công trình và điều kiện phân bố dân cư khu vực nông thôn tỉnh Quảng Ninh, nghiên cứu đề xuất định hướng lựa chọn công nghệ xử lý nước sinh hoạt theo ba nhóm nguồn nước chính gồm: nước mặt, nước ngầm và nước mưa. Việc lựa chọn công nghệ cần bảo đảm các nguyên tắc: phù hợp với đặc điểm chất lượng nguồn nước, quy mô phục vụ, điều kiện vận hành tại địa phương và khả năng đáp ứng yêu cầu của QCVN 01-1:2024/BYT.

3.4.1. Giải pháp công nghệ đối với nguồn nước mặt

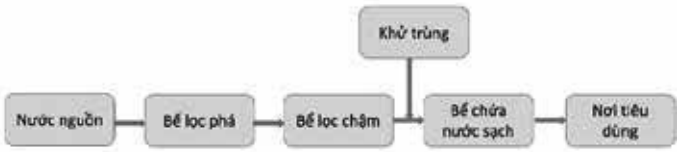
Nguồn nước mặt tại khu vực nông thôn Quảng Ninh chủ yếu khai thác từ suối, khe nhỏ hoặc hồ chứa, với đặc điểm hàm lượng cặn và độ màu biến động theo mùa. Đối với các hệ thống cấp nước tập trung quy mô vừa và lớn, có thể áp dụng dây chuyền xử lý truyền thống kết hợp keo tụ - lắng - lọc - khử trùng, cho phép điều chỉnh liều lượng hóa chất theo biến động chất lượng nước nguồn và bảo đảm hiệu quả xử lý ổn định.

Đối với các trạm cấp nước quy mô nhỏ phục vụ cụm dân cư nông thôn với nguồn nước có độ đục thấp, các công nghệ xử lý đơn giản như bể lọc chậm hoặc bể lọc chậm kết hợp lọc sơ bộ được đánh giá là phù hợp nhờ ưu điểm vận hành đơn giản, ít sử dụng hóa chất và chi phí đầu tư thấp. Trong trường hợp nguồn nước có độ đục cao, có thể sử dụng bể lắng lamella kết hợp bể lọc tự rửa dạng modul nhằm nâng cao hiệu quả xử lý và giảm yêu cầu can thiệp của người vận hành.

Mô hình 1. Sử dụng bể lọc chậm cho nguồn nước mặt không qua keo tụ

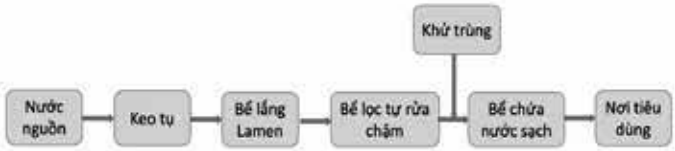
Hình 2. Công nghệ sử dụng bể lọc chậm cho nguồn nước mặt

Mô hình 2. Sử dụng bể lọc phá, sau đó sử dụng bể lọc chậm nguồn nước mặt



Hình 3. Công nghệ sử dụng bể lọc phá kết hợp bể lọc chậm cho nguồn nước mặt

Mô hình 3. Sử dụng bể lắng lamen, sau đó sử dụng bể lọc tự rửa cho nguồn nước mặt



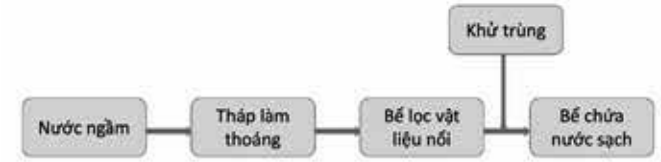
Hình 4. Công nghệ sử dụng bể lắng lamen kết hợp bể lọc tự rửa cho nguồn nước mặt

3.4.2. Giải pháp công nghệ đối với nguồn nước ngầm

Tại một số khu vực nông thôn của tỉnh, nguồn nước ngầm được khai thác từ các giếng khoan với đặc trưng phổ biến là hàm lượng sắt hòa tan cao. Đối với loại nguồn nước này, công nghệ xử lý chủ yếu dựa trên quá trình làm thoáng, oxy hóa và lọc nhằm chuyển hóa sắt hòa tan thành dạng kết tủa và loại bỏ qua lớp vật liệu lọc.

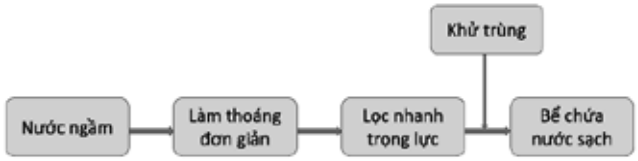
Các công nghệ phù hợp có thể bao gồm bể lọc vật liệu nổi kết hợp làm thoáng, công nghệ làm thoáng đơn giản kết hợp bể lọc, hoặc dây chuyền làm thoáng - bể tiếp xúc (hoặc lắng tiếp xúc) - bể lọc nhanh trọng lực đối với các hệ thống có hàm lượng sắt cao. Những công nghệ này có ưu điểm cấu tạo đơn giản, dễ vận hành và phù hợp với điều kiện kỹ thuật tại khu vực nông thôn.

Mô hình 4. Sử dụng bể lọc vật liệu lọc nổi cho nguồn nước ngầm



Hình 5. *Công nghệ sử dụng bể lọc vật liệu lọc nổi*

Mô hình 5. Sử dụng công nghệ làm thoáng đơn giản và lọc



Hình 6. Công nghệ làm thoáng đơn giản và lọc

Mô hình 6. Công nghệ làm thoáng - tiếp xúc hoặc lắng tiếp xúc- lọc nhanh trọng lực

Hình 7. Công nghệ làm thoáng - tiếp xúc hoặc lắng tiếp xúc- lọc nhanh trọng lực

3.4.3. Giải pháp sử dụng nguồn nước mưa

Đối với các khu vực hải đảo hoặc vùng khan hiếm nguồn nước ngọt, nước mưa có thể được xem là nguồn bổ sung quan trọng cho cấp nước sinh hoạt. Nước mưa sau khi thu gom và lưu trữ trong hồ hoặc bể chứa có thể được xử lý bằng bể lọc chậm kết hợp khử trùng, do đặc điểm hàm lượng cặn và độ đục của nước mưa thường thấp.

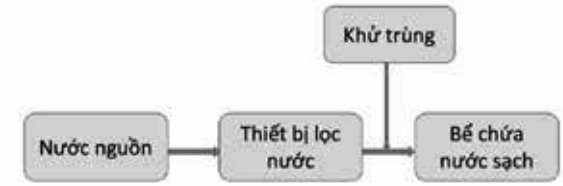
Mô hình 7. Công nghệ bể lọc chậm

Hình 8. Công nghệ bể lọc chậm

3.4.4. Giải pháp cấp nước quy mô hộ gia đình

Đối với các hộ dân phân bố rải rác tại vùng sâu, vùng xa, nơi việc đầu tư hệ thống cấp nước tập trung gặp nhiều khó khăn, có thể áp dụng thiết bị xử lý nước quy mô hộ gia đình hoặc nhóm hộ, với công suất từ 1–5 m^3/ngày. Các thiết bị này thường sử dụng các phương pháp lọc đơn giản kết hợp khử trùng nhằm bảo đảm chất lượng nước sử dụng cho sinh hoạt.

Mô hình 8. Thiết bị lọc nước quy mô hộ gia đình



Hình 9. Công nghệ thiết bị lọc nước quy mô hộ gia đình

Nhìn chung, việc lựa chọn công nghệ xử lý nước cấp nông thôn cần được xem xét đồng thời với quy mô công trình, đặc điểm nguồn nước và mô hình quản lý vận hành. Các giải pháp công nghệ có mức độ tự động hóa phù hợp, cấu tạo đơn giản và chi phí vận hành hợp lý sẽ góp phần nâng cao tính ổn định và bền vững của hệ thống cấp nước nông thôn.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu đã đánh giá tổng hợp hiện trạng hệ thống cấp nước sinh hoạt khu vực nông thôn tỉnh Quảng Ninh trên các phương diện: mức độ tiếp cận nước sạch, tình trạng công trình và công nghệ xử lý, chất lượng nước sau xử lý và mô hình quản lý vận hành. Kết quả nghiên cứu cho thấy tỷ lệ hộ dân nông thôn sử dụng nước đạt quy chuẩn QCVN 01-1:2024/BYT mới đạt 56,59%, đồng thời tồn tại sự chênh lệch rõ rệt giữa các khu vực ven đô, đồng bằng và các vùng miền núi, hải đảo.

Kết quả phân tích cũng cho thấy nhiều công trình cấp nước nông thôn quy mô nhỏ vẫn sử dụng công nghệ xử lý truyền thống, mức độ tự động hóa thấp và gặp hạn chế về nguồn lực vận hành, dẫn đến chất lượng nước sau xử lý chưa ổn định. Bên cạnh đó, mô hình quản lý vận hành có ảnh hưởng rõ rệt đến hiệu quả khai thác công trình; các hệ thống do doanh nghiệp hoặc đơn vị chuyên ngành quản lý thường đạt mức độ tuân thủ quy chuẩn và tính bền vững vận hành cao hơn so với mô hình cộng đồng tự quản.

Trên cơ sở đặc điểm nguồn nước và điều kiện không gian của địa phương, nghiên cứu đã đề xuất các định hướng lựa chọn công nghệ xử lý phù hợp cho từng loại nguồn nước và quy mô cấp nước, bao gồm các giải pháp xử lý nước mặt, nước ngầm, nước mưa và các thiết bị xử lý quy mô hộ gia đình. Các giải pháp này hướng tới việc nâng cao độ tin cậy của hệ thống, bảo đảm khả năng đáp ứng quy chuẩn chất lượng nước và phù hợp với điều kiện vận hành tại khu vực nông thôn.

Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc định hướng quy hoạch và lựa chọn công nghệ trong phát triển hệ thống cấp nước nông thôn tại tỉnh Quảng Ninh. Trong giai đoạn tới, để nâng cao tính bền vững của hệ thống cấp nước nông thôn, cần thực hiện đồng bộ các giải pháp về nâng cấp công nghệ xử lý, hoàn thiện mô hình quản lý vận hành, tăng cường nguồn lực tài chính cho công tác duy tu - bảo dưỡng công trình và nâng cao nhận thức của cộng đồng về sử dụng nước sạch.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Y tế. QCVN 01-1:2024/BYT - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt, 2024.

[2] Đề án cấp nước nông thôn tỉnh Quảng Ninh đến năm 2025, Sở Xây dựng tỉnh Quảng Ninh, 2025.

[3] Hòa, V. T., & Trang, N. T. D. Đánh giá thực trạng cấp nước và hiện trạng chất lượng nước cấp ở vùng nông thôn tỉnh Tiền Giang. Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ, 54(4), 31-39, 2018, doi: 10.22144/ctu.jvn.2018.066.

[4] Harvey, P.A., Reed, R.A. Community-managed water supplies in Africa: Sustainable or dispensable? Community Development Journal, 42, 365-378, 2007, doi:10.1093/cdj/bsl001.

[5] Lockwood, H., Smits, S. Supporting rural water supply: Moving towards a service delivery approach, Practical Action Publishing, 2011.

[6] WHO & UNICEF. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2020, Five years into the SDGs, 2021. https://www.who.int/publications/i/item/9789240030848 (Accessed: 03/2026).

[7] Trung tâm Quốc gia nước sạch và vệ sinh môi trường nông thôn. Bắc Ninh: Đánh giá hiệu quả hoạt động của các công trình nước sạch và vệ sinh môi trường nông thôn. Internet: https://ns.mard.gov.vn/tin-trong-nuoc/bac-ninh-danh-gia-hieu-qua-hoat-dong-cua-cac-cong-trinh-nuoc-sach-va-ve-sinh-moi-truong-nong-thon (Truy cập tháng 03/2026).

[8] Hùng Võ. Nước sạch nông thôn: Mới có khoảng 68% người dân được sử dụng nước đạt chuẩn. Internet: https://www.vietnamplus.vn/nuoc-sach-nong-thon-moi-co-khoang-68-nguoi-dan-duoc-su-dung-nuoc-dat-chuan-post1070835.vnp#google_vignette, (Truy cập tháng 03/2026).

■Ngày nhận bài: 03/3/2026 ■Ngày sửa bài: 10/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/3/2026

Kinh tế tuần hoàn: Hướng tiếp cận mới trong quản lý hệ thống thoát nước và xử lý nước thải đô thị Việt Nam

Circular economy: A new approach to the management of urban drainage and wastewater treatment systems in Vietnam

> THS VŨ HOÀNG ANH*, TS PHẠM VĂN DƯƠNG
Viện Đào tạo và Ứng dụng Khoa học công nghệ, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
*Email: anhvh@hau.edu.vn

TÓM TẮT

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh và yêu cầu phát triển bền vững, hệ thống thoát nước và xử lý nước thải đô thị Việt Nam đã có bước phát triển đáng kể về quy mô đầu tư và công suất xử lý. Tuy nhiên, mô hình quản lý hiện nay vẫn chủ yếu vận hành theo tiếp cận tuyến tính "thu gom - xử lý - xả thải", chưa khai thác hiệu quả giá trị tài nguyên thứ cấp từ nước thải. Bài báo phân tích hiện trạng hạ tầng và cơ chế quản lý hệ thống xử lý nước thải (XLNT) đô thị Việt Nam, trên cơ sở đó đề xuất định hướng chuyển đổi mô hình quản lý theo tiếp cận kinh tế tuần hoàn (KTTH) nhằm nâng cao hiệu quả tài nguyên, giảm phát thải và tăng tính bền vững của hệ thống hạ tầng kỹ thuật đô thị.

Từ khóa: Thoát nước đô thị; xử lý nước thải; kinh tế tuần hoàn; quản lý hạ tầng; tài nguyên thứ cấp.

ABSTRACT

In the context of rapid urbanization and increasing demands for sustainable development, Vietnam's urban drainage and wastewater treatment systems have experienced significant growth in terms of investment scale and treatment capacity. However, the current management model still primarily operates under a linear approach of "collection - treatment - discharge," without effectively exploiting the value of secondary resources derived from wastewater. This paper analyzes the current status of infrastructure and management mechanisms of urban wastewater treatment systems in Vietnam, and on that basis proposes a transition toward a circular economy-based management model to enhance resource efficiency, reduce emissions, and improve the sustainability of urban technical infrastructure systems.

Keywords: Urban drainage; wastewater treatment; circular economy; infrastructure management; secondary resources.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống thoát nước và xử lý nước thải là một trong những cấu phần hạ tầng kỹ thuật thiết yếu của đô thị, đóng vai trò bảo vệ môi trường, kiểm soát ngập úng và đảm bảo chất lượng sống cho người dân. Trong những năm qua, cùng với quá trình đô thị hóa, Việt Nam đã tăng cường đầu tư xây dựng các nhà máy xử lý nước thải tập trung tại các đô thị lớn, theo định hướng phát triển cấp thoát nước đến năm 2025 và tầm nhìn 2050 [1].

Trong những thập kỷ gần đây, quá trình đô thị hóa diễn ra mạnh mẽ cùng với sự gia tăng dân số cơ học và việc mở rộng không gian xây dựng đã và đang đặt ra những thách thức nghiêm trọng đối với hệ thống hạ tầng kỹ thuật đô thị. Cụ thể, năng lực của hệ thống thoát nước hiện hữu ngày càng bộc lộ sự quá tải do không theo kịp tốc độ phát triển, dẫn đến các hệ lụy trực tiếp về suy giảm chất lượng môi trường nước mặt và gia tăng rủi ro ngập lụt.

Đáng chú ý, phương thức quản lý và vận hành hệ thống nước thải đô thị hiện nay phần lớn vẫn đang bị giới hạn bởi mô hình kinh tế tuyến tính truyền thống. Hệ quả tất yếu của tư duy quản lý này là sự lãng phí nghiêm trọng các giá trị tài nguyên tiềm ẩn. Nước thải đô thị và bùn thải phát sinh, thay vì bị xem là gánh nặng xử lý tiêu tốn năng lượng, thực chất là một nguồn cung cấp dồi dào các tài nguyên có giá trị cao, bao gồm: nguồn nước tái sử dụng, năng lượng tái tạo và các dưỡng chất nông nghiệp thiết yếu. Do đó, việc thiếu hụt các cơ chế và công nghệ thu hồi tài nguyên không chỉ làm giảm hiệu quả kinh tế của các công trình xử lý mà còn cản trở tiến trình chuyển đổi sang nền KTTH trong lĩnh vực nước tại Việt Nam.

Trong bối cảnh Luật Bảo vệ môi trường 2020 [2] và Luật Tài nguyên nước 2023 [3] nhấn mạnh yêu cầu tái sử dụng và phát triển bền vững, việc nghiên cứu hiện trạng và đề xuất định hướng quản lý hệ thống thoát nước theo tiếp cận KTTH là cần thiết. Bài báo sử dụng kết hợp các phương pháp gồm: tổng hợp và phân tích các tài liệu pháp lý, báo cáo hiện trạng môi trường quốc gia [4]; phân tích so sánh giữa mô hình quản lý tuyến tính và tuần hoàn; tiếp cận hệ thống (system approach) để đánh giá cấu trúc quản lý và cơ chế tài chính; đồng thời tổng hợp kinh nghiệm quốc tế về áp dụng KTTH trong lĩnh vực nước thải [5], [6].

2. HIỆN TRẠNG HỆ THỐNG XLNT ĐÔ THỊ VIỆT NAM

2.1. Quy mô và phân bố hạ tầng

Trong hơn một thập kỷ qua, cơ sở hạ tầng thu gom và XLNT tại Việt Nam đã ghi nhận những bước tiến đáng kể về quy mô đầu tư và tổng công suất thiết kế. Hàng loạt các dự án nhà máy XLNT tập trung quy mô lớn đã được triển khai và đưa vào vận hành, song chủ yếu tập trung tại các cực tăng trưởng kinh tế, đô thị đặc biệt và đô thị loại I, II như Thủ đô Hà Nội, TP.HCM, Đà Nẵng và Hải Phòng. Mặc dù sự gia tăng về công suất thiết kế là một tín hiệu tích cực, bức tranh tổng thể về hạ tầng XLNT quốc gia vẫn bộc lộ sự phát triển phi đối xứng và phân bố không gian thiếu đồng bộ giữa các vùng kinh tế - sinh thái.

Sự phân mảnh này thể hiện rõ nét tại các đô thị loại III trở xuống và các khu vực ven đô, nơi mạng lưới thu gom và năng lực xử lý tập trung vẫn còn rất hạn chế, chưa đáp ứng được tốc độ phát triển dân cư. Tại các khu vực này, phương thức quản lý nước thải vẫn mang tính tự phát; phần lớn lượng nước thải sinh hoạt chỉ được xử lý sơ bộ thông qua các công trình vệ sinh tại chỗ (điển hình là công nghệ bể tự hoại truyền thống) với hiệu suất loại bỏ chất ô nhiễm thấp, hoặc nguy hiểm hơn là xả thải trực tiếp ra hệ thống kênh rạch và thủy vực tự nhiên. Tình trạng thiếu hụt hạ tầng đồng bộ này không chỉ làm vượt quá khả năng tự làm sạch của các nguồn nước tiếp nhận, gây suy thoái hệ sinh thái thủy sinh, mà còn tạo ra rào cản lớn cho việc áp dụng các mô hình thu hồi tài nguyên và KTTH trên diện rộng.

2.2. Thực trạng tỷ lệ bao phủ dịch vụ và bài toán hiệu năng vận hành

Căn cứ theo chuỗi số liệu từ Báo cáo hiện trạng môi trường quốc gia [4], tỷ lệ bao phủ dịch vụ thu gom và XLNT sinh hoạt đô thị đạt chuẩn kỹ thuật tại Việt Nam vẫn duy trì ở mức khiêm tốn, tạo ra khoảng cách lớn so với các mục tiêu phát triển hạ tầng bền vững. Đáng quan ngại hơn, đang hiện hữu một nghịch lý kỹ thuật về "thừa công suất thiết kế, thiếu lưu lượng đầu vào" tại nhiều dự án xử lý tập trung. Nhiều nhà máy quy mô lớn phải vận hành dưới tải do nút thắt trong tỷ lệ đấu nối hộ gia đình vào mạng lưới thu gom cấp 3 còn rất hạn chế.

Bên cạnh đó, di sản của quy hoạch hạ tầng giai đoạn trước để lại là sự áp đảo của hệ thống thoát nước chung, nơi nước thải sinh hoạt bị pha loãng bởi dòng chảy mặt từ nước mưa. Đặc thù của mạng lưới hỗn hợp này không chỉ làm suy giảm nồng độ chất ô nhiễm đầu vào, gây khó khăn cho việc duy trì sinh khối vi sinh ổn định trong các bể phản ứng, mà còn làm tăng đột biến tải lượng thủy lực trong mùa mưa. Hệ quả tất yếu là hiệu suất xử lý sinh học bị sụt giảm nghiêm trọng, đồng thời làm đội chi phí vận hành và gia tăng rủi ro tràn xả hỗn hợp trực tiếp ra nguồn tiếp nhận.

2.3. Nút thắt công nghệ: Sự chi phối của tư duy "xử lý cuối đường ống"

Về mặt công nghệ cốt lõi, bức tranh toàn cảnh của các trạm XLNT sinh hoạt tại Việt Nam hiện nay chủ yếu xoay quanh các dây chuyền sinh học truyền thống. Các quy trình phổ biến có thể kể đến như công nghệ xử lý sinh học theo mẻ (SBR), công nghệ bùn hoạt tính tuần hoàn liên tục (AAO-Anaerobic-Anoxic-Oxic), hệ thống hồ sinh học ổn định, và ở mức độ thấp hơn là hệ thống xử lý kỵ khí dòng chảy ngược (UASB).

Định hướng thiết kế của các dây chuyền công nghệ này phần lớn bị chi phối bởi tư duy tuân thủ pháp lý tuyến tính. Mục tiêu tối thượng của chúng chỉ dừng lại ở việc tối ưu hóa quá trình oxy hóa sinh hóa nhằm loại bỏ các chỉ tiêu ô nhiễm cơ bản (như BOD, COD, TSS và một phần N, P) để đảm bảo chất lượng nước đầu ra đáp ứng các Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về môi trường hiện hành [7].

Bối cảnh nêu trên phản ánh một thực tế bất cập: hệ thống hạ tầng XLNT hiện tại mới chỉ đóng vai trò là "cơ sở tiêu thụ năng lượng để xử lý ô nhiễm" thuần túy. Sự thiếu vắng hoàn toàn các module công nghệ tuần hoàn tiên tiến như hệ thống phân hủy bùn kỵ khí thu hồi Biogas để đồng phát nhiệt điện, màng lọc tái sử dụng nước, hay công nghệ kết tủa thu hồi khoáng chất dinh dưỡng, đã vô tình triệt tiêu các cơ hội chuyển đổi nhà máy xử lý thành "Cơ sở Thu hồi Tài nguyên" (WRRF). Sự chậm trễ trong chuyển giao công nghệ thu hồi này đang làm lãng phí một chuỗi giá trị thặng dư khổng lồ từ dòng thải đô thị, đi ngược lại triết lý tối ưu hóa tài nguyên của KTTH.

3. THỰC TRẠNG QUẢN LÝ VÀ CƠ CHẾ TÀI CHÍNH

3.1. Sự phân mảnh trong cơ cấu tổ chức và quản trị vận hành

Công tác quản lý hệ thống thoát nước và xử lý nước thải đô thị hiện nay tại Việt Nam được thực hiện theo cơ chế phân cấp cho chính quyền địa phương, thông qua các doanh nghiệp công ích hoặc đơn vị tư nhân theo mô hình đặt hàng dịch vụ. Tuy nhiên, mô hình này đang bộc lộ những hạn chế về tính liên kết hệ thống. Sự thiếu hụt các cơ chế phối hợp liên ngành dẫn đến tình trạng quản lý bị chia cắt theo địa giới hành chính thay vì theo lưu vực sông, đơn vị quản lý tài nguyên nước tối ưu nhất. Sự đứt gãy trong việc kiểm soát nguồn thải đầu nguồn và quản lý vận hành nhà máy đầu cuối gây khó khăn cho việc kiểm soát tải lượng ô nhiễm biến thiên, làm giảm tính ổn định kỹ thuật của các dây chuyền xử lý tập trung.

3.2. Thách thức từ cơ chế tài chính và rào cản tái đầu tư

Một trong những nút thắt lớn nhất kìm hãm sự phát triển bền vững của ngành nước thải là sự mất cân đối trong cơ cấu tài chính. Tại đa số các đô thị, giá dịch vụ thoát nước và xử lý nước thải vẫn chưa được tính đúng, tính đủ, dẫn đến doanh thu không đủ bù đắp chi phí vận hành bảo trì (O&M) và khấu hao tài sản cố định. Tình trạng phụ thuộc sâu vào ngân sách bao cấp không chỉ gây áp lực lên tài chính công mà còn triệt tiêu động lực đổi mới công nghệ của các đơn vị vận hành.

Đặc biệt, trong bối cảnh KTTH, Việt Nam vẫn chưa thiết lập được khung pháp lý về thương mại hóa các sản phẩm thu hồi. Thiếu các quy định về giá mua điện sinh học, tiêu chuẩn thương mại cho bùn thải sau xử lý hay đơn giá cho nước tái sử dụng đã khiến các giá trị kinh tế tiềm ẩn từ dòng thải bị bỏ ngỏ, làm mất đi nguồn thu quan trọng để tái đầu tư hạ tầng.

3.3. Sự lạc hậu trong tư duy quản trị vòng đời hạ tầng

Hệ thống quản lý hiện hành vẫn đang vận hành một cách rập khuôn theo mô hình kinh tế tuyến tính: **Khai thác → Sử dụng → Xả thải**. Tư duy này mặc định nước thải là chất thải cần loại bỏ thay vì coi đó là "nguồn tài nguyên thứ cấp" trong chu trình tuần hoàn đô thị.

Sự hạn chế này còn thể hiện rõ ở việc thiếu hụt quản trị vòng đời tài sản các bộ chỉ số đánh giá hiệu quả dựa trên mức độ tuần hoàn. Hiện nay, các đơn vị quản lý chỉ tập trung vào việc tuân thủ các chỉ số đầu ra mà chưa có các tiêu chí đánh giá về mức độ thu hồi năng lượng, tỷ lệ tái sử dụng nước hay hiệu quả giảm phát thải carbon. Việc thiếu một "thước đo xanh" khiến các nhà quản lý hạ tầng thiếu cơ sở dữ liệu để ra quyết định chuyển đổi mô hình từ nhà máy XLNT truyền thống sang các cơ sở thu hồi tài nguyên thông minh.

4. TIẾP CẬN KTTH TRONG CHIẾN LƯỢC QUẢN LÝ NƯỚC THẢI ĐÔ THỊ

Việc chuyển đổi từ mô hình quản lý tuyến tính sang KTTH không thuần túy là sự thay đổi về mặt công nghệ, mà là một sự tái cấu trúc toàn diện về tư duy hạ tầng. Trong lĩnh vực nước, KTTH hướng tới việc tối ưu hóa giá trị của nước trong suốt vòng đời sử dụng, biến các nhà máy xử lý nước thải thành các trung tâm sản xuất tài nguyên.

4.1. Các nguyên lý cốt lõi và trụ cột kỹ thuật

Mô hình KTTH trong quản lý nước thải sinh hoạt được xây dựng dựa trên năm trụ cột chiến lược sau đây:

Tái sử dụng nước sau xử lý: Thay vì xả thải trực tiếp ra nguồn tiếp nhận, nước sau xử lý thông qua các công nghệ lọc màng tiên tiến (như MBR, UF/RO) được xem là nguồn cấp nước thay thế. Nguồn nước này có thể đáp ứng đa dạng các nhu cầu: từ tưới tiêu đô thị, rửa đường, đến phục vụ các quy trình công nghiệp và bổ sung nhân tạo cho tầng chứa nước ngầm.

Thu hồi năng lượng từ bùn thải: Khai thác giá trị nhiệt lượng và tiềm năng sinh hóa trong bùn thải thông qua quá trình phân hủy kỵ khí hiệu suất cao. Việc thu hồi khí sinh học để đồng phát nhiệt - điện không chỉ

giúp nhà máy hướng tới mục tiêu trung hòa năng lượng mà còn giảm thiểu đáng kể chi phí vận hành.

Thu hồi dinh dưỡng: Nước thải đô thị chứa hàm lượng lớn Nitơ và Phốt pho- những nguyên tố thiết yếu cho sản xuất nông nghiệp. Thay vì tiêu tốn năng lượng để loại bỏ các nguyên tố này, cách tiếp cận tuần hoàn tập trung vào công nghệ kết tủa (ví dụ: thu hồi dưới dạng khoáng vật Struvite) để sản xuất phân bón hữu cơ chất lượng cao.

Giảm phát thải khí nhà kính: KTTH đóng góp trực tiếp vào mục tiêu Net Zero thông qua việc thu giữ khí Methane từ bùn thải và tối ưu hóa các quy trình sinh học để giảm thiểu phát thải Nitrous oxide. Đồng thời, việc tái sử dụng tài nguyên tại chỗ giúp giảm đáng kể dấu chân Carbon so với việc khai thác tài nguyên nguyên sinh.

Tái đầu tư nguồn thu vào hệ thống: Điểm khác biệt lớn nhất của KTTH là tạo ra giá trị thặng dư kinh tế. Doanh thu từ việc bán nước tái sử dụng, điện năng dư thừa và phân bón hữu cơ được tái đầu tư để bảo trì và nâng cấp hạ tầng. Điều này giúp hình thành một cơ chế tài chính tự chủ, giảm bớt sự phụ thuộc vào ngân sách công và tăng sức hấp dẫn đối với các nhà đầu tư tư nhân.

4.2. Đối chiếu đặc tính vận hành giữa mô hình Tuyến tính và mô hình Tuần hoàn

Sự chuyển dịch từ quản lý nước thải truyền thống sang quản lý tài nguyên nước tuần hoàn đại diện cho một bước nhảy vọt về cả tư duy lẫn công nghệ. Bảng dưới đây tổng hợp các khác biệt cốt lõi phục vụ công tác hoạch định chính sách và đầu tư hạ tầng:

Tiêu chí đối chiếu	Mô hình Tuyến tính truyền thống	Mô hình KTTH
Mục tiêu chiến lược	Giảm thiểu ô nhiễm, các tác động tiêu cực	Tối đa hóa giá trị thặng dư
Quản lý tài nguyên	Loại bỏ và tiêu hủy	Thu hồi và tái tạo
Cơ chế tài chính	Phụ thuộc ngân sách nhà nước	Tự chủ một phần và tạo doanh thu
Tác động môi trường	Không tối ưu hóa phát thải	Giảm phát thải

Từ bảng so sánh trên, có thể thấy mô hình tuyến tính hiện nay tại các đô thị Việt Nam đang tạo ra một trạng thái "lãng phí kép": vừa mất chi phí khổng lồ để xử lý ô nhiễm, vừa bỏ lỡ nguồn nguyên liệu tái tạo quan trọng.

Việc chuyển đổi sang mô hình tuần hoàn không chỉ giúp các đô thị giải quyết bài toán khủng hoảng bùn thải và thiếu hụt nước sạch, mà còn là chìa khóa để đạt được các cam kết quốc tế về phát triển bền vững. Đặc biệt, khía cạnh "Tự chủ một phần" về tài chính thông qua việc thu hồi tài nguyên chính là đòn bẩy để thu hút các nhà đầu tư tư nhân tham gia vào lĩnh vực hạ tầng kỹ thuật, vốn từ trước đến nay vẫn bị coi là lĩnh vực đầu tư rủi ro và chậm thu hồi vốn.

4.3. Đánh giá tiềm năng và ranh giới thực thi tại bối cảnh Việt Nam

Tiềm năng ứng dụng mô hình kinh tế tuần hoàn trong lĩnh vực nước thải tại Việt Nam là rất lớn, xuất phát từ nhu cầu cấp bách về tài nguyên và áp lực giảm thiểu ô nhiễm môi trường. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu gây ra tình trạng hạn hán và xâm nhập mặn cực đoan, nước thải sau xử lý đạt chuẩn có thể trở thành nguồn nước thay thế chiến lược cho nông nghiệp và các ngành công nghiệp tiêu thụ nước lớn như dệt nhuộm, sản xuất giấy hoặc làm mát thiết bị. Việc tái sử dụng nước không chỉ giúp giảm bớt áp lực khai thác nước ngầm đang dần cạn kiệt mà còn tạo ra một chu trình sử dụng nước bền vững tại các đô thị phát triển nóng.

Song song với đó, khối lượng bùn thải phát sinh khổng lồ tại các đô thị lớn như Hà Nội và TP.HCM nếu được xử lý ổn định bằng công nghệ phân hủy kỵ khí có thể thu hồi khí sinh học (biogas) phục vụ phát điện, góp phần vào mục tiêu tự chủ năng lượng tại chỗ của nhà máy. Đồng thời, bùn thải sau xử lý giàu dinh dưỡng là nguồn nguyên liệu tiềm năng để sản xuất vật liệu cải tạo đất hoặc phân bón hữu cơ, thay thế cho các phương pháp chôn lấp truyền thống đang quá tải. Tuy nhiên, để hiện thực hóa những tiềm năng này, Việt Nam cần sớm giải quyết các "nút thắt" về cơ chế pháp lý, đặc biệt là việc xây dựng hệ thống quy chuẩn kỹ thuật cho các sản phẩm tái tạo từ nước thải và thiết lập khung giá, chính sách ưu đãi tài chính để khuyến khích các nhà đầu tư tham gia vào chuỗi giá trị tuần hoàn.

5. NHỮNG VẤN ĐỀ ĐẶT RA: RÀO CẢN VÀ THÁCH THỨC

Dù tiềm năng là rất lớn, nhưng để thực hiện hóa tầm nhìn tuần hoàn tại Việt Nam, chúng ta đang đối mặt với 4 "điểm nghẽn" chiến lược sau:

1. Khoảng trống lý luận: Việt Nam hiện thiếu một khung lý thuyết thống nhất về quản lý thoát nước theo triết lý tuần hoàn, khiến các chính sách phát triển hạ tầng vẫn mắc kẹt trong tư duy "xử lý cuối đường ống" truyền thống.

2. Sự thiếu hụt "Thước đo xanh": Chưa có hệ thống tiêu chí và bộ chỉ số định lượng để đánh giá mức độ tuần hoàn của hệ thống hạ tầng, dẫn đến sự thiếu hụt cơ sở dữ liệu trong việc ra quyết định đầu tư và quản lý.

3. Nghịch lý tài chính: Cơ chế giá dịch vụ hiện tại chưa tính đúng - tính đủ, thiếu các công cụ khuyến khích kinh tế (tín dụng xanh, trợ giá sản phẩm tái chế) để thu hút tư nhân tham gia khai thác tài nguyên thứ cấp.

4. Bài toán thực thi tại siêu đô thị: Hà Nội và các đô thị lớn đang thiếu các mô hình thực chứng đặc thù để chuyển đổi hệ thống hạ tầng cũ kỹ thành những thực thể tuần hoàn trong điều kiện quỹ đất và nguồn lực tài chính hạn chế.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu cho thấy hệ thống xử lý nước thải đô thị tại Việt Nam đang đứng trước một ngưỡng cửa chuyển đổi mang tính lịch sử. Mặc dù đã có những bước tiến dài về quy mô đầu tư và năng lực thiết kế trong hơn một thập kỷ qua, nhưng thực trạng vận hành vẫn bị kìm hãm bởi tư duy quản lý tuyến tính lỗi thời. Việc chỉ tập trung vào mục tiêu xử lý ô nhiễm đầu ra mà bỏ qua giá trị thặng dư của dòng thải đã dẫn đến một hệ quả tất yếu: hệ thống hạ tầng trở thành gánh nặng cho ngân sách công, thiếu tính bền vững về tài chính và lãng phí nguồn tài nguyên thứ cấp quý giá.

Chuyển đổi sang mô hình quản trị theo tiếp cận KTTH không còn là một lựa chọn khuyến khích, mà là một xu thế tất yếu để cứu vẫn hiệu quả đầu tư hạ tầng đô thị. Việc chuyển dịch này không chỉ giúp tối ưu hóa giá trị tài nguyên, giảm thiểu dấu chân carbon để hướng tới mục tiêu Net Zero, mà còn kiến tạo một cơ chế tài chính tự chủ, linh hoạt hơn cho các đô thị. Tuy nhiên, hành trình này đòi hỏi một lộ trình bài bản, bắt đầu từ việc kiện toàn khung lý luận, xây dựng bộ chỉ số đánh giá chuẩn mực đến việc thiết lập các đòn bẩy kinh tế đủ mạnh. Chỉ khi ranh giới giữa nước thải và tài nguyên được xóa bỏ bằng các chính sách đột phá, các đô thị Việt Nam mới có thể thực sự chạm đến mục tiêu phát triển bền vững và thịnh vượng trong tương lai.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Thủ tướng Chính phủ, Quyết định số 589/QĐ-TTg về việc phê duyệt điều chỉnh định hướng phát triển thoát nước đô thị và khu công nghiệp Việt Nam đến năm 2025 và tầm nhìn đến năm 2050, 2016.

[2] Quốc hội, Luật Bảo vệ môi trường số 72/2020/QH14, 2020.

[3] Quốc hội, Luật Tài nguyên nước số 28/2023/QH15, 2023.

[4] Bộ Tài nguyên và Môi trường, Báo cáo hiện trạng môi trường quốc gia, 2022.

[5] Ramírez-Agudelo, N.A. et al, Exploring alternative practices in urban water management through the lens of circular economy, Journal of Cleaner Production, 329, 2021.

[6] Daniel, I. et al, A survey of water utilities' digital transformation: drivers, impacts, and enabling technologies, npj Clean Water, 2023.

[7] Bộ Xây dựng, QCVN 07:2023/BXD - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về hệ thống công trình hạ tầng kỹ thuật, 2023.

[8] Thủ tướng Chính phủ, Quyết định số 687/QĐ-TTg về việc phê duyệt Đề án phát triển kinh tế tuần hoàn ở Việt Nam, 2022.

[9] World Bank. Wastewater: From Waste to Resource - The Case of Vietnam. World Bank Publications, Washington, DC, tr. 1-120, 2020, doi:10.1596/978-1-4648-1457-4.

[10] UNEP. Circular Economy Approaches in Wastewater Management. United Nations Environment Programme, Nairobi, tr. 1-80, 2019.

■Ngày nhận bài: 03/3/2026 ■Ngày sửa bài: 16/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 26/3/2026

Dự báo mức độ nhiễm mặn khu vực hạ lưu sông Thái Bình và sông Luộc tại TP Hải Phòng để lựa chọn vị trí công trình thu nước hợp lý

Forecasting salinity intrusion in the downstream areas of the Thai Bình and Luoc rivers in Hai Phong city for the selection of appropriate water intake locations

> TS NGUYỄN VĂN HIỂN
Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
Email: nguyenvanhien.hau@gmail.com

TÓM TẮT

Hiện nay, theo kết quả quan trắc thường xuyên của địa phương tại cống ngăn triều phía hạ lưu sông Thái Bình, cụ thể là cống Kim Đới 2 (cách khoảng 5 km về phía hạ lưu, tính từ điểm giao với sông Luộc), kết hợp với khảo sát thực tế của tác giả vào các ngày 27/02/2026 và 28/02/2026 trên hạ lưu các sông Thái Bình, sông Luộc và sông Bắc Hưng Hải, cho thấy hiện tượng xâm nhập mặn đang có xu hướng ngày càng lấn sâu về phía thượng lưu các sông thuộc TP Hải Phòng. Nguyên nhân chủ yếu là do nước biển dâng, triều cường, cùng với việc các đập thủy điện điều tiết làm suy giảm lượng nước ngọt từ thượng lưu sông Hồng đổ về, đặc biệt trong mùa khô hằng năm. Vì vậy, việc đánh giá hiện trạng nhiễm mặn và dự báo mức độ rủi ro xâm nhập mặn tại hạ lưu các sông là hết sức cấp bách, nhằm phục vụ lựa chọn vị trí công trình thu nước thô, đáp ứng nhu cầu sinh hoạt, công nghiệp và tưới tiêu.

Từ khóa: Mức độ nhiễm mặn; vị trí công trình thu nước.

ABSTRACT

Currently, based on regular monitoring results conducted by the local authority at the tidal control sluice located downstream of the Thai Binh River-specifically at Kim Đoi 2 sluice (approximately 5 km downstream from the confluence with the Luộc River)-combined with field surveys carried out by the author on February 27 and 28, 2026, along the downstream sections of the Thai Binh, Luoc, and Bac Hung Hai rivers, it has been observed that saltwater intrusion is increasingly penetrating upstream into river systems within Hai Phong City. The primary causes include sea level rise, high tides, and the regulation of upstream freshwater flow by hydropower dams on the Red River, resulting in reduced freshwater discharge into these rivers, especially during the annual dry season. Therefore, assessing the current state of salinity intrusion and forecasting the associated risks in downstream river areas is extremely urgent. This will support the evaluation and selection of suitable locations for raw water intake structures to meet domestic, industrial, and irrigation demands.

Keywords: Salinity level; water intake location.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh nhiều tỉnh thành ở nước ta có hạ lưu sông đổ ra biển, trong đó có TP Hải Phòng, hiện tượng nước sông bị nhiễm mặn do triều cường thường xuyên xảy ra, ảnh hưởng không nhỏ tới cấp nước như tưới tiêu, cấp nước cho nhu cầu sinh hoạt của người dân, nhu cầu công nghiệp và các nhu cầu thiết yếu khác.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT DỰ BÁO MỨC ĐỘ NHIỄM MẶN VÀ LỰA CHỌN VỊ TRÍ CÔNG TRÌNH THU NƯỚC

2.1. Phương pháp tiếp cận

Để dự báo được mức độ nhiễm mặn tại hạ lưu các sông Thái Bình và sông Luộc, tác giả sử dụng các phương pháp tiếp cận sau:

Phương pháp điều tra, khảo sát, thu thập dữ liệu thực tế tại địa phương: tác giả đã tiến hành khảo sát thực tế tại xã Kiến Thụy, TP Hải Phòng (như khảo sát thực địa, chụp ảnh, lấy mẫu nước, đo nhanh độ mặn bằng máy đo cầm tay, tham khảo ý kiến người dân sinh sống tại khu vực) và thu thập số liệu thực tế nhiều năm liền tại trạm đo đặt tại cống Kim Đới 2 (số liệu về độ nhiễm mặn, số liệu thủy văn, thủy triều đặt tại Hòn Dấu);

Phương pháp bản đồ: dựa trên số liệu bản đồ quy hoạch khu vực hạ lưu các sông Thái Bình và sông Luộc, bản đồ định vị thông tin địa lý về không gian khu vực cần khảo sát.

2.2. Các luật, nghị định, quyết định, quy chuẩn và tiêu chuẩn của Chính phủ và các bộ, ngành

Luật Tài nguyên nước số 28/2023/QH15, ngày 27/11/2023: Luật gồm 10 chương, 86 điều, quy định về quản lý, bảo vệ, điều hòa, phân phối, phục hồi, phát triển, khai thác và sử dụng tài nguyên nước; phòng, chống và khắc phục tác hại do nước gây ra trên lãnh thổ nước Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam.

Luật Bảo vệ môi trường số 72/2020/QH14, ngày 17/11/2020: Luật gồm 16 chương, 171 điều, quy định về hoạt động bảo vệ môi trường; quyền, nghĩa vụ và trách nhiệm của cơ quan, tổ chức, cộng đồng dân cư, hộ gia đình và cá nhân; áp dụng đối với các đối tượng này trên lãnh thổ nước Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam.

Nghị định số 124/2011/NĐ-CP, ngày 28/12/2011: Nghị định của Chính phủ về sửa đổi, bổ sung một số điều Nghị định số 117/2007/NĐ-CP ngày 11/7/2007 của Chính phủ về sản xuất, cung cấp và tiêu thụ nước sạch;

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

Quyết định số 1929/QĐ-TTG, ngày 20/11/2009: phê duyệt định hướng phát triển cấp nước đô thị và khu công nghiệp Việt Nam đến năm 2025 và tầm nhìn đến năm 2050;

QCVN 01-1:2024/BYT Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt;

QCVN 07:2023-1/BXD Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về hạ tầng kĩ thuật cấp nước;

QCVN 08:2023/BTNMT Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước mặt;

QCVN 01:2021/BXD Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về quy hoạch xây dựng;

TCVN 33:2006/BXD Tiêu chuẩn cấp nước mạng ngoài và công trình.

3. KẾT QUẢ KHẢO SÁT THỰC TẾ

3.1. Đối tượng cần khảo sát

Nguồn nước mặt khu vực hạ lưu sông Thái Bình và sông Luộc, cụ thể: hình dạng sông, thủy lực và thủy văn dòng chảy, diễn biến triều cường, chất lượng nước nguồn (đặc biệt khả năng nhiễm mặn của sông), lấy mẫu nước phân tích, đo chỉ tiêu nhiễm mặn tại điểm lấy mẫu bằng máy cầm tay, khả năng khai thác ổn định, lâu dài của nguồn nước.

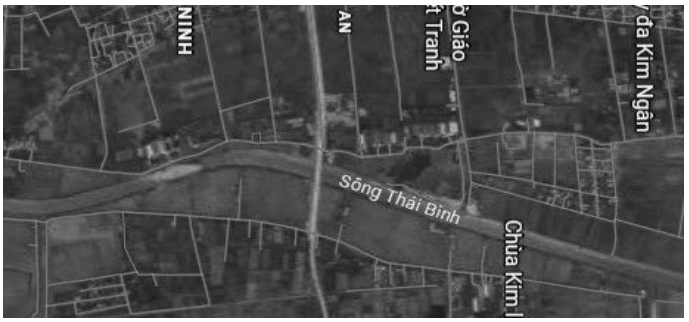
Công trình thu, trạm bơm nước thô: vị trí dự kiến đặt công trình thu, trạm bơm nước thô cấp cho nhu cầu sinh hoạt, công nghiệp và các nhu cầu khác tại địa phương.

3.2. Nguồn nước

3.2.1. Đặc điểm của sông Luộc và sông Thái Bình

Hình dạng sông, đoạn chảy qua xã Kiến Thụy, TP Hải Phòng có hình dạng uốn lượn theo quy luật dòng chảy thủy lực dạng bên lở, bên bồi, bờ sông dạng hơi thoải, có bãi bồi xung quanh;

Hình 1. Hình dạng sông Luộc đoạn chảy qua xã Kiến Thụy (Nguồn: tác giả sưu tầm)



Hình 2. Hình dạng sông Luộc đoạn chảy qua xã Kiến Thụy (Nguồn: tác giả sưu tầm)

Thủy lực, thủy văn dòng chảy: vận tốc dòng chảy nhanh, lưu lượng khá lớn, đảm bảo đủ để cấp cho nhu cầu sinh hoạt, công nghiệp, tưới tiêu cho các khu vực sông chảy qua hiện tại và tương lai lâu dài;

Diễn biến triều cường: dựa trên thông số đo triều cường khu vực Hòn Dấu, Hải Phòng, thấy rằng cuối tháng (28/02/2026), mực triều cường đỉnh cao nhất +3,7 m (Nguồn: theo kết quả đo triều cường tại khu vực Hòn Dấu do tác giả thu thập).

3.2.2. Chất lượng nước nguồn (đặc biệt khả năng nhiễm mặn của sông)

Lấy mẫu nước: tác giả lấy 04 mẫu nước tại các vị trí và thời gian, cụ thể:

Mẫu số 01 (M01): vị trí: cống Ba Đồng 1; thời gian lấy mẫu (17h, ngày 27/02/2026); mực triều (+1,1 m);

Mẫu số 02 (M02): vị trí: cống Ba Đồng 1; thời gian lấy mẫu (1h45, ngày 28/02/2026); mực triều (+3,7 m);

Mẫu số 03 (M03): vị trí: cách cống Ba Đồng 1 là 5 km về phía thượng lưu sông Luộc; thời gian lấy mẫu (2h, ngày 28/02/2026); mực triều (+3,7 m);

Mẫu số 04 (M04): vị trí: cống Kim Đới 2, cách hạ lưu 5 km về phía thượng lưu sông Thái Bình; thời gian lấy mẫu (9h, ngày 28/02/2026); mực triều (+1,3 m);

Kết quả khảo sát của tác giả, chất lượng nước sông như sau:

+ Nước sông có độ đục, độ màu do phù sa cuốn trôi theo dòng chảy;

Hình 3. Sông Luộc có độ đục và màu (Nguồn: tác giả)

+ Độ nhiễm mặn tại các vị trí lấy Mẫu nước phân tích theo kết quả đo tại chỗ bằng máy đo độ mặn cầm tay:

Mẫu số M01: Cl^- (100mg/l); t^0 (24,1^{0}C);

Mẫu số M02: Cl^- (200mg/l); t^0 (24,3^{0}C);

Mẫu số M03: Cl^- (100mg/l); t^0 (23,7^{0}C).

Mẫu số M04: Cl^- (3900mg/l); t^0 (24^{0}C).

Lưu ý: các chỉ tiêu chất lượng nước của 04 mẫu sẽ được đối chứng dựa theo QCVN 08:2023/BTNMT (Quy chuẩn kỹ thuật Quốc gia về chất lượng nước mặt).

4. ĐÁNH GIÁ MỨC ĐỘ NHIỄM MẶN VÀ ĐỀ XUẤT LỰA CHỌN VỊ TRÍ CÔNG TRÌNH THU NƯỚC

4.1. Đánh giá mức độ nhiễm mặn

Về nguồn nước: lưu lượng và chất lượng nước sông Luộc có thể đáp ứng yêu cầu khai thác cấp nước cho khu vực hạ lưu. Tuy nhiên,

khu vực hạ lưu sông Thái Bình hiện đã bị nhiễm mặn ở mức khá cao, do đó không phù hợp để khai thác nguồn nước.

Kết quả kiểm tra nhanh hàm lượng ion Cl^- trong nước tại thời điểm đỉnh triều cường (thời điểm xâm nhập mặn lớn nhất) cho thấy: giá trị đạt 200 mg/l tại vị trí lấy mẫu số 02; độ mặn 100 mg/l tại vị trí lấy mẫu số 03 và độ mặn 3900 mg/l tại vị trí lấy mẫu số 04. So với QCVN 08:2023/BTNMT (quy định $Cl^- \leq 250$ mg/l), hiện tại mức độ nhiễm mặn sông Luộc phía hạ lưu vẫn dưới ngưỡng Quy chuẩn quy định, đạt yêu cầu để khai thác, mức độ nhiễm mặn sông Thái Bình vượt ngưỡng Quy chuẩn quy định, không đạt yêu cầu về chỉ tiêu độ nhiễm mặn.

Dựa trên kết quả quan trắc trong những năm gần đây tại cống ngăn triều khu vực hạ lưu sông Thái Bình (cống Kim Đới 2, xã Kiến Thụy, cách khoảng 5 km về phía hạ lưu, theo số liệu khảo sát của tác giả), cho thấy xu hướng xâm nhập mặn ngày càng lấn sâu về phía thượng lưu các sông Thái Bình, sông Luộc và sông Bắc Hưng Hải, và dự báo sẽ tiếp diễn trong khoảng 30 năm tới. Nguyên nhân chủ yếu là do nước biển dâng và việc điều tiết của các hồ chứa, thủy điện làm suy giảm lưu lượng nước ngọt từ thượng lưu sông Hồng, đặc biệt vào mùa khô. Tốc độ xâm nhập mặn ước tính khoảng 0,5÷1,0 km/năm theo hướng thượng lưu.

4.2. Đề xuất lựa chọn vị trí đặt công trình thu nước

Việc xác định vị trí dự kiến xây dựng công trình thu và trạm bơm nước thô được thực hiện dựa trên các tiêu chí sau: bố trí tại khu vực có dòng chảy ổn định, vận tốc tương đối lớn; không đặt tại khu vực bồi lắng; gần khu vực có nhu cầu sử dụng nước; đảm bảo đủ diện tích xây dựng; lưu lượng và chất lượng nước đáp ứng yêu cầu khai thác; đồng thời bảo đảm khoảng cách ly vệ sinh và hành lang bảo vệ an toàn theo quy định.

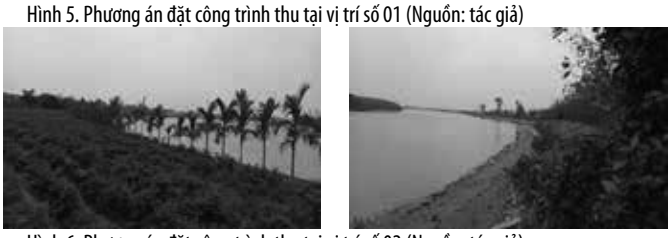
Đối với sông Luộc:

Căn cứ các tiêu chí nêu trên, tác giả đề xuất lựa chọn vị trí đặt công trình thu nước phù hợp với điều kiện hiện tại, đồng thời có xét đến khả năng dự phòng rủi ro do xâm nhập mặn trong tương lai.

Vị trí số 01 (cách cống Ba Đồng 1 khoảng 50 m về phía thượng lưu sông); vị trí số 02 (cách cống Ba Đồng 1 khoảng 5 km về phía thượng lưu sông)

Hình 4. Vị trí dự kiến đặt công trình thu nước

Hình 5. Phương án đặt công trình thu tại vị trí số 01 (Nguồn: tác giả)



Hình 6. Phương án đặt công trình thu tại vị trí số 02 (Nguồn: tác giả)

Nếu đặt Công trình thu tại vị trí số 01 (gần Cống Ba Đồng 1) về lâu dài là không an toàn, khả năng bị nhiễm mặn trong tương lai là có thể xảy ra, nên vị trí này chỉ đặt cho các dự án cấp nước ngắn hạn trong 10 năm tới. Cần đặt vị trí công trình thu lùi về phía thượng lưu sông Luộc từ 5 km÷10 km (vị trí số 02) là an toàn.

Đối với sông Thái Bình: do mức độ xâm nhập mặn trên hạ lưu sông Thái Bình cao hơn sông Luộc, vì vậy đề xuất giải pháp đặt vị trí công trình thu nước lùi về phía thượng lưu sông (tính từ điểm giao với sông Luộc), khoảng cách an toàn ≥ 20 km. Cụ thể vị trí công trình thu tính từ điểm Cầu Thái Bình 1 về phía thượng lưu sông Hình 7.

Hình 7. Vị trí dự kiến đặt công trình thu nước đặt gần cầu Thái Bình 1, tỉnh Hưng Yên (vị trí số 03)

5. KẾT LUẬN

Để đánh giá và dự báo mức độ xâm nhập mặn trên hạ lưu các sông Thái Bình, sông Luộc và các sông khác nằm trên địa bàn TP Hải Phòng, cần thiết phải đánh giá, phân tích chỉ tiêu độ mặn của nước, diễn biến triều cường theo ngày, giờ hàng tháng, hàng năm, kết hợp với khả năng bổ cập nguồn nước ngọt từ phía thượng lưu sông Hồng, nhất là vào mùa khô (từ tháng 11 năm khảo sát đến tháng 4 năm sau). Từ đó sẽ có số liệu tổng hợp và đưa ra dự báo mức độ xâm nhập mặn chính xác, giúp các cơ quan quản lý, các cơ quan chuyên ngành, các đơn vị cung cấp nước sạch lựa chọn được nguồn nước mặt thích hợp, đặt vị trí công trình thu nước an toàn. Giúp ích cho các dự án cung cấp nước sạch cho người dân và các nhu cầu khác đạt chất lượng tốt, chi phí xây dựng vận hành giảm, hiệu quả kinh tế và thu hồi vốn dự án cấp nước mang tính khả thi cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Xây dựng, TCXD VN 33:2006 - Cấp nước - Mạng lưới đường ống và công trình: Tiêu chuẩn thiết kế, 2006.

[2] Bộ Xây dựng, QCVN 01:2021 - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về quy hoạch xây dựng, 2021.

[3] Bộ Y tế, QCVN 01-1:2024/BYT - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước sạch sử dụng cho mục đích sinh hoạt, 2024.

[4] Bộ Tài nguyên và Môi trường, QCVN 08:2023/BTNMT - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về chất lượng nước mặt, 2023.

[5] 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 cấp Bộ Xây dựng, 2023.

[6] Trần Thanh Sơn, Nguyễn Văn Hiển và nhóm nghiên cứu, Nghiên cứu công nghệ tự rửa bể lọc vật liệu nổi xử lý nước cấp sinh hoạt, Đề tài cấp Nhà nước, Bộ Khoa học và Công nghệ, 2014.

[7] American Water Works Assn, Water Distribution Operator Training Handbook, 2017.

[8] Nicholas G. Pizzi, Water Treatment Principles and Practices of Water Supply Operations Volume 1, 2014.

[9] Nicholas G. Pizzi, Water Treatment Principles and Practices of Water Supply Operations Volume, 2010.

[10] Zahid Amjad, Science and Technology of Industrial Water Treatment, 2010.

■Ngày nhận bài: 02/3/2026 ■Ngày sửa bài: 09/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 20/3/2026

Nghiên cứu xác định tải trọng phá hoại hệ kết cấu do hình thành khớp dẻo

Research to determine the failure load of structural systems due to plastic hinge formation

> THS NGUYỄN VŨ THIÊM*,TS PHẠM VĂN TRUNG
Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội
*Email: thiemnv@hau.edu.vn

TÓM TẮT

Khớp dẻo là một tiết diện trên kết cấu mà tại đó thành phần ứng suất pháp đạt đến σc. Một hệ kết cấu đủ liên kết khi xuất hiện 1 khớp dẻo tương đương với việc mất đi một liên kết, làm cho hệ kết cấu bị thiếu liên kết và dẫn tới phá hoại. Nói chung một hệ siêu tĩnh bậc n tương đương với xuất hiện tối đa n+1 khớp dẻo sẽ phá hoại. Tải trọng gây ra sự phá hoại của hệ kết cấu khi xuất hiện đủ số khớp dẻo gọi là tải trọng phá hoại dẻo. Nghiên cứu này trình bày cách xác định tải trọng phá hoại dẻo theo phương pháp phân tích từng khớp và phương pháp cơ cấu.

Từ khóa: Khớp dẻo; ứng suất chảy; chuyển vị lớn; tải trọng tĩnh; trạng thái giới hạn.

ABSTRACT

A plastic hinge is a cross-section in a structure where the normal stress component reaches σc. A structural system is considered fully connected when the appearance of one plastic hinge is equivalent to the loss of one connection, causing the system to become unconnected and leading to collapse. In general, a statically indeterminate system of degree n will collapse if a maximum of n+1 plastic hinges appear. The load that causes the collapse of the structural system when a sufficient number of plastic hinges appear is called the plastic collapse load. This study presents a method for determining the plastic collapse load using the hinge-by-hing analysis method and the mechanism method.

Keywords: Plastic hinge; yield stress; large displacement; static load; limit state.

1. MỞ ĐẦU

Trong cách tính kết cấu theo ứng suất cho phép ta chỉ dùng một hệ số an toàn chung để đánh giá độ bền của kết cấu mà không xét một cách chặt chẽ về khả năng thay đổi đặc trưng cơ học và đặc biệt là tính dẻo của vật liệu, cũng như về khả năng thay đổi tải trọng. Thực ra độ bền của vật liệu làm mẫu thí nghiệm dùng để xác định ứng suất cho phép khác tương đối xa độ bền của vật liệu làm kết cấu đồng thời tải trọng tác dụng trên kết cấu cũng có thể có những sai lệch khác nhau. Do đó người ta đã xây dựng cách đánh giá khác về khả năng của kết cấu. Đó là cách tính kết cấu theo trạng thái giới hạn. Trạng thái giới hạn của kết cấu là trạng thái xảy ra do ứng suất hay do chuyển vị phát triển quá mức làm cho kết cấu không thể làm việc bình thường được nữa. Trạng thái giới hạn của kết cấu không nhất thiết phải là trạng thái kết cấu bị phá hoại, mà chính là trạng thái kết cấu không thể làm việc bình thường được nữa. Một kết cấu không thể làm việc bình thường có thể là do mất khả năng chịu lực (chẳng hạn không đủ độ bền, không đủ ổn định hay độ,chịu mỏi), hoặc do biến dạng quá mức, hoặc do phát sinh các vết nứt. Do đó có thể chia ra hai nhóm trạng thái giới hạn:

* Trang thái giới hạn về cường độ, xác định theo khả năng chịu lực của kết cấu (về độ bền, độ ổn định và độ chịu mỏi).

* Trạng thái giới hạn về sử dụng, xác định theo sự biến dạng quá mức của kết cấu (độ cứng), sự xuất hiện các dao động, vết nứt...

• So sánh với cách tính theo ứng suất cho phép, cách tính kết cấu theo trạng thái giới hạn có xét đến tính dẻo của vật liệu. thường kinh tế hơn và trong khá nhiều trường hợp lại đơn giản hơn.

Theo cách tính này, có ba loại hệ số an toàn:

1. Hệ số vượt tải (hệ số độ tin cậy) n. kể đến khả năng thay đổi của tải trọng so với tải trọng tiêu chuẩn, tức là xét đến sự sai lệch ngẫu nhiên giữa tải trọng tác dụng và tải trọng tiêu chuẩn. Tải trọng tính toán Pi sẽ bằng tải trọng tiêu chuẩn Pi nhân với hệ số vượt tải n lớn hơn đơn vị. $P_t = P_{tc} \times n$ .Khi tính về độ chịu mỏi theo trạng thái giới hạn về cường độ và khi tính về độ cứng theo trạng thái giới hạn về sử dụng, tải trọng được lấy bằng tải trọng tiêu chuẩn (n=1).

2. Hệ số đồng chất k của vật liệu, kể đến khả năng thay đổi tính chất và giảm độ bền của vật liệu do ảnh hưởng của hình dạng và kích thước của kết cấu gây ra. Hệ số k > 1.

3. Hệ số điều kiện làm việc m của kết cấu, kể đến ảnh hưởng của những yếu tố bất lợi cho sự liên kết không chính xác các cấu kiện v.v... Tùy từng trường hợp cụ thể, hệ số này có giá trị tương ứng khác nhau, lớn hơn hoặc nhỏ hơn đơn vị. Đặc trưng độ bền của vật liệu là sức chịu tính toán R, vừa phụ thuộc sự đồng chất của vật liệu vừa phụ thuộc điều kiện làm việc của kết cấu, được xác định bằng sức chịu tiêu chuẩn Rc (tức giới hạn chảy, hoặc giới hạn bền hay giới hạn mỏi tùy từng trường hợp) chia cho hệ số không đồng nhất k và nhân với hệ số điều kiện làm việc m (m < 1):

$$R_t = R_{tc} \times m \div k.$$

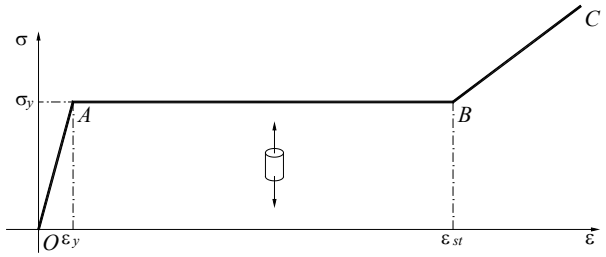
Lý thuyết tính toán kết cấu theo các trạng thái giới hạn có những nội dung phong phú và tùy theo vật liệu dòn hay vật liệu dẻo, kết quả sẽ khác nhau. Trong báo cáo này chỉ giới hạn nghiên cứu với vật

liệu dẻo trong quá trình hình thành các khớp dẻo đến lúc hệ kết cấu phá hoại.

Do đó, tải trọng tới hạn đàn hồi P là tải trọng tối đa đối với một khung đàn hồi. Mặt khác, nếu chúng ta loại trừ ảnh hưởng của sự mất ổn định mà chỉ xem xét sự chảy dẻo của vật liệu, sự hỏng hóc của khung sẽ được kiểm soát bởi sự hình thành cơ chế phá hoại dẻo. Tải trọng cơ chế phá hoại dẻo P là khả năng chịu tải tối đa của khung. Một cơ chế phá hoại dẻo sẽ hình thành khi có đủ số lượng khớp dẻo phát triển trong cấu trúc để làm cho nó không ổn định về mặt tĩnh. Trước khi chúng ta đi vào thảo luận về phương pháp xác định tải trọng phá hoại P, điều cần thiết ở đây là giải thích ngắn gọn khái niệm cơ bản về khớp dẻo và cơ chế phá hoại dẻo trong lý thuyết dẻo đơn giản.

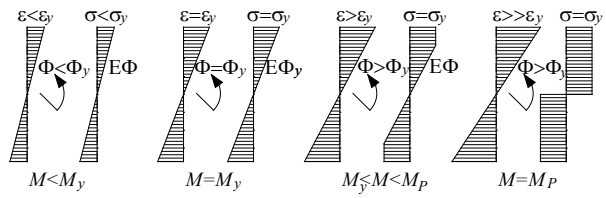
2. KHỚP DẺO

Nếu thực hiện một thử nghiệm kéo đơn giản trên một mẫu thép kết cấu, biểu đồ ứng suất - biến dạng của nó sẽ như trong Hình 1: có một điểm uốn rõ ràng tại A đánh dấu điểm chảy của vật liệu. Mức ứng suất tương ứng với điểm A là ứng suất chảy của vật liệu. Nếu ứng suất thấp hơn ứng suất chảy σy, vật liệu sẽ hoạt động đàn hồi như thể hiện bởi đường OA. Sau khi đạt đến ứng suất chảy, biến dạng có thể tăng lên đáng kể mà không có sự gia tăng ứng suất nào nữa như thể hiện bởi đường AB. Khi biến dạng đạt đến εst=12εy, sự gia tăng biến dạng tiếp theo sẽ dẫn đến sự gia tăng ứng suất hơn nữa do hiện tượng hóa bền biến dạng, như thể hiện bởi đường BC. Để đơn giản, ảnh hưởng của hiện tượng hóa bền biến dạng thường không được xem xét trong phân tích thiết kế dẻo đơn giản. Việc bỏ qua ảnh hưởng này rõ ràng sẽ dẫn đến một thiết kế an toàn. Khi vật liệu có thể chịu được biến dạng lớn mà không bị gãy, điều này được gọi là độ dẻo. Chính đặc tính độc đáo này của kết cấu thép đã làm cho thiết kế dẻo trở nên khả thi.



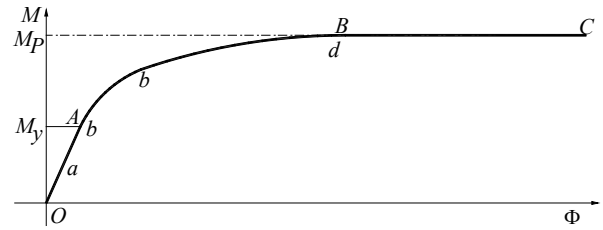
Hình 1. Quan hệ ứng suất - biến dạng đơn trục của thép kết cấu

Khi một cấu kiện chịu uốn thuần túy, và nếu giả định thông thường là mặt cắt phẳng trước khi uốn vẫn phẳng sau khi uốn, thì có thể phác họa một loạt các phân bố ứng suất và biến dạng trên mặt cắt tương ứng với mômen uốn tăng dần, như trong Hình 2a-d. Mối quan hệ mômen-độ cong tương ứng được thể hiện trong Hình 3. Các điểm a, b, c và d trên hình tương ứng với các giai đoạn khác nhau được thể hiện trong Hình 2. Trước khi ứng suất trong bất kỳ thớ nào trong mặt cắt ngang đạt đến ứng suất chảy σy Hình 2a, mặt cắt có tính đàn hồi (đường OA trong Hình 3). Khi các thớ ngoài cùng của mặt cắt ngang vừa đạt đến σy Hình 2b, mômen tương ứng được gọi là mômen chảy My và được ký hiệu bằng điểm A trong Hình 3. Việc tăng thêm mômen trên mômen chảy sẽ làm tăng độ cong của mặt cắt ngang với tốc độ nhanh hơn. Khi tải trọng tiếp tục tăng, sự biến dạng dẻo của các sợi sẽ lan rộng và xuyên suốt về phía các sợi nằm gần trục trung hòa của mặt cắt ngang hơn Hình 2c. Quá trình biến dạng dẻo liên tiếp của các sợi hướng về trục trung hòa của mặt cắt ngang được gọi là sự dẻo hóa. Lưu ý rằng do đặc tính ứng suất-biến dạng của thép, ứng suất của các sợi bị biến dạng dẻo vẫn ở mức σy. Khi sự dẻo hóa của các sợi trên toàn bộ mặt cắt ngang hoàn tất (Hình 2d), mặt cắt ngang không thể chịu thêm bất kỳ mômen nào nữa.



Hình 2. (a), (b), (c), (d) Biểu đồ biến dạng và ứng suất

Mômen tương ứng với sự dẻo hóa hoàn toàn được gọi là mômen dẻo Mp, được ký hiệu bằng điểm B trong Hình 3. Từ Hình 3, rõ ràng là mômen biến dạng dẻo My không phải là khả năng chịu mômen tối đa của mặt cắt ngang. Thay vào đó, khả năng chịu mômen tối đa là mômen dẻo M. Hình dạng chính xác của đường cong M-Φ từ My đến Mp (đường cong AB trong Hình 3), cũng như độ lớn tương đối của chúng, là khác nhau đối với các hình dạng mặt cắt ngang khác nhau. Ví dụ, đối với mặt cắt ngang hình chữ nhật, Mp/My=1,5, và đối với các mặt cắt chữ I cán nóng, bản vẽ là Mp/My = 1,12 nếu uốn cong quanh trục mạnh, và Mp/My = 1,5 nếu uốn cong quanh trục yếu.

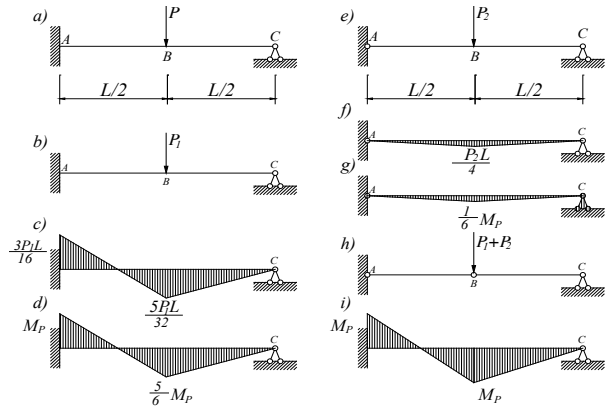


Hình 3. Quan hệ mômen - độ cong tương ứng

Hình 3 cũng cho thấy mặt cắt ngang có thể chịu được mô men Mp không đổi thông qua khả năng xoay lớn, như được chỉ ra bởi đường ngang BC, chính xác là do độ dẻo lớn của thép. Nói cách khác, mặt cắt ngang hoạt động như một khớp thực sự, nhưng mang khả năng chịu mô men không đổi Mp. Do đó, thuật ngữ khớp dẻo được sử dụng để chỉ đặc tính như vậy đối với mặt cắt ngang bằng thép.

3. XÁC ĐỊNH TẢI TRỌNG PHÁ HUỶ DẺO P, BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH TỪNG KHỚP

Xét một dầm đầu ngàm đầu khớp, nhịp L chịu lực tập trung P tại giữa nhịp Hình 4a. Hệ siêu tĩnh bậc nhất. Do đó, nếu một khớp dẻo được hình thành trong dầm tại vị trí mômen cực đại, dầm sẽ trở thành dầm tĩnh định. Nếu, ngoài ra, một khớp dẻo thứ hai được hình thành tại một vị trí quan trọng tiếp theo, dầm sẽ trở nên thiếu liên kết, không đủ khả năng chịu. Trong phần tiếp theo, chúng ta sẽ ký hiệu giai đoạn tải từ khi bắt đầu đến khi hình thành khớp dẻo đầu tiên là giai đoạn tải 1 Hình 4b, và tải trọng bổ sung sau giai đoạn tải 1 là giai đoạn tải 2 Hình 4e. Chúng ta sử dụng các chỉ số dưới 1 và 2 để phân biệt hai giai đoạn tải này.



Hình 4. Sơ đồ chất tải và các biểu đồ mômen dầm

Giai đoạn tải 1

Trước khi hình thành khớp dẻo đầu tiên, dầm hoạt động đàn hồi; Biểu đồ mômen đàn hồi dưới tải trọng P được thể hiện trong Hình 4. Vì mômen tại đầu cố định lớn hơn mômen tại giữa nhịp, khớp dẻo đầu tiên sẽ hình thành tại đầu cố định điểm A. Tải trọng tương ứng với sự hình thành khớp dẻo đầu tiên có thể được tìm thấy bằng cách cho $3P_1L/16$ bằng Mp.

$$\frac{3P_1L}{16} = M_p \quad (1)$$

Từ đó, ta thu được tải trọng khớp dẻo đầu tiên.

$$P_1^* = \frac{16M_p}{3L} \quad (2)$$

Mômen tại giữa nhịp (điểm B), khi khớp dẻo đầu tiên vừa hình thành, là

$$\frac{5P_1L}{32} = \frac{5}{32}\frac{16M_p}{3L}L = \frac{5}{6}M_p \quad (3)$$

Hình 4d thể hiện biểu đồ mômen ở cuối giai đoạn tải 1.

Giai đoạn tải 2

Sau khi hình thành khớp dẻo đầu tiên tại A, dầm đang xét trở thành một dầm tựa đơn giản với mômen không đổi Mp tại A để chịu tải trọng P_1*. Khi tải trọng bổ sung P_2 được áp dụng, dầm hoạt động như một cấu kiện tựa đơn giản Hình 4e; Hình 4f thể hiện biểu đồ mômen tương ứng do P_2. Tải trọng P_2 được cộng thêm vào tải trọng khớp dẻo đầu tiên P_1* và mômen cực đại tại giữa nhịp dưới tác dụng của tải trọng kết hợp P_1* + P_2 là $5M_p/6 + P_2L/4$. Khớp dẻo thứ hai sẽ hình thành tại giữa nhịp, khi mômen này đạt đến khả năng chịu mômen dẻo Mp, từ đó ta thu được tải trọng khớp dẻo thứ hai

$$\frac{5Mp}{6} = \frac{P_2L}{4} = M_p \quad \rightarrow \quad P_2^* = \frac{2M_p}{3L} \quad (5)$$

Khi hình thành khớp dẻo thứ hai, kết cấu trở nên biến hình và dẫn đến một cơ chế phá hoại dẻo, như thể hiện trong Hình 4h.

Tải trọng phá hoại Pp đưa dầm đến trạng thái phá hoại, là tổng của P_1* và P_2*

$$P_p = P_2^* + P_2^* = \frac{16M_p}{3L} + \frac{2M_p}{3L} = \frac{6M_p}{L} \quad (6)$$

và biểu đồ mômen ở trạng thái phá hoại được thể hiện trong Hình 4i thu được bằng cách chồng các biểu đồ mômen của Hình 4h và 4g lên nhau.

Quy trình được mô tả ở trên được gọi là phân tích từng khớp. Về cơ bản, đó là một chuỗi các phân tích đàn hồi với các khớp dẻo bổ sung được đưa vào trong quá trình chịu tải. Phương pháp này có thể được lập trình trên máy tính và do đó có thể mở rộng sang các trường hợp kết cấu và tải trọng phức tạp hơn. Trong phân tích từng khớp, trình tự hình thành các khớp dẻo được theo dõi. Nói chung, nếu cấu trúc siêu tĩnh bậc n, thì việc hình thành (n + 1) khớp dẻo sẽ là cần thiết để cấu trúc đạt đến trạng thái phá hoại dẻo.

4. XÁC ĐỊNH TẢI TRỌNG PHÁ HOẠI DẺO BẰNG PHƯƠNG PHÁP CƠ CẤU

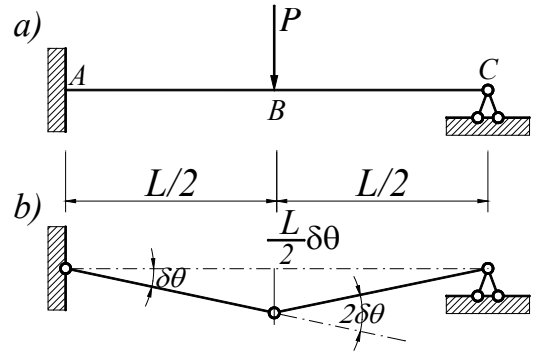
Để xác định tải trọng phá hoại dẻo P một cách trực tiếp hơn, một phương pháp đơn giản hơn, được gọi là phương pháp cơ cấu, sẽ được trình bày ở đây. Phương pháp này dựa trên định lý giới hạn trên của phân tích dẻo. Định lý này phát biểu rằng tải trọng được tính toán dựa trên cơ chế phá hoại hoặc phá hoại giả định sẽ luôn lớn hơn hoặc tối đa bằng tải trọng phá hoại thực sự. Do đó, khi sử dụng định lý này, tất cả các cơ chế phá hoại có thể xảy ra của kết cấu được xác định và tải trọng tương ứng với mỗi cơ chế này được đánh giá. Cơ chế cho giá trị P thấp nhất sẽ là cơ chế phá hoại. Nói một cách chính xác, để xác định cơ chế được chọn sẽ cho giá trị P thấp nhất, việc kiểm tra mômen thường là cần thiết để đảm bảo rằng mômen ở mọi nơi trong kết cấu nhỏ hơn hoặc tối đa bằng M. Đối với một cơ chế giả định không phải là cơ chế phá hoại thực sự, việc kiểm tra mômen này thường không thể thực hiện được. Việc áp dụng phương pháp cơ cấu để thu được P được hỗ trợ rất nhiều bởi việc sử dụng các phương trình công ảo.

Tải trọng phá hoại dẻo Pp đối với dầm đầu ngàm đầu khớp

Để minh họa việc sử dụng các phương trình công ảo trong phương pháp cơ cấu để thu được P một cách trực tiếp, hãy xem xét cùng một dầm đơn giản đã xét ơt trên Hình aa được tái hiện trong Hình 5a.

Tải trọng phá hoại Pp có thể được xác định trực tiếp từ cơ chế phá hoại giả định như trong Hình 5b. Các phép tính có thể được thực hiện theo cách sau:

Giả sử khớp dẻo tại A trải qua một chuyển vị quay ảo $\delta\theta$, dễ dàng thấy từ hình học của cơ chế phá hoại rằng khớp dẻo tại B sẽ trải qua một chuyển vị quay ảo $2\delta\theta$, và chuyển vị thẳng đứng của điểm B so với vị trí ban đầu là $L\delta\theta/2$. Lưu ý rằng giả định về chuyển vị nhỏ được sử dụng trong việc đánh giá độ rơi thẳng đứng này.



Hình 5. Cơ chế phá hoại của dầm đầu ngàm đầu khớp

Công ảo bên ngoài được thực hiện trong quá trình dịch chuyển ảo này bằng tải trọng tác dụng P nhân với quãng đường nó di chuyển, tức là,

$$\delta Wcxt = P\frac{L\delta\theta}{2} \quad (7)$$

và năng lượng biến dạng ảo được lưu trữ trong kết cấu của quá trình dịch chuyển ảo này bằng tổng của mômen dẻo nhân với góc quay khớp tại các điểm A và B, tức là

$$\delta U\,\mathrm{int} = Mp(\delta\theta) + Mp(2\delta\theta) \quad (8)$$

Lưu ý, khi viết phương trình (4.6.8), người ta ngầm giả định rằng tất cả các biến dạng đều tập trung tại các khớp dẻo. Do đó, không có năng lượng biến dạng ảo nào được lưu trữ ở bất kỳ nơi nào khác ngoài vị trí của các khớp dẻo trong quá trình dịch chuyển ảo.

Bằng cách so sánh phương trình (7) với phương trình (8), ta có

$$P\frac{L\delta\theta}{2} = Mp(\delta\theta) + Mp(2\delta\theta) \quad (9)$$

từ đó ta thu được tải trọng phá hoại

$$Pp = \frac{6Mp}{L} \quad (10)$$

giống như phương trình (6), đã được thu được trước đó bằng phương pháp phân tích từng khớp.

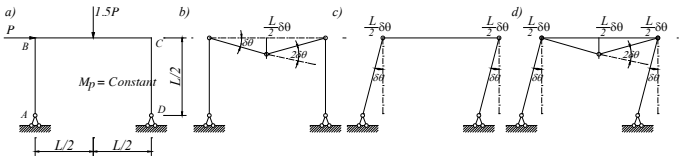
Phương pháp cơ cấu có thể được mở rộng để thu được Pp cho một kết cấu khung. Điều này được mô tả trong ví dụ sau.

Tải trọng phá hoại dẻo Pp đối với khung một tầng một nhịp tựa trên hai khớp

Hình 6a cho thấy một khung một tầng một nhịp tựa trên hai khớp chịu tải bởi một lực thẳng đứng 1,5P tại giữa nhịp dầm và một

lực ngang P tại điểm B. Bây giờ chúng ta sẽ tính toán tải trọng phá hoại của khung bằng phương pháp cơ cấu.

Không giống như ví dụ trước về dầm đơn giản, trong đó chỉ xác định được một cơ chế phá hoại, ta có thể xác định được ba cơ chế phá hoại khả thi cho khung. Chúng được thể hiện trong Hình 6b-d. Cơ chế được thể hiện trong Hình 6b được gọi là cơ chế dầm; trong Hình 6c, nó được gọi là cơ chế lắc ngang và trong Hình 6d, chúng ta có cơ chế kết hợp, trong đó bao gồm các đặc điểm của cả cơ cấu dầm và cơ cấu lắc ngang. Các chuyển vị ảo tương ứng cũng được chỉ ra trong Hình 6.



Hình 6. Cơ chế phá hoại của khung cổng đơn giản

Để tính toán Pp chúng ta viết các phương trình công ảo cho tất cả các cơ cấu này.

$$\delta Wcxt = \delta U \text{ int} \tag{11}$$

Cơ cấu dầm

$$(1,5P)\left(P\frac{L\delta\theta}{2}\right) = Mp(\delta\theta) + Mp(2\delta\theta) + Mp(\delta\theta) \rightarrow P_1 = \frac{16Mp}{3L} \tag{12}$$

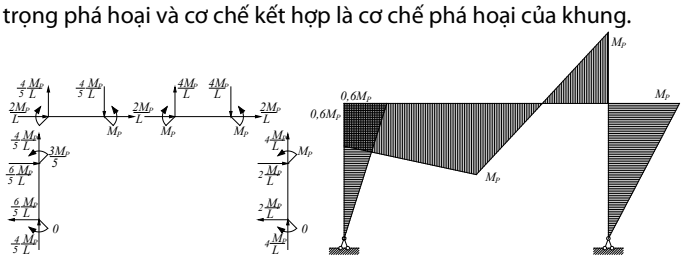
Cơ cấu lắc ngang

$$(P)\left(P\frac{L\delta\theta}{2}\right) = Mp(\delta\theta) + Mp(\delta\theta) \quad \rightarrow \quad P_2 = \frac{4Mp}{L} \tag{13}$$

Cơ cấu kết hợp

$$(1,5P)\left(P\frac{L\delta\theta}{2}\right) + (P)\left(P\frac{L\delta\theta}{2}\right) = \\ = Mp(2\delta\theta) + Mp(2\delta\theta) \rightarrow P_3 = \frac{16Mp}{5L} \tag{14}$$

Vì giá trị thấp nhất là P_3, theo định lý cận trên, ta chọn P_3 làm tải trọng phá hoại. Tuy nhiên, để đảm bảo P_3 là tải trọng phá hoại thực sự, ta cần kiểm tra mômen của kết cấu. Bằng cách vẽ sơ đồ rời rạc của khung Hình 7a, ta dễ dàng thấy rằng điều kiện M ≤ Mp được thỏa mãn ở mọi nơi trong khung Hình 7b. Do đó, ta có thể kết luận từ định lý cận dưới của phân tích dẻo rằng Pp = P_3 = 16Mp/5L là tải trọng phá hoại và cơ chế kết hợp là cơ chế phá hoại của khung.



Hình 7. Kiểm tra mômen

Đối với các khung kết cấu nhiều tầng, nhiều nhịp, sẽ tồn tại một số cơ chế phá hoại có thể xảy ra. Nhà phân tích có thể khó hình dung tất cả các cơ chế có thể này. Tuy nhiên, nhiều cơ chế khác nhau có thể được xây dựng một cách có hệ thống từ hai cơ chế cơ bản, đó là cơ chế dầm và cơ chế lắc ngang, bằng một quy trình được gọi là kết hợp các cơ chế. Phương pháp này được mô tả chi tiết trong tài liệu tham khảo và sẽ không được trình bày ở đây. Ngoài ra, người ta có thể tính được Pp cho các khung như vậy bằng phương pháp từng khớp với sự hỗ trợ của máy tính.

5. KẾT LUẬN

Nhìn chung, tải trọng phá hoại dẻo Pp sẽ chỉ cho ước tính hợp lý về tải trọng phá hoại P_f của khung nếu ảnh hưởng của sự mất ổn định nhỏ và có thể bỏ qua, ví dụ như trong các khung một tầng gồm các cấu kiện chắc chắn. Đối với các khung nhiều tầng mà tính ổn định là quan trọng, tải trọng phá hoại dẻo cứng sẽ không đại diện cho tải trọng phá hoại P_f.

Trên thực tế, sự phá hủy của khung là kết quả của cả sự mất ổn định và hiệu ứng dẻo. Do đó, cả tải trọng tới hạn Pth, được đánh giá bằng cách chỉ xem xét hiệu ứng mất ổn định đàn hồi, lẫn tải trọng phá hoại dẻo cứng P_p được đánh giá bằng cách chỉ xem xét hiệu ứng dẻo, đều không thể hiện tải trọng phá hủy của khung.

Để có được giá trị chính xác của P_f cần phải thực hiện một phân tích nghiêm ngặt, chẳng hạn như phân tích đàn hồi-dẻo hoàn chỉnh của cấu trúc. Loại phân tích này khá phức tạp và tốn kém và chắc chắn cần sử dụng máy tính. Tuy nhiên, đối với mục đích thiết kế, sẽ tốt hơn nếu có thể thu được P_f bằng một phương pháp đơn giản hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Phạm Văn Hội, Kết cấu thép công trình dân dụng và công nghiệp - Tập 2, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2006.

[2] Lều Thọ Trình, Cơ học kết cấu tập II: Hệ siêu tĩnh, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, 2001. ISBN 978-604-82-7652-2.

[3] Phạm Văn Trung, Cơ học kết cấu, NXB Xây dựng, 2024.

[4] W.F. Chen; E.M. Lui, Structural Stability: Theory and Implementation, New York - Amsterdam - London.

[5] Baker, J.; Heyman, J., Plastic Design of Frames, Vol. I: Fundamentals, Cambridge University Press, Cambridge, 1969.

■Ngày nhận bài: 02/3/2026 ■Ngày sửa bài: 09/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 20/3/2026

So sánh gia tốc đỉnh theo phương dọc gió của công trình nhiều tầng theo TCVN 2737:2023 và EN 1991-1-4

Comparison of along-wind peak accelerations of high-rise buildings using TCVN 2737:2023 and EN 1991-1-4

> **KS NGUYỄN TRUNG KIÊN[1], PGS.TS VŨ TÂN VĂN[2,*]**
[1]HVCH Ngành Kỹ thuật xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM
Email: 23xd03@uah.edu.vn
[2]GV Khoa Xây dựng, Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM
*Corresponding author: van.vutan@uah.edu.vn

TÓM TẮT

Các tiêu chuẩn thiết kế công trình nhiều tầng đều yêu cầu kiểm tra chuyển vị, đồng thời đảm bảo điều kiện tiện nghi và sức khỏe cho người sử dụng thông qua việc giới hạn gia tốc của công trình dưới tác dụng của tải trọng động. Bài báo này trình bày phương pháp tính toán gia tốc dọc hướng gió của công trình nhiều tầng do nhiễu động gió gây ra, dựa trên Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 2737:2023 và Tiêu chuẩn châu Âu EN 1991-1-4.

Kết cấu nhà nhiều tầng được mô hình hóa đơn giản như một dầm công-xôn dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn thông qua phần tử dầm không gian. Các thành phần nhiễu động gió được xác định thông qua phổ vận tốc gió kiểu Kaimal. Phổ tải trọng gió được xây dựng dựa trên các thành phần nhiễu động gió, việc tuyến tính hóa hệ số lực đẩy và lực nâng, kết hợp với hàm liên hợp phản ánh mức độ tương quan của tải gió theo chiều cao. Quá trình này có tính đến sự giảm tương quan theo khoảng cách, đồng thời phản ánh mức độ tương tác giữa dạng dao động của kết cấu và đặc tính không gian - tần số của trường vận tốc gió. Thông qua phép biến đổi Fourier, phổ chuyển vị và phổ gia tốc được xác định dựa trên hàm đáp ứng tần số, độ cứng kết cấu và phổ tải trọng gió.

Kết quả phân tích cho thấy, đối với công trình nhiều tầng có mặt bằng hình chữ nhật chịu tải trọng gió tại Việt Nam, gia tốc đỉnh tính theo EN 1991-1-4 cho giá trị lớn hơn so với TCVN 2737:2023.

Từ khóa: Gia tốc đỉnh; hệ số giật; tải trọng gió; công trình nhiều tầng; phương pháp phần tử hữu hạn.

ABSTRACT

Design codes for high-rise buildings require controlling displacements while ensuring occupant comfort and habitability by limiting the building's acceleration under dynamic loads. This paper presents a calculation method for the along-wind acceleration of tall buildings induced by wind turbulence, based on the Vietnamese Standard TCVN 2737:2023 and the European Standard EN 1991-1-4.

The high-rise building structure is simplified and modeled as a cantilever beam based on the finite element method using 3D beam elements. The wind turbulence components are determined using the Kaimal wind velocity spectrum. The wind load spectrum is established based on the wind turbulence components, the linearization of drag and lift coefficients, combined with a coherence function reflecting the spatial correlation of wind loads along the height. This process accounts for the spatial correlation decay with distance and reflects the interaction between the structure's vibration modes and the spatial-frequency characteristics of the wind velocity field. Through the Fourier transform, the displacement and acceleration spectra are determined based on the frequency response function, structural stiffness, and wind load spectrum.

The analytical results indicate that for a high-rise building with a rectangular plan subjected to wind loads in Vietnam, the peak acceleration calculated according to EN 1991-1-4 is higher than that calculated using TCVN 2737:2023.

Keywords: Peak acceleration; gust factor; wind load; high-rise buildings; finite element method.

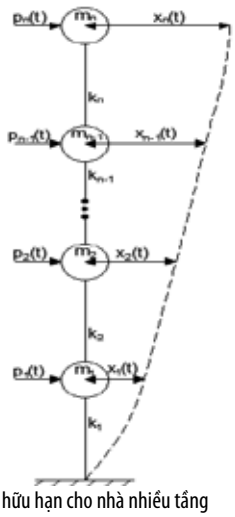
1. GIỚI THIỆU

Hệ quả tất yếu của xu hướng gia tăng dân số là sự gia tăng số lượng cũng như chiều cao của các công trình nhiều tầng. Phản ứng của công trình cao tầng chịu tải gió là một bài toán phức tạp [1] do gió luôn thay đổi cả theo thời gian và không gian. Đối với các công trình thấp tầng gió thường gây ra nguy hiểm cho hệ bao che và mái công trình. Ngược lại, đối với cầu nhịp lớn và nhà nhiều tầng, ứng xử động lực học dưới tác dụng của gió phức tạp hơn đáng kể. Gió có thể gây ra các hiệu ứng bất lợi như dao động do kích động xoáy (vortex-induced vibration), mất ổn định khí động học theo dạng dao động uốn, xoắn, hoặc uốn-xoắn kết hợp, và dao động do nhiễu động gió (buffeting) [2]. Những hiệu ứng này ảnh hưởng trực tiếp đến điều kiện tiện nghi của người sử dụng bên trong tòa nhà. Vì vậy việc thiết kế kết cấu nhà cao tầng cần thỏa mãn điều kiện về trạng thái giới hạn sử dụng và thường được đánh giá dựa trên giá trị gia tốc đỉnh hoặc độ lệch chuẩn [3]. Mặc dù các ngưỡng gia tốc giới hạn đã được khuyến nghị trong nhiều tiêu chuẩn thiết kế kết cấu, việc ước tính chuyển vị và gia tốc đỉnh trong giai đoạn thiết kế sơ bộ chưa được tiêu chuẩn thiết kế hướng dẫn tính toán chi tiết. Do đó, việc nghiên cứu và tính toán phản ứng động lực học của nhà nhiều tầng chịu tải trọng gió trong điều kiện Việt Nam là hết sức cần thiết và mang ý nghĩa thực tiễn cao.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Mô hình nhà nhiều tầng

Kết cấu nhà nhiều tầng được mô hình dưới dạng một dầm công-xôn thẳng đứng, Hình 1, trong đó khối lượng của các dầm sàn đối với các tầng được mô hình bởi các khối lượng tập trung đặt tại các nút có cao độ ứng với cao độ của các tầng, các khối lượng cột vách được quy thành các khối lượng phân bố đều trên chiều cao của các tầng.



Hình 1. Mô hình phần tử hữu hạn cho nhà nhiều tầng

Phương trình chuyển động của hệ kết cấu:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{k}\mathbf{x} = \mathbf{p} \quad (1)$$

trong đó $\mathbf{m}$, $\mathbf{c}$, $\mathbf{k}$ lần lượt là các ma trận khối lượng, cản và độ cứng của hệ; $\mathbf{p}$ là véc tơ tải trọng gió tác dụng lên hệ kết cấu nhà kết cấu.

Theo [7] ,ma trận độ cứng phần tử, $\boldsymbol{k}_e$ có dạng

$$\mathbf{k}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_{11} & \mathbf{k}_{12} \\ \mathbf{k}_{21} & \mathbf{k}_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Ma trận khối lượng phần tử, $\mathbf{m}_e$, được xác định như sau:

$$\mathbf{m}_e = \mathbf{m}_{e1} + \mathbf{m}_{e2} \quad (3)$$

trong đó $\mathbf{m}_{e1}$ là ma trận khối lượng đường chéo được xây dựng từ khối lượng tập trung của hệ dầm-sàn; và $\mathbf{m}_{e2}$ là ma trận khối lượng được xây dựng từ khối lượng phân bố liên tục của hệ cột và vách.

Ma trận khối lượng $\mathbf{m}_{e1}$ có dạng sau:

$$\mathbf{m}_{e1} = \mathrm{diag}\left(\frac{m}{2}, \frac{m}{2}, \frac{m}{2}, 0, 0, 0, \frac{m}{2}, \frac{m}{2}, \frac{m}{2}, 0, 0, 0\right) \quad (4)$$

trong đó $m\ (kg)$ là khối lượng dầm sàn của một tầng

Theo [7], ma trận khối lượng $\mathbf{m}_{e2}$ có dạng sau:

$$\mathbf{m}_{e2} = \begin{bmatrix} \mathbf{m}_{11} & \mathbf{m}_{12} \\ \mathbf{m}_{21} & \mathbf{m}_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Ma trận độ cứng ($\mathbf{k}$) và ma trận khối lượng ($\mathbf{m}$) tổng thể được xác định theo công thức:

$$\mathbf{k} = \mathbf{T}^{\mathrm{T}}\mathbf{k}_e\mathbf{T}\ ,\ \mathbf{m} = \mathbf{T}^{\mathrm{T}}\mathbf{m}_e\mathbf{T} \quad (6)$$

trong đó $\mathbf{T}$ là ma trận chuyển.

Tần số dao động và dạng dao động của hệ được xác định thông qua việc giải phương trình trị riêng sau:

$$\det[\mathbf{k} - \omega^2\mathbf{m}] = \mathbf{0} \quad (7)$$

2.2. Tải trọng gió

Trong bài báo này, vận tốc gió cơ sở, $V_{3s,50}(\frac{m}{s})$; là vận tốc gió được lấy trung bình trong khoảng thời gian 3s, chu kỳ lặp 50 năm, ở độ cao 10m so với mốc chuẩn, tương ứng với dạng địa hình B. Vận tốc gió cơ sở được tra theo bảng 5.1 của QCVN 02:2022 [4].

Phổ vận tốc gió được sử dụng trong [5] có dạng:

$$R_n = \frac{7.47N_1}{(1+10.3N_1)^{5/3}} \quad (8)$$

với $N_1 = \dfrac{n_1 L(z_s)}{V(z_s)_{3600s,50}}$ (9)

$$V(z_s)_{3600s,50} = \bar{b}\left(\frac{z_s}{10}\right)^{\bar{\alpha}} V_{3s,50} \quad (10)$$

trong đó $n_1\ (Hz)$ là tần số dao động cơ bản của công trình theo phương gió, $L(z_s)$ là thang nguyên kích thước xoáy tại độ cao z_s, $V(z_s)_{3600s,50}\ (\frac{m}{s})$ là vận tốc gió trung bình trong 1 giờ chu kỳ lặp 50 năm tại độ cao z_s, $z_s\ (m)$ là cao độ tương đương và bằng 0.6 chiều cao công trình, $\bar{b}, \bar{\alpha}$ là các hệ số tra bảng 10 của [5]

Phổ vận tốc gió được sử dụng trong [6] có dạng:

$$\frac{fS_u(x,f)}{u_*^2} = \frac{6.8f_L}{(1+10.2f_L)^{5/3}}\ ;\ \text{với}\ \ f_L = \frac{fL_u^x}{V} \quad (11)$$

trong đó $L_u^x\ (m)$ là thang nguyên kích thước xoáy , x là phương đứng, u là phương theo hướng di chuyển của gió, $f\ (Hz)$ là tần số dao động cơ bản của công trình theo phương gió, $V\ (\frac{m}{s})$ là vận tốc gió trung bình ở độ cao x.

2.3 Hệ số giật

Theo [5], Hệ số giật G_f được xác định theo:

$$G_f = 0.925\left(\frac{1+1.7I(z_s)\sqrt{g_Q^2Q^2 + g_R^2R^2}}{1+1.7g_vI(z_s)}\right) \quad (12)$$

trong đó g_Q, g_v lần lượt là hệ số đỉnh cho thành phần xung và thành phần phản ứng của gió, lấy bằng 3.4; Q là hệ số phản ứng nền; R là hệ số phản ứng cộng hưởng; $I(z_s)$ là cường độ rối (nhiễu loạn) ở độ cao tương đương z_s; $z_s(m)$ bằng 0.6 lần chiều cao công trình.

Hệ số phản ứng nền được xác định theo:

$$Q = \sqrt{\frac{1}{1+0.63\left(\frac{B+h}{L(z_s)}\right)^{0.63}}} \quad (13)$$

trong đó $B\ (m)$ là bề rộng đón gió; $h\ (m)$ là chiều cao công trình; $L(z_s)$ là thang nguyên kích thước xoáy tại độ cao tương đương z_s.

Thang nguyên kích thước xoáy ở độ cao z_s

$$L(z_s) = \ell\left(\frac{z_s}{10}\right)^{\bar{\varepsilon}} \quad (14)$$

trong đó $l, \bar{\varepsilon}$ là các hệ số tra bảng 10 của [5] .

Hệ số phản ứng cộng hưởng được xác định theo:

$$R = \sqrt{\frac{1}{\beta} R_n R_h R_b (0.53 + 0.47 R_d)} \quad (15)$$

trong đó β lấy bằng 0.02 đối với kết cấu bê tông cốt thép; R_h, R_b, R_d là các hàm dẫn suất khí động được xác định theo [5] .

R_n tính theo công thức:

$$R_n = \frac{7.47 N_1}{(1+10.3N_1)^{5/3}} \quad (16)$$

trong đó N_1 tính theo công thức (n_1 là tần số dao động thứ 1):

$$N_1 = \frac{n_1 L(z_s)}{V(z_s)_{3600s,50}} \quad (17)$$

trong đó $V(z_s)_{3600s,50}$ là vận tốc gió trung bình ở độ cao z_s trong thời gian 1 giờ, chu kỳ 50 năm

$$V(z_s)_{3600s,50} = \bar{b}\left(\frac{z_s}{10}\right)^{\bar{\alpha}} V_{3s,50} \quad (18)$$

trong đó $\bar{b}, \bar{\alpha}$ là các hệ số tra bảng 10 của [5]

Cường độ rối ở độ cao z

$$I_z = I(z) = c_r\left(\frac{10}{z}\right)^{1/6} \quad (19)$$

Hệ số cản chính diện được xác định theo:

$$c_x = k_\lambda . c_{x\infty} \quad (20)$$

trong đó k_λ là hệ số phụ thuộc vào độ mảnh hiệu dụng của công trình. Đối với công trình có tiết diện hình chữ nhật thì $c_{x\infty}$ tra theo hình F.22 của [5] .

Theo [6], Hệ số giật được xác định theo:

$$c_s c_d = \frac{1+2k_p I_v(z_s)\sqrt{B^2+R^2}}{1+7I_v(z_s)} \quad (21)$$

trong đó k_p là hệ số đỉnh; B là hệ số phản ứng nền; R là hệ số phản ứng cộng hưởng; $I_v(z_s)$là cường độ rối tại độ cao z_s; $z_s\ (m)$ là độ cao tham chiếu và bằng 0.6 lần chiều cao công trình.

Hệ số nền B được xác định theo công thức sau:

$$B^2 = \frac{1}{1+0.9\left(\frac{D+H}{L(z_s)}\right)^{0.63}} \quad (22)$$

trong đó $D\ (m)$ là cạnh đón gió; $H\ (m)$ là chiều cao công trình; n_{1x} là tần số dao động cơ bản thứ nhất, $L(z_s)$ là thang nguyên kích thước xoáy tại độ cao z_s.

Hệ số phản ứng cộng hưởng được xác định như sau :

$$R_{EC} = \sqrt{\frac{\pi^2}{2(\delta_s+\delta_a)} S_L(z_s,f_x) R_h(\eta_h) R_b(\eta_b)} \quad (23)$$

trong đó :

$S_L(z_s,f_x)$ là hàm mật độ phổ không thứ nguyên (24)

$$f_L(z_s,f_x) = \frac{f_x L_u^x(z_s)}{V(z_s)} \quad (25)$$

$$L_u^x(z_s) = 300\left(\frac{z_s}{200}\right)^{0.67+0.05\ln(z_o)} \quad \text{khi } z \ge z_{min}$$
$$L_u^x(z_s) = L_u^x(z_{min}) \quad \text{khi } z < z_{min} \quad (26)$$

$$\delta_a = \frac{c_f \rho V(z_s)}{2 n_1 m_e} \quad (27)$$

trong đó δ_a là độ giảm chấn logarit; $n_1(Hz)$ là tần số dao động cơ bản theo phương gió; δ_s là độ giảm chấn của bản thân công trình; $H(m)$ là chiều cao công trình; các giá trị z_0, z_{min} là các hệ số tra theo bảng 4.1 của [6]; R_h, R_b là các hàm dẫn suất khí động được xác định theo [6] .

Hệ số đỉnh k_p được xác định theo công thức sau

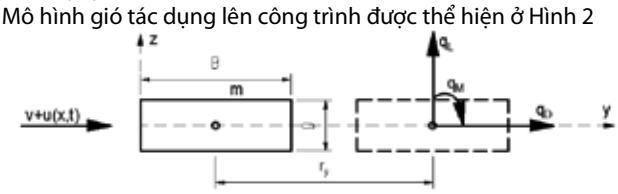
$$k_p = \sqrt{2\ln(600\nu)} + \frac{0.6}{\sqrt{2\ln(600\nu)}} \ge 3 \quad (28)$$

Với $$\nu = n_{1x}\sqrt{\frac{R^2}{B^2+R^2}} \quad (29)$$

trong đó n_{1x} là tần số dao động cơ bản thứ nhất theo phương gió, B là hệ số nền, R là hệ số cộng hưởng.

2.4. Độ lệch chuẩn của gia tốc

Mô hình gió tác dụng lên công trình được thể hiện ở Hình 2



Hình 2 Tải trọng gió tác dụng vào công trình

trong đó q_L là lực nâng, q_D là lực đẩy và q_M là mô men xoay quanh trục đứng.

Trong bài báo này chỉ xét phản ứng do thành phần nhiễu loạn theo phương của gió gây ra, và theo Strommen [7] thì tải trọng đơn vị tác động lên công trình do thành phần này được xác định theo công thức:

$$q_D(z,t) = \rho V u(z,t) \bar{C}_D D \quad (30)$$

trong đó $\rho\ (\frac{kg}{m^3})$ là khối lượng riêng của không khí; $D\ (m)$ bề rộng đón gió, $\bar{C}_D$ là hệ số lực theo phương gió; $u(x,t)$ là thành phần nhiễu loạn của vận tốc gió theo phương gió tại độ cao x và thời gian t; $V\ (\frac{m}{s})$ là vận tốc gió trung bình ở độ cao x

Tải trọng tác dụng lên công trình được xác định theo công thức:

$$\tilde{Q}_x(t) = \int_L \phi_x(z) q_D(z,t) dz \quad (31)$$

trong đó $\phi_x(z)$là dạng dao động của công trình ở độ cao z. Sử dụng phương pháp biến đổi Fourier phương trình trên ta có phổ tải trọng gió:

$$S_{\tilde{Q}_x}(\omega) = \left[\frac{\rho B}{2} J_x(\omega)\right]^2 \quad (32)$$

trong đó $\omega\ (\frac{rad}{s})$ là miền tần số; $B\ (m)$ là cạnh song song với hướng gió; $J_x(\omega)$ là hàm điều chỉnh tải trọng gió.

Từ phổ tải trọng ta tính được phổ chuyển vị như sau:

$$S_{r_x}(z,\omega) = \frac{\phi_x^2(z)}{\omega_x^2 \tilde{M}_x} \left|\hat{H}_x(\omega)\right|^2 S_{\tilde{Q}_x}(\omega) \quad (33)$$

trong đó ω_x ($\frac{rad}{s}$) là tần số góc của dao động cơ bản theo phương gió; $\widetilde{M}_x$ là khối lượng tương đương theo phương gió; $\widetilde{H}_x(\omega)$ là hàm phản ứng tần số theo phương gió.

Phổ gia tốc theo công thức sau:

$$S_{a_x}(\omega) = \omega^4 S_{r_x}(\omega) \quad (34)$$

Theo Strommen [7], độ lệch chuẩn của gia tốc theo các công thức sau:

$$\sigma_{a_x} = \sqrt{\int_0^\infty S_{a_x}(\omega)d\omega} = \sqrt{\int_0^\infty \omega^4 S_{r_x}(\omega)d\omega} \quad (35)$$

2.5. Gia tốc đỉnh

Theo Strommen [7], gia tốc đỉnh được tính theo công thức:

$$a_x = k_p \sigma_{a_x} \quad (36)$$

trong đó k_p là hệ số đỉnh; σ_{a_x} là độ lệch chuẩn gia tốc. Đối với tiêu chuẩn TCVN 2737:2023 thì hệ số đỉnh được tính theo công thức

$$g_R = \sqrt{2\ln(3600n_1)} + \frac{0.577}{\sqrt{2\ln(3600n_1)}} \quad (37)$$

trong đó $n_1(Hz)$ là tần số dao động cơ bản thứ 1 theo phương gió. Đối với tiêu chuẩn EN1991-1-4 thì k_p được tính theo công thức B.4 phụ lục B. Do [5] không có chỉ dẫn cụ thể phần tính độ lệch chuẩn cho gia tốc nên trong bài báo này áp dụng công thức tính độ lệch chuẩn được trình bày trong phần 2.4. Theo phụ lục B của EN1991-1-4 [6], độ lệch chuẩn của gia tốc đỉnh theo phương gió được tính theo:

$$\sigma_{\ddot{u}_x}(z) = \frac{c_f \rho D I_u(z_s) V^2(z_s)}{m_e} R_{EC} K_x \phi_x(z) \quad (38)$$

trong đó c_f là hệ số lực; ρ khối lượng riêng của không khí, lấy bằng 1.25 ($\frac{kg}{m^3}$) ; m_e là khối lượng tương đương; $V(z_s)$ là vận tốc gió trung bình tại độ cao tham chiếu z_s ; $I_u(z_s)$ là cường độ rối ở độ cao z_s ; z_s lấy bằng 0.6 lần chiều cao của công trình; R_{EC} là hệ số phản ứng cộng hưởng; K_x là hệ số không thứ nguyên; D là bề rộng đón gió; $\phi_x(z)$ là véc tơ dạng dao động ứng với dao động thứ nhất theo phương gió. Hệ số không thứ nguyên K_x được xác định theo công thức như sau:

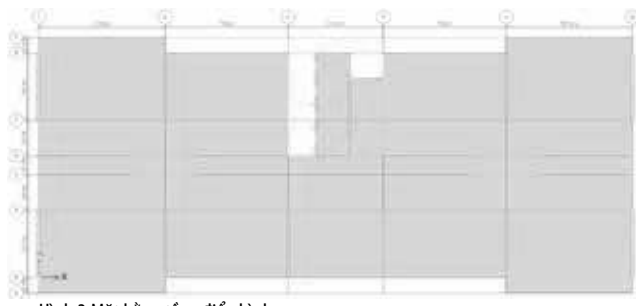
$$K_x = \frac{\int_0^H V^2(z_s)\phi_x(z_s)dz}{V^2(z_s)\int_0^H \phi_x^2(z_s)dz} \quad (39)$$

3. KẾT QUẢ SỐ

3.1. Công trình áp dụng

Công trình được sử dụng trong mô phỏng số cho bài báo này là một chung cư 36 tầng được xây dựng tại Việt nam, ở gió vùng II, địa hình B. Công trình có mặt bằng tầng điển hình như Hình 3.

Các đặc trưng hình học và khối lượng của tầng được thể hiện trong Bảng 1. Mô đun đàn hồi, hệ số Poisson, trọng lượng riêng của vật liệu bê tông lần lượt là 3.6e10 ($\frac{N}{m^2}$) , 0.2, 25 ($\frac{kN}{m^3}$)



Hình 3 Mặt bằng tầng điển hình

Bảng 1. Đặc trưng hình học và khối lượng công trình

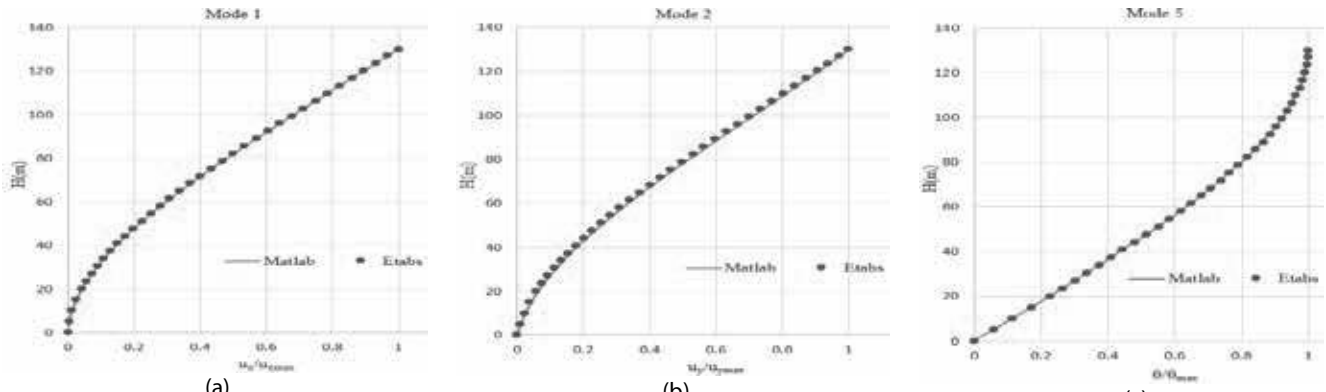
Tầng	Chiều cao tầng (m)	Ix (m^4)	Iy (m^4)	Diện tích sàn (m^2)	Khối lượng sàn (kg)	Khối lượng cột vách (kg)
T01	5	2311.791	12300.43	1125.08	1522138	656442
T02	5	2311.791	12300.43	1125.08	1520064	656442.3
T03	5	2311.791	12300.43	1125.08	1522138	656442.3
T04	5	2311.791	12300.43	1125.08	1513470	656442.3
T05- T06	3.45	2311.791	12300.43	1125.08	1461587	452945.2
T07-T08	3.45	2311.791	12300.43	1192.88	1543427	452945.2
T09	3.45	2311.791	12300.43	1192.88	1534785	452945.2
T10	3.45	2311.791	12300.43	1192.88	1543427	452945.2
T11 – T16	3.45	2094.731	11069.87	1192.88	1543427	424361.3
T17 – T20	3.45	2035.143	10764.22	1192.88	1543427	400174.9
T21 – T25	3.45	1817.034	9533.684	1192.88	1543427	371591
T26 – T30	3.45	1760.807	9510.714	1192.88	1543427	357958.6
T31 – T35	3.45	1538.728	7997.525	1192.88	1543427	318820.6
T36	3	1538.728	7997.525	1125.08	1348316	277235.3

3.2. Chu kỳ dao động và hình dạng dao động

Một mô hình phân tích động lực học của công trình được xây dựng dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn trong môi trường MATLAB để xác định phản ứng động của công trình. Độ tin cậy của mô hình này được đánh giá thông qua việc so sánh với mô hình tham chiếu được xây dựng trong phần mềm ETABS cả về tần số dao động riêng và dạng dao động của hệ. Bảng 2 thể hiện so sánh về chu kỳ giữa hai mô hình. Kết quả so sánh về hình dạng dao động đầu tiên của dạng dao động tịnh tiến theo hai phương và xoắn được thể hiện ở Hình 4. Từ các kết quả trên ta thấy rằng mô hình phần tử hữu hạn được xây dựng trong MATLAB có sự tương thích cao so với mô hình trong ETABS.

Bảng 2. So sánh chu kỳ dao động giữa mô hình trong ETABS và MATLAB

Dạng dao động	Chu kỳ T (s)		Sai số (%)	Dạng dao động	Chu kỳ T (s)		Sai số (%)
	ETABS	MATLAB			ETABS	MATLAB	
1	2.526	2.5349	0.352%	7	0.189	0.19568	3.534%
2	1.179	1.1982	1.628%	8	0.128	0.1366	6.719%
3	0.466	0.47483	1.895%	9	0.11	0.11483	4.391%
4	0.291	0.29127	0.093%	10	0.102	0.10173	0.265%
5	0.272	0.28637	5.283%	11	0.083	0.089626	7.983%
6	0.194	0.19663	1.356%	12	0.075	0.079701	6.268%



(a) (b) (c)

Hình 4. So sánh dạng dao động của hai mô hình, *(a), (b) lần lượt là tịnh tiến theo phương X, Y, (c) xoắn quanh trục Z*

3.3. Gia tốc theo phương hướng gió

Kết quả tính toán gia tốc đỉnh công trình được thể hiện trong Bảng 3. Từ kết quả trên ta thấy gia tốc đỉnh tính theo tiêu chuẩn EN1991-1-4 cho kết quả lớn hơn tiêu chuẩn TCVN 2737:2023 với sự chênh lệch là 12.27%.

Bảng 3. So sánh gia tốc đỉnh giữa TCVN và Eurocode

Phương pháp	Gia tốc đỉnh (m/s^2)	Chênh lệch (%)
TCVN2737:2023	0.041158	-
EN1991-1-4	0.046209	12.27%

Sự chênh lệch này do hai nguyên nhân chính: (1) hệ số đỉnh của hai tiêu chuẩn được tính theo hai công thức khác nhau; (2) EN1991-1-4 sử dụng phổ gió Kaimal chuẩn (hệ số 6.8 cho tử số và 10.2 cho mẫu số), trong khi TCVN 2737:2023 sử dụng phổ gió Kaimal đơn giản hóa (hệ số 7.47 cho tử số và 10.3 cho mẫu số). Cần lưu ý rằng do TCVN 2737:2023 không có chỉ dẫn cụ thể về tính độ lệch chuẩn gia tốc, phép so sánh này sử dụng công thức độ lệch chuẩn theo Strommen [7] kết hợp với các thông số của TCVN 2737:2023.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày phương pháp xác định gia tốc đỉnh theo tiêu chuẩn châu Âu (EN1991-1-4) và tiêu chuẩn Việt Nam (TCVN 2737:2023) để tính gia tốc đỉnh theo phương dọc gió cho công trình nhiều tầng với chiều cao trung bình, có mặt bằng hình chữ nhật và được xây dựng ở khu vực gió thuộc vùng II, địa hình B. Do TCVN 2737:2023 không có chỉ dẫn cụ thể về tính độ lệch chuẩn gia tốc, bài báo đã sử dụng công thức theo Strommen [7] kết hợp với hệ số đỉnh và phổ gió của TCVN. Kết quả cho thấy, đối với công trình khảo sát, gia tốc đỉnh tính theo EN 1991-1-4 cho kết quả lớn hơn 12.27% so với TCVN 2737:2023. Sự chênh lệch này chủ yếu do sự khác biệt về hệ số đỉnh và dạng phổ gió Kaimal giữa hai tiêu chuẩn.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM thông qua đề tài nghiên cứu khoa học cấp cơ sở năm 2025-2026. Tên đề tài: "Nghiên cứu sự tương tác giữa nền và công trình nhiều tầng chịu tải trọng gió"

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Priyan Mendis, Tuan Ngo, N. Haritos, A. Hira, B. Samali và J. Cheung, "Wind Loading on Tall Buildings", Electronic Journal of Structural Engineering, số 1, tr. 41-54, 2007.

[2] McEvoy, C. và Fitzgerald, B., "Structural Reliability of Tall Buildings Under Wind Loads with Tuned Mass Damper Fluid Inerters", Buildings, 15(10), tr. 1736, 2025.

[3] H. Alinejad, B. Ahn và T. H. K. Kang, "Performance-Based Wind Design of Tall Buildings Considering Corner Modification and Inelastic Behavior", Journal of Structural Engineering, 150(7), 2024.

[4] QCVN 02:2022, Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về số liệu điều kiện tự nhiên dùng trong xây dựng, Bộ Xây dựng, 2022.

[5] TCVN 2737:2023, Tải trọng và tác động, Bộ Khoa học và Công nghệ, 2023.

[6] EN 1991-1-4, Eurocode 1: Actions on Structures - Part 1-4: General Actions - Wind Actions, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2005.

[7] Einar N. Strømmen, Structural Dynamics, Springer International Publishing, Switzerland, 2014.

■Ngày nhận bài: 26/02/2026 ■Ngày sửa bài: 07/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 18/3/2026

Một số kết quả nghiên cứu bước đầu về hỗn hợp Stone Mastic Asphalt sử dụng xỉ thép trong xây dựng mặt đường ở Việt Nam

Preliminary investigation on the performance of Stone Mastic Asphalt (SMA) mixtures incorporating steel slag for pavement construction in Vietnam

> THS NGUYỄN TRỌNG ANH MINH, PGS.TS NGUYỄN HOÀNG LONG*, PGS.TS TRẦN VĂN QUÂN, TS LÊ THANH HẢI
Trường Đại học Công nghệ giao thông vận tải; *Email: longnh@utt.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày một số kết quả nghiên cứu bước đầu về khả năng sử dụng xỉ thép thay thế đá dăm để chế tạo hỗn hợp Stone Mastic Asphalt (SMA), bao gồm lựa chọn thành phần cấp phối, thử nghiệm đánh giá các chỉ tiêu độ ổn định và độ dẻo Marshall. Kết quả thí nghiệm cho thấy có thể chế tạo SMA sử dụng xỉ thép với hàm lượng thay thế từ 5% đến 20% đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật cho xây dựng mặt đường ô tô trong điều kiện Việt Nam. SMA sử dụng xỉ thép với hàm lượng 20% có độ ổn định Marshall đạt giá trị cao nhất.

Từ khóa: Hỗn hợp đá vữa nhựa; xỉ thép; độ ổn định Marshall; độ dẻo Marshall.

ABSTRACT

This paper presents preliminary research findings on the feasibility of utilizing steel slag as a partial replacement for coarse aggregates in Stone Mastic Asphalt (SMA) mixtures. The investigation encompasses aggregate gradation design and the evaluation of Marshall stability and flow parameters. Experimental results demonstrate that SMA mixtures incorporating steel slag at replacement levels ranging from 5% to 20% satisfy the technical specifications for road pavements under Vietnamese conditions. Notably, the SMA mixture with a 20% steel slag content achieved the peak Marshall stability value.

Keywords: Stone Mastic Asphalt; steel slag; marshall stability; marshall flow.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Xỉ thép đã được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực xây dựng hạ tầng giao thông vận tải ở nhiều nước trên thế giới như: Mỹ, Nga, Trung Quốc… Tỷ lệ tái chế sử dụng xỉ thép có thể đạt gần 100% ở một số nước phát triển. Tuy nhiên, ở Việt Nam, về cơ bản xỉ thép vẫn được xem là chất thải rắn cần xử lý, chôn cất. Điều này không những gây tác động xấu đến môi trường mà còn tiêu tốn chi phí, năng lượng và chiếm dụng diện tích đất nhất định cho việc xử lý xỉ thép. Tái chế sử dụng xỉ thép (nhất là trong lĩnh vực xây dựng, giao thông) không những mang lại lợi ích lớn về năng lượng, môi trường, kinh tế mà còn góp phần vào sự phát triển bền vững của xã hội, phù hợp với chủ trương của Chính phủ đó là ưu tiên cho việc tái chế và xử lý chất thải rắn, nhằm giảm thiểu khối lượng chất thải được chôn lấp, tiết kiệm kinh phí, năng lượng cho đất nước.

Số liệu từ Hiệp hội Thép Việt Nam (VSA) cho thấy, tổng sản lượng sản xuất thép thô cả năm 2025 đạt 24,7 triệu tấn, đạt mức cao kỷ lục trong 5 năm trở lại đây [8]. Lượng xỉ thải ra từ các nhà máy thông thường chiếm từ 11% - 12% khối lượng phôi đầu vào. Như vậy, mỗi năm, lượng xỉ thải ra từ các nhà máy luyện thép trên cả nước sẽ lên đến 1 - 1,5 triệu tấn. Lượng xỉ này tương ứng với thể tích khoảng 300.000 - 500.000m^3 [16]. Xỉ thép được tạo ra từ quá trình sản xuất thép. Tùy thuộc vào lò luyện thép mà xỉ thép được chia thành hai loại: xỉ lò thổi (Basic Oxygen Furnace slag - BOF) và xỉ lò hồ quang điện (Electric Arc Furnace slag - EAF).

Năm 2017, Bộ Xây dựng ban hành Chỉ dẫn kỹ thuật "*Xỉ gang và xỉ thép sử dụng làm vật liệu xây dựng*" (Quyết định số 430/QĐ-BXD ngày 16/5/2017). Tuy nhiên, tài liệu này mới đưa ra các chỉ dẫn cơ bản đối với ứng dụng của xỉ gang, xỉ thép và còn viện dẫn nhiều tiêu chuẩn nước ngoài. Do vậy, việc nghiên cứu, lựa chọn các đặc tính của xỉ thép, và khả năng ứng dụng thực tế vào sản xuất bê tông nhựa (BTN) sử dụng xỉ thép là điều vô cùng cần thiết.

Hỗn hợp đá vữa nhựa - Stone Mastic Asphalt (SMA) có nguồn gốc ở Đức vào cuối những năm 1960 và sau đó trở nên phổ biến ở Châu Âu, Mỹ, Australia, New Zealand, Nhật Bản, Trung Quốc… SMA được sử dụng phổ biến làm lớp mặt đường cao tốc, đường sân bay, mặt cầu… ở nhiều nước trên thế giới do có ưu điểm hơn so với hỗn hợp BTN truyền thống về khả năng chống lún vệt bánh xe, kháng nứt, kháng ẩm, tuổi thọ cao. Từ năm 1990, vật liệu này nhanh chóng được áp dụng ở Mỹ và đưa vào các tiêu chuẩn dưới tên gọi Stone Mastic Asphalt [10].

Trên thế giới đã có nhiều nghiên cứu và ứng dụng xỉ thép làm cốt liệu cho BTN và SMA. Từ những năm 1990, xỉ thép đã được sử dụng cho công nghệ chế tạo BTN tại Úc, Mỹ. Theo thống kê của Sở GTVT Washington, có mười sáu tiểu bang và Đặc khu Columbia đã

ghi nhận việc ứng dụng cốt liệu xỉ thép trong thực tiễn. Riêng Bang Indiana đã ban hành tiêu chuẩn sử dụng xỉ thép cho lề đường, lớp mặt BTN nóng, lớp mặt SMA…. Bang Iowa đã có các nghiên cứu với tỷ lệ thay thế xỉ thép trong hỗn hợp cốt liệu từ 25 - 30% [19].

Nghiên cứu của Ali [2] cho thấy, BTN có mô đun đàn hồi và cường độ chịu nén tăng, ít biến dạng và ít bị ảnh hưởng bởi nước hơn khi hàm lượng xỉ thép trong hỗn hợp tăng. Hướng dẫn sử dụng xỉ thép của Hiệp hội xỉ thép Australia [4] cho thấy xỉ thép hoàn toàn phù hợp để dùng làm cốt liệu cho BTN, bởi xỉ thép có cường độ cao, sắc cạnh, độ chống va đập, chống mài mòn, chống bong bật và chống trượt tốt. Asi [3] đã thay thế đá dăm bằng xỉ thép trong BTN với các tỷ lệ 25%, 50%, 75%, 100%, kết quả cho thấy việc thay thế 75% cốt liệu thô đá vôi bằng xỉ thép đã cải thiện đáng kể các đặc tính cơ học của BTN, tỷ lệ thay thế 25% là tối ưu. Năm 2010, Mladen Fistri [6] đã tiến hành thí nghiệm hằn lún bằng thiết bị Wheel tracking đối với BTN sử dụng xỉ thép. Kết quả cho thấy khả năng kháng lún của BTN sử dụng xỉ thép gấp 3 lần so với BTN thông thường. Nghiên cứu của Kateryna [9] đã nhận định, xỉ thép có thể sử dụng như một loại cốt liệu để sản xuất BTN. Điều này không những làm giảm giá thành, mà còn cải thiện độ bền theo thời gian của BTN, nhất là trong 5 năm đầu của thời kỳ khai thác.

Năm 2003, ShaopengWu đã công bố quy trình thiết kế và chế tạo SMA sử dụng xỉ thép trên tập san của nhà xuất bản Springer [17]. Năm 2007, nghiên cứu của ShaopengWu cho thấy SMA sử dụng xỉ thép có các đặc tính kỹ thuật tương đương và tốt hơn BTN thông thường. Đặc biệt, ở nhiệt độ cao, SMA sử dụng xỉ thép có khả năng kháng biến dạng vĩnh cửu tốt hơn. Các thử nghiệm thực tế trên mặt đường sau 2 năm sử dụng đã cho thấy hệ số mài mòn và chiều sâu lún bề mặt là rất nhỏ (lần lượt là 55 BPN và 0,8mm) [20]. Nghiên cứu của A.Behnood [5] đã chỉ ra rằng, sử dụng xỉ thép trong SMA giúp độ ổn định Marshall tăng lên và giá trị độ dẻo Marshall giảm xuống, nâng cao khả năng kháng ẩm và chống biến dạng vĩnh cửu, đồng thời có độ sâu hằn lún thấp hơn. Hainina [7] đã sử dụng xỉ thép thay thế cốt liệu cho SMA14 và SMA20, kết quả chỉ ra rằng việc sử dụng xỉ thép giúp cải thiện cường độ và khả năng chống hằn lún so với các mẫu SMA đối chứng. Năm 2015, Trung Quốc đã ban hành tiêu chuẩn sử dụng xỉ thép cho hỗn hợp SMA (YB/T 4488-2015: Steel slag for stone mastic asphalt).

Tại Việt Nam, đã có những công trình nghiên cứu về xỉ thép như: nghiên cứu xỉ thép làm móng đường ô tô [12]; sử dụng cốt liệu xỉ thép để sản xuất BTN nóng ở khu vực phía nam Việt Nam [15]; sử dụng xỉ thép làm cốt liệu thay thế đá dăm làm BTN [18]. Các nghiên cứu đều cho thấy, BTN sử dụng xỉ thép có tính chất cơ lý tương đương hoặc cao hơn BTN sử dụng đá dăm thông thường.

Năm 2023, L.V.Phúc [11] đã tiến hành thí nghiệm trong phòng đánh giá khả năng sử dụng xỉ thép khu vực Bà Rịa - Vũng Tàu để chế tạo SMA. Nghiên cứu đã thay thế 50% và 75% cốt liệu bằng xỉ thép để chế tạo SMA 12,5. Kết quả cho thấy có thể sử dụng 50% xỉ thép để thay thế cốt liệu trong việc chế tạo SMA 12,5 làm mặt đường ô tô. Năm 2024, N.T.Sang [14] đã thay thế xỉ thép làm một phần cốt liệu lớn từ 20%, 40%, 60%, 80%, 100% và tỷ lệ hàm lượng sợi xơ dừa trong hỗn hợp SMA C9,5 từ 0,2%, 0,3%, 0,4%. Kết quả nghiên cứu cho thấy xỉ thép và sợi xơ dừa cải thiện đáng kể độ ổn định và độ dẻo Marshall, độ ổn định Marshall lên đến 30 KN.

Nghiên cứu này được thực hiện trong phòng với mục đích bước đầu chế tạo SMA có cỡ hạt lớn nhất danh định là 12,5 mm (SMA 12,5) sử dụng xỉ thép thay thế đá dăm với các hàm lượng khác nhau: 5%, 10%, 15% và 20%.

2. THÀNH PHẦN VẬT LIỆU

Thành phần vật liệu trong nghiên cứu bao gồm: Cốt liệu thô, cốt liệu mịn, bột khoáng, xỉ thép, chất kết dính và chất ổn định, chi tiết như sau:

2.1. Cốt liệu thô, cốt liệu mịn và bột khoáng

Cốt liệu thô và cốt liệu mịn được nghiền từ đá bazan tại mỏ đá Phú Mãn (Quốc Oai, Hà Nội), bột khoáng lấy từ mỏ đá Kiện Khê (Hà Nam). Các chỉ tiêu kỹ thuật của cốt liệu và bột khoáng sau khi thí nghiệm đáp ứng yêu cầu sử dụng cho BTN theo các quy định hiện hành. Các thông số kỹ thuật của cốt liệu và bột khoáng được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Kết quả thí nghiệm các yêu cầu kỹ thuật đối với cốt liệu

Chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Dmax 19	Dmax 12,5	Dmax 5	Bột khoáng	Tiêu chuẩn
Tỷ trọng khối	-	2,790	2,830	2,850	2,700	AASHTO T85
Độ hao mòn Los Angeles	%	9,5	18,3	-		TCVN 7572-12
Hàm lượng hạt thoi dẹt	%	7,43	5,81	-		TCVN 7572-13
Hàm lượng chung bùn, bụi, sét	%	0,272	0,783	3,267		TCVN 7572-8
Mô đun độ lớn M_k	-	-	-	3,6		TCVN 7572-2
Độ góc cạnh của cát	%	-	-	50,6		TCVN 8860-7

2.2. Nhựa đường

Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng bitum PMB III do Công ty TNHH Nhựa đường Petrolimex - Việt Nam cung cấp. Kết quả thử nghiệm các chỉ tiêu của nhựa đường được trình bày ở Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả thử nghiệm các chỉ tiêu của nhựa đường PMB III

TT	Chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Nhựa PMB III
1	Độ kim lún ở 25°C	0,1mm	48
2	Nhiệt độ hoá mềm	°C	86
3	Nhiệt độ bắt lửa	°C	255
4	Lượng tổn thất sau khi đun nóng ở 163°C trong 5 giờ	%	0,004
5	Khối lượng thể tích ở 25°C	g/cm³	1,037
6	Độ dính bám đối với đá	Cấp	Cấp 5
7	Độ đàn hồi ở 25°C	%	83,5

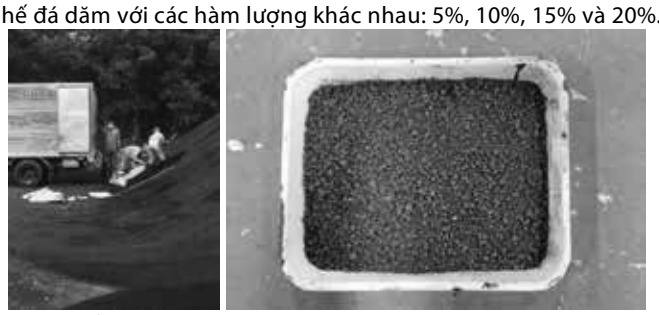
2.3. Chất ổn định - sợi cellulose

Chất ổn định được sử dụng trong nghiên cứu là sợi cellulose (loại sợi hữu cơ) ARBOCEL ZZ 8/1 do Công ty JRS (Đức) cung cấp Hình 1. Tại Mỹ, khuyến cáo sử dụng sợi cellulose cho hỗn hợp SMA với tỷ lệ 0,3% theo khối lượng hỗn hợp, sợi khoáng tỷ lệ là 0,4%) [1]. Ấn Độ, Trung Quốc và một số nước ở châu Âu quy định sử dụng sợi cellulose cho hỗn hợp SMA với hàm lượng tối thiểu là 0,3% theo khối lượng hỗn hợp. Trong nghiên cứu này, sử dụng sợi cellulose với tỷ lệ 0,3% theo khối lượng hỗn hợp.

Hình 1. Chất ổn định (sợi cellulose)

2.4. Xỉ thép

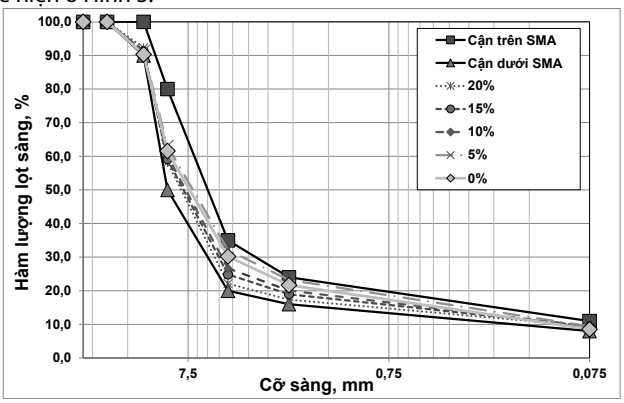
Xỉ thép lò hồ quang điện (EAF) đã được nghiền, sàng, lấy tại TP Hải Phòng (Hình 2). Trong nghiên cứu này, xỉ thép được thay thế đá dăm với các hàm lượng khác nhau: 5%, 10%, 15% và 20%.



Hình 2. Xỉ thép

3. THIẾT KẾ THÀNH PHẦN CẤP PHỐI

SMA được thiết kế theo các chỉ tiêu về đặc tính thể tích như độ rỗng dư, độ rỗng cốt liệu và sự hình thành liên kết đá chèn đá [10]. Tiêu chuẩn kỹ thuật cho hỗn hợp SMA ở Mỹ trước đây là AASHTO MP8 và AASHTO PP 41-02. Hiện nay đã được thay thế bằng tiêu chuẩn AASHTO M325-08 và AASHTO R46-08. Điểm khác biệt lớn nhất giữa hai tiêu chuẩn là AASHTO M325 yêu cầu sử dụng đầm xoay (SGC), trong khi đó AASHTO MP8 sử dụng thiết bị đầm theo phương pháp Marshall (2×50 chày/1 mặt; độ ổn định Marshall ≥ 6,2kN và độ dẻo Marshall từ 2-4 mm). Trong nghiên cứu này, phương pháp Marshall được lựa chọn để thiết kế SMA có kích cỡ hạt lớn nhất danh định bằng 12,5 mm. SMA sử dụng xỉ thép để thay thế đá dăm thông thường với hàm lượng xỉ thép khác nhau: 5%, 10%, 15% và 20%. SMA không sử dụng xỉ thép (hàm lượng xỉ thép 0%) dùng để đối chứng. Đường cong cấp phối của các loại hỗn hợp được thể hiện ở Hình 3.



Hình 3. Đường cong cấp phối của các hỗn hợp SMA sau khi phối trộn

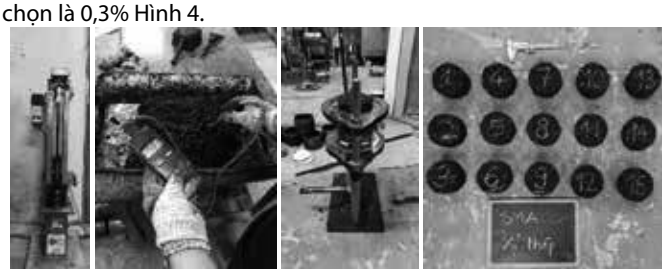
4. THỰC NGHIỆM TRONG PHÒNG

Với cấp phối thiết kế, chất kết dính và loại sợi đã chọn, tiến hành xác định hàm lượng nhựa tối ưu của các hỗn hợp theo phương pháp Marshall. Số lượng các mẫu thí nghiệm cho từng tổ hợp cấp phối cốt liệu và chất kết dính được thể hiện ở Bảng 3. Toàn bộ quá trình thí nghiệm được thực hiện tại phòng thí nghiệm LAS-XD72 của Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải.

Bảng 3. Số lượng mẫu thí nghiệm xác định hàm lượng nhựa tối ưu

TT	Hàm lượng nhựa	SMA thông thường (0% xỉ Thép)	SMA sử dụng xỉ thép				Tổng số mẫu
			Hàm lượng 5%	Hàm lượng 10%	Hàm lượng 15%	Hàm lượng 20%	
1	5,5	3	3	3	3	3	**15**
2	6,0	3	3	3	3	3	**15**
3	6,5	3	3	3	3	3	**15**
4	7,0	3	3	3	3	3	**15**
5	7,5	3	3	3	3	3	**15**
Tổng số mẫu		**15**	**15**	**15**	**15**	**15**	**75**

Thử nghiệm sử dụng phương pháp Marshall với mẫu hình trụ tiêu chuẩn có chiều cao 63,5mm, đường kính 101,6 mm, số chày đầm là 50 chày/1 mặt. Sử dụng thiết bị đầm Marshall tự động do hãng Mastest - Italia sản xuất. Hàm lượng bitum tối ưu được xác định thông qua các chỉ tiêu về độ rỗng dư, độ rỗng cốt liệu, độ ổn định Marshall, độ dẻo,… Chuẩn bị 5 tổ mẫu có hàm lượng bitum chênh lệch nhau 0,5%. Các hàm lượng bitum được lựa chọn để đúc mẫu là: 5,5%; 6,0%; 6,5%; 7,0% và 7,5%. Hàm lượng sợi cellulose được lựa chọn là 0,3% Hình 4.



Hình 4. Quá trình đúc mẫu thí nghiệm

5. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

5.1. Kết quả thí nghiệm trong phòng

Kết quả thí nghiệm trong phòng những chỉ tiêu kỹ thuật của SMA sử dụng xỉ thép với các hàm lượng khác nhau được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 4. Các chỉ tiêu kỹ thuật của SMA sử dụng xỉ thép với hàm lượng khác nhau

Chỉ tiêu kỹ thuật	Kết quả thí nghiệm					Yêu cầu	Kết luận
	SMA 0% xỉ thép	SMA 5% xỉ thép	SMA 10% xỉ thép	SMA 15% xỉ thép	SMA 20% xỉ thép		
Hàm lượng bitum tối ưu, %	6,30	6,40	6,50	6,60	6,70	Min 6,0	Đạt
Độ rỗng dư, %	3,60	3,36	3,60	3,14	3,52	3 - 4	Đạt
VCA_{DRC}, %	43,38	43,44	43,35	43,96	43,51	-	Đạt
VCA_{MIX}, %	40,67	40,49	40,72	40,71	40,76	Nhỏ hơn VCA_{DRC}	Đạt
Độ chảy bitum, %	0,092	0,083	0,087	0,064	0,057	Max 0,3	Đạt
Độ ổn định Marshall, kN	10,25	10,45	12,27	12,51	13,09	Min 6,2	Đạt
Độ dẻo Marshall, mm	3,44	3,32	3,27	3,11	2,94	2,0 - 4,0	Đạt

Kết quả thí nghiệm cho thấy, tất cả các mẫu (SMA không sử dụng xỉ thép và sử dụng xỉ thép thay thế đá dăm với hàm lượng 5%, 10%, 15% và 20%) đều đáp ứng yêu cầu kỹ thuật theo tiêu chuẩn AASHTO M325-08, AASHTO MP8 và TCCS 36:2021.

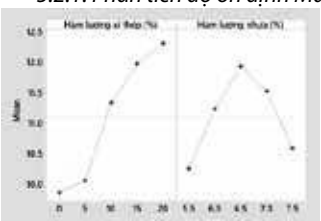
5.2. Phân tích kết quả thí nghiệm hỗn hợp SMA

Sử dụng phần mềm Minitab 19 thiết kế thí nghiệm tổng quát. Số lần lặp thí nghiệm 3. Phân tích phương sai ANOVA và phân tích hậu định phát hiện sai khác theo chuẩn Tukey.

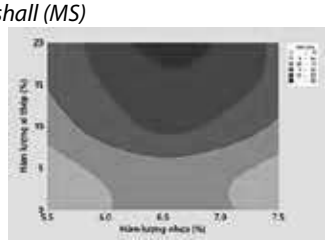
Các biến đầu vào của thiết kế thực nghiệm: 2 biến

- Hàm lượng nhựa: 5 tỷ lệ (5,5%; 6,0%; 6,5%; 7,0%; 7,5%);
- Hàm lượng xỉ thép: 5 tỷ lệ (0%, 5%; 10%; 15%; 20%);
- Hàm phân tích: 2 hàm - Độ ổn định Marshall (MS, kN) và Độ dẻo Marshall (FS, mm).

5.2.1. Phân tích độ ổn định Marshall (MS)



Hình 5. Ảnh hưởng hàm lượng nhựa, hàm lượng xỉ thép đến độ ổn định Marshall

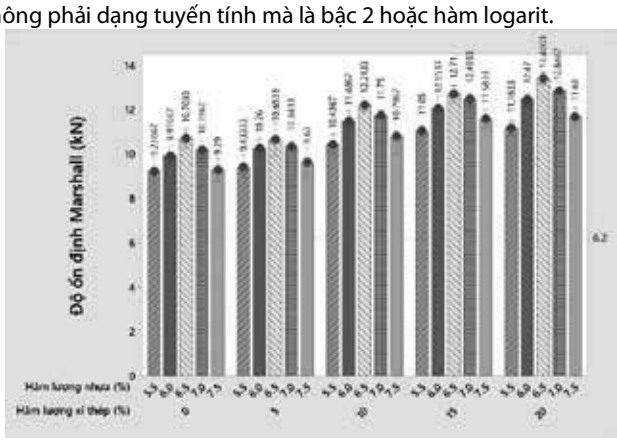


Hình 6. Biểu đồ đường đồng mức thể hiện ảnh hưởng của hàm lượng nhựa và hàm lượng xỉ thép đến độ ổn định Marshall

Hình 5 thể hiện các yếu tố ảnh hưởng đến độ ổn định Marshall. Nhận thấy cả 2 yếu tố hàm lượng nhựa và hàm lượng xỉ thép đều ảnh hưởng đáng kể đến chỉ số độ ổn định Marshall.

- Ảnh hưởng của hàm lượng nhựa: Khi hàm lượng nhựa là 5,5% thì độ ổn định Marshall đạt giá trị thấp nhất. Hàm lượng nhựa tăng từ 5,5% đến 6,5%, độ ổn định Marshall tăng nhanh (thể hiện ở đường dốc lớn) và đạt giá trị lớn nhất khi hàm lượng nhựa là 6,5%. Tiếp tục tăng hàm lượng nhựa từ 6,5% đến 7,0%, độ ổn định Marshall giảm dần. Khi tăng hàm lượng nhựa lên đến 7,5%, độ ổn định Marshall giảm mạnh. Biểu đồ ảnh hưởng hàm lượng nhựa đến độ ổn định Marshall không thuộc dạng tuyến tính mà là bậc 2 hoặc hàm logarit.

- Ảnh hưởng của hàm lượng xỉ thép: Khi chưa sử dụng xỉ thép thì độ ổn định Marshall là nhỏ nhất, khi sử dụng xỉ thép với hàm lượng 5%, độ ổn định Marshall tăng nhẹ, tuy nhiên không đáng kể. Tiếp tục tăng hàm lượng xỉ thép từ 5% lên 10%, độ ổn định Marshall tăng nhanh (đường dốc gần thẳng đứng). Độ ổn định Marshall tiếp tục tăng khi hàm lượng xỉ thép là 15% và đạt giá trị lớn nhất khi sử dụng xỉ thép thay thế với hàm lượng 20%. Có thể thấy rằng, khi tăng hàm lượng xỉ thép sử dụng, độ ổn định Marshall sẽ tăng lên tương ứng. Biểu đồ ảnh hưởng hàm lượng xỉ thép đến độ ổn định Marshall không phải dạng tuyến tính mà là bậc 2 hoặc hàm logarit.



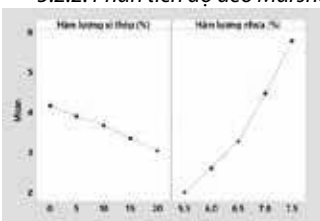
Hình 7. Biểu đồ tổng hợp độ ổn định Marshall

Biểu đồ đường đồng mức Hình 6 cho thấy rõ hơn ảnh hưởng của hai yếu tố hàm lượng nhựa và hàm lượng xỉ thép đến độ ổn định Marshall của SMA. Khi không sử dụng xỉ thép hoặc sử dụng xỉ thép với hàm lượng thấp (< 7,5%), đồng thời hàm lượng nhựa thấp (5,5% - 6,0%) hoặc cao (7,0% - 7,5%) thì độ ổn định Marshall đạt giá trị thấp nhất. Hàm lượng xỉ thép được sử dụng càng cao, thì độ ổn định Marshall càng lớn. Độ ổn định Marshall đạt giá trị lớn nhất khi hàm lượng xỉ thép sử dụng là 20% và hàm lượng nhựa 6,5%. Vùng giá trị độ ổn định Marshall đạt giá trị cao (>10 kN) khi hàm lượng nhựa trong khoảng 6,3% - 6,8% và hàm lượng xỉ thép sử dụng >10%.

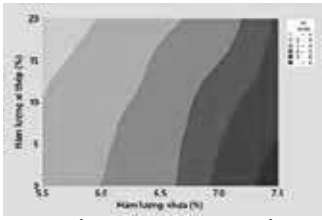
Kết quả thí nghiệm độ ổn định Marshall của SMA theo hàm lượng nhựa và hàm lượng xỉ thép khác nhau được thể hiện ở Hình 7. Độ ổn định Marshall của tất cả các hỗn hợp đều đạt yêu cầu theo tiêu chuẩn AASHTO M325-08, AASHTO MP8 và TCCS 36:2021.

Kết quả nghiên cứu bước đầu cho thấy việc sử dụng xỉ thép thay thế một phần đá dăm trong SMA giúp tăng độ ổn định Marshall của hỗn hợp. Hàm lượng xỉ thép càng cao thì độ ổn định Marshall càng lớn. Độ ổn định Marshall của SMA khi sử dụng xỉ thép với hàm lượng 20% đạt giá trị cao nhất. Kết quả thí nghiệm có thể được lý giải như sau: Xỉ thép có độ góc cạnh, khi chịu nén sẽ tạo thành cấu trúc được liên kết, cài móc chặt chẽ với nhau. Xỉ thép có bề mặt thô và cấu trúc nhiều lỗ rỗng giúp nhựa đường thẩm thấu và bám dính cơ học tốt hơn đá dăm thông thường. Xỉ thép có tính kiềm, nhiều lỗ rỗng hơn đá dăm thông thường, vì vậy liên kết hiệu quả hơn với nhựa đường. Do vậy khi sử dụng xỉ thép thay thế đá dăm cường độ cơ học tổng thể của SMA sẽ được tăng cường. Kết quả thí nghiệm của một số tác giả trên thế giới cũng cho kết quả tương đồng, như nghiên cứu của A.Behnood [5], Marco Pasetto [13], Hainina [7] và Zhao [21].

5.2.2. Phân tích độ dẻo Marshall (FS)



Hình 8. Ảnh hưởng các yếu hàm lượng nhựa và hàm lượng xỉ thép đến độ dẻo Marshall



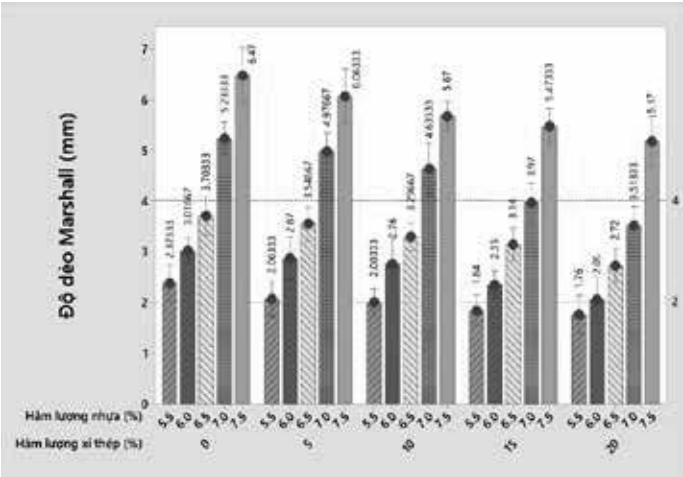
Hình 9. Biểu đồ đường đồng mức thể hiện ảnh hưởng của hàm lượng nhựa và hàm lượng xỉ thép đến độ dẻo Marshall

Hình 8 thể hiện các yếu tố ảnh hưởng đến độ dẻo Marshall. Có thể thấy cả 2 yếu tố hàm lượng nhựa và hàm lượng xỉ thép đều ảnh hưởng đáng kể đến độ dẻo Marshall.

- Ảnh hưởng của hàm lượng nhựa: Hàm lượng nhựa có ảnh hưởng rõ rệt đến độ dẻo Marshall. Khi hàm lượng nhựa tăng từ 5,5% đến 7,5% thì độ dẻo Marshall tăng nhanh và đều, thể hiện bằng độ dốc lớn. Khi hàm lượng nhựa là 5,5% thì độ dẻo Marshall có giá trị nhỏ nhất, hàm lượng bitum tăng lên 7,5%, độ dẻo Marshall đạt giá trị lớn nhất.

- Ảnh hưởng của hàm lượng xỉ thép: Hàm lượng xỉ thép càng tăng thì độ dẻo Marshall càng giảm (kết quả này cũng tương đồng với nghiên cứu của A.Behnood [5]). Khi không sử dụng xỉ thép, độ dẻo Marshall có giá trị nhỏ nhất. Khi hàm lượng xỉ thép tăng lên 20% độ dẻo Marshall đạt giá trị lớn nhất.

Biểu đồ đường đồng mức Hình 9 cho thấy ảnh hưởng của hai yếu tố hàm lượng xỉ thép và hàm lượng nhựa đến độ dẻo Marshall của các hỗn hợp BTN. Khi sử dụng xỉ thép với hàm lượng >10% và hàm lượng nhựa thấp 5,5% - 6,0% thì độ dẻo Marshall đạt giá trị thấp nhất (<2 mm). Khi hàm lượng nhựa cao (>7,0%) đồng thời không sử dụng xỉ thép, hoặc sử dụng xỉ thép với hàm lượng nhỏ, độ dẻo Marshall đạt giá trị cao (>5 mm).



Hình 10. Biểu đồ tổng hợp độ dẻo Marshall

Hình 10 là biểu đồ tổng hợp độ dẻo Marshall của SMA theo hàm lượng nhựa và hàm lượng xỉ thép. Độ dẻo Marshall của tất cả các hỗn hợp đều đạt yêu cầu (nằm trong khoảng 2% - 4%) theo tiêu chuẩn AASHTO M325-08, AASHTO MP8 và TCCS 36:2021.

6. NHẬN XÉT - KIẾN NGHỊ

Từ những kết quả nghiên cứu bước đầu trong phòng thí nghiệm về lựa chọn thành phần cấp phối và thử nghiệm, đánh giá các chỉ tiêu chất lượng SMA sử dụng xỉ thép cho thấy:

- Có thể chế tạo SMA sử dụng xỉ thép với hàm lượng thay thế đá dăm từ 5% đến 20% đáp ứng các tiêu chuẩn hiện hành.

- SMA sử dụng xỉ thép với hàm lượng 20% có độ ổn định Marshall đạt giá trị cao nhất (13,09 kN), cao hơn 28% so với SMA không sử dụng xỉ thép (10,25 kN).

Kiến nghị: Để đánh giá toàn diện tính năng của SMA sử dụng xỉ thép, cần nghiên cứu thêm các thí nghiệm đánh giá chỉ tiêu cơ lý của SMA như: Mô đun đàn hồi tĩnh; Mô đun đàn hồi động; Cường độ kéo uốn; Thí nghiệm đánh giá khả năng kháng nứt của vật liệu BTN.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] AASHTO M325, Standard Specification for Stone Matrix Asphalt, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017.

[2] Ali, N., Chan, J. S., Theriault, E. G., Papagiannakis, A. T., & Bergan, A. T., SYSCO Electric Arc Furnace Slag As an Asphalt Concrete Aggregate, Proceedings Of The Thirty-Sixth Annual Conference Of Canadian Technical Asphalt Association, 1991.

[3] Asi, I. M., Qasrawi, H. Y., & Shalabi, F. I., Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes, Canadian Journal of Civil Engineering, 34(8), 902-911, 2007.

[4] Australasian Slag Association, A Guide to the Use of Iron and Steel Slag in Roads, Rev. 2, ASA, 2002.

[5] Behnood, A., & Ameri, M., Experimental investigation of stone matrix asphalt mixtures containing steel slag, Scientia Iranica, 19(5), 1214-1219, 2012.

[6] Fistrić, M., Strineka, A., Rosković, R., & Oslaković, I. S., Properties of steel slag aggregate and steel slag asphalt concrete, In First International Conference on Road and Rail Infrastructure, CETRA, 2010.

[7] Hainin, M. R., Rusbintardjo, G., Aziz, M. A. A., Hamim, A., & Yusoff, N. I. M., Laboratory evaluation on steel slag as aggregate replacement in stone mastic asphalt mixtures, Jurnal Teknologi, 65(2), 2013.

[8] Hiệp hội Thép Việt Nam, Ngành thép Việt Nam: Nhìn lại 2025- Triển vọng 2026, https://vsa.com.vn/nganh-thep-viet-nam-nhin-lai-2025-trien-vong-2026, 2026

[9] Krayushkina, K., Prentkovskis, O., Bieliatynskyi, A., & Junevičius, R., Use of steel slags in automobile road construction, Transport, 27(2), 129-137, 2012.

[10] Krzysztof Blazejowski, Stone Matrix Asphalt: Theory and Practice, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011.

[11] Lê Văn Phúc, Võ Hồng Lâm, Phan Đức, Đỗ Như Khang, Nghiên cứu khả năng sử dụng xỉ thép khu vực Bà Rịa-Vũng Tàu để chế tạo hỗn hợp đá vữa nhựa (SMA), Tạp chí Khoa học công nghệ giao thông vận tải, 12(4), 2023.

[12] Mai Hồng Hà, Nghiên cứu sử dụng xỉ thép tái chế làm lớp móng đường ô tô, Tạp chí Khoa học công nghệ giao thông vận tải, số 27+28, 149-154, 2018.

[13] Marco Pasetto, Nicola Baldo, Performance comparative analysis of stone mastic asphalts with electric arc furnace steel slag: a laboratory evaluation, Materials and Structures, 45, 411-424, 2012.

[14] Nguyễn Thanh Sang, Phạm Trung Hải, Nghiên cứu thực nghiệm chế tạo hỗn hợp đá vữa nhựa (SMA) chất lượng cao sử dụng cốt liệu xỉ thép Formosa và sợi xơ dừa Việt Nam, Tạp chí Giao thông vận tải, số 10, 70-75, 2024.

[15] Nguyễn Văn Du, Nghiên cứu khả năng sử dụng cốt liệu xỉ thép để sản xuất bê tông nhựa nóng ở khu vực phía nam Việt Nam, Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Trường Đại học GTVT, 2016.

[16] Nguyễn Quốc Hiển, Ứng dụng xỉ thép trong lĩnh vực công trình xây dựng, Tạp chí Giao thông vận tải, số 10, 63-66, 2016.

[17] Shao-peng, W., Wen-feng, Y., Yong-jie, X., & Zhen-hua, L., Design and preparation of steel slag SMA, Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 18(3), 86-88, 2003.

[18] Trần Văn Miền, Sử dụng xỉ thép làm cốt liệu thay thế đá dăm làm bê tông asphalt ứng dụng làm lớp áo đường trong công trình giao thông, Đề tài KHCN cấp TP.HCM, 2011.

[19] Washington State DOT Construction Division pavements Office, Use of Steel Slag Aggregate in Pavements, November, 2015.

[20] Wu, S., Xue, Y., Ye, Q., & Chen, Y., Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures, Building and Environment, 42(7), 2580-2585, 2007.

[21] Zhao, X., Sheng, Y., Lv, H., Jia, H., Liu, Q., Ji, X., ... & Meng, J., Laboratory investigation on road performances of asphalt mixtures using steel slag and granite as aggregate, Construction and Building Materials, 315, 125655, 2022.

■Ngày nhận bài: 02/3/2026 ■Ngày sửa bài: 10/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 20/3/2026

Ảnh hưởng của tro bay và phụ gia chống thấm WP307 đến cường độ nén và độ chống thấm nước của bê tông xi măng

Effects of fly ash and WP307 waterproofing admixture on the compressive strength and water impermeability of cement concrete

> TS BÙI THỊ QUỲNH ANH[1,*], HOÀNG MẠNH HÙNG[2]
[1]Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
[2]Công ty Cổ phần Đường sắt Hà Thái
[*]Email: quynhanhbt@utt.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của tro bay và phụ gia chống thấm WP307 đến cường độ nén 28 ngày và khả năng chống thấm nước của bê tông xi măng, định hướng ứng dụng cho kết cấu ngầm giao thông. Chương trình thí nghiệm gồm 9 cấp phối với 3 mức hàm lượng tro bay và 3 mức hàm lượng WP307. Cường độ nén được xác định theo TCVN 3118, trong khi độ chống thấm được đánh giá theo TCVN 3116 bằng phương pháp vệt thấm. Kết quả cho thấy tro bay làm giảm nhẹ cường độ nén nhưng cải thiện khả năng chống thấm. WP307 có ảnh hưởng rõ rệt hơn đến độ sâu vệt thấm và là yếu tố chi phối chính đối với tính chống thấm của bê tông. Vùng thành phần phù hợp bước đầu được đề xuất là 15 - 20% tro bay kết hợp với 0,3 - 0,6% WP307 theo khối lượng chất kết dính.

Từ khóa: Bê tông xi măng; tro bay; phụ gia chống thấm; cường độ nén; độ chống thấm nước; công trình ngầm giao thông.

ABSTRACT

This study evaluates the effects of fly ash and WP307 waterproofing admixture on the 28-day compressive strength and water impermeability of cement concrete for potential use in underground transportation structures. The experimental program included nine mixtures with three levels of fly ash and three levels of WP307 dosage. Compressive strength was determined in accordance with TCVN 3118, while water impermeability was assessed according to TCVN 3116 using the water penetration depth method. The results indicate that fly ash slightly reduced compressive strength but improved water resistance. WP307 showed a stronger effect on penetration depth and was identified as the dominant factor affecting impermeability. An initial suitable composition range is proposed at 15 - 20% fly ash combined with 0.3 - 0.6% WP307 by binder mass.

Keywords: Cement concrete; fly ash; waterproofing admixture; compressive strength; water impermeability; underground transportation structures.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong các công trình ngầm giao thông, bê tông không chỉ bảo đảm khả năng chịu lực mà còn phải đáp ứng yêu cầu kín nước trong điều kiện thường xuyên chịu tác động của nước ngầm, áp lực nước và môi trường ẩm ướt kéo dài. Khi khả năng chống thấm không đạt yêu cầu, nước có thể xâm nhập qua hệ lỗ rỗng và vi khe nứt, làm tăng nguy cơ rò rỉ, ẩm mốc, suy giảm độ bền lâu và chi phí sửa chữa. Vì vậy, cùng với cường độ chịu lực, độ chống thấm là một chỉ tiêu kỹ thuật quan trọng đối với bê tông dùng cho các kết cấu ngầm giao thông, đặc biệt là hầm, tường vây, sàn đáy và các công trình ngầm đô thị.

Khả năng chống thấm của bê tông phụ thuộc vào cấu trúc lỗ rỗng, mức độ liên thông mao quản, tỷ lệ nước/chất kết dính, chất lượng vùng tiếp xúc hồ xi măng - cốt liệu và sự hiện diện của phụ gia khoáng hoặc phụ gia hóa học. Trong các giải pháp đang được quan tâm, việc sử dụng tro bay thay thế một phần xi măng kết hợp

với phụ gia chống thấm là hướng tiếp cận có tiềm năng do vừa có thể cải thiện vi cấu trúc bê tông, vừa giảm lượng xi măng sử dụng. Nhiều nghiên cứu cho thấy tro bay ở mức thay thế trung bình có thể giúp giảm tính thấm và nâng cao độ bền lâu nếu được bảo dưỡng phù hợp, tuy nhiên hiệu quả còn phụ thuộc vào loại tro bay, tỷ lệ thay thế và điều kiện dưỡng hộ [5-7]. Ngoài ra, TCVN 13568 cũng khuyến nghị sử dụng tro bay kết hợp với phụ gia hóa học và kiểm tra đồng thời các chỉ tiêu cường độ, độ chống thấm khi áp dụng cho bê tông công trình. Bên cạnh đó, phụ gia chống thấm có thể làm giảm tính thấm thông qua cải thiện cấu trúc lỗ rỗng hoặc cản trở đường dẫn thấm, song hiệu quả vẫn phụ thuộc vào liều lượng sử dụng và tính tương thích với hệ chất kết dính.

Ở Việt Nam, một số nghiên cứu đã xem xét khả năng thấm hoặc xâm nhập của các tác nhân bất lợi trong bê tông, chẳng hạn thông qua các chỉ tiêu liên quan đến ion clorua [8]. Tuy nhiên, hiện chưa có nhiều nghiên cứu trong nước đánh giá trực tiếp ảnh hưởng của tro bay và phụ gia chống thấm đến khả năng chống thấm nước của bê tông xi măng theo TCVN 3116:2022 [3], đặc biệt theo phương pháp vết thấm. Đây là phép thử có ý nghĩa thực tiễn vì phản ánh trực tiếp khả năng kín nước của bê tông cứng dưới áp lực nước, phù hợp với yêu cầu kiểm chứng cấp phối cho các kết cấu ngầm.

Nghiên cứu này tập trung làm rõ ảnh hưởng của hàm lượng tro bay và phụ gia chống thấm WP307 đến cường độ nén 28 ngày và khả năng chống thấm nước của bê tông xi măng theo TCVN 3116:2022 [3]. Trên cơ sở đó, nghiên cứu hướng tới đề xuất khoảng thành phần phù hợp nhằm cân bằng giữa yêu cầu chịu lực và yêu cầu kín nước. Kết quả thu được có thể được sử dụng như cơ sở tham khảo bước đầu cho lựa chọn cấp phối bê tông dùng trong công trình ngầm giao thông trong điều kiện vật liệu và khí hậu ở Việt Nam.

2. THÍ NGHIỆM

2.1. Kế hoạch thí nghiệm

Ma trận cấp phối gồm 9 tổ hợp (3 mức hàm lượng tro bay × 3 mức hàm lượng WP307). Để đảm bảo độ tin cậy thống kê tối thiểu, mỗi cấp phối được bố trí 3 mẫu cho mỗi chỉ tiêu thí nghiệm ở tuổi 28 ngày. Kế hoạch thí nghiệm được tóm tắt trong Bảng 1.

Bảng 1. Kế hoạch thí nghiệm và số lượng mẫu dự kiến (tuổi 28 ngày)

STT	Chỉ tiêu	Tiêu chuẩn	Tuổi (ngày)	Số mẫu cho 1 cấp phối	Tổng số mẫu
1	Cường độ nén bê tông	TCVN 3118	28	3	27
2	Khả năng chống thấm nước (vết thấm)	TCVN 3116	28	3	27

2.2. Vật liệu

Xi măng sử dụng trong nghiên cứu là xi măng poóc-lăng hỗn hợp PCB40 Bỉm Sơn, được sản xuất phù hợp với TCVN 6260 [2]. Tro bay sử dụng được thu hồi từ Nhà máy Nhiệt điện Vũng Áng bằng hệ thống lọc bụi tĩnh điện và được dùng như phụ gia khoáng thay thế một phần xi măng, phù hợp để sử dụng trong bê tông theo TCVN 10302:2014. Cốt liệu nhỏ là cát vàng thô đã được sàng rửa, cốt liệu lớn là đá dăm nghiền từ đá gốc cứng phù hợp sử dụng cho bê tông kết cấu theo TCVN 7570:2006 [1]. Nước trộn bê tông là nước sạch có chất lượng tương đương nước sinh hoạt, không chứa các tạp chất gây ảnh hưởng bất lợi đến quá trình đông kết và phát triển cường độ của bê tông. Nghiên cứu sử dụng đồng thời phụ gia siêu dẻo BestFlow R342 (giữ mức cố định để ổn định tính công tác) và phụ gia chống thấm tích hợp BestProof WP307(thay đổi tỉ lệ sử dụng, là biến đầu vào của nghiên cứu).

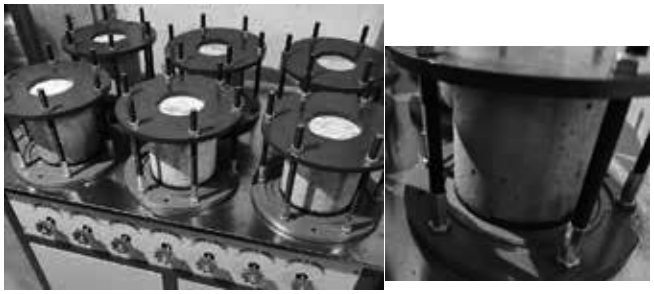
Bảng 2. Tính chất chính của phụ gia hóa học sử dụng trong nghiên cứu

Chỉ tiêu	BestFlow R342	BestProof WP307
Tên thương mại	BestFlow R342	BestProof WP307
Nhà sản xuất/phân phối	Bestmix, Việt Nam	Bestmix
Nhóm phụ gia	Phụ gia siêu dẻo duy trì độ sụt	Phụ gia chống thấm tích hợp
Cơ sở hóa học	Polycarboxylate ester	Hệ hoạt tính vô cơ/hữu cơ
Dạng vật lý	Dung dịch lỏng nhớt	Dung dịch lỏng/huyền phù
Màu sắc	Nâu nhạt	Nâu nhạt/xám nhạt
pH ở 20°C	4,28	11-13
Hàm lượng ion Cl^-	Trong giới hạn TCVN 8826:2011	≤ 0,1% hoặc không chứa ion Cl^- gây ăn mòn cốt thép

2.3. Quá trình tạo mẫu và thí nghiệm

Các hỗn hợp bê tông được chế tạo theo cấp phối đã thiết kế, trong đó kiểm soát tỷ lệ nước/chất kết dính và tính công tác nhằm hạn chế sai khác giữa các mẻ trộn. Sau khi trộn, bê tông được đúc mẫu, đầm chặt và bảo dưỡng đến tuổi thí nghiệm theo quy định. Cường độ nén được xác định ở tuổi 28 ngày trên mẫu lập phương (150×150×150)mm theo TCVN 3118, với giá trị trung bình của tối thiểu 3 mẫu cho mỗi cấp phối.

Khả năng chống thấm nước được đánh giá ở tuổi 28 ngày theo TCVN 3116:2022 bằng phương pháp vệt thấm, sử dụng mẫu trụ tròn D150×H150 mm, với tối thiểu 3 mẫu cho mỗi cấp phối. Mẫu được chuẩn bị để nước chỉ thấm qua một mặt chịu áp lực. Sau thí nghiệm, mẫu được tách để xác định vùng thấm ướt và đo độ sâu vệt thấm. Độ sâu vệt thấm được dùng làm chỉ tiêu so sánh khả năng chống thấm giữa các cấp phối.



Hình 1. Thí nghiệm thấm mẫu BTXM theo TCVN 3116

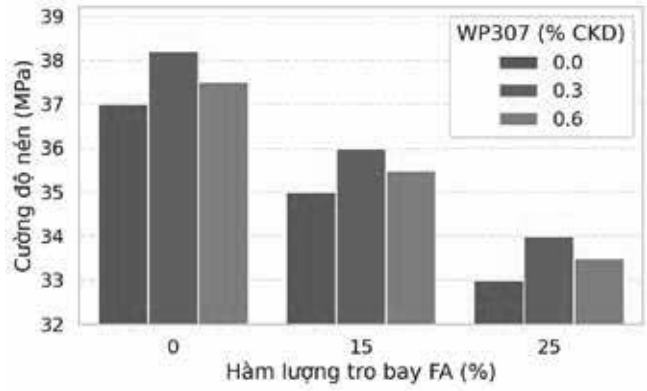
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Ảnh hưởng của tro bay và WP307 đến cường độ nén 28 ngày

Kết quả thí nghiệm cho thấy hàm lượng tro bay có ảnh hưởng nhất định đến cường độ nén ở tuổi 28 ngày của bê tông. Khi tăng FA từ 0 lên 15% và 25% khối lượng chất kết dính, cường độ nén có xu hướng giảm dần ở cả ba mức WP307, với mức giảm khoảng 2 - 4 MPa. Xu hướng này phù hợp với bản chất của hệ chất kết dính có tro bay, trong đó việc thay thế một phần clinker bằng pha khoáng phản ứng chậm làm giảm tốc độ phát triển cường độ ở tuổi 28 ngày. Tuy nhiên, mức suy giảm không lớn và các cấp phối sử dụng FA trong khoảng 15 - 25% vẫn duy trì được cường độ tương đương bê tông mác B30-B35, cho thấy việc sử dụng tro bay trong phạm vi khảo sát chưa làm mất khả năng đáp ứng yêu cầu chịu lực cơ bản của bê tông.

Xét riêng ảnh hưởng của phụ gia chống thấm WP307, kết quả cho thấy tại cùng một mức tro bay, khi tăng hàm lượng WP307 từ 0 lên 0,3% khối lượng chất kết dính thì cường độ nén đều tăng nhẹ, khoảng 1,0 - 1,2 MPa so với mẫu không dùng phụ gia. Điều

này cho thấy WP307 có thể góp phần cải thiện độ đặc chắc của cấu trúc bê tông, qua đó bù lại một phần xu hướng suy giảm cường độ do tro bay gây ra. Khi tiếp tục tăng WP307 lên 0,6%, cường độ nén giảm nhẹ so với mức 0,3%, nhưng vẫn cao hơn hoặc xấp xỉ mẫu không dùng phụ gia tại cùng hàm lượng FA. Như vậy, trong phạm vi nghiên cứu, hàm lượng WP307 khoảng 0,3% có thể xem là mức hợp lý hơn xét riêng theo chỉ tiêu cường độ nén 28 ngày.

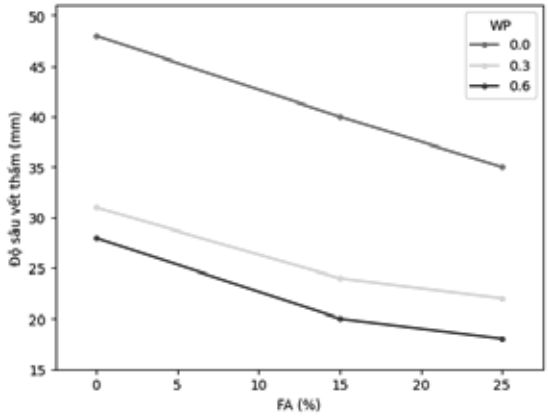


Hình 2. Cường độ nén 28 ngày của các cấp phối theo hàm lượng FA và WP307

3.2. Ảnh hưởng của tro bay và WP307 đến độ chống thấm nước của bê tông

So với cường độ nén, ảnh hưởng của hai biến nghiên cứu đến độ chống thấm thể hiện rõ rệt hơn nhiều. Kết quả cho thấy khi tăng hàm lượng tro bay từ 0 đến 25%, độ sâu vệt thấm giảm đáng kể. Xu hướng này cho thấy tro bay đã góp phần cải thiện cấu trúc lỗ rỗng liên thông trong bê tông, thông qua hiệu ứng lấp đầy và phản ứng pozzolan, từ đó hạn chế sự xâm nhập của nước dưới áp lực.

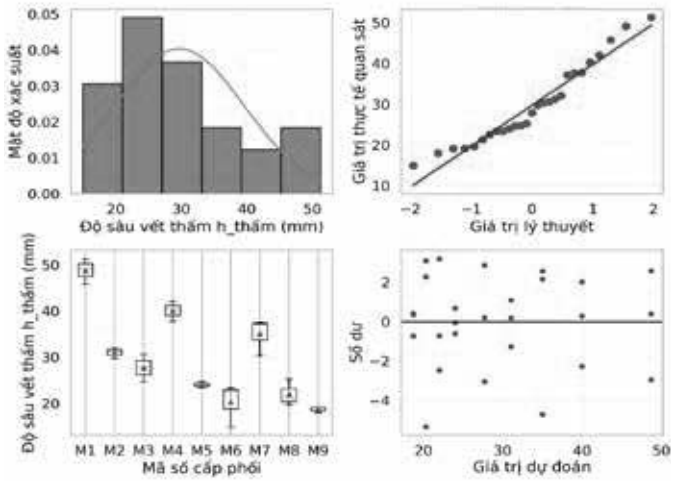
Ảnh hưởng của WP307 còn rõ ràng hơn. Khi tăng hàm lượng WP307 từ 0 lên 0,3% và 0,6%, độ sâu vệt thấm giảm mạnh ở tất cả các mức tro bay, trong khi cường độ nén chỉ biến động nhỏ. Kết quả này cho thấy WP307 là nhân tố chi phối chính đối với khả năng chống thấm của bê tông trong khung thí nghiệm của nghiên cứu. Về cơ chế, có thể hiểu rằng phụ gia chống thấm đã hỗ trợ làm giảm mức độ liên thông của mao quản và các kênh thấm mịn trong đá xi măng, qua đó làm tăng khả năng cản nước dưới áp lực. Đây cũng là lý do vì sao cùng một mức FA, sự thay đổi WP307 tạo ra khác biệt lớn hơn nhiều về độ sâu vệt thấm so với khác biệt về cường độ nén.



Hình 3. Độ sâu vệt thấm của các cấp phối theo hàm lượng FA và WP307

3.3. Phân tích thống kê ảnh hưởng của FA và WP307 đến độ sâu vết thấm

Các kiểm định sơ bộ ở Hình 4 cho phép sử dụng các phương pháp ANOVA và hồi quy tuyến tính để phân tích sâu hơn ảnh hưởng của FA và WP307 đến khả năng chống thấm của bê tông.



Hình 4. Kết quả kiểm định giả thuyết thống kê

3.3.1. Phân tích anova

Kết quả ANOVA (Bảng 3) cho thấy mô hình có ý nghĩa thống kê rất cao (F=111,85, p<0,001). Cả hàm lượng FA (F=50,46, p<0,001) và hàm lượng WP (F=173,25, p<0,001) đều ảnh hưởng có ý nghĩa đến biến đáp ứng, trong đó WP là yếu tố chi phối mạnh hơn. Ngược lại, tương tác FA × WP không có ý nghĩa thống kê (F=1,09; p=0,39). Mô hình có độ phù hợp cao với R^2=96,17%, R^2_{adj}=94,24%, cho thấy khả năng mô tả và dự báo tốt trong phạm vi nghiên cứu.

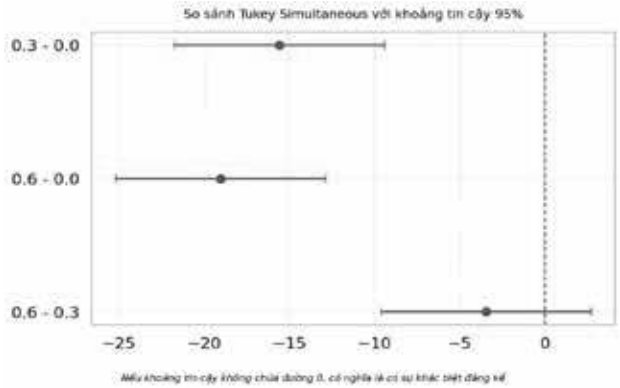
Bảng 3. Kết quả phân tích ANOVA

Nguồn	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Linear	4	2382.81	595.70	111.85	0.000
Hàm lượng FA	2	537.49	268.74	50.46	0.00
Hàm lượng WP	2	1845.33	922.66	173.25	0.00
2-Way Interactions	4	23.21	5.80	1.09	0.39
FA * WP	4	23.21	5.80	1.09	0.39
Sai số	18	95.86	5.33		
Tổng	26	2501.89			

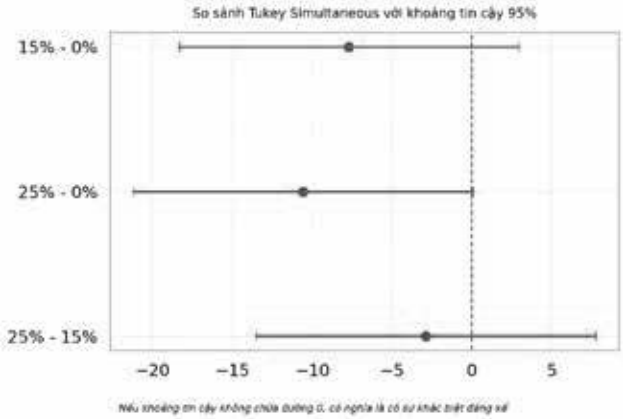
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2.31	96.17%	94.47%	94.24%

3.3.2. Kiểm định Tukey

Kết quả so sánh Tukey (Hình 5 và 6) ở mức tin cậy 95% cho thấy WP307 làm giảm rõ rệt độ sâu vết thấm. Hai cặp so sánh giữa mẫu không dùng phụ gia với các mẫu dùng 0,3% và 0,6% WP307 đều có khác biệt có ý nghĩa thống kê, trong khi chênh lệch giữa 0,3% và 0,6% WP307 chưa có ý nghĩa rõ rệt. Đối với tro bay, độ sâu vết thấm có xu hướng giảm khi tăng FA, nhưng các khác biệt giữa các mức FA chưa đạt ý nghĩa thống kê. Nhìn chung, kết quả kiểm định Tukey phù hợp với ANOVA khi cho thấy WP307 là yếu tố chi phối chính đối với độ sâu vết thấm, còn ảnh hưởng của FA yếu hơn.



Hình 5. Kiểm định Tukey giữa các hàm lượng phụ gia WP307 khác nhau



Hình 6. Kiểm định Tukey giữa các hàm lượng tro bay khác nhau

3.3.3. Xây dựng mô hình hồi quy

Ngoài ANOVA, nghiên cứu còn xây dựng mô hình hồi quy bậc hai gồm các thành phần FA, WP, FA^2, WP^2, FA-WP để mô tả quan hệ giữa thành phần vật liệu và độ sâu vệt thấm. Mô hình hồi quy bậc hai (Bảng 4) cho hệ số xác định hiệu chỉnh R^2_{adj}=0,974, cho thấy khả năng mô tả rất tốt trong phạm vi dữ liệu thí nghiệm.

Bảng 4. Kết quả các hệ số của trong mô hình hồi quy

Số hạng	Ảnh hưởng	Hệ số	Hệ số SE	Giá trị T	Giá trị P
Hằng số		48.365	0.774	62.50	0.000
FA	-1.632	-0.816	0.106	-7.66	0.000
WP	-136.003	-68.001	4.413	-15.41	0.000
FA*FA	0.022	0.011	0.004	2.71	0.013
FA*WP	107.164	53.582	6.649	8.06	0.000
FA*WP	0.898	0.449	0.112	4.01	0.001

Chỉ tiêu	Giá trị		
S =	1.46572		
R-sq =	97.93%	R-sq(adj) =	97.43%

Phương trình hồi quy:

h_tham = 48.489 - 0.734 FA - 76.014 WP + 0.009 FA^2 + 67.284 WP^2 + 0.298 FA*WP

Trên cơ sở đánh giá đồng thời cường độ nén 28 ngày và độ sâu vệt thấm, vùng thành phần phù hợp được đề xuất là FA khoảng 15 - 20% kết hợp với WP307 ở mức 0,3 - 0,6% khối lượng chất kết dính. Vùng này cho thấy khả năng cân bằng tương đối tốt giữa yêu cầu chịu lực và chống thấm của bê tông. Tuy nhiên, kết luận hiện mới dựa trên hai chỉ tiêu ở tuổi 28 ngày và trên một hệ vật liệu cụ thể; do đó cần tiếp tục nghiên cứu các chỉ tiêu độ bền lâu cũng như hành vi thấm tại mối nối, khe co giãn và các chi tiết neo thép trước khi áp dụng rộng rãi.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng tro bay và phụ gia chống thấm WP307 đến cường độ nén 28 ngày và khả năng chống thấm nước của bê tông xi măng theo TCVN 3116:2022.

Kết quả cho thấy khi tăng hàm lượng tro bay từ 0 đến 25%, cường độ nén có xu hướng giảm nhẹ, nhưng độ sâu vệt thấm giảm rõ rệt.

Phụ gia WP307 có tác động tích cực hơn đến khả năng chống thấm; việc bổ sung phụ gia ở mức 0,3% và 0,6% đều làm giảm có ý nghĩa độ sâu vệt thấm so với mẫu không sử dụng phụ gia.

Phân tích ANOVA và kiểm định so sánh cặp cho thấy WP307 là yếu tố chi phối chính đối với độ sâu vệt thấm, còn ảnh hưởng của tro bay tồn tại nhưng yếu hơn.

Kết quả nghiên cứu là cơ sở tham khảo cho lựa chọn cấp phối bê tông dùng trong các kết cấu ngầm giao thông yêu cầu độ kín nước cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] TCVN 7570:2006: Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật.

[2] TCVN 6260:2020: Xi măng poóc lăng hỗn hợp - Yêu cầu kỹ thuật.

[3] TCVN 3116:2022: Bê tông - Phương pháp xác định độ chống thấm nước - Phương pháp vết thấm.

[4] TCVN 9345:2012: Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Hướng dẫn kỹ thuật phòng chống nứt dưới tác động của khí hậu nóng ẩm.

[5] A Elahi, PAM Basheer, SV Nanukuttan, QUZ Khan. Mechanical and durability properties of high performance concretes containing supplementary cementitious materials. Construction and Building Materials, vol. 24, Issue 3, pp. 292-299, March 2010.

[6] ALA Fraay, JM Bijen, YM De Haan. The reaction of fly ash in concrete: A critical examination. Cement and Concrete Research, vol. 19, Issue 2, pp. 235-246, March 1989.

[7] C Van Nguyen, P Lambert, Q Hung Tran. Effect of Vietnamese fly ash on selected physical properties, durability and probability of corrosion of steel in concrete. Materials, 12(4), 593, 2019.

[8] Nguyễn Văn Chính, Đặng Văn Mến. Ảnh hưởng của tro bay nhiệt điện Duyên Hải đến cường độ chịu nén và khả năng chống thấm của bê tông, Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng, số 17, tr. 11-14, 2019.

■Ngày nhận bài: 09/3/2026 ■Ngày sửa bài: 17/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 23/3/2026

Ảnh hưởng của tro bay và xỉ lò cao đến độ rỗng và khả năng chống thấm ion clo của bê tông hạt nhỏ

Effects of fly ash and ground granulated blast furnace slag on the porosity and chloride ion penetration resistance of fine-grained concrete

> TS NGÔ ĐỨC CHINH*, PGS.TS NGUYỄN THANH SANG
Trường Đại học Giao thông vận tải
*Email: chinhnd@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày ảnh hưởng của tro bay (TB) và xỉ lò cao (XLC) đến độ rỗng và khả năng chống thấm ion clo của bê tông hạt nhỏ (BTHN). Trong nghiên cứu này, TB được sử dụng với hàm lượng 30%, XLC được sử dụng với hàm lượng 15 - 45% thay thế xi măng (XM) theo khối lượng. Kết quả thực nghiệm chỉ ra rằng, TB và XLC làm giảm độ rỗng và tăng khả năng chống thấm ion clo của BTHN. Hàm lượng TB và XLC thay thế XM càng lớn thì độ rỗng của bê tông càng giảm và khả năng chống thấm ion clo của bê tông càng tăng. Khi lượng TB và XLC thay thế đến 75% hàm lượng XM, độ rỗng của bê tông giảm từ 12,63% xuống còn 5,87%; điện lượng truyền qua mẫu từ 3067 Coulomb giảm xuống còn 505 Coulomb. Kết quả nghiên cứu còn cho thấy, XLC có hiệu quả cao hơn TB trong việc giảm độ rỗng và tăng khả năng chống thấm ion clo của BTHN, qua đó làm tăng độ bền cho bê tông.

Từ khóa: Bê tông hạt nhỏ; tro bay; xỉ lò cao; độ rỗng; khả năng chống thấm ion Clo.

ABSTRACT

This article presents the effects of fly ash (FA) and ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on the porosity and chloride ion penetration resistance of fine-grained concrete (FGC). In this study, FA was used at a replacement level of 30%, while GGBFS was incorporated at replacement levels ranging from 15% to 45% by mass of cement. Experimental results indicate that the incorporation of FA and GGBFS reduces the porosity and enhances the resistance of FGC to chloride ion penetration. Higher replacement levels of cement with FA and GGBFS result in a further reduction in concrete porosity and a corresponding improvement in chloride ion penetration resistance. When the combined replacement level of FA and GGBFS reached 75% of the cement content, the concrete porosity decreased from 12.63% to 5.87%, while the total electrical charge passed through the specimens was reduced from 3067 Coulombs to 505 Coulombs. The results also show that GGBFS is more effective than FA in reducing porosity and improving chloride ion penetration resistance of fine-grained concrete, thereby enhancing its durability.

Keywords: Fine-grained concrete; fly ash; blast furnace slag; porosity; chloride ion penetration resistance.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay, TB từ các nhà máy nhiệt điện than và XLC từ ngành luyện kim là hai loại phế thải công nghiệp được phát sinh với khối lượng lớn trên phạm vi toàn cầu cũng như tại Việt Nam. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng lượng phát thải TB và XLC ngày càng gia tăng cùng với sự phát triển của ngành năng lượng và công nghiệp luyện kim, gây áp lực lớn lên môi trường nếu không được quản lý và tái sử dụng hợp lý [1-3].

Theo Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050 (Quy hoạch điện VIII), nhiệt điện than

vẫn giữ vai trò nhất định trong cơ cấu nguồn điện quốc gia đến năm 2030, nhiệt điện than vẫn chiếm tỷ trọng lớn, khoảng 51,6% trong cơ cấu nguồn điện quốc gia. Dự báo mỗi năm khoảng 200 triệu tấn than sẽ được tiêu thụ cho sản xuất điện, kéo theo lượng tro xỉ phát sinh lên đến gần 40 triệu tấn [4]. Nếu không được xử lý và tái sử dụng hiệu quả, khối lượng phế thải này sẽ chiếm dụng diện tích đất lớn cho bãi thải, đồng thời tiềm ẩn nguy cơ ô nhiễm môi trường đất, nước và không khí.

Việc nghiên cứu và tận dụng TB và XLC làm vật liệu xây dựng, đặc biệt là phụ gia khoáng cho bê tông, không chỉ góp phần giảm thiểu ô nhiễm môi trường và bảo vệ tài nguyên thiên nhiên mà còn mang lại hiệu quả kinh tế rõ rệt. Nhiều công bố khoa học cho thấy việc sử dụng các phế thải công nghiệp này giúp giảm tiêu thụ XM, giảm phát thải CO_2 đồng thời cải thiện một số tính chất kỹ thuật và độ bền của bê tông [5-7].

Trên thế giới, nhiều nghiên cứu thực nghiệm đã khẳng định ảnh hưởng tích cực của TB và XLC đối với các chỉ tiêu này. Mehta [8] và Neville [9] đều chỉ ra rằng việc thay thế một phần XM bằng TB hoặc XLC làm tăng mật độ vi cấu trúc, giảm độ rỗng và hạn chế sự xâm nhập của ion clo qua mạng mao dẫn bê tông. Wang và cộng sự [10] quan sát thấy bê tông cường độ cao kết hợp TB và XLC cho độ thấm clo thấp hơn đáng kể so với bê tông không bổ sung phụ gia khoáng. Tương tự, Chore & Joshi [11] chỉ ra rằng sự kết hợp này làm giảm điện lượng truyền qua mẫu trong thử nghiệm ASTM C1202, biểu thị khả năng chống thấm ion clo được cải thiện rõ rệt.

Tại Việt Nam, các nghiên cứu gần đây cũng nhất quán với kết quả của các nghiên cứu nước ngoài. Tác giả Lê Thanh Hà và cộng sự [12-13] cho thấy khi tăng hàm lượng TB trong hỗn hợp BTHN, độ rỗng giảm đáng kể và khả năng chống thấm nước, chống thấm ion clo được nâng cao, tạo nên sự bền vững của cấu kiện bê tông. Tăng Văn Lâm, Nguyễn Đình Trinh [14] tập trung vào XLC hoạt tính, ghi nhận việc thay thế đến một tỷ lệ nhất định giúp giảm độ rỗng và tăng chỉ số chống thấm ion. Hồ Văn Quân và cộng sự [15] cũng chứng minh bê tông kết hợp TB + XLC có cấu trúc mao quản chặt hơn, giảm thiểu sự xâm thực của clo so với bê tông đối chứng.

Nhìn chung, cả TB và XLC đều góp phần giảm độ rỗng và cải thiện khả năng chống thấm ion clo của BTHN, với XLC cho hiệu quả hơn do khả năng phản ứng pozzolanic cao và kích thước hạt phù hợp hơn, từ đó nâng cao độ bền của bê tông trong điều kiện xâm thực.

Bài báo trình bày ảnh hưởng của TB và XLC đến độ rỗng và khả năng chống thấm của BTHN. TB được thay thế XM với hàm lượng 30% theo khối lượng, XLC được thay thế XM từ 15 - 45% theo khối lượng.

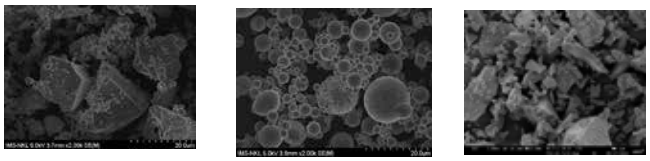
2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu chế tạo

Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu gồm: XM Bút Sơn PC40, TB nhiệt điện Phả Lại, XLC nghiền mịn Hòa Phát, cát mịn có kích thước hạt < 0,63 mm, cát thô sông Lô có kích thước hạt < 5,0 mm và phụ gia siêu dẻo của hãng Sika (PGSD-3000 20M). Bảng 1 là các chỉ tiêu cơ lý cơ bản của XM, TB và XLC. Cấu trúc hạt của XM PC40, TB và XLC dưới kính hiển vi điện tử được trình bày trong Hình 1.

Bảng 1. Chỉ tiêu cơ lý cơ bản của XM, TB và XLC

Chỉ tiêu	XM	TB	XLC
Khối lượng riêng (g/cm^3)	3,1	2,24	2,89
Kích thước hạt trung bình (μm)	14,12	16,42	7,87



Hình 1. Cấu trúc hạt lần lượt của XM, TB và XLC dưới kính hiển vi điện tử SEM

2.2. Thành phần cấp phối BTHN

Thành phần cấp phối của BTHNTNC nghiên cứu sau tính toán được thể hiện trong Bảng 2.

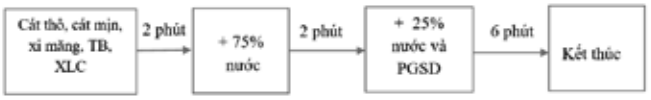
Bảng 2. Thành phần cấp phối của BTHN nghiên cứu

Hỗn hợp	XM (kg)	TB (kg)	XLC (kg)	N (kg)	PGSD (kg)	Cát mịn (kg)	Cát thô (kg)
100XM	745	0	0	209	14,90	438	1.022
0TB30XLC	521	0	223	209	11,92	438	1.022
30TB0XLC	521	223	0	209	9,68	438	1.022
30TB15XLC	410	223	112	209	8,94	438	1.022
30TB30XLC	298	223	223	209	8,19	438	1.022
30TB45XLC	186	223	335	209	7,45	438	1.022

2.3. Phương pháp nghiên cứu

- *Các phương pháp thí nghiệm:* Trong nghiên cứu này, các phương pháp thí nghiệm tiêu chuẩn được sử dụng để xác định các tính chất cơ lý của các thành phần cấp phối và các tính chất của hỗn hợp bê tông và BTHN cường độ cao. Các phương pháp thí nghiệm tiêu chuẩn gồm: TCVN 141:2023, XM - Phương pháp phân tích hóa học; TCVN 8262:2009, TB - Phương pháp phân tích hóa học; TCVN 7572 - 2:2006 cốt liệu cho bê tông và vữa - phương pháp thử - Phần 2: Xác định thành phần hạt; ASTM C0642-1: Xác định độ rỗng của bê tông, ASTM C1202-19: Xác định độ thấm ion clo bằng phương pháp đo điện lượng.

- *Quy trình trộn:* Vật liệu sau khi được cân đong đủ khối lượng cho 1 mẻ trộn thì tiến hành trộn. Máy trộn được sử dụng là máy trộn vữa cưỡng bức. Đối với phương pháp trộn hỗn hợp BTHN, độ chảy cao, thời gian trộn thường dài hơn so với bê tông và vữa thường. Sau khi được trộn sơ bộ, hỗn hợp hạt rắn (cát thô, cát mịn, XM, TB và XLC) được nhào trộn với nước, sau đó trộn PGSD và nước vào hỗn hợp theo quy trình dưới đây (Hình 2).

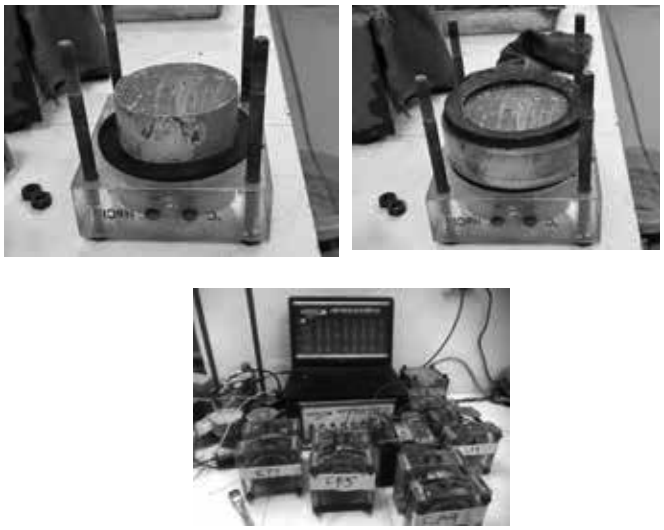


Hình 2. Quy trình trộn hỗn hợp BTHNTNC

- *Đo độ độ rỗng của BTHN:* Sử dụng tiêu chuẩn ASTM C 642-1. Thí nghiệm được thực hiện trên 3 nửa mẫu BTHN có đường kính 100 mm và chiều dày 50 mm được cắt ra từ mẫu hình trụ (100x200)cm ở 28 ngày tuổi. Một số bước quá trình đo độ rỗng của BTHN được thể hiện trên Hình 3.

Hình 3. Quy trình đo độ rỗng của BTHN

- Đo khả năng chống thấm của BTHN: Thí nghiệm đo khả năng chống thấm ion clorua của BTHN được thực hiện dựa trên tiêu chuẩn ASTM C1202-19. Thí nghiệm được thực hiện trên 3 mẫu có đường kính 100 mm và chiều dày 50 mm được cắt ra từ mẫu hình trụ (100x200)cm ở 28 ngày tuổi. Mặt bên của mẫu được sơn phủ bằng epoxy. Sau khi được bão hòa nước trong bình hút chân không, mẫu được lắp vào các khoang có chứa dung dịch NaCl 3% và NaOH 0,3N. Tổng số cu-lông truyền qua mẫu dưới hiệu điện thế 60 V trong 6 tiếng được sử dụng để đánh giá khả năng thấm ion clorua của bê tông. Một số bước quá trình đo khả năng chống thấm ion clo của BTHN được thể hiện trên Hình 4.



Hình 4. Quy trình đo độ chống thấm ion clo của BTHN

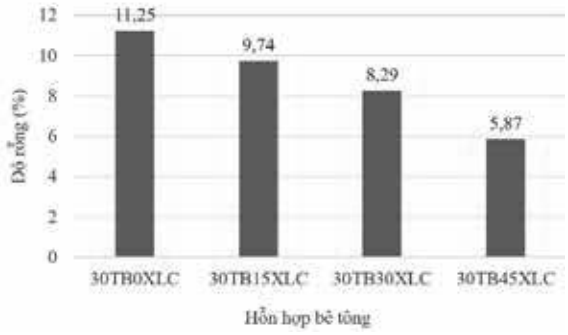
3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Ảnh hưởng của TB và XLC độ rỗng của BTHN

Kết quả cho thấy, khi lượng TB thay thế XM được giữ ổn định ở mức 30% thì độ rỗng của BTHN giảm dần khi hàm lượng XLC tăng từ 0 - 45%. Sự ảnh hưởng của XLC đến độ rỗng của BTHN khi hàm lượng XLC thay thế từ 0 - 45% tỉ lệ thuận, khá tuyến tính với sự suy giảm độ rỗng của bê tông. Kết quả ảnh hưởng của TB và XLC đến độ rỗng của BTHN được thể hiện trên Bảng 3 và Hình 5.

Bảng 3. Ảnh hưởng của TB và XLC đến độ rỗng của BTHN

Hỗn hợp	**Độ rỗng** (%)
30TB0XLC	11,25
30TB15XLC	9,74
30TB30XLC	8,29
30TB45XLC	5,87



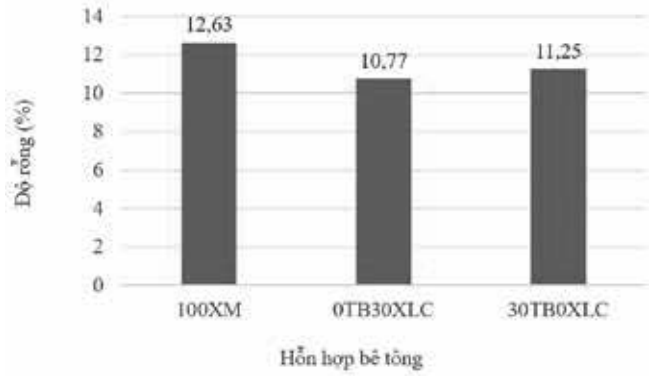
Hình 5. Ảnh hưởng của TB và XLC đến độ rỗng của BTHN

Với kết quả trên có thể lý giải rằng, khối lượng riêng của TB < XLC < XM (Bảng 1), nên khi TB và XLC thay thế một khối lượng XM tương đương thì thì tổng khối lượng của chất kết dính không đổi, nhưng thể tích hồ chất kết dính sẽ tăng lên, tức là tỷ lệ thể tích của hồ và cốt liệu sẽ tăng lên, tăng tính công tác của bê tông, giúp các lỗ rỗng có thể dễ dàng được lấp đầy bằng các hạt nhỏ, khiến độ rỗng của bê tông giảm đi.

Kết quả thực nghiệm ở Bảng 4 và Hình 6 cũng cho thấy, ảnh hưởng của XLC đến độ rỗng của BTHN lớn hơn một chút so với TB khi cùng sử dụng một lượng thay thế XM là 30% theo khối lượng. Điều này có thể lý giải bởi kích thước hạt trung bình của XLC nhỏ hơn kích thước hạt trung bình của TB (7,87 mm so với 16,42 mm). Như vậy, khi tăng lượng XLC khiến cho các lỗ rỗng dễ dàng được lấp đầy hơn so với tăng hàm lượng TB và làm giảm độ rỗng của bê tông, độ rỗng giảm khoảng 4% khi sử dụng cùng 30% hàm lượng TB và XLC thay thế XM.

Bảng 4. Ảnh hưởng của TB và XLC đến độ rỗng của BTHN

Hỗn hợp	**Độ rỗng** (%)
100XM	12,63
0TB30XLC	10,77
30TB0XLC	11,25



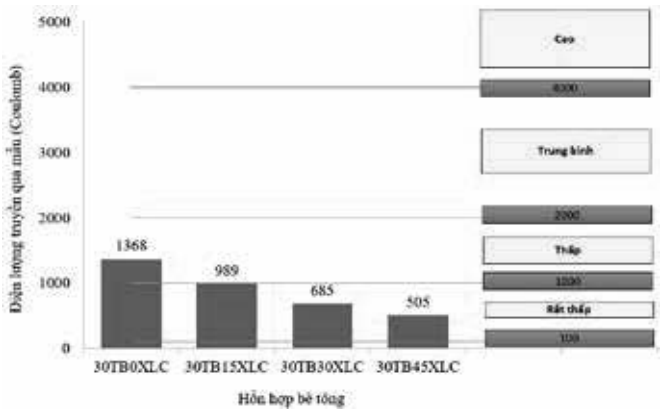
Hình 6. Ảnh hưởng của TB và XLC đến độ rỗng của BTHN

3.2. Ảnh hưởng của TB và XLC đến khả năng chống thấm ion clo của BTHN

Các kết quả thu được trên Bảng 5 và Hình 7 cho thấy với cùng lượng TB thay thế XM là 30% điện lượng truyền qua mẫu giảm tỉ lệ thuận khi hàm lượng XLC tăng lên từ 0 - 45%. Điện lượng truyền qua mẫu đạt mức "thấp" khi hàm lượng TB thay thế XM là 30% và hàm lượng XLC thay thế XM là 0%. Khi hàm lượng TB thay thế XM là 30% và khi hàm lượng XLC thay thế XM tăng từ 15 - 45% điện lượng truyền qua mẫu đạt mức "rất thấp".

Bảng 5. Ảnh hưởng của TB và XLC đến khả năng chống thấm ion clo của BTHN

Hỗn hợp	**Điện lượng truyền qua mẫu** (Coulomb)
30TB0XLC	1.368
30TB15XLC	989
30TB30XLC	685
30TB45XLC	505



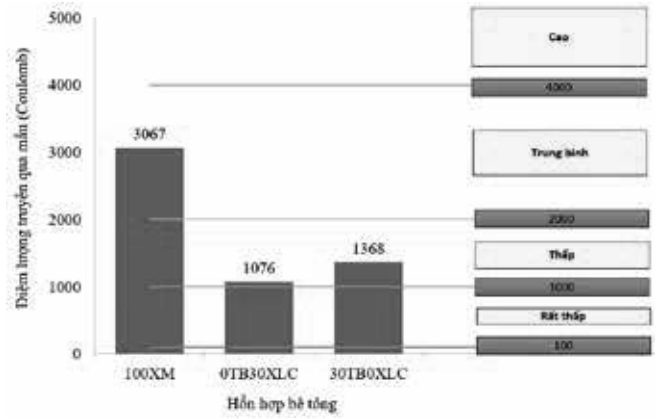
Hình 7. Ảnh hưởng của TB và XLC đến khả năng chống thấm ion clo của BTHN

Khi sử dụng TB và XLC thay thế XM trong hỗn hợp bê tông thì cơ chế chính của TB và XLC trong bê tông là tác dụng pozzolanic và tích hợp vi hạt, giúp lấp đầy lỗ rỗng, tạo liên kết C–S–H bổ sung và thu nhỏ kích thước mao dẫn khi XM thủy hóa dẫn đến giảm độ rỗng và tăng khả năng chống thấm, đặc biệt đối với ion clo, dẫn đến làm giảm độ rỗng của bê tông và tăng khả năng chống thấm ion clo. Các kết quả này cũng tương đồng với các nghiên cứu của một số tác giả [8, 12, 16].

Bảng 6 và Hình 8 cho thấy, ảnh hưởng của XLC đáng kể hơn TB đến khả năng chống thấm ion clo của BTHN, khả năng chống thấm ion clo tăng lên khoảng 27% khi sử dụng cùng 30% hàm lượng thay thế XM. Thứ nhất, như đã giải thích ở phần trên, XLC có kích thước hạt trung bình nhỏ hơn TB, do đó các hạt dễ lấp đầy lỗ rỗng hơn TB. Ngoài ra, hạt XLC cũng trơn nhẵn hơn hạt TB, do đó khả năng lấp đầy các lỗ rỗng cũng tốt hơn do độ ma sát nhỏ hơn. Khi mật độ hỗn hợp tăng lên do các lỗ rỗng được lấp đầy nhiều hơn dẫn đến hỗn hợp bê tông đặc chắc hơn, chống thấm ion clo tốt hơn.

Bảng 6. Ảnh hưởng của TB và XLC đến khả năng chống thấm ion clo của BTHN

Hỗn hợp	**Điện lượng truyền qua mẫu** (Coulomb)
100XM	3.067
0TB30XLC	1.076
30TB0XLC	1.368



Hình 8. Ảnh hưởng của TB và XLC đến khả năng chống thấm ion clo của BTHN

4. KẾT LUẬN

Từ kết quả trong nghiên cứu này có thể rút ra một số kết luận sau:

- Sử dụng TB và XLC làm giảm độ rỗng của BTHN. Độ rỗng của BTHN giảm từ 12,63% xuống 5,87% khi lượng TB và XLC thay thế 75% khối lượng XM.

- Sử dụng TB và XLC làm tăng khả năng chống thấm ion clo của BTHN. Lượng TB và XLC thay thế 75% XM theo khối lượng làm giảm khả năng chống thấm ion clo của BTHN từ mức trung bình xuống rất thấp so với bê tông sử dụng 100% XM.

- Sử dụng XLC có khả năng giảm độ rỗng và tăng khả năng chống thấm ion clo của HHBT tốt hơn so với TB: Độ rỗng giảm khoảng 4% và khả năng chống thấm ion clo tăng lên khoảng 27%.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] V. M. Malhotra, P. K. Mehta. High-performance, high-volume fly ash concrete: Materials, mixture proportioning, properties, construction practice and case histories. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., Canada, 2005.

[2] C. Shi, P. V. Krivenko, D. Roy. Alkali-Activated Cements and Concretes. Taylor & Francis, London, 2006.

[3] World Coal Association. Coal combustion products: Production and use. World Coal Association Report, London, 2019.

[4] Văn phòng Chính phủ. Quyết định phê duyệt Quy hoạch phát triển điện lực quốc gia thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050, số 500/QĐ-TTg, 2023.

[5] P. K. Mehta. Reducing the environmental impact of concrete. Concrete International, 23(10) 61-66, 2001.

[6] M. Thomas. Supplementary cementing materials in concrete. CRC Press, Boca Raton, 2013.

[7] A. M. Neville. Properties of Concrete, 5th Edition. Pearson Education, London, 2011.

[8] P. K. Mehta. Reducing the environmental impact of concrete. Concrete International, 23(10) 61-66, 2001.

[9] A. M. Neville. Properties of Concrete, 5th Edition. Pearson Education, London, 2011.

[10] J. L. Wang et al. Effects of fly ash and ground granulated blast furnace slag on properties of high strength concrete. Key Engineering Materials, 405-406, 219-225, 2009. Intenet: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.405-406.219.

[11] H. S. Chore, M. P. Joshi. Strength evaluation of concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag as cement replacing materials. Advances in Concrete Construction, 3(3) 223-236, 2015. Internet: https://doi.org/10.12989/acc.2015.3.3.223.

[12] Lê Thanh Hà. Nghiên cứu ảnh hưởng của tro xỉ nhiệt điện đến khả năng chống thấm ion clo của bê tông hạt nhỏ. Cầu đường Việt Nam, 5, 29-34, 2021.

[13] Lê Thanh Hà, Ngô Đức Chinh. Nghiên cứu ảnh hưởng của tro bay và bột đá vôi đến tính chất cơ học và tính chống thấm nước của bê tông hạt nhỏ. Cầu đường Việt Nam, 5, 52-57, 2022.

[14] Tăng Văn Lâm, Nguyễn Đình Trinh. Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng tro bay và xỉ lò cao hoạt tính đến tính chất của bê tông cường độ cao hạt mịn không sử dụng chất kết dính XM. Khoa học kỹ thuật thủy lợi và môi trường, 76, 2021.

[15] Hồ Văn Quân, Phan Nhật Long, Phạm Thái Uyết. Tính chất của bê tông tính năng cao kết hợp tro bay và xỉ lò cao. Khoa học công nghệ, 56-59, 2021.

[16] M. Thomas. Supplementary cementing materials in concrete. CRC Press, Boca Raton, USA, 2013.

■Ngày nhận bài: 28/02/2026 ■Ngày sửa bài: 10/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 18/3/2026

Đặc tính cơ học dài hạn của bê tông nhiều tro bay sử dụng cát nhiễm mặn trong công trình ở đồng bằng sông Cửu Long

Long-term mechanical properties of high-volume fly ash concrete using saline sand for construction in the Mekong Delta

> THS.NCS HUỲNH THỊ MỸ DUNG[1,2], TS HUỲNH VĂN HIỆP[2], PGS.TS NGUYỄN THANH SANG[1,*]
[1]Trường Đại học Giao thông vận tải
[2] Đại học Trà Vinh
[*]Email: nguyenthanhsang@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá đặc tính cơ học của bê tông (BT) nhiều tro bay (TB) sử dụng cát nhiễm mặn (CNM) nhằm phát triển vật liệu bền vững cho khu vực đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL). TB thay thế xi măng (XM) ở mức 20 - 60% và các chỉ tiêu cường độ chịu nén, cường độ ép chẻ, khả năng chống mài mòn được xác định đến 360 ngày. Kết quả cho thấy TB cải thiện rõ rệt sự phát triển cường độ dài hạn. Cường độ chịu nén 28 ngày đạt 45,3 - 57,2 MPa, các cấp phối 20 - 30% TB cho giá trị cao nhất và xấp xỉ mẫu đối chứng (58,5 MPa). Ở 180 - 360 ngày, cường độ đạt 75,3 - 76,9 MPa đối với các mẫu có 20 - 40% TB, vượt BT không TB. Cường độ ép chẻ phát triển tương đồng với cường độ chịu nén. Độ mài mòn ở 28 ngày không chênh lệch lớn so với đối chứng. Ở 180 ngày, các cấp phối 20 - 40% TB đạt khả năng chống mài mòn tốt nhất, cho thấy sự cải thiện độ đặc chắc và tăng bền bề mặt BT. BT nhiều TB sử dụng CNM đáp ứng yêu cầu cơ học và đặc tính dài hạn vượt trội, phù hợp cho vật liệu làm đường ô tô.

Từ khóa: Bê tông nhiều tro bay; cát nhiễm mặn; đặc tính cơ học dài hạn; khả năng mài mòn; bê tông bền vững.

ABSTRACT

This study evaluates the mechanical properties of high-volume fly ash concrete using saline sand to develop sustainable materials for the Mekong Delta region. Fly ash replaced cement at replacement levels of 20 - 60% and compressive strength, splitting strength and abrasion resistance were determined up to 360 days. The results showed that fly ash significantly improved long-term strength development. Compressive strength at 28 days reached 45.3 - 57.2 MPa, with mixtures containing 20 - 30% fly ash yielding the highest values, comparable to that of the control concrete (58.5 MPa). At 180 - 360 days, compressive strength reached 75.3 - 76.9 MPa for mixtures with 20 - 40% fly ash, exceeding that of the control concrete. Splitting strength developed similarly to compressive strength. Abrasion resistance at 28 days did not significantly differ from that of the control concrete. At 180 days, mixes with 20 - 40% fly ash achieved the best abrasion resistance, demonstrating a denser microstructure and increased surface strength of the concrete. High-volume fly ash concrete using saline sand satisfies mechanical requirements and exhibits superior long-term properties, making it suitable for road construction applications.

Keywords: High-volume fly ash concrete; saline sand; long-term mechanical properties; abrasion resistance; sustainable concrete.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Vật liệu xanh và xây dựng bền vững ngày càng trở nên cấp thiết để giảm phát thải khí nhà kính và hạn chế khai thác tài nguyên thiên nhiên. Việc thay thế một phần XM bằng TB - phế thải từ các nhà máy nhiệt điện được xem là giải pháp hiệu quả vừa giảm lượng CO_2 phát thải từ sản xuất XM [1, 2]. Bên cạnh đó, tình trạng thiếu hụt cát sông và sự gia tăng xói lở do khai thác [3-4], đặc biệt tại vùng ĐBSCL tình trạng sạt lở ngày càng nghiêm trọng với nhiều nguyên nhân khác nhau, trong đó có hoạt động khai thác cát [5] đặt ra yêu cầu cấp bách cần tìm kiếm các nguồn cát thay thế, trong đó CNM là lựa chọn tiềm năng nếu được xử lý hợp lý trong cấp phối BT XM. Trên thế giới, để giải quyết vấn đề khan hiếm nguồn cát nhiều quốc gia đã sử dụng cát biển, cát nạo vét cửa sông với khối lượng lớn làm vật liệu trong ngành Xây dựng [6].

Các nghiên cứu trong và ngoài nước đã đánh giá các đặc tính cơ học của BT nhiều TB cũng như BT sử dụng CNM. Tuy nhiên, đa phần các công trình nghiên cứu riêng lẻ đối với hai vật liệu này, sử dụng cát biển qua rửa sạch, hoặc cát nạo vét đánh giá cường độ ở tuổi 28 ngày [7-9]. Trong khi sự kết hợp giữa hai loại vật liệu này trong BT để xem xét các chỉ tiêu dài hạn như cường độ chịu nén, cường độ ép chẻ và khả năng chống mài mòn - sử dụng trong xây dựng đường bộ chưa được đề cập nhiều. Do vậy, bài báo trình bày một kết quả nghiên cứu với đặc tính cơ học dài hạn đến 360 ngày để minh chứng cho tiềm năng sử dụng vật liệu này trong xây dựng công trình giao thông.

2. VẬT LIỆU CHẾ TẠO VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu chế tạo

Với điều kiện thực tiễn ĐBSCL, gồm TB nhiệt điện Duyên Hải 1 và CNM biển Ba Động, XM PC40 Hà Tiên có cường độ tuổi 3 ngày là 38,6 MPa, 28 ngày là 56,4 MPa, phụ gia siêu dẻo SilkRoad SPR1500 (loại G), cát nghiền và đá 5×20 Trà Đuốc được dùng để đảm bảo tính công tác, cường độ và độ bền của BT. Sự kết hợp này vừa đáp ứng yêu cầu kỹ thuật, vừa có tính khả thi và khả năng ứng dụng rộng rãi trong điều kiện xâm nhập mặn của ĐBSCL.

2.2. Thiết kế thành phần BT nhiều TB

Cường độ đặc trưng của BT dùng cho thiết kế là 45 MPa, cường độ mục tiêu dùng để lựa chọn thành phần của BT được xác định theo công thức:

$$f_{cu,0} \geq f_{cu,k} + 1,645\sigma$$

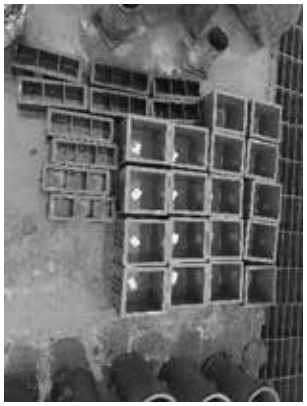
Chọn $\sigma = 5,0$ MPa khi cường độ đặc trưng 25 - 45 MPa. Cường độ mục tiêu dùng để thiết kế thành phần: 45+1,645*5 = 53 MPa. Sau khi tính toán và điều chỉnh lượng vật liệu phù hợp thì thành phần các vật liệu được trình bày tại Bảng 1. Tương tự, cường độ ép chẻ đặc trưng là 3,3 MPa. Khoảng cường độ chịu nén nên đạt [48 MPa - 58 MPa] và cường độ ép chẻ [3,7 MPa - 4,7 MPa]. Thiết kế BT nên đạt đồng thời cả cường độ chịu nén và ép chẻ như trên.

Bảng 1. Thành phần các loại BT nhiều TB

STT	Kí hiệu	Nước	XM (kg)	TB (kg)	Đá 5x20 (kg)	Cát tự nhiên (kg)	Cát nghiền (kg)	CNM (kg)	Phụ gia (kg)
1	CMTB0	168	440	0	1.150	0	370	370	4,4
2	CMTB20	168	352	88	1.150	0	361	361	3,9
3	CMTB30	168	308	132	1.150	0	350	350	3,3
4	CMTB40	168	264	176	1.150	0	343	343	3,1
5	CMTB50	168	220	220	1.150	0	336	336	2,9
6	CMTB60	168	176	264	1.150	0	329	329	2,6

Thành phần các loại BT được thực nghiệm tại trạm trộn với quy trình lựa chọn vật liệu, máy móc thiết bị và tuân thủ đúng quy trình (Hình 1 - 5).

Hình 1. Chuẩn bị vật liệu



Hình 2. Chuẩn bị khuôn mẫu

Hình 3. Đổ BT và kiểm tra độ sụt

Hình 4. Làm phẳng, dán nhãn bề mặt các loại BT

Hình 5. Tháo khuôn và bảo dưỡng BT

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phát triển cường độ chịu nén dài hạn

Sau khi đúc các loại BT được bảo dưỡng đúng quy trình, thiết bị nén đạt kiểm định chất lượng trong Hình 6. Thí nghiệm mẫu lập phương theo Tiêu chuẩn TCVN 3118-2022 [10].

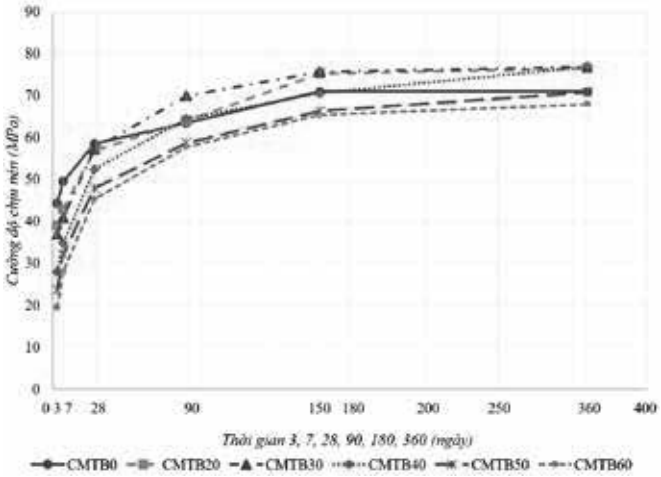
Hình 6. Công tác chuẩn bị và nén mẫu

Kết quả cường độ chịu nén được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả cường độ chịu nén của BT cát mặn và TB (MPa)

Ký hiệu	3 ngày	7 ngày	28 ngày	90 ngày	180 ngày	360 ngày
CMTB0	44,4	49,5	58,5	63,4	71,0	71,0
CMTB20	38,9	42,9	56,8	64,0	75,3	76,5
CMTB30	36,9	40,9	57,2	70,0	75,7	76,9
CMTB40	28,0	34,8	52,4	64,5	70,6	76,9
CMTB50	23,7	32,2	47,9	58,7	66,3	70,7
CMTB60	19,4	28,0	45,3	57,8	65,4	67,9

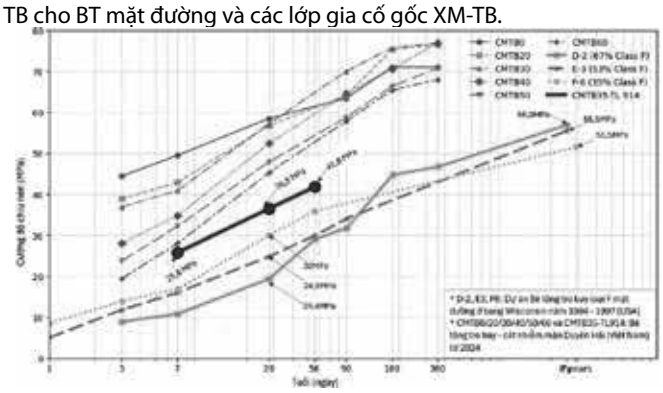
So với B45, ở 3 ngày tuổi CMTB0-30 đạt 99 - 82%, trong khi CMTB40-60 chỉ đạt 62 - 43%; do đó nếu yêu cầu cường độ sớm, tỷ lệ thay thế nên ≤30%. Ở 7 ngày, các giá trị tương ứng là 110 - 91% và 77 - 62%, cho phép xem xét thay thế đến 50% khi không yêu cầu cao về cường độ sớm. Tại 28 ngày, cường độ đạt 48 - 58 MPa (trừ mức 60%), vì vậy có thể đề xuất tuổi thiết kế khoảng 35 ngày cho BT CNM-TB (Hình 7).



Hình 7. Kết quả cường độ nén của BT 0 - 60% TB và cát mặn

Đối với BT cát mặn TB có sự phản ứng pozzolan xảy ra giữa TB và vôi tiết ra từ phản ứng của XM với nước với sự có mặt của hàm lượng mặn trong cát cũng ảnh hưởng đáng kể. Ở tuổi 3, 7 ngày do hạt XM chưa thủy hóa hết và đủ lượng vôi tiết ra ($Ca(OH)_2$), tốc độ tăng của lượng vôi tiết ra từ 28 - 90 ngày (theo Toroka, 1979) khi có mặt của vôi thì thành phần SiO_2 và Al_2O_3 trong TB sẽ phản ứng và tạo thêm các CSH dạng các sợi ngắn và CASH tăng mật độ phần đặc trong đá XM lên, các sợi này được phát triển đến 360 ngày và còn cao hơn cả BT đối chứng bởi đến 90 ngày cơ bản mật độ CSH của BT chỉ có XM đã ổn định, còn lượng vôi thì tiếp tục phản ứng với TB và làm tăng mật độ chất rắn lên đến 360 ngày. Có thể sự có mặt của ion Cl trong cát mặn hình thành muối Friedel (ít trương nở) dạng rắn, hơn nữa khi tỷ lệ thay thế TB cao làm giảm đáng kể C_3A của XM nên đồng thời sẽ ức chế sự hình thành Ettringite gây trương nở trong đá XM, kết quả là càng dài ngày đến 360 ngày BT nhiều TB càng đặc cao và ít trương nở đá XM hơn so với BT đối chứng thông thường.

Cường độ dài ngày là ưu điểm nổi bật của BT này. Ở 360 ngày, CMTB30 và CMTB40 đạt 171% so với B45. Hiệu quả tối ưu ghi nhận trong khoảng thay thế 20 - 50%, phù hợp với các nghiên cứu trước [11-13]. Do phản ứng pozzolan diễn ra chậm, cường độ sớm còn hạn chế nhưng tăng nhanh sau 28 ngày nhờ phản ứng thứ cấp, góp phần cải thiện vi cấu trúc và nâng cao cường độ dài hạn. Ion Cl^- trong CNM cũng có thể tham gia ổn định cấu trúc, hỗ trợ quá trình đặc chắc của BT. Tương tự nghiên cứu của Mỹ [14], cường độ BT mặt đường sau 7 - 8 năm có thể gần gấp đôi so với 28 ngày khi sử dụng TB loại F ở mức 53 - 67%. Kết quả thí nghiệm BT CNM-TB tại Duyên Hải đến 360 ngày cũng cho thấy xu hướng tăng gần gấp đôi so với 28 ngày. Mẫu hiện trường trên tỉnh lộ 914 đạt 36,5 MPa ở 28 ngày, 41,8 MPa ở 56 ngày [15] và tiếp tục phát triển theo thời gian (Hình 8). Những kết quả này khẳng định tiềm năng ứng dụng CNM kết hợp TB cho BT mặt đường và các lớp gia cố gốc XM-TB.



Hình 8. Sự phát triển cường độ dài hạn của BT nhiều TB

3.2. Phát triển cường độ ép chẻ dài hạn

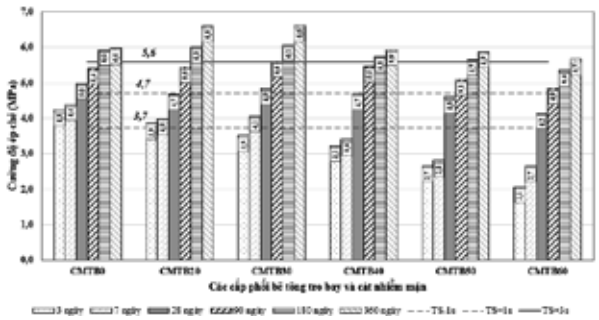
Thí nghiệm mẫu hình trụ theo Tiêu chuẩn TCVN 3120-2022 có tham khảo theo ASTM C496, vì thực hiện trên mẫu lập phương khó khăn trong quá trình thực hiện. Kết quả thí nghiệm cường độ ép chẻ được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả cường độ ép chẻ của BT cát mặn TB (MPa)

Ký hiệu	3 (ngày)	7 (ngày)	28 (ngày)	90 (ngày)	180 (ngày)	360 (ngày)
CMTB0	4,3	4,4	5,0	5,4	6,0	6,0
CMTB20	3,9	4,0	4,7	5,5	6,0	6,6
CMTB30	3,5	4,1	4,9	5,6	6,1	6,6
CMTB40	3,2	3,4	4,7	5,5	5,8	5,9
CMTB50	2,7	2,8	4,6	5,1	5,7	5,9
CMTB60	2,1	2,7	4,2	4,9	5,4	5,7

Cường độ ép chẻ có xu hướng phát triển tương tự cường độ chịu nén, giảm khi tăng hàm lượng TB. Loại BT B45 được chọn yêu cầu cường độ ép chẻ đặc trưng là 3,3 MPa (SP3,3). Ở 3 ngày của CMTB0, CMTB20, CMTB30 đạt lần lượt là 129%, 117%, 106% và CMTB40, CMTB50, CMTB60 đạt lần lượt là 98%, 80%, 62% so với loại SP3,3 thông thường. Xu hướng tương tự ghi nhận ở 7 ngày. Kết quả cho thấy tốc độ phát triển cường độ ép chẻ ở tuổi sớm cao hơn so với cường độ chịu nén, đây là ưu điểm quan trọng khi ứng dụng cho BT mặt đường, nơi yêu cầu khả năng chịu kéo sớm.

Để thiết kế đạt khoảng cường độ kỳ vọng (3,7 MPa - 4,7 MPa) thì cơ bản ở tuổi 7 ngày hỗn hợp 0 - 30% TB đạt yêu cầu, còn hỗn hợp TB từ 40% trở lên chưa đạt, đến 28 ngày tuổi thì cấp phối đều đạt trình bày trong Hình 9. Đến 360 ngày các mẫu 0 - 30% TB đạt là 181%, 200%, 201% và 40 - 60% TB đạt 180%, 178%, 182% khá tương đồng với cường độ chịu nén, nhưng tỷ lệ cường độ chịu kéo đạt cao hơn so với cường độ chịu nén khi so sánh với cấp BT. Tỷ lệ TB đạt tốt nhất cho cường độ chịu kéo từ 20 - 30%. Kết quả cường độ chịu nén và kéo này phù hợp với các nhận định trong các nghiên cứu gần đây trên BT dùng cát biển kết hợp phụ gia khoáng [16-17]. Cơ sở khoa học hình thành và tạo ra cường độ kéo cao hơn được cho là với sự tham gia của cấu tử TB tăng mạnh CASH cũng như độ dài của các sợi cứng này làm cải thiện đáng kể khả năng chịu kéo của BT, tuy nhiên với một hàm lượng phù hợp để lượng vôi tiết ra của XM đủ để phản ứng cùng TB.



Hình 9. Cường độ ép chẻ của các loại BT cát mặn TB

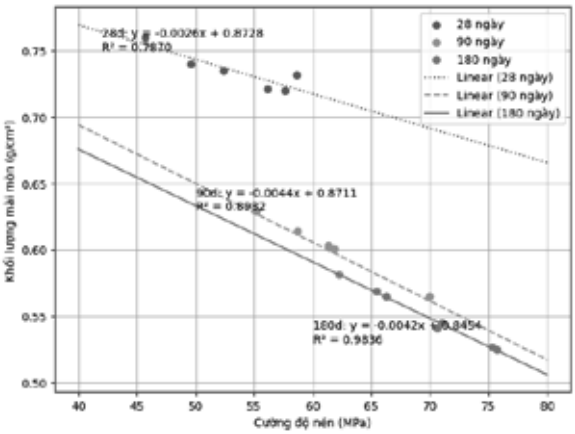
3.3. Khả năng chống mài mòn

Kết quả mài mòn của BT CMTB được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 4. Khối lượng mài mòn của BT CMTB khi sử dụng bột mài là bột nhôm

Ký hiệu	CMTB0	CMTB20	CMTB30	CMTB40	CMTB50	CMTB60
28 (ngày)	0,732	0,720	0,721	0,735	0,740	0,760
90 (ngày)	0,603	0,601	0,565	0,581	0,614	0,629
180 (ngày)	0,545	0,527	0,525	0,541	0,565	0,569

Ở tuổi 28 ngày, các cấp phối thay thế TB từ 20 - 30% có độ mài mòn đạt giá trị gần như nhau và thấp hơn mẫu đối chứng. Các cấp phối có hàm lượng TB cao 50 - 60% có khối lượng mài mòn lớn hơn, cho thấy ở tuổi sớm lượng chất kết dính hoạt tính chưa đủ để tạo cấu trúc đặc chắc. Ở tuổi 90 đến 180 ngày, khối lượng mài mòn của các cấp phối tiếp tục giảm và có xu hướng hội tụ. Trong đó, các cấp phối 50 - 60% TB cải thiện độ mài mòn rất tốt. Phân tích tương quan giữa cường độ nén và độ hao hụt mài mòn trong Hình 10 cho thấy tồn tại mối liên hệ tương đối chặt chẽ giữa các chỉ tiêu. Đối với các cấp phối chứa 20 - 40% TB, tương quan này thể hiện rõ nhất, cho thấy sự kết hợp tối ưu giữa vi cấu trúc đặc, độ bền cơ học và độ bền bề mặt. Kết quả phù hợp với [8], [18-19].



Hình 10. Mối tương quan giữa cường độ nén và độ mài mòn của BT cát mặn TB

Ở tuổi dài ngày, khả năng chống mài mòn không chỉ phụ thuộc vào cường độ nén mà chủ yếu do sự hoàn thiện cấu trúc vi mô thông qua hình thành CSH thứ cấp, cải thiện vùng tiếp giáp và giảm lỗ mao quản. Đồng thời, hàm lượng hạt mịn cao trong CNM góp phần tăng độ chặt, giảm lỗ rỗng và nâng cao khả năng chống mài mòn.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã chứng minh rằng BT nhiều TB sử dụng CNM có khả năng phát triển cường độ và độ bền dài hạn tốt, đặc biệt với hàm lượng TB thay thế từ 20 - 40%. Ở tuổi trung và dài ngày (90 - 360 ngày), các cấp phối này đạt cường độ nén và cường độ ép chẻ cao hơn hoặc tương đương BT đối chứng, đồng thời thể hiện khả năng chống mài mòn vượt trội. Kết quả cho thấy phản ứng pozzolan của TB đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện vi cấu trúc và độ bền lâu của BT, khi có mặt của cát mặn trong thành phần BT. Điều này khẳng định tính khả thi và tiềm năng ứng dụng của vật liệu trong các công trình hạ tầng tại ĐBSCL.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] H Tan, C Du, X He, M Li, J Zhang, Z Zheng and Y Wang. Enhancement of compressive strength of high-volume fly ash cement paste by wet grinded cement: Towards low carbon cementitious materials. Construction and Building Materials, no. 323, pp. 126458, 14 March 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126458.

[2] Nguyễn Thanh Sang và cộng sự. Giảm thiểu phát thải và chỉ số tiêu thụ năng lượng của bê tông nhiều tro bay ở Việt Nam. Tạp chí Xây dựng, số 07, tr. 94-97, 2025.

[3] F Jaramillo. Estimating and modelling soil loss and sediment yield in the Maracas-St. Joseph River Catchment with empirical models (RUSLE and MUSLE) and a physical-based model (erosion 3D). Montreal: McGill University, 2007.

[4] ES Rentier and LH Cammeraat. The environmental impacts of river sand mining. Science of the Total Environment, no. 838, p. 155877, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.155877.

[5] Huỳnh Công Hoài và cộng sự. Phân tích nguyên nhân gây gia tăng xói lở bờ sông ở đồng bằng sông Cửu Long. Tạp chí Khí tượng Thủy văn, số 703, tr. 42-50, 2019.

[6] E Garel, W Bonne, MB Collins and C Peffer. Offshore sand and gravel mining, 2019, In, Cochran, J. Kirk, Bokuniewicz, Henry J. and Yager, Patricia L. (eds.) Encyclopedia of Ocean Sciences. Elsevier, pp. 655-662, doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.11392-2.

[7] B Sampath and G Mohankumar. Preliminary study on the development of concrete with sea sand as fine aggregate. Indian Journal of Science and Technology, no. 9(32), pp. 1-5, August 2016, doi: 10.17485/ijst/2016/v9i32/98631.

[8] J Limeira, M Etxeberria, L Agulló and D Molina. Mechanical and durability properties of concrete made with dredged marine sand. Construction and Building Materials, no. 25, pp. 4165-4174, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.053.

[9] Nguyen Thanh Sang, Thai Minh Quan, May Huu Nguyen and Lanh Si Ho. Performances of eco-fine-grained concrete containing saline sand as partial fine aggregate replacement. Journal of Applied Science and Engineering, no. 4, pp. 527-539, 2021.

[10] TCVN 3118:2022. Bê tông - Phương pháp xác định cường độ chịu nén.

[11] M Kosior-Kazberuk and M Lelusz. Strength development of concrete with fly ash addition. Journal of Civil Engineering and Management, no. 2, pp. 115-122, 2007, doi: 10.3846/13923730.2007.9636427.

[12] S Haruna, BS Mohammed, MMA Wahab, MU Kankia, M Amran and AM Gora. Long-term strength development of fly ash-based one-part alkali-activated binders. Materials, no. 15, p. 4160, 2021, doi: 10.3390/ma14154160.

[13] T-T Nguyen and V-H Dang. Experimental and probabilistic investigations of the effect of fly ash dosage on concrete compressive strength and stress-strain relationship. Periodica Polytechnica Civil Engineering, no. 4, pp. 1098-1113, 2022, doi: 10.3311/PPci.20607.

[14] TR Naik, BW Ramme, RN Kraus and R Siddique. Long-term performance of high-volume fly ash concrete pavements. ACI Materials Journal, no. 02-196, pp. 150-155, October 1, 2003.

[15] Nguyễn Thanh Sang và cộng sự. Nghiên cứu giải pháp công nghệ vật liệu sử dụng phối hợp tro xỉ nhiệt điện duyên hải và cát nhiễm mặn. Đề tài khoa học và công nghệ cấp tỉnh, mã số CT.KT.03-2024, 2025.

[16] Y Tan and L Yang. A statistical compressive and splitting tensile strength model for recycled seawater and sea sand concrete with admixtures. Buildings, no. 7, p. 1950, 2024, doi: 10.3390/buildings14071950.

[17] VT-A Phan, H-B Tran, B Safi and V-T Vo. Effects of sea sand and fly ash on the compressive strength of concrete. Proceedings of the 4th International Conference on Sustainable Development in Civil, Urban and Transportation Engineering, pp. 201-210, March 2025, doi: 10.1007/978-981-97-9400-3_21.

[18] Đoàn Anh Thái. Nghiên cứu ảnh hưởng của vật liệu mài tới độ mài mòn của bê tông xi măng. Hội nghị khoa học quốc tế Kỷ niệm 60 năm thành lập Viện KHCN Xây dựng, tr. 300-303, 2023, doi: 10.59382/pro.intl.con-ibst.2023.ses2-7.

[19] Hoàng Minh Đức và Ngọ Văn Toản. Nâng cao khả năng chống mài mòn của bê tông sử dụng cát mịn làm mặt đường bê tông xi măng. Tạp chí KHCN Xây dựng, số 3, tr.26-33, 2018.

■Ngày nhận bài: 26/02/2026 ■Ngày sửa bài: 07/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 18/3/2026

Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng cốt thép đến sức kháng uốn của dầm bê tông tính năng siêu cao

Investigation of the influence of reinforcement ratio on the flexural capacity of ultra-high-performance concrete beams

> TS TRẦN VIỆT HƯNG
Trường Đại học Giao thông vận tải
Email: hungtv@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày các kết quả nghiên cứu thực nghiệm các tính chất cơ học của bê tông tính năng siêu cao (UHPC) và ứng xử uốn của dầm bê tông tính năng siêu cao cốt thép. Tiến hành thí nghiệm uốn 4 điểm cho 6 dầm thí nghiệm với các hàm lượng cốt thép khác nhau cho đến khi phá hoại để xác định ứng xử uốn của các dầm. Kết quả thí nghiệm cho thấy rõ các giai đoạn chịu lực của dầm bê tông tính năng siêu cao tốt thép cho đến khi bị phá hoại.

Từ khóa: Bê tông tính năng siêu cao; UHPC; sợi thép; ứng xử uốn; sức kháng uốn; dầm.

ABSTRACT

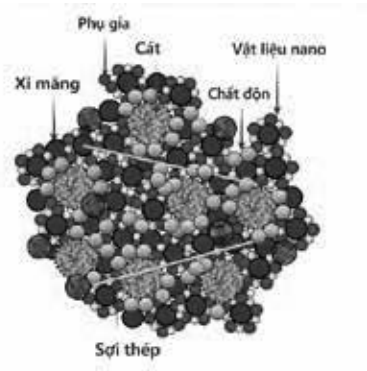
This paper presents the experimental results on the mechanical properties of ultra-high-performance concrete (UHPC) and the flexural behavior of reinforced UHPC beams. Four-point bending tests were conducted on six beam specimens with different reinforcement ratios until failure to evaluate their flexural response. The experimental results clearly reveal the load-carrying stages of the reinforced UHPC beams up to failure.

Keywords: Ultra-high-performance concrete; UHPC; Steel fiber; flexural behavior; flexural Resistance; beam.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bê tông siêu tính năng (UHPC) là một loại bê tông không sử dụng cốt liệu thô nhằm tăng tính đồng nhất và duy trì khả năng liên kết giữa hồ xi măng và cốt liệu mịn. Với tỷ lệ nước/chất kết dính (w/b) rất thấp, UHPC cần sử dụng phụ gia siêu dẻo để đảm bảo tính công tác và tối ưu hóa quá trình phát triển vi cấu trúc.

Ngoài ra, các phụ gia khoáng siêu mịn như silica fume, tro bay và xỉ lò cao nghiền mịn được bổ sung nhằm tăng cường phản ứng pozzolan, đẩy nhanh quá trình thủy hóa sớm và lấp đầy các lỗ rỗng mao quản, từ đó cải thiện cường độ và độ bền của UHPC [1]. Các sợi thép phân tán đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện khả năng chịu kéo và uốn, đồng thời giảm co ngót, giúp UHPC chịu đựng tốt hơn trong các điều kiện làm việc khắc nghiệt [2, 3].



Hình 1. Cấu trúc thành phần của bê tông UHPC

Bê tông siêu tính năng (UHPC) hiện đã được sử dụng cho các công trình lớn trên thế giới cũng như ở Việt Nam. Trên thế giới, cây cầu đường ô tô đầu tiên sử dụng bê tông UHPC là cầu Chuncheon Grand với chiều dài nhịp là 100 m, được hoàn thành xây dựng năm 2017. Cây cầu đường ô tô lớn nhất sử dụng bê tông UHPC cho kết cấu nhịp là cầu dây văng Goduck Grand có chiều dài nhịp chính là 230+540+230 = 1.000 m được hoàn thành xây dựng năm 2024 tại Hàn Quốc.

Tại Việt Nam, nghiên cứu và ứng dụng UHPC bắt đầu vào khoảng năm 2015. Các tổ chức như Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, cùng các doanh nghiệp tư nhân đã triển khai một số dự án nghiên cứu về công nghệ UHPC. Cho đến nay, hơn 26 cây cầu nhỏ sử dụng dầm UHPC đã được xây dựng trên địa bàn 13 tỉnh, cho thấy tính khả thi và hiệu quả kinh tế của loại vật liệu này trong điều kiện thực tế của địa phương. Dự án lớn nhất sử dụng UHPC là sửa chữa mặt cầu Thăng Long đã hoàn thành 5 năm và đến nay cho thấy sự thành công của giải pháp công nghệ này.

Hiện có một số tiêu chuẩn của nước Hoa Kỳ, Pháp, châu Âu về UHPC và Việt Nam chưa có tiêu chuẩn về vật liệu này. Tuy đã có một số nghiên cứu và ứng dụng, nhưng đến nay UHPC vẫn chưa được nghiên cứu nhiều và ứng dụng hạn chế ở Việt Nam do công nghệ phức tạp và chặt chẽ. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu thực nghiệm về ứng xử uốn của dầm UHPC cốt thép để làm cơ sở từng bước đưa vật liệu này vào ứng dụng trong các kết cấu chịu lực công trình.

2. VẬT LIỆU VÀ CHẾ TẠO MẪU THỬ

2.1. Thành phần vật liệu và chế tạo mẫu thử cường độ

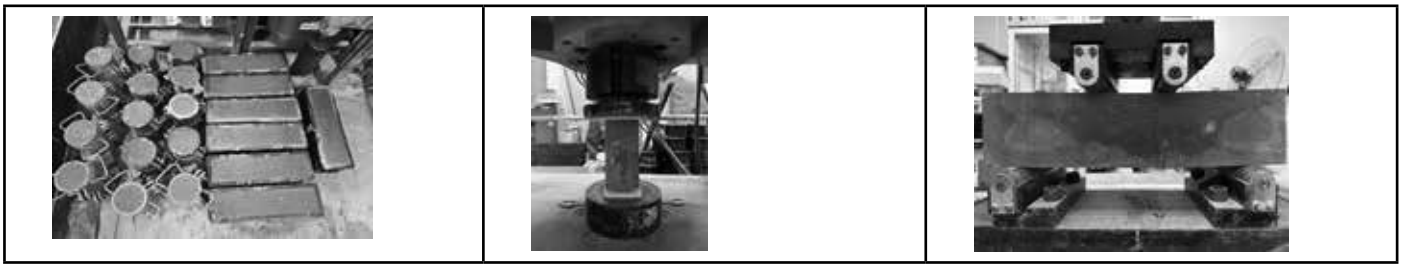
Xi măng sử dụng là loại xi măng PC40 thương hiệu Bút Sơn phù hợp theo TCVN 2682:2009 [4]. Cốt liệu sử dụng trong đề tài là cát thạch anh. Cát thạch anh sử dụng gồm loại cát thạch anh thô có mô-đun độ lớn 1,67 và cát thạch anh mịn có mô-đun độ lớn 1,47. Các tính chất cơ lý của cát thạch anh xác định theo TCVN 7572:2006 [5]. Silica fume sử dụng đảm bảo theo TCVN 8827:2011 [6]. Sợi thép sử dụng trong nghiên cứu là sợi Dramix OL 13/0,2. Trong nghiên cứu sử dụng phụ gia siêu dẻo đảm bảo theo tiêu chuẩn.

Thành phần hỗn hợp bê tông UHPC thí nghiệm được thiết kế bao gồm các vật liệu có khối lượng tính sao cho đủ 1 m^3 thể tích bê tông, bao gồm:

Bảng 1. Thành phần và cường độ mẫu thử bê tông UHPC thí nghiệm

Thành phần UHPC	Khối lượng (kg)/m^3
Cát	870
Xi măng PC40	780
Nước	178
Siêu dẻo	59
Sợi thép (19,5 mm)	78
Hỗn hợp chất độn	470
Cường độ chịu nén (MPa)	127,1
Cường độ kéo uốn (MPa)	16,9

Trộn UHPC là một quy trình phức tạp và có thể được chia thành hai phần. Đầu tiên là trộn phân bố, trạng thái của các hạt hỗn hợp được thay đổi bởi lực và vận tốc cắt thấp; thứ hai là trộn phân tán, sự kết tụ của các hạt hỗn hợp được phân tán bởi vận tốc cắt lớn. Trong một thể thống nhất, những hiệu ứng này được thể hiện về mặt lý thuyết là UHPC rất dễ chảy.

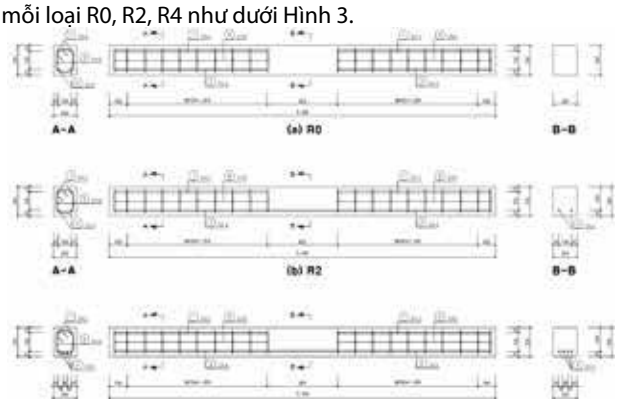


Hình 2. Mẫu bê tông thí nghiệm cường độ bê tông UHPC

Mẫu chế tạo để kiểm tra cường độ nén là mẫu trụ (100x200)mm, mẫu kiểm tra cường độ kéo uốn là mẫu hình lăng trụ (100x100x400)mm, các mẫu được chế tạo theo Tiêu chuẩn ASTM C192-02 [7]. Kết quả thí nghiệm được thể hiện trong Bảng 1.

2.2. Chế tạo mẫu dầm thí nghiệm

Các dầm thí nghiệm phải được thiết kế để phá hoại uốn khi đạt trạng thái giới hạn cực hạn. Mô hình thí nghiệm uốn với hai lực tập trung đối xứng (uốn bốn điểm). Tác giả đã chế tạo 6 mẫu dầm có tiết diện hình chữ nhật với kích thước: chiều cao 250 mm, chiều rộng 200 mm và chiều dài 3.300 mm (bao gồm 2 dầm cho mỗi loại R0, R2, R4 như dưới Hình 3.



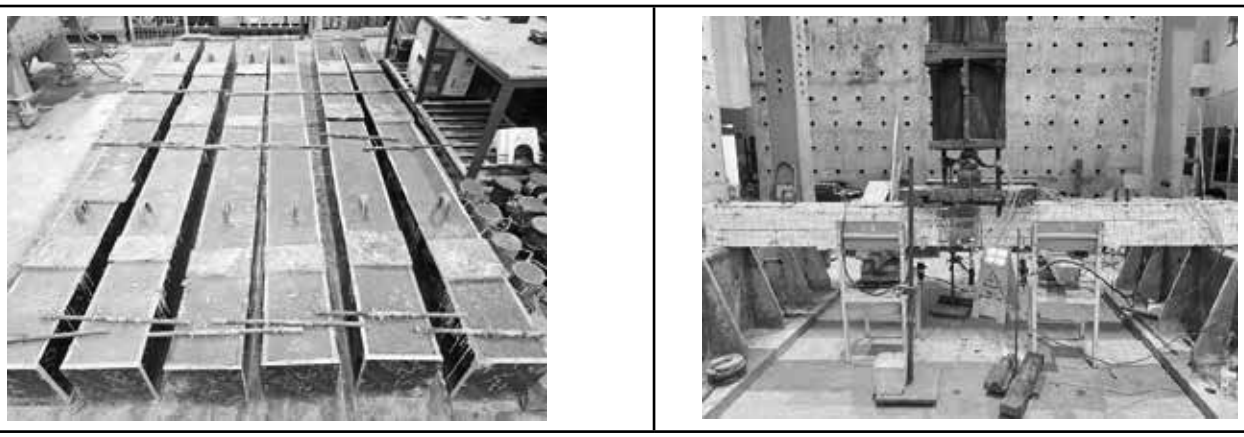
Hình 3. Sơ đồ cấu tạo của 6 dầm thí nghiệm (kích thước mm)

Cốt thép bố trí sử dụng cho dầm chịu uốn gồm:

Cốt thép dọc chủ: Thép Việt Úc $\Phi 14$ loại CB-400v có gờ f_y=400 MPa.
Cốt thép đai: Thép Việt Úc $\Phi 10$ loại CB-400v có gờ f_y=400 MPa
Bảng 2. Thông số dầm thí nghiệm

STT	Ký hiệu dầm	Cường độ nén của bê tông	Cường độ chảy của cốt thép	Thanh cốt thép chịu kéo tại mặt cắt giữa dầm		Cốt thép đai		Diện tích cốt thép chịu kéo	Hàm lượng cốt thép chịu kéo
		f_{ck} MPa	f_y MPa	Số lượng	Loại	Loại	Khoảng cách (mm)	A_s (mm^2)	ρ
1	R0-1	127	400	0	D14	D10	150	0	0
2	R0-2	127	400	0	D14	D10	150	0	0
3	R2-1	127	400	2	D14	D10	150	157,2	0,003144
4	R2-2	127	400	2	D14	D10	150	157,2	0,003144
5	R4-1	127	400	4	D14	D10	150	314,4	0,006288
6	R4-2	127	400	4	D14	D10	150	314,4	0,006288

Quá trình chế tạo mẫu dầm thí nghiệm thể hiện trên Hình 2. Các dầm sau khi được đúc trong khuôn sẽ được bảo dưỡng và chờ đến tuổi thí nghiệm ở 28 ngày. Sơ đồ gắn các thiết bị và bố trí thí nghiệm được thể hiện như Hình 4.

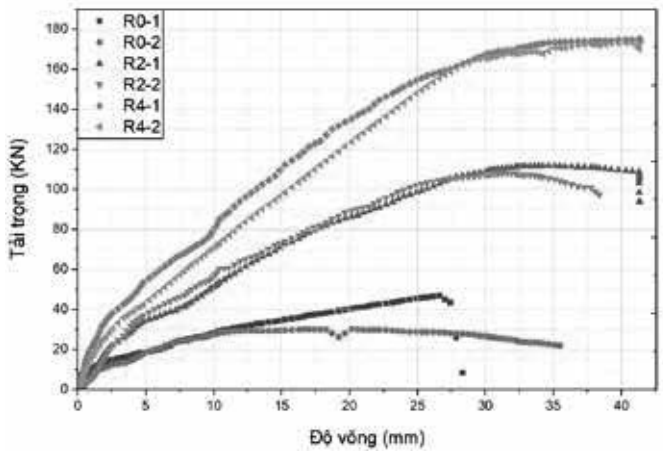


Hình 4. Chế tạo mẫu dầm thí nghiệm

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

3.1. Quan hệ tải trọng - độ võng của các dầm thí nghiệm

Số liệu kết quả thu thập được trong thí nghiệm về quan hệ tải trọng tác dụng lên dầm (kN) - độ võng tại mặt cắt giữa nhịp (mm) (P-Δ) của tất cả 6 dầm thí nghiệm được thể hiện trên Hình 5.



Hình 5. Quan hệ tải trọng - độ võng của các dầm thí nghiệm

Kết quả trên Hình 5 cho thấy có sự phân biệt rõ 3 giai đoạn chịu lực của dầm thí nghiệm chịu uốn thuần túy dựa trên độ dốc của đường quan hệ tải trọng - độ võng. Khi chịu uốn trạng thái ứng suất biến dạng trên tiết diện thẳng góc của dầm bê tông cốt thép sử dụng bê tông UHPC cũng trải qua 3 giai đoạn gồm:

1. Giai đoạn chưa xuất hiện vết nứt: Quan hệ ứng suất-biến dạng cũng như quan hệ mô-men - độ cong là tuyến tính. Điểm kết thúc giai đoạn này là khi ứng suất ở thớ bê tông ngoài cùng đạt tới cường độ chịu kéo giới hạn.

2. Giai đoạn đã nứt: Sau khi vết nứt xuất hiện, các sợi thép trong bê tông UHPC làm cầu nối giữa các vết nứt, điều này làm cho phần tiết diện bê tông nằm trong vùng kéo dưới trục trung hòa có ứng suất kéo dư sau nứt đóng góp tạo nên sức kháng uốn của mặt cắt dầm.

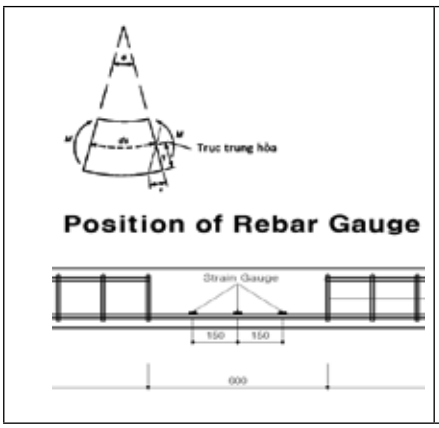
- Đối với 2 dầm ký hiệu R0-1 và R0-2 không có cốt thép dọc ở mặt cắt giữa dầm nên sau khi đã nứt, ứng suất kéo dư của các sợi thép sẽ làm cho giai đoạn này kéo dài tải trọng tác dụng lên dầm tăng lên không nhiều và sau khi các sợi thép này đứt hoặc tuột khỏi bê tông thì dầm bị gãy hoàn toàn.

- Đối với 4 dầm còn lại có cốt thép học chủ ở thớ dưới của dầm thì điểm kết thúc của giai đoạn này thường là khi ứng suất trong cốt thép dọc chịu kéo đạt tới cường độ chảy.

3. Giai đoạn phá hoại: Khi cốt thép dọc đã chảy vết nứt sẽ mở rộng nhanh, độ võng tăng nhanh, vùng bê tông chịu nén trên trục trung hòa thu hẹp lại và ứng suất nén trong bê tông sẽ tăng nhanh. Phá hoại có thể xảy ra từ vùng kéo hoặc đồng thời từ vùng kéo và vùng nén. Đối với 4 dầm có bố trí cốt thép chịu kéo thì các dầm đều bị phá hoại do cốt thép bị chảy dẻo.

3.2. Quan hệ mô-men - độ cong của các dầm thí nghiệm

Độ cong φ được định nghĩa là sự thay đổi góc quay trên một đơn vị chiều dài đã biết [8] như trên Hình 6.

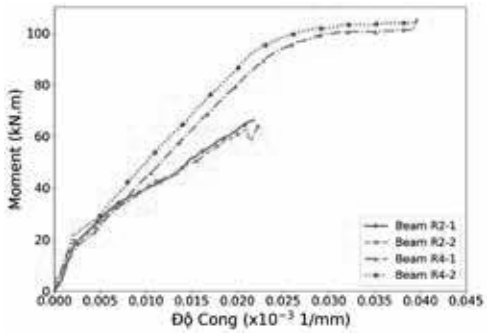


$$\varphi = \frac{\varepsilon}{y}$$

ε là biến dạng tại khoảng cách y tính từ trục trung hòa của tiết diện.

Hình 6. Độ cong của dầm thí nghiệm

Độ cong của dầm được tính thông qua kết quả đo biến dạng của cốt thép chịu kéo trên dầm khi thí nghiệm. Mô-men tại mặt cắt giữa nhịp được tính toán theo giá trị tải trọng tác dụng lên dầm. Đồng bộ hóa theo thời gian, ta được số liệu kết quả quan hệ mô-men - độ cong (M-φ) tại mặt cắt giữa nhịp của các dầm thí nghiệm. Đối với các dầm thí nghiệm thì chỉ xác định được độ cong dầm đối với 4 dầm bố trí cốt thép dọc chịu kéo R2 và R4 như Hình 7 dưới đây.



Hình 7. Biểu đồ mô-men - độ cong của các dầm thí nghiệm

Kết quả trên biểu đồ mô-men - độ cong cho thấy:

- Mối quan hệ M-φ là tuyến tính trước khi xuất hiện vết nứt đầu tiên.

- Ở giai đoạn hình thành vết nứt, giá trị mô-men không tăng trong khi biến dạng tăng nhanh cho đến khi vết nứt hình thành.

- Ở giai đoạn phát triển vết nứt, biểu đồ vẫn thể hiện tính tuyến tính. Độ dốc của biểu đồ cũng giảm do hiệu ứng giảm cứng do nứt gây ra.

- Điểm chảy trên biểu đồ thực nghiệm cũng thể hiện rõ ràng. Ở giai đoạn này, mô-men tăng chậm nhưng độ cong tăng rất nhanh thể hiện rằng cốt thép bắt đầu bị chảy dẻo.

- Ở giai đoạn phá hoại, các kết quả thực nghiệm cho thấy mô -men không tăng quá nhiều mà độ cong lại tăng nhanh cho tới khi phá hoại.

3.3. Xác định các giá trị tải trọng và độ võng của dầm thí nghiệm tại các giai đoạn chịu lực khác nhau

Việc xác định tải trọng nứt, tải trọng khi thép bắt đầu chảy và tải trọng phá hoại cuối cùng của các dầm bê tông Super có cốt thép là rất quan trọng để đánh giá khả năng làm việc của chúng. Các giá trị tải trọng tại các giai đoạn khác nhau có thể được xác định thông qua:

- Biến dạng đo được trong cốt thép chịu kéo;
- Biến dạng đo được trong vùng bê tông chịu nén;
- Tải trọng tác dụng lên dầm;
- Độ dốc của đường cong quan hệ biến dạng - tải trọng.

Các kết quả tổng hợp về giá trị tải trọng tại các điểm tới hạn - tải trọng nứt ban đầu, tải trọng chảy của tiết diện và tải trọng lớn nhất được trình bày trong Bảng 3 như sau:

Bảng 3. Dữ liệu các giai đoạn chịu lực của dầm thí nghiệm

Ký hiệu dầm	Tải trọng gây nứt bê tông			Tải trọng gây chảy dẻo cốt thép			Tải trọng phá hoại		
	P_{cr} (KN)	M_{cr} (KN.m)	Δ_{cr} (mm)	P_y (KN)	M_y (KN)	Δ_y (mm)	P_u (KN)	M_u (KN.m)	Δ_u (mm)
R0-1	5,82	3,49	0,02	-		-	46,77	28,06	9,20
R0-2	5,78	3,47	0,08	-		-	30,24	18,14	9,26
R2-1	27,21	16,33	1,74	105,55	63,33	22,71	111,80	67,08	31,81
R2-2	19,66	11,80	1,72	102,81	61,69	25,16	108,08	64,85	34,00
R4-1	22,68	13,60	1,87	160,27	96,16	27,35	175,45	105,27	46,56
R4-2	24,11	14,47	1,74	158,94	95,36	27,41	173,28	103,97	40,32

Dữ liệu về kết quả thí nghiệm trong Bảng 3 cho thấy, hàm lượng cốt thép chịu kéo vẫn ảnh hưởng lớn đến tải trọng gây nứt, tải trọng phá hoại của các dầm thí nghiệm. Khi có thêm cốt thép chịu kéo trên mặt cắt dầm thí nghiệm thì giá trị tải trọng (mô-men) của mặt cắt tăng lên rất nhiều lần tại các thời điểm dầm nứt, dầm bị phá hoại do uốn.

3.4. Dạng vết nứt và phá hoại của các dầm thí nghiệm

Dầm R0-1

	Dầm R0-2
	Dầm R2-1
	Dầm R2-2
	Dầm R4-1
	Dầm R4-2

Hình 8. Các dạng phá hoại và hình dạng vết nứt của các dầm thí nghiệm

Hình 8 thể hiện các dạng phá hoại của các dầm thí nghiệm, đều thể hiện dạng phá hoại uốn điển hình. Đối với dầm không có cốt thép chịu kéo, vết nứt xuất hiện phương thẳng đứng, phát triển nhanh làm dầm phá hoại ngay. Đối với các dầm bố trí 2 thanh cốt thép thì tại tải trọng lớn nhất, vùng bê tông chịu nén không bi vỡ vụn do khả năng chịu lực của cốt thép không đủ và cốt thép bị chảy. Đối với dầm 4 thanh cốt thép thì khi đạt tới tải trọng phá hoại, các vét nứt xuất hiện nhiều phân bố toàn bộ khu vực chịu uốn. Khi đạt tới tải trong phá hoại, chiều cao vùng chịu nén giảm và do có nhiều sợi thép và cường độ bê tông rất cao nên các dầm có hiện tượng dập bề mặt bê tông và vỡ vụn một phần cùng với cốt thép bị chảy.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã thực nghiệm khảo sát đánh giá sức kháng uốn của các dầm bê tông siêu tính năng UHPC không có và có cốt thép chịu uốn với các hàm lượng khác nhau. Kết quả thí nghiệm cho biết ảnh hưởng của tỷ lệ cốt thép đến sức kháng uốn của các dầm thí nghiệm và dạng phá hoại của các dầm này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Zhi-hai He et al. A novel development of green UHPC containing waste concrete powder derived from construction and demolition waste. Powder Technology, 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117075.

[2] J. Liu, F. Han, G. Cui, Q. Zhang, J. Lv, L. Zhang and Z. Yang. Combined effect of coarse aggregate and fiber on tensile behavior of ultra-high performance concrete. Construction and Building Materials, vol. 121, pp. 310-318, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.136.

[3] K. Wille, A. E. Naaman, S. El-Tawil and G. J. Parra-Montesinos. Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: Achieving strength and ductility without heat curing. Materials and Structures, vol. 45, no. 3, pp. 309-324, 2012, doi: 10.1617/s11527-011-9767-0.

[4] TCVN 2682:2009. Xi măng poóc lăng - Yêu cầu kỹ thuật. Bộ Khoa học và Công nghệ, 2009.

[5] TCVN 7572:2006. Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử. Bộ Khoa học và Công nghệ.

[6] TCVN 8827:2011. Phụ gia khoáng cho bê tông đầm lăn - Tro bay - Yêu cầu kỹ thuật. Bộ Khoa học và Công nghệ, 2011.

[7] ASTM C192-02. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. ASTM International, 2002.

[8] PGS.TS Ngô Đăng Quang và TS Nguyễn Duy Tiến. Kết cấu bê tông. NXB. Giao thông vận tải, 2009.

■Ngày nhận bài: 02/3/2026 ■Ngày sửa bài: 09/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 20/3/2026

Ứng dụng mô hình 2S2P1D để mô phỏng đặc tính đàn nhớt của bê tông asphalt - lưu huỳnh ở vùng nhiệt độ và tần số rộng

Application of the 2S2P1D model to simulate the linear viscoelastic properties of Sulfur-Extended Asphalt over a wide range of temperatures and frequencies

> TS NGUYỄN THU TRANG
Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
Email: trangnt@utt.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này nhằm mục đích xác định và mô hình hóa đặc tính đàn nhớt của bê tông asphalt - lưu huỳnh (BTAS) - một giải pháp vật liệu tiềm năng giúp giảm chi phí xây dựng và tăng khả năng kháng lún vệt bánh xe - làm cơ sở dữ liệu đầu vào cho thiết kế kết cấu áo đường theo phương pháp Cơ học - Thực nghiệm. Mô-đun động (|E*|) là đại lượng then chốt đặc trưng cho tính chất đàn nhớt của bê tông asphalt và đường cong chủ |E*| là đường cong tổng hợp mô tả tính chất này trong một vùng rộng của tần số và nhiệt độ. Trong phạm vi nghiên cứu này, mô-đun động (|E*|) của BTAS (với tỷ lệ lưu huỳnh 30% và 40% theo khối lượng hỗn hợp chất kết dính) và bê tông asphalt đối chứng (BTA) đã được xác định thực nghiệm theo Tiêu chuẩn AASHTO TP-62, trong dải nhiệt độ rộng từ 10°C - 60°C. Phân tích thống kê cho thấy, các biến tỷ lệ lưu huỳnh, nhiệt độ và tần số đều ảnh hưởng có ý nghĩa thống kê đến |E*|. Kết quả thực nghiệm khẳng định |E*| của BTAS đều lớn hơn BTA ở nhiệt độ cao (40°C - 60°C) với |E*| của BTAS_40/60 tại 60°C và tần số thấp lớn gấp 1,7 lần so với BTA đối chứng, phản ánh sự gia tăng độ cứng đáng kể. Đường cong chủ |E*| đã được xây dựng bằng mô hình Williams-Landel-Ferry (WLF) và sau đó mô hình đàn nhớt 2S2P1D đã được ứng dụng để mô phỏng đường cong này. Mô hình 2S2P1D cho thấy sự phù hợp rất tốt với dữ liệu thực nghiệm, đạt hệ số xác định R2 luôn lớn hơn 0,98 và tỷ lệ sai số tiêu chuẩn Se/Sy luôn nhỏ hơn 0,15 cho tất cả các loại hỗn hợp. Các thông số mô hình 2S2P1D đã được xác định, cung cấp bộ dữ liệu tin cậy và chính xác để dự đoán |E*| của BTAS trong phạm vi nhiệt độ và tần số rộng, phục vụ trực tiếp cho các phân tích thiết kế theo phương pháp Cơ học - Thực nghiệm.

Từ khóa: Bê tông asphalt; bê tông asphalt - lưu huỳnh; cơ học thực nghiệm; mô-đun động.

ABSTRACT

This study aims to determine and model the viscoelastic characteristics of Sulfur Extended Asphalt (BTAS) - a potential material solution for reducing construction costs and enhancing rutting resistance - as input data for pavement structure design based on the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. Dynamic Modulus (|E*|) is the key parameter characterizing the viscoelastic properties of asphalt concrete, and the |E*| Master Curve is the aggregate curve describing this property across a wide range of frequencies and temperatures. In the scope of this research, the dynamic modulus of BTAS (with 30% and 40% sulphur ratio) and control Asphalt Concrete (BTA) was experimentally determined according to the AASHTO TP-62 standard, covering a temperature range from 10°C - 60°C. Statistical analysis indicated that the variables of sulphur ratio, temperature, and frequency all significantly affect |E*|. Experimental results confirm that the |E*| of BTAS is consistently greater than that of BTA at high temperatures (40°C - 60°C); specifically, the |E*| of BTAS_40/60 at 60°C and low frequency is 1.7 times higher than the control BTA, reflecting a substantial

increase in stiffness. The |E*| Master Curve was constructed using the Williams-Landel-Ferry (WLF) model and subsequently, the 2S2P1D viscoelastic model was applied to simulate this curve. The 2S2P1D model demonstrated an Excellent fit with the experimental data, achieving a coefficient of determination R2 always greater than 0.98 and a standard error ratio Se/Sy always less than 0.15 for all mixtures. The determined 2S2P1D model parameters provide a reliable and accurate dataset for predicting the |E*| of BTAS over a wide range of temperatures and frequencies, directly serving design analyses under the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide.
Keywords: Asphalt concrete; sulfur - asphalt concrete; mechanistic-empirical pavement design guide; dynamic modulus.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việc phát triển và ứng dụng vật liệu bền vững, hiệu quả kinh tế là yêu cầu then chốt đối với ngành xây dựng hạ tầng đường bộ Việt Nam. Bê tông asphalt (BTA) đóng vai trò chiến lược, chiếm tới 70% các tuyến quốc lộ tại Việt Nam. Tuy nhiên, chi phí xây dựng mặt đường hiện nay chịu ảnh hưởng lớn từ biến động giá bitum, do chất kết dính này chiếm tỷ trọng đáng kể, lên tới 70% giá thành hỗn hợp BTA [1]. Điều này đặt ra thách thức lớn về tính kinh tế trong quản lý và bảo trì đường bộ.

Trước bối cảnh đó, việc nghiên cứu và ứng dụng bê tông asphalt - lưu huỳnh (BTAS) nổi lên như một giải pháp tiềm năng. BTAS sử dụng lưu huỳnh - một phụ phẩm có sẵn và giá rẻ từ công nghiệp lọc hóa dầu để thay thế một phần bitum, từ đó giảm chi phí vật liệu tới 32% và tổng chi phí xây dựng khoảng 21% [2]. Về mặt cơ học, BTAS đã được chứng minh là cải thiện đáng kể các đặc tính quan trọng của hỗn hợp. Đặc biệt, BTAS cho thấy khả năng kháng lún vệt bánh xe vượt trội, có thể cao hơn 1,3 đến 3,7 lần so với BTA truyền thống [3-6], một đặc tính vô cùng quan trọng đối với các khu vực chịu tải trọng giao thông nặng và khí hậu nóng như Việt Nam.

Để đưa vật liệu BTAS vào các mô hình thiết kế đường bộ tiên tiến, đặc biệt là phương pháp Cơ học - Thực nghiệm (MEPDG), việc đánh giá định lượng các đặc trưng cơ học là bắt buộc. Trong MEPDG, mô-đun động |E*| là thông số đầu vào cơ bản và quan trọng nhất, mô tả chính xác tính chất đàn nhớt tuyến tính của vật liệu dưới tác dụng của tải trọng động và nhiệt độ [7]. Để đảm bảo tính toán chính xác |E*| cho mọi điều kiện thiết kế, cần phải mô hình hóa đường cong chủ |E*| đã được xây dựng bằng quy tắc tương quan Tần số - Nhiệt độ và mô hình Williams-Landel-Ferry (WLF). Nghiên cứu này tập trung vào việc mô hình hóa chính xác đặc tính đàn nhớt của BTAS bằng mô hình 2S2P1D. Để thực hiện mục tiêu này, tác giả tiến hành các bước nghiên cứu sau:

(1) Thực nghiệm xác định mô-đun động |E*| của BTAS và BTA đối chứng theo tiêu chuẩn AASHTO TP-62, trong phạm vi nhiệt độ (10°C - 60°C) và tần số (0,1Hz - 25 Hz);

(2) Xây dựng đường cong chủ |E*| và xác định các hệ số WLF;

(3) Ứng dụng mô hình 2S2P1D để mô phỏng đường cong chủ |E*| cho BTAS ở vùng nhiệt độ và tần số rộng, đánh giá mức độ phù hợp của mô hình và xác định các thông số đàn nhớt cần thiết làm cơ sở dữ liệu tin cậy cho thiết kế kết cấu áo đường theo phương pháp Cơ học - Thực nghiệm.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

2.1. Cơ sở lý thuyết

2.1.1. Mô-đun động

Mô-đun động của bê tông asphalt (|E*|) là một trong những thông số đầu vào rất quan trọng được sử dụng để thiết kế kết cấu mặt đường BTA theo phương pháp cơ học thực nghiệm của Mỹ [7].

Mô-đun phức động của BTA (E*) là tỉ số giữa độ lớn của ứng suất tác dụng hình sin tại thời điểm t bất kỳ và tần số góc của tải trọng tác dụng ω(rad/s), $\sigma=\sigma_o\sin(\omega t)$ và độ lớn của biến dạng hình sin do ứng suất đó gây ra tại cùng thời điểm và cùng tần số, $\varepsilon = \varepsilon_o\sin(\omega t-\phi)$. Do tính đàn nhớt của BTA mà biến dạng luôn trễ pha so với ứng suất một góc (ϕ). |E*| là biên độ của mô-đun phức động và là giá trị tuyệt đối của mô-đun phức động, mô tả các tính chất đàn hồi của vật liệu đàn nhớt tuyến tính phụ thuộc vào tải trọng tác dụng hình sin.

2.1.2. Đường cong chủ mô-đun động

Đường cong chủ mô-đun động (|E*|) là đường cong đặc trưng cho tính chất đàn nhớt của BTA trong một vùng rộng của tần số và nhiệt độ. Đường cong chủ |E*| của BTA được xây dựng từ quy tắc tương quan tần số - nhiệt độ [8].

Để xây dựng đường cong này, một nhiệt độ tham chiếu (T_{ref}) được chọn. Các đường cong |E*| tương ứng với nhiệt độ lớn hơn T_{ref} sẽ được dịch chuyển sang trái và các đường cong |E*| ở nhiệt độ thấp hơn T sẽ được dịch chuyển sang phải bằng các hệ số dịch chuyển (a_T) sao cho các đường cong hòa vào nhau, tạo ra một đường cong trơn liên tục [9, 10]. Đường cong chủ |E*| được sử dụng để dự đoán |E*| ở các tần số tải và nhiệt độ khác nhau [8, 9].

Hệ số dịch chuyển a_T là hàm số của nhiệt độ và được sử dụng để dịch chuyển các đường cong |E*| ở các nhiệt độ thử nghiệm khác nhau về một nhiệt độ tham chiếu (T_{ref}). Quan hệ giữa a_T và T được mô hình hóa theo công thức Williams, Landel và Ferry (WLF) [8, 11].

$$log_{(a_T)} = \frac{-C_1\,(T-T_{ref})}{C_2+T-T_{ref}} \quad (1)$$

Trong đó:

C_1 và C_2: Các hằng số vật liệu, đặc trưng cho sự thay đổi của tính chất nhớt của hỗn hợp với nhiệt độ;

T_{ref} : Nhiệt độ tham chiếu;

T: Nhiệt độ thí nghiệm.

2.1.3. Mô hình 2S2P1D

Mô hình 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolic elements, 1 Dashpot) là một mô hình tổng quát được sử dụng để mô phỏng đặc tính đàn nhớt tuyến tính của BTA trong miền biến dạng nhỏ với vùng nhiệt độ và tần số bất kỳ [12]. Mô hình này gồm 7 thông số đầu vào cần thiết ((E_{00}, E_0, δ, β, τ, k và h) để mô hình hóa đặc tính đàn nhớt tuyến tính của BTA.

Theo mô hình này, |E*| được tính toán bằng công thức (2).

$$E^*(\omega) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1+\delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (2)$$

Trong đó:

i: Đơn vị ảo với $i^2 = -1$;

ω: Vận tốc góc $\omega = 2\pi f$ (f tần số);

k, h: Hệ số 0 < k < h < 1;

δ: Hằng số;

E_0: Mô-đun động khi $\omega\beta \to \infty$ (tần số rất cao hoặc nhiệt độ rất thấp);

E_{00}: Mô-đun động khi $\omega\beta \to 0$ (tần số rất thấp hoặc nhiệt độ rất

cao), tương đương mô-đun tĩnh;

η: Hệ số nhớt $\eta = (E_0 - E_\infty)\beta\tau$.

Trong nghiên cứu để đánh giá mức độ phù hợp của mô hình 2S2P1D với số liệu đo |E*| của BTA, BTAS, phương pháp mức độ phù hợp [11, 13] được sử dụng để đánh giá. Trong phương pháp này, sai số tiêu chuẩn của ước lượng (S_e) và độ lệch chuẩn (S_y) được tính bằng các công thức sau:

$$S_e = \left[\frac{1}{(n-p-1)}\sum_1^n (log|\hat{E}^*|_i - log|E^*|_i)^2\right]^{0,5} \quad (3)$$

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_1^n (log|E^*|_i - \overline{log|E^*|})^2}{n-1}} \quad (4)$$

Trong đó:

n: Tổng số cặp tần số và nhiệt độ thí nghiệm;

p: Số lượng thông số của mô hình;

$log|E^*|_i$: Logarit cơ số 10 của |E*| thí nghiệm ở mỗi cặp tần số - nhiệt độ;

$log|\hat{E}^*|_i$: Logarit cơ số 10 của |E*| dự báo sau khi tối ưu ở mỗi cặp tần số - nhiệt độ;

$\overline{log|E^*|}$: Trung bình của logarit cơ số 10 của |E*| thí nghiệm.

Hệ số R^2 được xác định theo công thức sau:

$$R^2 = 1 - \frac{(n-p-1)S_e^2}{(n-1)S_y^2} \quad (5)$$

Mô hình 2S2P1D được đánh giá là phù hợp với số liệu đo khi các hệ số xác định đều thỏa mãn $R^2 > 0,90$ và $S_e/S_y < 0,35$ [12,13].

2.2. Phương pháp thí nghiệm

Nghiên cứu sử dụng ba loại hỗn hợp BTA để tiến hành thí nghiệm mô-đun động:

(1) BTA đối chứng: Là hỗn hợp bê tông asphalt thông thường.

(2) BTAS_30/70: Hỗn hợp Bê tông asphalt - lưu huỳnh (BTAS) với tỷ lệ lưu huỳnh thay thế bitum là 30% (theo khối lượng lượng hỗn hợp chất kết dính bitum - lưu huỳnh).

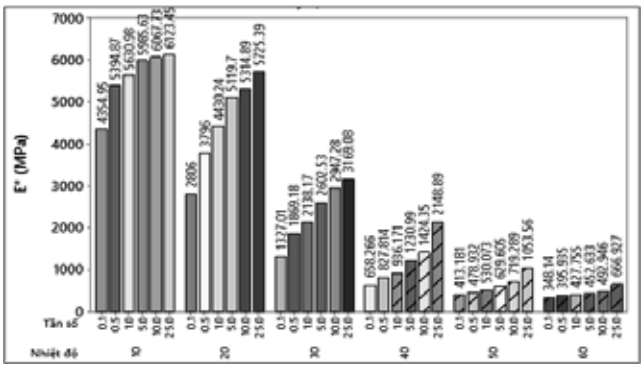
(3) BTAS_40/60: Hỗn hợp BTAS với tỷ lệ lưu huỳnh thay thế bitum 40% (theo khối lượng lượng hỗn hợp chất kết dính bitum - lưu huỳnh).

Các hỗn hợp BTA, BTAS đã được nghiên cứu thiết kế thành phần được trình bày trong nghiên cứu [5] của tác giả và cộng sự. Thí nghiệm mô-đun động được thực hiện trên thiết bị thí nghiệm Cooper tại Phòng thí nghiệm vật liệu xây dựng - Trường Đại học Giao thông vận tải theo hướng dẫn của Tiêu chuẩn AASHTO TP-62 (Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures). Các mẫu thí nghiệm được chế bị bằng thiết bị đầm xoay Superpave (SGC). Kích thước mẫu thí nghiệm được chuẩn hóa là hình trụ có đường kính 100 mm và chiều cao 100 mm. Mỗi loại BTA và BTAS tiến hành đúc 1 tổ mẫu gồm 3 mẫu. Sau khi đúc mẫu được bảo quản 14 ngày ở nhiệt độ phòng trước khi thí nghiệm. Nhiệt độ thí nghiệm gồm 6 nhiệt độ là 10°C, 20°C, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C; tần số thí nghiệm gồm 6 tần số là 25Hz, 10Hz, 5Hz, 1Hz, 0,5Hz, 0,1Hz. Tổng số kết quả thí nghiệm thu được là 324 kết quả, dựa trên 3 lần lặp thí nghiệm cho mỗi tổ hợp vật liệu, nhiệt độ và tần số.

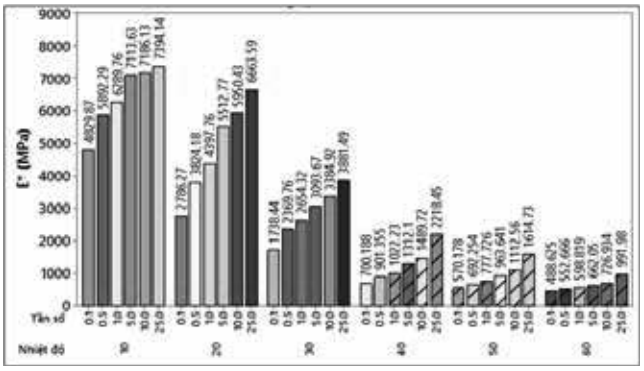
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả thí nghiệm mô-đun động

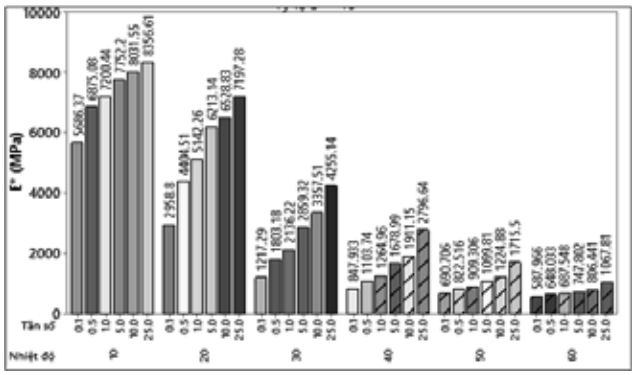
Nghiên cứu sử dụng phần mềm Minitab19 để thực hiện thiết kế thí nghiệm tổng quát nhằm phân tích phương sai ANOVA và đánh giá mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào đến mô-đun động (|E*|). Kết quả phân tích phương sai ANOVA cho thấy các biến tỷ lệ lưu huỳnh, nhiệt độ, tần số và tích tương tác của chúng đều có ảnh hưởng đến |E*| có ý nghĩa thống kê, các biến đều có hệ số p-value << 0,05; hệ số xác định điều chỉnh R^2_{dc}=99,25%.



a)



b)



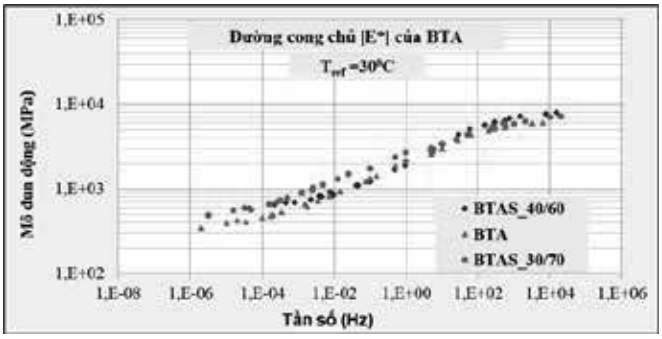
c)

Hình 1. Biểu đồ mô-đun động của a) - BTA; b) - BTAS_30/70; c) - BTAS_40/60

Hình 1 là kết quả mô-đun động của mẫu BTAS và BTA đối chứng. Từ kết quả thí nghiệm cho thấy ở cùng một nhiệt độ, khi tần số tăng lên thì |E*| cũng tăng còn nếu ở cùng một tần số, khi nhiệt độ tăng lên thì |E*| giảm đi rất nhanh. Ở khoảng nhiệt độ cao (40°C - 60°C), |E*| của mẫu BTAS đều lớn hơn BTA. Ở nhiệt độ cao 60°C và tần số thấp, |E*| của BTAS_30/70, BTAS_40/60 lớn gấp 1,4 và 1,7 lần |E*| của BTA. Ở khoảng nhiệt độ trung gian (30°C) và thấp, |E*| của BTAS tương đương hoặc tăng 1,1 - 1,3 lần so với BTA tùy theo nhiệt độ và tần số. Kết quả này cho thấy khi thay thế một phần bitum bằng lưu huỳnh trong hỗn hợp BTAS, hàm lượng bitum trong hỗn hợp giảm đi đồng thời sau thời gian 14 ngày tuổi lưu huỳnh kết tinh trong BTAS [14] làm tăng độ cứng (tăng mô-đun động) của BTAS.

3.2. Kết quả xây dựng đường cong chủ và mô hình WLF

Từ kết quả thí nghiệm |E*| của BTAS và BTA tiến hành xây dựng đường cong chủ |E*|. Kết quả xây dựng đường cong chủ |E*| của BTA và BTAS ở nhiệt độ tham chiếu 30°C được thể hiện trên Hình 2.



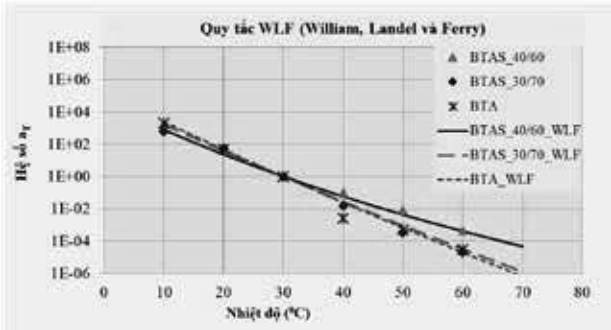
Hình 2. Đường cong chủ |E*| của BTA, BTAS_30/70, BTAS_40/60 ở nhiệt độ tham chiếu 30°C.

Biểu đồ Hình 2 cho thấy ở nhiệt độ tham chiếu đường cong chủ |E*| của BTAS nằm phía trên so với BTA đối chứng trong phạm vi nhiệt độ và tần số thử nghiệm. Từ biểu đồ Hình 2 ta thấy phía bên trái biểu đồ có sự tách biệt rõ ràng giữa các đường cong chủ |E*| của BTAS và đường của hỗn hợp BTA, điều này cho thấy ở nhiệt độ cao (tần số thấp) có sự khác biệt đáng kể mô-đun động giữa BTAS và BTA. Điều này phản ánh sự gia tăng đáng kể về độ cứng và khả năng chịu tải của hỗn hợp khi có sự tham gia của lưu huỳnh. Về mặt vật lý, hiện tượng này có thể giải thích do sự hình thành mạng lưới tinh thể lưu huỳnh trong pha nền bitum sau quá trình bảo quản, giúp tăng cường cấu trúc khung của hỗn hợp và cải thiện khả năng kháng biến dạng dẻo ở điều kiện nhiệt độ bất lợi [5]. Ngược lại, phía bên phải biểu đồ các đường cong chủ |E*| của hai loại BTAS và BTA nằm sát nhau điều này cho thấy ở nhiệt độ thấp (tần số cao) sự khác nhau giữa |E*| của BTAS và BTA không đáng kể [12]. Kết quả này mang ý nghĩa kỹ thuật quan trọng, cho thấy việc thay thế một phần bitum bằng lưu huỳnh dù giúp tăng độ cứng ở nhiệt độ cao nhưng không làm hỗn hợp trở nên quá giòn ở nhiệt độ thấp. Điều này đảm bảo rằng BTAS vẫn giữ được tính dẻo cần thiết để hạn chế nứt vỡ khi chịu tải trọng động trong điều kiện thời tiết lạnh. Sự phù hợp của quy luật này với các nghiên cứu quốc tế khẳng định rằng lưu huỳnh chủ yếu cải thiện độ cứng ở vùng nhiệt độ cao mà không gây giòn hóa quá mức ở nhiệt độ thấp [14, 16].

Kết quả xác định hệ số C_1, C_2 theo quy tắc WLF của BTA và BTAS thể hiện ở Bảng 1 và Hình 3.

Bảng 1. Kết quả xác định các hệ số của quy tắc WLF

Loại BTN	C_1	C_2
BTA	98,99	623,7
BTAS_30/70	103,95	633,2
BTAS_40/60	25,93	199,77



Hình 3. Biểu đồ quan hệ giữa a_T thực và a_T theo quy tắc WLF với nhiệt độ

Hình 3 là biểu đồ quan hệ giữa a_T thực và a_T theo quy tắc WLF với nhiệt độ cho thấy sự phù hợp tốt giữa mô hình và dữ liệu thực nghiệm. Điều này xác nhận quy tắc WLF phù hợp để mô tả quan hệ giữa hệ số dịch chuyển và nhiệt độ cho cả BTA và BTAS.

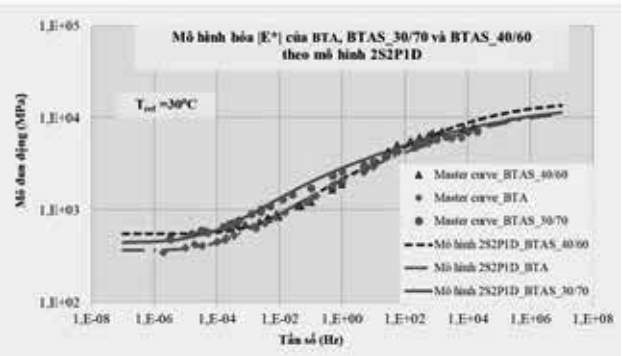
3.3. Kết quả mô hình hóa bằng 2S2P1D

Các thông số của mô hình 2S2P1D được xác định cho cả BTA và BTAS được trình bày trong Bảng 2 trong đó hai thông số E_{00} và E_0 của mô hình tham khảo tài liệu [11, 12].

Bảng 2. Các thông số của mô hình 2S2P1D mô phỏng đường cong chủ |E*|

Loại BTN	E_{00} (MPa)	E0 (MPa)	k	h	δ	τ (s)	β
BTA	370	20 000	0,18	0,45	6,3	4,00E-02	1000
BTAS_30/70	450	21 000	0,16	0,50	6,9	2,50E-01	2000
BTAS_40/60	550	22 000	0,24	0,66	10,5	1,50E-01	1000

Kết quả trong Bảng 2 cho thấy thấy các giá trị k, h, δ, τ, β đều nằm trong khoảng giá trị tham khảo trong tài liệu [11, 12]. Kết quả mô hình hóa |E*| của BTAS và BTA được thể hiện ở Hình 4.



Hình 4. Mô hình hóa đường cong chủ |E*| của BTAS và BTA.

Kết quả đánh giá mức độ phù hợp của mô hình 2S2P1D với số liệu đo |E*| dự trên hệ số xác định R^2 và S_e/S_y thể hiện ở Bảng 3.

Bảng 3. Đánh giá mức độ phù hợp của mô hình 2S2P1D với số liệu đo |E*|

Loại BTA	R^2	S_e/S_y	Đánh giá
BTA	0,9963	0,07	Rất tốt
BTAS_30/70	0,9827	0,150	Rất tốt
BTAS_40/60	0,9870	0,130	Rất tốt

Kết quả trong Bảng 3 cho thấy hệ số xác định R^2 luôn lớn hơn 0,98 và tỷ lệ sai số tiêu chuẩn Se/Sy luôn nhỏ hơn 0,15 cho tất cả các loại hỗn hợp điều đó khẳng định mô hình 2S2P1D phù hợp để mô phỏng đường cong chủ |E*| của cả BTAS_30/70, BTAS_40/60 và BTA.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã xác định và mô hình hóa thành công đặc tính đàn nhớt của BTAS bằng mô hình 2S2P1D. Kết quả nghiên cứu cho

thấy ở nhiệt độ cao, mô-đun động |E*| của BTAS cao hơn BTA. Việc gia tăng mô-đun động |E*| lên tới 1,7 lần ở nhiệt độ cao (60°C) là bằng chứng kỹ thuật quan trọng cho thấy BTAS có khả năng chống lún vệt bánh xe vượt trội so với BTA truyền thống, đặc biệt phù hợp với các vùng khí hậu nóng.

Phân tích đường cong chủ cho thấy sự hiện diện của lưu huỳnh giúp tăng độ cứng ở vùng nhiệt độ cao mà không làm vật liệu trở nên quá giòn ở vùng nhiệt độ thấp. Điều này cho phép BTAS duy trì sự cân bằng giữa khả năng kháng lún và kháng nứt.

Quy tắc WLF và mô hình 2S2P1D đã được áp dụng thành công để mô hình hóa đường cong chủ |E*| của cả BTAS và BTA. Các thông số mô hình 2S2P1D được xác định với độ chính xác cao (R^2 > 0,98), cung cấp dữ liệu đầu vào tin cậy cho các phân tích thiết kế kết cấu áo đường theo phương pháp cơ học thực nghiệm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] A. Copeland. Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: State of the practice, United States. Federal Highway Administration, 2011. Internet: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/40918 (Aaccessed: August 11, 2025).

[2] A. M. O. Mohamed & M. M. El Gamal. Sulfur concrete for the construction industry, 2010. Internet: https://books.google.ba/books?id=OYecyRmnTEkC&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false (Accessed: December 16, 2025).

[3] J. Colange, D. Strickland, G. McCabe, K. Gilbert, R. May, S. Banbury. Asphalt Mixtures Modified with Sulphur Pellets, Impact on Pavement Thickness, Road Materials and Pavement Design, 459-4850, November 2010, doi: 10.1080/14680629.2010.9690342.

[4] A. Gedik. Laboratory Study to Assess Impact of Sulphur-Added Binder on Flexible Pavements: Case of Binder Course. J. Mater. Civ. Eng. 31, 2019, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002688.

[5] T.N. Thu, H.T. Ngoc, K.P. Huy, C.B. Xuan, K.B. Ngoc. Research on the effects of sulfur on characteristics of sulfur bituminous binder (SBB) and hot mix asphalt-sulfur (HMAS). Tạp chí Khoa học Giao thông vận tải, no. 72, pp. 33-45, 2021, doi: https://doi.org/10.47869/tcsj.72.1.5.

[6] J.C. Nicholls. Review of Shell Thiopave sulphur-extended asphalt modifier. TRL Report TRL672, 2009. Internet: https://trid.trb.org/View/1148835 (accessed: August 11, 2025).

[7] FHWA. Mechanistic Empirical Pavement Design Guide, 2016. Internet: https://www.fhwa.dot.gov/pavement/materials/hmec/pubs/module_e/participant_workbook.pdf (Accessed: December 16, 2025).

[8] Q.T. Nguyen, H. Di Benedetto, C. Sauzéat. Prediction of Linear Viscoelastic Behaviour of Asphalt Mixes from Binder Properties and Reversal, in: N. Kringos, B. Birgisson, D. Frost, L. Wang (Eds.), Multi-Scale Modeling and Characterization of Infrastructure Materials, Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 237-248, 2013, doi: 10.1007/978-94-007-6878-9_17.

[9] C.E. Dougan, J.E. Stephens, J. Mahoney, G. Hansen. E*-dynamic modulus test protocol: problems and solutions. University of Connecticut. Connecticut Transportation Institute, 2003. Internet: https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/38612 (Accessed: December 16, 2025).

[10] T. Xiaoge, H. Bin. Dynamic Modulus of Asphalt Treated Mixtures, Road Pavement Material Characterization and Rehabilitation. American Society of Civil Engineers, Changsha, Hunan, China, pp. 16-21, 2009, doi: https://doi.org/10.1061/41043(350)3.

[11] N.M. Rais, M.Y.A. Wahab, I.R. Endut, A.A. Latif. Dynamic modulus master curve construction using the modified MEPDG model, 2013 1st International Conference on Artificial Intelligence. Modelling and Simulation, IEEE, pp. 212-216, 2013. Internet: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6959918/ (Accessed: December 16, 2025).

[12] F. Olard, H. Di Benedetto. General "2S2P1D" Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes. Road Materials and Pavement Design 4, pp. 185-224, 2003, doi: https://doi.org/10.1080/14680629.2003.9689946.

[13] T. AASHTO. Determining dynamic modulus of hot-mix asphalt concrete mixtures. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2004. Internet: https://matest.ru/uploads/standards/AASHTO_T342-11.pdf (accessed: December 16, 2025).

[14] N.T. Trang, T.N. Hung, P.H. Khang, B.X. Cay. Study the effect of sulfur crytallization by the time in asphalt concrete structure on marshall indicators, 2020. Internet: https://www.academia.edu/download/103635242/470.pdf (Accessed: December 17, 2025).

[15] D. Strickland, J. Colange, P. Shaw, N. Pugh. Study of the low-temperature properties of sulphur extended asphalt mixtures. Proceedings of the Fifty-Third Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA) Canadian Technical Asphalt Association, 2008. Internet: https://trid.trb.org/View/878262 (Accessed: December 19, 2025).

■Ngày nhận bài: 25/02/2026 ■Ngày sửa bài: 04/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 11/3/2026

Nghiên cứu xây dựng bộ điều khiển Hybrid Fuzzy-PID cho hệ thống xử lý dầu cặn trên tàu thủy

Research and development of a Hybrid Fuzzy-PID controller for shipboard sludge oil treatment systems

> THS HỨA XUÂN LONG*, THS ĐẶNG ĐÌNH PHÚC, THS NGUYỄN DUY QUANG
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email: huaxuanlong@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Trong bối cảnh quy định MARPOL 73/78 ngày càng thắt chặt, việc kiểm soát nhiệt độ gia nhiệt dầu cặn trên tàu biển là yêu cầu then chốt để đảm bảo hiệu suất lò đốt và an toàn vận hành. Tuy nhiên, do đặc tính quán tính nhiệt lớn và các nhiễu tải bất định, bộ điều khiển PID truyền thống thường gây ra độ vọt lố cao và thời gian xác lập kéo dài. Bài báo đề xuất bộ điều khiển lai ghép Hybrid Fuzzy-PID, kết hợp khả năng suy luận thích nghi của logic mờ (Mamdani) trong giai đoạn quá độ với khâu tích phân song song để đảm bảo độ chính xác ở trạng thái xác lập. Kết quả mô phỏng trên MATLAB/Simulink cho thấy, so với PID truyền thống, giải thuật đề xuất giúp triệt tiêu hoàn toàn độ vọt lố (0%) và duy trì nhiệt độ ổn định (60°C ± 1°C) ngay cả khi chịu tác động của nhiễu đo lường hoặc thay đổi lưu lượng dòng chảy. Mặc dù thời gian phục hồi nhiễu chậm hơn, giải pháp này đảm bảo an toàn tuyệt đối cho thiết bị, tạo tiền đề cho việc phát triển các hệ thống tự động hóa tàu thủy nội địa hóa.

Từ khóa: Hybrid Fuzzy-PID; gia nhiệt dầu cặn; lò đốt rác; điều khiển nhiệt độ; vọt lố; kháng nhiễu.

ABSTRACT

In the context of increasingly stringent regulations under MARPOL 73/78, controlling the heating temperature of sludge oil on board ships has become a critical requirement to ensure incinerator efficiency and operational safety. However, due to the large thermal inertia and uncertain load disturbances inherent in the system, conventional PID controllers often result in significant overshoot and prolonged settling time. This paper proposes a Hybrid Fuzzy–PID controller that combines the adaptive inference capability of Mamdani-type Fuzzy Logic during the transient phase with a parallel integral action to guarantee steady-state accuracy. Simulation results obtained using MATLAB/Simulink demonstrate that, compared with a conventional PID controller, the proposed algorithm completely eliminates overshoot (0%) and maintains a stable temperature of 60°C ± 1°C even under measurement noise or variations in flow rate. Although the disturbance recovery time is slightly longer, the proposed approach ensures absolute equipment safety and provides a foundation for the development of domestically engineered shipboard automation systems.

Keywords: Hybrid Fuzzy-PID; sludge oil heating; marine incinerator; temperature control; overshoot; disturbance rejection.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

1.1. Bối cảnh nghiên cứu

Giao thông vận tải biển hiện đảm nhận hơn 80% khối lượng thương mại toàn cầu. Đi kèm với sự phát triển này là lượng lớn chất thải phát sinh từ quá trình vận hành tàu, đặc biệt là dầu cặn từ quá trình lọc nhiên liệu nặng và dầu bôi trơn. Theo Phụ lục I và VI của Công ước MARPOL 73/78, lượng dầu cặn này không được phép xả thải trực tiếp ra biển mà phải được xử lý bằng phương pháp đốt để giảm thể tích và loại bỏ những chất có hại cho môi trường [1].

Hệ thống lò đốt chất thải trên tàu yêu cầu quy trình kiểm soát nhiệt nghiêm ngặt. Trước khi được đưa vào buồng đốt, dầu cặn bắt buộc phải được gia nhiệt trong két phục vụ từ nhiệt độ môi trường lên nhiệt độ làm việc tối thiểu là 60°C để đảm bảo độ linh động cho bơm định lượng và khả năng phun sương tại vòi phun [2]. Nếu nhiệt độ quá thấp (dưới 60°C), độ nhớt cao sẽ gây quá tải cho bơm và tắc nghẽn vòi phun. Ngược lại, nếu nhiệt độ tăng quá cao (vượt quá 95°C - 100°C), hiện tượng sôi cục bộ của nước lẫn trong dầu (thường chiếm 20 - 50% thể tích dầu cặn) sẽ gây ra hiện tượng sủi bọt khí,

làm gián đoạn dòng chảy nhiên liệu và gây tắt lò đột ngột. Do đó, bài toán điều khiển nhiệt độ két dầu cặn không chỉ là vấn đề ổn định tham số mà còn liên quan trực tiếp đến an toàn và tính vận hành liên tục của hệ thống.

1.2. Đặc tính đối tượng và hạn chế của phương pháp truyền thống

Hệ thống gia nhiệt dầu cặn trên tàu biển là một đối tượng điều khiển nhiệt điển hình với các đặc tính phức tạp: Thứ nhất, hệ thống có quán tính nhiệt lớn. Với dung tích két dầu thải thường khoảng 1,0 m^3 (tương đương 1.000 lít), việc thay đổi nhiệt độ của khối chất lỏng này đòi hỏi thời gian dài, tạo ra độ trễ đáng kể giữa tín hiệu điều khiển và đáp ứng đầu ra. Thứ hai, đối tượng mang tính phi tuyến và bất định cao. Thành phần dầu cặn thay đổi liên tục tùy thuộc vào nguồn thải (dầu máy chính, dầu máy đèn, nước la canh), dẫn đến nhiệt dung riêng (C_p) và hệ số truyền nhiệt biến thiên không cố định.

Hiện nay, đa số các hệ thống điều khiển trên tàu sử dụng bộ điều khiển PID truyền thống hoặc điều khiển ON/OFF đơn giản. Mặc dù PID có ưu điểm về cấu trúc đơn giản, việc xác định bộ tham số cố định (K_p, K_i, K_d) theo các phương pháp cổ điển như Ziegler-Nichols [3] thường dẫn đến sự đánh đổi giữa độ ổn định và tốc độ đáp ứng [4].

- Nếu thiết lập hệ số khuếch đại lớn để tăng tốc độ gia nhiệt, hệ thống dễ bị vọt lố cao. Đối với hệ thống sấy dầu, vọt lố nhiệt độ là điều tối kỵ vì có thể gây kích hoạt báo động nhiệt độ cao (100°C) hoặc làm biến tính dầu.

- Nếu thiết lập hệ số nhỏ để đảm bảo an toàn, hệ thống sẽ đáp ứng quá chậm, không kịp bù lại nhiệt lượng khi có dòng dầu lạnh mới được bơm vào két.

1.3. Đề xuất giải pháp Hybrid Fuzzy-PID

Để khắc phục các nhược điểm trên, xu hướng hiện đại là ứng dụng các giải thuật điều khiển thông minh. Trong đó, Logic Mờ (Fuzzy Logic) nổi lên như một giải pháp ưu việt cho các đối tượng phi tuyến và khó mô hình hóa chính xác. Logic mờ mô phỏng quá trình ra quyết định của con người dựa trên các luật ngôn ngữ thay vì các phương trình toán học cứng nhắc [5], cho phép xử lý tốt các bất định của hệ thống.

Tuy nhiên, bộ điều khiển Mờ thuần túy có thể gặp khó khăn trong việc triệt tiêu sai số tĩnh ở trạng thái xác lập. Do đó, nghiên cứu này đề xuất cấu trúc Hybrid Fuzzy-PID (lai ghép mờ - PID) [6]. Cấu trúc này tận dụng ưu điểm của cả hai phương pháp:

1. Sử dụng cơ chế suy luận Mờ để tự động chỉnh định các tham số PID trực tuyến dựa trên sai lệch (e) và tốc độ thay đổi sai lệch (de/dt).

2. Đảm bảo đáp ứng nhanh trong giai đoạn quá độ để giảm thời gian gia nhiệt.

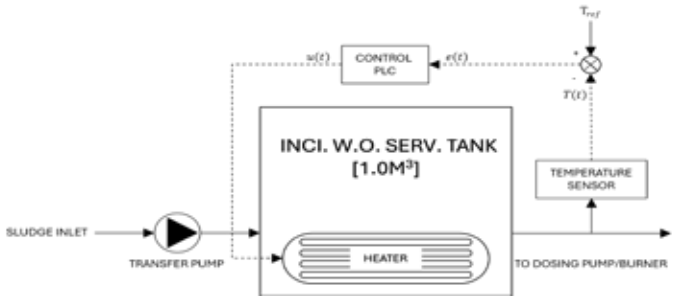
3. Triệt tiêu độ vọt lố và sai số xác lập khi nhiệt độ tiệm cận giá trị đặt (60°C - 90°C), đồng thời tăng cường khả năng kháng nhiễu trước các tác động ngoại cảnh như rung động tàu hay thay đổi tải đột ngột.

Bài báo sẽ trình bày chi tiết quy trình mô hình hóa toán học hệ thống két sấy dầu cặn, thiết kế bộ điều khiển Hybrid Fuzzy-PID và kiểm chứng hiệu quả thông qua mô phỏng so sánh với bộ điều khiển PID truyền thống trên nền tảng MATLAB/Simulink.

2. MÔ HÌNH HÓA TOÁN HỌC HỆ THỐNG

2.1. Mô tả hệ thống thực

Đối tượng nghiên cứu là hệ thống gia nhiệt cho két phục vụ dầu cặn thuộc tổ hợp lò đốt rác thải trên tàu. Cấu trúc vật lý của hệ thống bao gồm các thành phần chính sau:



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc hệ thống điều khiển nhiệt độ két trực nhật dầu thải

- Két chứa (Tank): Có dung tích thiết kế V=1,0 m^3 [7]. Đây là khâu quán tính nhiệt chính của hệ thống.

- Thiết bị chấp hành (Actuator): Bao gồm thanh gia nhiệt điện trở hoặc van điều khiển hơi. Tín hiệu điều khiển u(t) sẽ tác động độ mở van hoặc công suất điện trở để thay đổi nhiệt lượng cung cấp Q_{in}.

- Cảm biến (Temperature Sensor): Cảm biến nhiệt độ Pt-100 hoặc can nhiệt loại K được lắp đặt tại két để đo nhiệt độ dầu thực tế T_{out}.

2.2. Xây dựng hàm truyền đạt

Dựa trên cấu trúc vật lý và quá trình nhận dạng thực nghiệm trên mô hình MATLAB/Simulink (Hình 1), hệ thống điều khiển nhiệt độ là một hệ kín gồm các khâu động học mắc nối tiếp [8]. Các tham số mô hình hóa được xác định cụ thể như sau:

- Thiết bị chấp hành (Actuator - Control Valve): Van điều khiển lưu lượng hơi được mô hình hóa là khâu quán tính bậc nhất. Dựa trên đặc tính đáp ứng của cơ cấu chấp hành khí nén/điện, hàm truyền của van có hệ số khuếch đại k_v = 0,13 và hằng số thời gian Tv = 2s:

$$G_v(s) = \frac{0,13}{2s+1} \quad (1)$$

- Đối tượng điều khiển (Process - Service Tank): Đây là thành phần quan trọng nhất quyết định động học của hệ thống. Với dung tích 1.000 lít dầu, hệ thống có đặc tính quán tính nhiệt rất lớn. Dựa trên dữ liệu mô phỏng, hàm truyền đạt của quá trình nhiệt trong két được xác định là khâu quán tính bậc nhất [9] với hệ số khuếch đại tĩnh lớn (K_p = 50) và hằng số thời gian nhiệt lên tới 600 giây (T_p = 600_s). Quá trình gia nhiệt két dầu được mô hình hóa bằng hàm truyền quán tính bậc nhất có trễ (FOPDT). Trong đó, thành phần trễ vận chuyển e^{-Ts} được tách thành khối Transport Delay riêng biệt trong Simulink để mô phỏng chính xác đường ống dẫn hơi. Hàm truyền định danh:

$$G_p(s) = \frac{50}{600s+1} \quad (2)$$

Giá trị (10 phút) phản ánh đúng thực tế vật lý về sự thay đổi nhiệt độ chậm chạp của khối lượng dầu lớn, đây là nguyên nhân chính gây ra hiện tượng vọt lố nếu bộ điều khiển không ngắt nhiệt sớm.

- Cảm biến và thiết bị đo (Sensor & Transmitter): Bao gồm độ trễ của đầu dò nhiệt Pt-100 và bộ chuyển đổi tín hiệu, được mô hình hóa bởi hàm truyền:

$$H(s) = \frac{0.16}{3s+1} \quad (3)$$

2.3. Mô hình hóa nhiễu

Trong quá trình vận hành, hệ thống chịu tác động của nhiễu tải (ví dụ: bơm cấp bổ sung dầu lạnh từ két lắng vào két phục vụ). Nhiễu này được mô phỏng dưới dạng tín hiệu bước (Step disturbance) tác động vào đầu ra của quá trình nhiệt thông qua hàm truyền nhiễu:

$$G_d(s) = \frac{1}{200s + 1} \quad (4)$$

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN

Để giải quyết bài toán phi tuyến tính và trễ vận chuyển lớn trong hệ thống gia nhiệt dầu HFO, nghiên cứu này đề xuất kiến trúc điều khiển lai ghép Hybrid Fuzzy-PID. Kiến trúc này tận dụng khả năng suy luận xấp xỉ của logic mờ (Fuzzy Logic) để xử lý đáp ứng quá độ, kết hợp với khâu tích phân (Integral) song song để đảm bảo độ chính xác ở trạng thái xác lập.

3.1. Cấu trúc bộ điều khiển

Hệ thống điều khiển được xây dựng dựa trên cấu trúc song song, trong đó tín hiệu điều khiển tổng hợp u(t) được xác định bởi luật điều khiển:

$$u(t) = u_{fuzzy}(e, \Delta e) + K_i \int e(t)dt \quad (5)$$

Tín hiệu điều khiển tổng hợp u(t) là tổng của tín hiệu ra từ bộ FLC (u_{fuzzy}) và tín hiệu từ khâu tích phân (u_I). Trong đó:

- Vai trò của FLC: Đóng vai trò như một bộ điều khiển PD phi tuyến (Fuzzy-PD), chịu trách nhiệm xử lý đáp ứng quá độ, giúp hệ thống tăng tốc nhanh và hãm phanh kịp thời để triệt tiêu vọt lố khi nhiệt độ tiến gần điểm đặt.

- Vai trò của khâu Tích phân (K_I): Bộ điều khiển mờ PD thuần túy thường để lại sai số xác lập. Khâu tích phân mắc song song sẽ tích lũy sai số theo thời gian để đẩy tín hiệu điều khiển, đảm bảo nhiệt độ dầu đạt chính xác giá trị đặt 60°C (triệt tiêu sai số tĩnh).

3.2. Thiết kế bộ điều khiển logic mờ tối giản

Bộ điều khiển mờ được thiết kế theo mô hình Mamdani [10], bao gồm ba giai đoạn xử lý tín hiệu: Mờ hóa, Suy luận và Giải mờ.

- Mờ hóa và Chuẩn hóa miền biến thiên: Các biến ngõ vào gồm sai lệch nhiệt độ e(t) và đạo hàm sai lệch de(t)/dt được chuẩn hóa về miền [−1,1] thông qua các hệ số tỉ lệ được xác định từ thực nghiệm mô phỏng trên SIMULINK:

+ Hệ số tỉ lệ lỗi: K_e = 0,03

+ Hệ số tỉ lệ đạo hàm: K_{de} = 1,0

+ Hệ số khuếch đại ngõ ra: K_u = 290

- Giá trị K_u = 290 được chọn lớn nhằm cung cấp năng lượng điều khiển đủ mạnh để thắng được quán tính nhiệt lớn (T = 600s) của két dầu 1n³ ngay khi có tín hiệu sai lệch nhỏ.

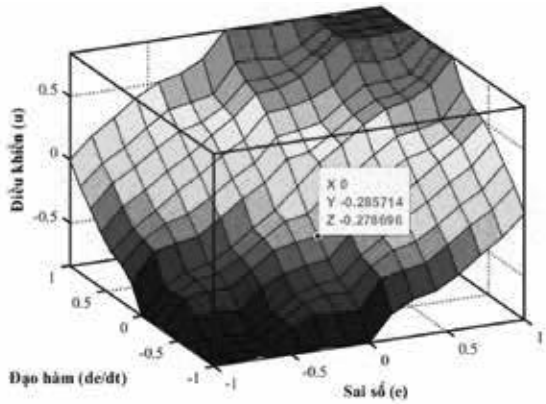
Để đảm bảo tính khả thi khi triển khai trên các bộ điều khiển công nghiệp có tài nguyên hạn chế, nghiên cứu này áp dụng cấu trúc điều khiển mờ tối giản. Thay vì sử dụng bảng luật phức tạp (49 hoặc 81 quy tắc), bộ điều khiển được thiết kế tập trung vào 5 biến ngôn ngữ chính: Âm lớn (NB - Negative Big), Âm nhỏ (NS - Negative Small), Không (ZE - Zero), Dương nhỏ (PS - Positive Small) và Dương lớn (PB - Positive Big), từ đó tạo ra 25 quy tắc điều khiển cốt lõi như Bảng 1. Cách tiếp cận này giúp giảm khối lượng tính toán mà vẫn đảm bảo độ bám sát nhiệt độ yêu cầu.

Bảng 1. Ma trận luật mờ

Δe \ $e(t)$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZE
NS	NB	NB	NS	ZE	PS
ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
PS	NS	ZE	PS	PB	PB
PB	ZE	PS	PB	PB	PB

Các quy tắc trên đường chéo đóng vai trò như một bộ điều khiển. Tỉ lệ phi tuyến mạnh mẽ, giúp hệ thống bám sai lệch nhanh nhất nhưng tự động giảm gain khi e(t) giảm dần để hãm đà tăng nhiệt.

Dựa trên cơ sở các hàm thuộc tính và bảng luật mờ đã thiết lập, mối quan hệ tổng quát giữa các biến đầu vào (sai số e(t) Tốc độ biến thiên sai số de(t)/dt)) và tín hiệu điều khiển đầu ra (u), được trực quan hóa thông qua bề mặt điều khiển không gian 3 chiều như thể hiện tại Hình 2.



Hình 2. Mặt cắt bề mặt điều khiển của bộ điều khiển lai ghép

3.3. Thiết kế khâu Tích phân song song

Mặc dù bộ điều khiển Logic Mờ (FLC) hoạt động hiệu quả như một khâu PD phi tuyến trong giai đoạn quá độ, nhưng bản chất xấp xỉ của tập mờ thường dẫn đến sai số tĩnh khác không quanh điểm làm việc. Để khắc phục nhược điểm này mà không làm mất đi tính ổn định, một khâu tích phân độc lập được thiết kế mắc song song với bộ FLC.

Tín hiệu điều khiển từ nhánh tích phân $u_I(t)$ được xác định bởi:

$$u_I(t) = K_{i_{fuzzy}} \int_0^t e(\tau)d\tau \quad (6)$$

Trong đó, việc lựa chọn hệ số tích phân K_{ifuzzy} là một thách thức lớn đối với đối tượng có hằng số thời gian rất lớn (T ≈600s).

- Nếu K_i lớn: Năng lượng tích lũy trong bộ tích phân sẽ tăng quá nhanh trong thời gian khởi động (khi sai lệch e lớn và kéo dài), dẫn đến hiện tượng bão hòa tích phân, gây ra vọt lố nghiêm trọng.

- Giải pháp đề xuất: Dựa trên thực nghiệm mô phỏng, hệ số này được chọn ở mức rất nhỏ: K_{ifuzzy} = 0,008. Giá trị này đảm bảo rằng thành phần tích phân chỉ tác động đáng kể khi hệ thống đi vào trạng thái xác lập, triệt tiêu sai số dư một cách từ từ mà không gây ra dao động cộng hưởng với quán tính nhiệt của két dầu.

3.4. Thiết lập tham số bộ điều khiển PID đối chứng

Để làm cơ sở đánh giá hiệu năng của giải thuật đề xuất, một bộ điều khiển PID truyền thống được thiết kế dựa trên cấu trúc chuẩn:

$$u_{PID}(t) = K_p\left(e(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(\tau)d\tau + T_d\frac{de(t)}{dt}\right) \quad (7)$$

Các tham số được tinh chỉnh dựa trên phương pháp Ziegler-Nichols chu kỳ giới hạn và được tối ưu hóa tinh chỉnh trên mô hình Simulink để đạt tốc độ đáp ứng nhanh nhất có thể [11]:

- Hệ số Tỉ lệ (K_p = 12): Được chọn lớn để tăng tốc độ gia nhiệt ban đầu. Tuy nhiên, với hệ số khuếch đại của đối tượng là K_{plan} = 50 và van K_{valve} = 0,13, tích số vòng hở lớn này làm hệ thống rất nhạy cảm, dễ mất ổn định.

- Hệ số Tích phân (K_i = 0,08): Tương đương T_i =Kp/K_i = 150s. Khâu này giúp loại bỏ sai số tĩnh nhưng lại là nguyên nhân chính gây ra vọt lố do tích lũy sai số trong suốt 10 - 15 phút khởi động của lò.

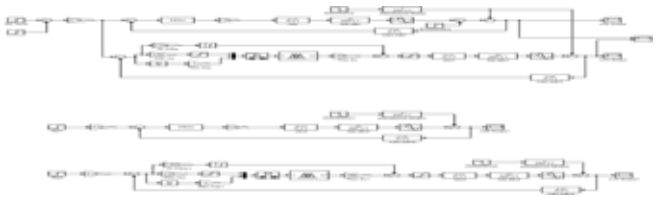
- Hệ số Vi phân (K_d = 10): Có vai trò dự báo xu hướng biến đổi nhiệt độ để "hãm" bớt dao động. Tuy nhiên, kết quả mô phỏng cho thấy thành phần vi phân tuyến tính này không đủ mạnh để thắng được quán tính nhiệt quá lớn (T = 600s) của 1 tấn dầu cặn khi nhiệt độ tiệm cận giá trị đặt.

4. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

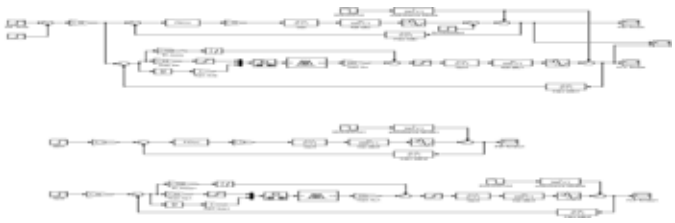
Để kiểm chứng tính đúng đắn của giải thuật điều khiển Hybrid Fuzzy-PID đề xuất, quá trình mô phỏng được thực hiện trên môi trường MATLAB/Simulink.

4.1. Thiết lập kịch bản mô phỏng

Mô hình bộ điều khiển PID và FLC trên Simulink (Hình 3, Hình 4) và được xây dựng dựa trên các hàm truyền đạt thành phần đã xác định bao gồm: Bộ chấp hành (K_d = 0,75), Van điều khiển (Gv), Két dầu (Gp) và Cảm biến (H).



Hình 3. Bộ điều khiển PID



Hình 4. Bộ điều khiển FLC

Quy trình kiểm chứng được chia thành hai kịch bản vận hành thực tế:

1. Kịch bản 1: Đánh giá khả năng gia nhiệt và đáp ứng quá độ khi thay đổi nhiệt độ từ 60°C sang 80°C.

2. Kịch bản 2: Đánh giá khả năng ổn định nhiệt độ khi có nhiễu tải (bơm bổ sung dầu nguội vào két) tại thời điểm hệ thống đang ổn định.

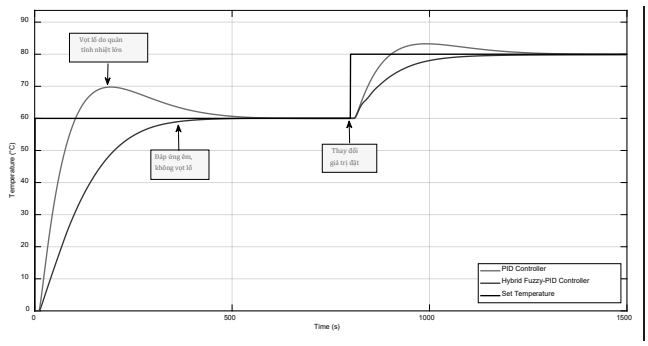
4.2. Kịch bản 1: Gia nhiệt và đáp ứng quá độ

Trong kịch bản này, hệ thống thực hiện quá trình gia nhiệt cho két dầu phục vụ. Giá trị đặt được thay đổi đột ngột từ 60°C lên 80°C tại thời điểm t = 800s. Kết quả gia nhiệt và đáp ứng nhiệt độ của hai bộ điều khiển được thể hiện ở Hình 5.

Đối với bộ điều PID, hệ thống gia nhiệt nhanh, đạt mốc 60°C và 80°C trong thời gian ngắn. Nhưng do quán tính nhiệt lớn, bộ điều khiển PID không hãm được đà tăng nhiệt dẫn đến bị vọt lố. Với mức nhiệt độ này tiệm cận ngưỡng báo động. Bộ điều khiển PID được tham số hóa theo phương pháp Ziegler-Nichols. Đây là thiết lập tiêu chuẩn trong công nghiệp nhằm ưu tiên rút ngắn thời gian tăng trưởng khi khởi động lò, chấp nhận một lượng vọt lố nhất định thay vì đáp ứng quá chậm.

Đối với bộ điều khiển Hybrid Fuzzy-PID, đường đặc tính nhiệt độ tăng ổn định sớm đạt được trạng thái xác lập nhiệt theo quy luật tiệm cận.

Bộ điều khiển Hybrid Fuzzy-PID thể hiện ưu thế tốt hơn về tính an toàn, tiếp cận mức nhiệt độ xác lập chậm và có sai số tĩnh rất nhỏ nên phù hợp với đặc thù điều kiện vận hành trên biển.

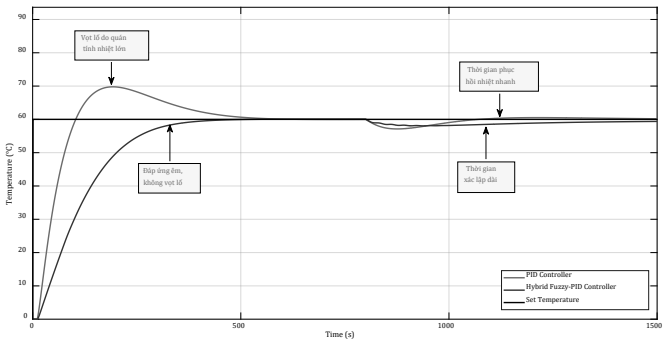


Hình 5. Gia nhiệt và đáp ứng quá độ của hệ thống

4.3. Kịch bản 2: Đánh giá khả năng ổn định nhiệt độ khi có nhiễu tải

Trong điều kiện vận hành thực tế trên tàu, lò đốt không chỉ hoạt động ở chế độ xác lập mà còn thường xuyên chịu tác động của các nhiễu tải ngẫu nhiên. Tình huống phổ biến nhất là khi bơm chuyển hoạt động để bổ sung dầu từ két chứa lớn vào két phục vụ. Dầu mới nạp vào thường có nhiệt độ thấp (nhiệt độ môi trường), làm nhiệt độ tổng thể trong két sụt giảm đột ngột.

Hệ thống đang hoạt động ổn định tại 60°C. Tại thời điểm t = 800s, giả lập một tín hiệu nhiễu đầu vào, làm nhiệt độ két có xu hướng tụt giảm mạnh (giả định giảm khoảng 15°C trong vòng 200s. Kết quả đáp ứng của hai bộ điều khiển trước nhiễu tải được thể hiện ở Hình 6.



Hình 6. Đáp ứng của hệ thống khi chịu tác động của nhiễu tải

Với bộ điều khiển PID, ngay khi phát hiện sai lệch nhiệt độ, khâu Vi phân (D) và Tỷ lệ (P) của bộ PID phản ứng rất mạnh mẽ, điều khiển tín hiệu tức thì để bù nhiệt. Tốc độ gia tăng nhiệt độ nhanh nhưng do quan tính nhiệt dư thừa của hệ thống, bộ PID gây ra hiện tượng vọt lố thứ cấp. Nên khi phục hồi, nhiệt độ không dừng lại ở 60°C mà vọt lên giá trị đặt.

Đối với bộ điều khiển Hybrid Fuzzy-PID, khi nhiệt độ có dấu hiệu giảm, bộ điều khiển mờ tính toán lại giá trị K_p, K_d dựa trên bảng luật mờ. Hệ thống nhận diện được đây là sự thay đổi của tải và gia tăng nhiệt độ cho két dầu cặn nhưng tăng theo quy luật thăm dò thận trọng. Nhược điểm là thời gian để nhiệt độ phục hồi về giá trị 60°C kéo dài hơn so với bộ điều khiển PID.

Kết quả mô phỏng của bộ điều khiển Hybrid Fuzzy-PID mất nhiều thời gian để đưa nhiệt độ về trạng thái xác lập khi có nhiễu do bản chất tích phân và luật mờ được thiết kế để ưu tiên triệt tiêu vọt lố. Tuy nhiên, trong đối tượng là lò đốt dầu cặn trên tàu biển, sự chậm trễ này chấp nhận được. Việc duy trì nhiệt độ thấp hơn giá trị đặt trong một khoảng thời gian ngắn không ảnh hưởng nhiều tới hệ thống bằng việc độ vọt lố cao của bộ điều khiển PID. Theo tài liệu kỹ thuật vận hành lò đốt, nhiệt độ dầu tối thiểu yêu cầu để duy

trì độ nhớt cho bơm là 60°C. Để khắc phục hiện tượng này thay vì đặt nhiệt độ đặt là 60°C, người vận hành có thể thiết lập giá trị đặt là 65°C. Khi xảy ra nhiễu, hệ thống vẫn đảm bảo nhiệt độ dầu thực tế luôn duy trì quanh mốc tối ưu.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu, xây dựng và kiểm chứng thành công giải thuật điều khiển Hybrid Fuzzy-PID áp dụng cho hệ thống gia nhiệt dầu cặn của lò đốt rác thải trên tàu biển. Dựa trên kết quả mô phỏng so sánh với bộ PID truyền thống trong các điều kiện khởi động và nhiễu tải, nghiên cứu rút ra các kết luận chính sau:

- Kết quả mô phỏng khẳng định bộ điều khiển Hybrid Fuzzy-PID đã giải quyết triệt để bài toán vọt lố nhiệt độ vốn là nhược điểm của bộ PID truyền thống đối với các đối tượng có quán tính nhiệt lớn. Trong khi PID gây ra đỉnh nhiệt độ cao, bộ điều khiển đề xuất duy trì độ vọt lố ở mức 0%, đảm bảo hệ thống không bao giờ bị dừng sự cố do quá nhiệt giả.

- Đối với kịch bản nhiễu, bộ điều khiển Fuzzy chấp nhận thời gian đáp ứng chậm hơn để đổi lấy sự ổn định, không gây ra dao động hay vọt lố thứ cấp. Nghiên cứu đề xuất kết hợp giải thuật này với chiến lược nâng nhiệt độ đặt lên mức 65°C. Giải pháp này tận dụng đặc tính của Fuzzy để tạo ra một biên dự phòng nhiệt, đảm bảo nhiệt độ dầu luôn cao hơn ngưỡng tối thiểu theo yêu cầu của nhà sản xuất ngay cả khi chịu tác động lớn từ nhiễu, mà vẫn đảm bảo an toàn tuyệt đối cho thiết bị.

- Việc duy trì nhiệt độ dầu ổn định và tin cậy có ý nghĩa quan trọng trong việc đảm bảo độ nhớt nhiên liệu tối ưu cho quá trình phun sương. Điều này giúp quá trình cháy diễn ra hoàn toàn, giảm thiểu muội than và khí thải độc hại (No_x, So_x), đáp ứng các quy định ngày càng khắt khe của công ước quốc tế MARPOL Annex VI về ngăn ngừa ô nhiễm không khí từ tàu biển.

- Kết quả nghiên cứu là cơ sở lý thuyết vững chắc để triển khai giải thuật Hybrid Fuzzy-PID lên các thiết bị điều khiển công nghiệp thực tế như PLC, thay thế cho các bộ điều khiển nhiệt độ ON/OFF hoặc PID đơn giản hiện có trên các đội tàu, góp phần nội địa hóa và hiện đại hóa công nghệ tự động hóa tàu thủy tại Việt Nam.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT25-26.62.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] D. Cooper. Exhaust emissions from ships at berth. Atmospheric Environment, vol. 37, no. 27, pp. 3817-3830, 2003.

[2] H. D. McGeorge. Marine Auxiliary Machinery, 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.

[3] J. G. Ziegler and N. B. Nichols. Optimum Settings for Automatic Controllers. Journal of Dynamic Systems. Measurement and Control, vol. 115, no. 2B, pp. 220-222, 1993.

[4] A. Kiam Heong, G. Chong and L. Yun. PID control system analysis, design and technology. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 13, no. 4, pp. 559-576, 2005.

[5] L. A. Zadeh. Fuzzy sets. Information and Control, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, 1965.

[6] J. Carvajal. Fuzzy PID controller: Design, performance evaluation and stability analysis. Information Sciences, vol. 123, no. 3-4, pp. 249-270, 2000.

[7] L. H. Hyundai Marine Machinery Co. Instruction Book for Installation, Operation and Maintenance of Incinerator (Waste Oil Incinerator Unit Type: MAXI NG25SL WS). Incheon, Korea 2018.

[8] Q. Bi, W.-J. Cai, E.-L. Lee, Q.-G. Wang, C.-C. Hang and Y. Zhang. Robust identification of first-order plus dead-time model from step response. Control Engineering Practice, vol. 7, no. 1, pp. 71-77, 1999.

[9] J. E. Normey-Rico and E. F. Camacho. Robust tuning of dead-time compensators for processes with an integrator and long dead-time. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 44, no. 8, pp. 1597-1603, 1999.

[10] E. H. Mamdani. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 121, no. 12, 1974.

[11] X. Liu, Z. Zhang, Z. Peng and J. Yang. Optimization of fuzzy-PID temperature controller based on improved slime mould algorithm. Journal of Physics: Conference Series, vol. 2862, no. 1, 2024.

■Ngày nhận bài: 05/3/2026 ■Ngày sửa bài: 18/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 27/3/2026

Nghiên cứu ứng dụng mạng nơ-ron nhân tạo trong nhận diện và dự báo nồng độ khí hydrocarbon trên tàu biển

Research on the application of artificial neural networks for the identification and prediction of hydrocarbon gas concentration on ships

> PGS.TS HOÀNG ĐỨC TUẤN*, KS NGUYỄN MẠNH HÙNG
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email: hoangductuan@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Rò rỉ khí hydrocarbon là nguy cơ dẫn đến cháy nổ nghiêm trọng trên tàu biển. Các hệ thống giám sát truyền thống dựa trên ngưỡng cố định thường hạn chế trong dự báo sớm và dễ gây báo động giả do tác động môi trường. Bài báo nghiên cứu ứng dụng mô hình mạng nơ-ron nhân tạo nhằm nâng cao hiệu quả nhận diện và dự báo nồng độ khí theo thời gian thực. Bằng cách huấn luyện với dữ liệu đa biến, hệ thống có khả năng nhận diện các xu hướng bất thường và đưa ra cảnh báo sớm trước khi nồng độ đạt mức nguy hiểm. Kết quả đã chứng minh mô hình đạt độ chính xác cao và thời gian đáp ứng nhanh, góp phần tối ưu hóa quản lý an toàn và giảm thiểu rủi ro cháy nổ cho các phương tiện thủy nội địa và tàu viễn dương.

Từ khóa: Mạng nơ-ron nhân tạo; khí hydrocarbon; an toàn tàu biển; dự báo nồng độ khí; an toàn cháy nổ.

ABSTRACT

Hydrocarbon gas leakage poses a severe risk of fire and explosion on ships. Traditional monitoring systems based on fixed thresholds are often limited in providing early predictions and are prone to triggering false alarms due to environmental factors. This paper investigates the application of an Artificial Neural Network model to enhance the effectiveness of real-time gas concentration identification and prediction. By being trained on multivariate data, the system is capable of recognizing anomalous trends and issuing early warnings before the gas concentration reaches hazardous levels. Experimental results demonstrate that the proposed model achieves high accuracy and rapid response times, thereby contributing to the optimization of safety management and the mitigation of fire and explosion risks for both inland waterway vessels and ocean-going ships.

Keywords: Artificial neural networks; hydrocarbon gas; marine safety; gas concentration prediction; fire and explosion safety.

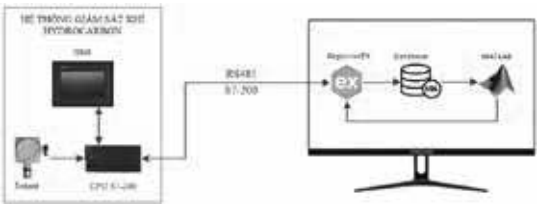
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong kỷ nguyên công nghiệp 4.0, đảm bảo an toàn cháy nổ trên tàu biển là yêu cầu cấp thiết và bắt buộc theo các quy chuẩn an toàn hàng hải quốc tế [1]. Tuy nhiên, thực tế vận hành cho thấy các hệ thống giám sát dựa trên ngưỡng cố định thường bộc lộ hạn chế trong việc dự báo sớm và dễ gây ra báo động giả do tác động của môi trường và lỗi kỹ thuật tích lũy [1, 2].

Nhằm chuyển đổi từ mô hình "phản ứng thụ động" sang "cảnh báo chủ động", nghiên cứu này đề xuất ứng dụng mạng nơ-ron nhân tạo cấu trúc 3 lớp [1, 3]. Bằng cách khai thác đồng thời giá trị nồng độ thực tế (x_1) và tốc độ biến thiên (x_2) [4], mô hình mạng nơ-ron nhân tạo có khả năng xấp xỉ các hàm phi tuyến phức tạp [5], từ đó bóc tách nhiễu và dự báo chính xác xu hướng tích tụ khí ngay từ giai đoạn khởi phát [2, 6]. Việc ứng dụng mạng nơ-ron nhân tạo vào hệ thống nhận diện và dự báo nồng độ khí hydrocarbon trên tàu biển không chỉ giúp loại bỏ hiện tượng trôi giá trị thông số của cảm biến nồng độ khí hydrocarbon, mà còn đặt nền tảng quan trọng cho việc phát triển các thế hệ tàu biển thông minh trong tương lai [7, 8].

2. HỆ THỐNG NHẬN DIỆN VÀ DỰ BÁO NỒNG ĐỘ KHÍ HYDROCARBON

2.1. Cấu trúc hệ thống đề xuất

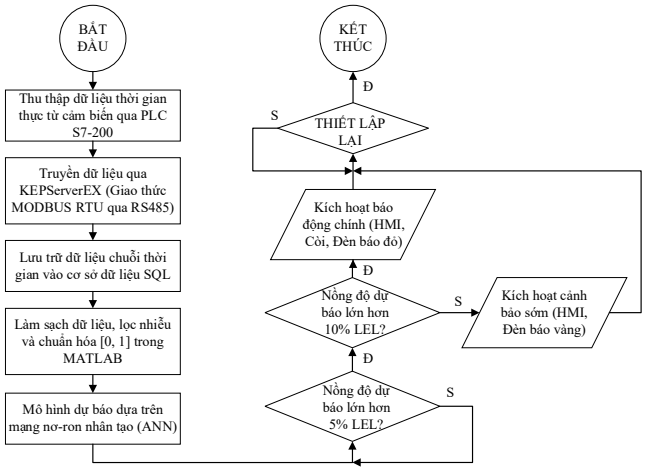


Hình 1. Cấu trúc hệ thống giám sát khí hydrocarbon

Cấu trúc hệ thống giám sát khí hydrocarbon dựa trên sự kết hợp giữa bộ điều khiển khả trình và mạng nơ-ron nhân tạo được trình bày như Hình 1. Dữ liệu từ bộ điều khiển khả trình S7-200 được truyền qua chuẩn RS485, sau đó đồng bộ hóa vào SQL Database thông qua KepwareEX [9]. Toàn bộ dữ liệu được cấu trúc hóa và lưu trữ tại SQL Database nhằm phục vụ giám sát thời gian thực và huấn luyện mạng nơ-ron. Tại tầng xử lý, thuật toán mạng nơ-ron nhân tạo trong MATLAB phân tích dữ liệu để phân loại trạng thái an toàn hoặc nguy hiểm, từ đó phản hồi tín hiệu về bộ điều khiển khả trình để điều khiển còi, đèn cảnh báo và hiển thị trực quan trên giao diện HMI.

2.2. Xây dựng thuật toán xử lý dữ liệu

Quy trình vận hành của thuật toán mạng nơ-ron nhân tạo được mô tả tại Hình 2, thiết lập một vòng lặp kín. Dữ liệu thời gian thực sau khi được thu thập sẽ truyền qua KepwareEX để lưu trữ vào SQL Database dưới dạng chuỗi thời gian. Tiếp theo, MATLAB thực hiện tiền xử lý và sử dụng mô hình mạng nơ-ron nhân tạo để dự báo nồng độ khí dựa trên các đặc trưng phi tuyến. Cuối cùng, giá trị dự báo được so sánh với ngưỡng 5% LEL và 10% LEL để kích hoạt báo động, trạng thái này được duy trì cho đến khi người vận hành thiết lập lại nhằm đảm bảo an toàn hàng hải.

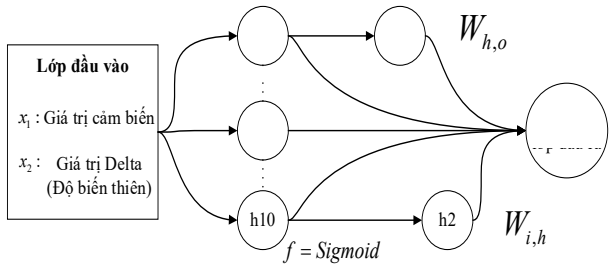


Hình 2. Thuật toán mạng nơ-ron nhân tạo dự báo nồng độ khí hydrocarbon thời gian thực

2.3. Xây dựng mô hình mạng nơ-ron nhân tạo dự báo nồng độ khí hydrocarbon

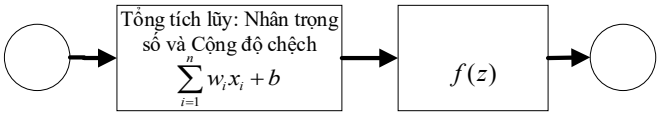
2.3.1. Sơ đồ luồng tín hiệu

Mạng nơ-ron thiết kế trong Hình 3 với cấu trúc 3 lớp gồm lớp đầu vào nhận 2 tín hiệu là giá trị cảm biến (x_1) và tốc độ thay đổi (x_2), lớp ẩn với 10 nơ-ron thực hiện xử lý tính toán chính và lớp đầu ra sử dụng một nơ-ron để đưa ra kết quả dự báo dưới dạng xác suất trong khoảng (0, 1).



Hình 3. Sơ đồ cấu trúc mạng nơ-ron nhân tạo dự báo

Quá trình xử lý tại mỗi nơ-ron đơn lẻ thông qua việc nhân dữ liệu đầu vào với trọng số ($W_{i,h}$), cộng độ lệch (b) tại khối tổng và đưa qua hàm kích hoạt để tạo đầu ra phi tuyến trình bày trong Hình 4.



Hình 4. Sơ đồ luồng đi của dữ liệu hệ thống

2.3.2. Cơ sở toán học cho mô hình mạng nơ-ron nhân tạo

** Bước 1: Tính tổng trọng số:*

Đây là giai đoạn tổng hợp dữ liệu tại nơ-ron theo công thức:

$$z = \sum_{i=1}^{n} (w_i \cdot x_i) + b \quad (1)$$

Trong đó:

z : Giá trị tổng hợp trước khi đi qua hàm kích hoạt;

x_i : Các giá trị đầu vào từ cảm biến;

w_i : Trọng số thể hiện độ quan trọng của đầu vào, được mạng nơ-ron nhân tạo tự học;

b : Ngưỡng điều chỉnh độ nhạy của mô hình, được mạng nơ-ron nhân tạo tối ưu hóa tự động.

** Bước 2: Hàm kích hoạt:*

Hàm kích hoạt nén giá trị z để quyết định cường độ tín hiệu đầu ra. Ta có công thức:

$$Output = f(z) = \frac{1}{1+e^{-z}} \quad (2)$$

Trong đó:

e: Số Euler (xấp xỉ 2.718)

Nếu z rất lớn (dương) => Output tiệm cận 1, nếu z rất nhỏ (âm) => Output tiệm cận 0.

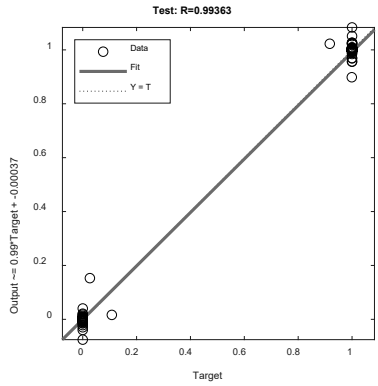
3. THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

3.1. Ứng dụng thực tiễn và kiểm chứng bằng số liệu

Để đảm bảo độ tin cậy của hệ thống, mô hình mạng nơ-ron nhân tạo được đánh giá thông qua chỉ số sai số bình phương trung bình (MSE). Đối với tập dữ liệu gồm *N* = 2.675 mẫu, mục tiêu huấn luyện tập trung vào việc tối thiểu hóa hàm hiệu suất được định nghĩa trong công thức (3).

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(t_i - y_i)^2 \quad (3)$$

Trong đó: t_i đại diện cho các giá trị mục tiêu và y_i biểu thị các kết quả dự báo. Tập dữ liệu được phân chia ngẫu nhiên với tỷ lệ 80% dành cho huấn luyện và 20% dành cho kiểm tra. Kết quả phân tích hồi quy trong Hình 5 cho thấy độ chính xác vượt trội với hệ số tương quan đạt R=0,99363.



Hình 5. Kết quả phân tích hồi quy mạng nơ-ron nhân tạo

Đường tuyến tính xác nhận độ chính xác của mô hình khí, đảm bảo hiệu suất ổn định qua hai kịch bản thực tế sau:

- Trường hợp 1 (trạng thái an toàn): Dưới điều kiện nồng độ ổn định ($x_1 = 4.000$) và xung lượng bằng không ($\Delta c = 0$), hệ thống cho ra kết quả $z = -10$ và $\hat{y} \approx 0$, xác nhận bầu không khí ổn định.

- Trường hợp 2 (trạng thái nguy hiểm): Gia tăng nồng độ nhẹ ($x_1 = 4.050$) cùng với vận tốc tích lũy cao ($x_2 = 20$) dẫn đến kết quả $z = 8$ và $\hat{y} \approx 1$, kích hoạt báo động chủ động ngay lập tức.

Những kết quả này xác nhận rằng, hệ thống tích hợp mạng nơ-ron nhân tạo cung cấp khả năng phát hiện nguy hiểm nhạy bén và tin cậy hơn so với các cảm biến ngưỡng cố định thông thường.

3.2. Kết quả và thảo luận

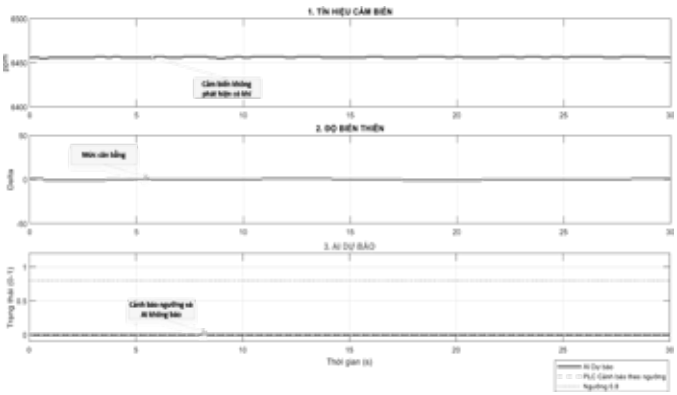
Hiệu quả mô hình được phân tích chi tiết qua 4 kịch bản thử nghiệm tại Bảng 1.

Bảng 1. Danh mục các kịch bản thực nghiệm kiểm chứng hệ thống

Hạng mục	Tên trường hợp thử nghiệm	Ghi chú nội dung thử nghiệm
Kịch bản 1	Thử nghiệm ổn định tĩnh	Kiểm tra độ ổn định của hệ thống trong điều kiện môi trường bình thường
Kịch bản 2	Thử nghiệm phát hiện khí	Kiểm tra khả năng phản hồi và kích hoạt báo động khi hệ thống phát hiện có khí
Kịch bản 3	Thử nghiệm trôi điểm đặt cảm biến	Kiểm tra khả năng chống báo động giả khi tín hiệu cảm biến bị trôi do lỗi kỹ thuật
Kịch bản 4	Thử nghiệm tổng hợp trôi cảm biến và phát hiện khí	Kiểm tra khả năng phân biệt giữa hiện tượng trôi cảm biến và nguy cơ có khí thực tế

3.2.1. Phân tích kết quả thực nghiệm Kịch bản 1: Thử nghiệm ổn định tĩnh

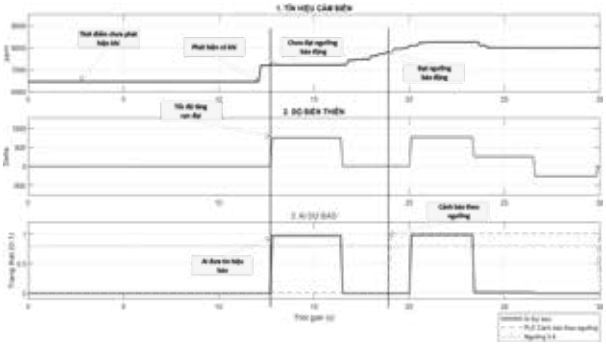
Tại Kịch bản 1 thể hiện ở Hình 6, tín hiệu duy trì trạng thái xác lập ổn định với nhiễu nền không đáng kể. Kết quả này minh chứng cho khả năng kháng nhiễu của phần cứng và hiệu quả tiền xử lý dữ liệu. Việc xác lập chính xác trạng thái "bình thường" giúp mô hình mạng nơ-ron nhân tạo đạt độ nhạy tối ưu, nhận diện sớm các bất thường mà phương pháp ngưỡng truyền thống thường bỏ qua.



Hình 6. Kết quả thử nghiệm hệ thống trong Kịch bản 1

3.2.3. Phân tích kết quả thực nghiệm Kịch bản 2: Thử nghiệm phát hiện khí

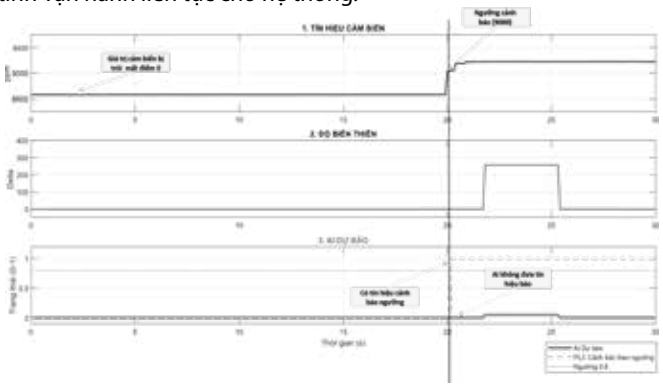
Tại Kịch bản 2, hệ thống phát hiện khí rõ rệt tại $t = 13s$. Khác với bộ điều khiển khả trình bị trễ do ngưỡng cố định, mô hình mạng nơ-ron nhân tạo nhận diện sự cố ngay khi sai lệch tăng mạnh. Nhờ phân tích đặc trưng phi tuyến và đạo hàm, hệ thống bắt được vận tốc tăng trưởng cực đại từ giai đoạn khởi phát, giúp cảnh báo sớm và tạo "thời gian vàng" ứng phó.



Hình 7. Kết quả thử nghiệm hệ thống trong Kịch bản 2

3.2.3. Phân tích kết quả thực nghiệm Kịch bản 3: Thử nghiệm trôi điểm đặt cảm biến

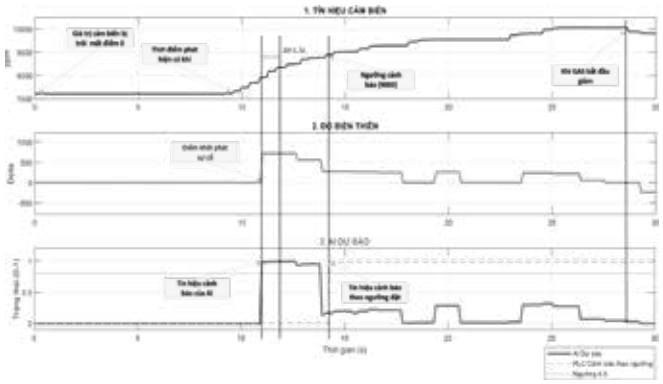
Tại Kịch bản 3, tín hiệu tăng dần do hiện tượng trôi giá trị thông số của cảm biến. Trong hệ thống truyền thống, giá trị chạm ngưỡng sẽ gây báo động giả. Ngược lại, mô hình mạng nơ-ron nhân tạo phân tích đồng thời x_1 và x_2. Do vận tốc tăng trưởng thấp, mạng nơ-ron nhân tạo nhận diện đây là sai số kỹ thuật tích lũy, thay vì rò rỉ thực tế. Khả năng phân biệt này giúp loại bỏ báo động giả, đảm bảo tính vận hành liên tục cho hệ thống.



Hình 8. Kết quả thử nghiệm hệ thống trong Kịch bản 3

3.2.4. Phân tích kết quả thực nghiệm Kịch bản 4: Thử nghiệm tổng hợp trôi cảm biến và phát hiện khí

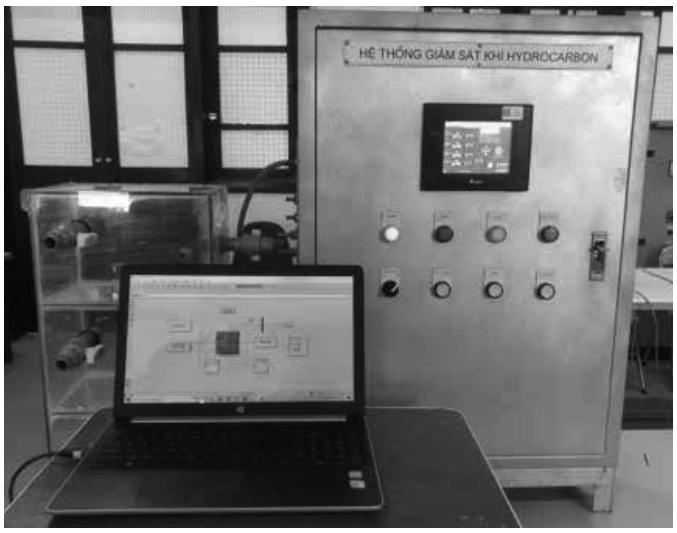
Tại Kịch bản 4, mô hình mạng nơ-ron nhân tạo giải quyết triệt để bài toán rò rỉ khí trên nền tín hiệu dịch chuyển. Trong khi phương pháp ngưỡng cố định dễ báo động giả hoặc trễ sự cố, thuật toán mạng nơ-ron nhân tạo tự thích ứng với đường nền biến thiên và bóc tách chính xác tín hiệu thực thông qua biến sai lệch (x_2). Kết quả này khẳng định tính bền vững tuyệt đối của mạng nơ-ron nhân tạo trước sự già hóa cảm biến và môi trường vận hành khắc nghiệt.



Hình 9. Kết quả thử nghiệm hệ thống trong Kịch bản 4

3.2.5. Đánh giá sự tương quan giữa mô phỏng và thực tế

Mô hình thực nghiệm hệ thống giám sát khí hydrocarbon được trình bày như Hình 10, để kiểm chứng kết quả giữa mô phỏng và thực tế tại 4 kịch bản. Khi nồng độ khí hydrocarbon biến động hoặc xảy ra hiện tượng trôi, hệ thống đèn báo và HMI hiển thị chính xác trạng thái theo dự báo từ mạng nơ-ron nhân tạo. Điều này khẳng định thuật toán có độ tin cậy cao, hoàn toàn khả thi khi triển khai thực tế trên tàu biển.



Hình 10. Mô hình thực nghiệm hệ thống giám sát khí hydrocarbon thực tế

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã triển khai thành công hệ thống giám sát khí hydrocarbon ứng dụng mạng nơ-ron nhân tạo. Hệ thống thu thập dữ liệu thời gian thực qua bộ điều khiển khả trình và truyền thông ổn định với giao thức OPC. Thuật toán mạng nơ-ron nhân tạo dự báo chính xác nồng độ khí hydrocarbon, kịp thời cảnh báo sớm tại ngưỡng 5% LEL và 10% LEL. Kết quả khẳng định, hệ thống hoạt động tin cậy, chính xác, chi phí thấp, khả thi để nhân rộng cho đội tàu biển. Hướng phát triển tiếp theo sẽ tối ưu hóa mạng nơ-ron học sâu và tích hợp Internet vạn vật để giám sát từ xa.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT25-26.72.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Honeywell, Technical Documents: Hydrocarbon Gas Detection System. Honeywell Analytics, 2021.

[2] Hoàng Đức Tuấn và Đoàn Hữu Khánh. Thiết kế hệ thống giám sát khí dễ cháy nổ hydrocarbon cố định cho tàu dầu. Tạp chí Giao thông vận tải, số 11, tr. 126-128, 2017.

[3] Simon Haykin. Neural Networks and Learning Machines. 3rd Edition, New Jersey: Pearson Education, 2009.

[4] Nguyễn Công Nam. Dự báo nồng độ khí Hydrocarbon trên tàu dầu sử dụng mô hình mạng nơ-ron nhân tạo ANN. Kỷ yếu Hội nghị Khoa học và Công nghệ Giao thông vận tải, Hà Nội, tr. 85-91, 2023.

[5] Trần Anh Dương. Nghiên cứu thiết kế hệ thống giám sát tiêu thụ nhiên liệu tàu thủy thích ứng với điều kiện kết nối vệ tinh gián đoạn. Tạp chí Khoa học Công nghệ hàng hải, số 70, 2022.

[6] Hina Ruqsar, Chandana R., Nandini R. and T. P. Surekha. Internet of Things (IoT) based real time gas leakage monitoring and controlling. International Journal of Electronics and Communication Engineering & Technology (IJECET), vol. 5, no. 8, pp. 208-214, 2014.

[7] Đinh Anh Tuấn. Ứng dụng công nghệ 4.0 trong quản lý và khai thác kỹ thuật tàu biển. Tạp chí Giao thông vận tải, số 11, 2022.

[8] J. M. Son and K. H. Kim. Real-time gas monitoring and prediction system for hazardous environments using artificial neural networks. IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 14, no. 5, pp. 1920-1928, 2018.

[9] Kepware. KEPServerEX Communications Platform - User Manual. Portland: Kepware Technologies, 2021.

■Ngày nhận bài: 03/3/2026 ■Ngày sửa bài: 16/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 26/3/2026

Phân tích hiệu ứng động lực do tác dụng của hoạt tải đoàn tàu đối với một số dạng cầu dầm liên tục trên đường sắt tốc độ cao bằng phương pháp tính toán đơn giản theo tiêu chuẩn thiết kế

Analysis of dynamic effects due to train live load on several types of continuous beam bridges on high-speed railways using simple calculation methods according to design standards

> PGS.TS HOÀNG HÀ
Trường Đại học Giao thông vận tải
Email: hoangha@.utc.edu.vn

TÓM TẮT

Ứng xử động lực của kết cấu cầu dưới tải trọng đoàn tàu di động là nội dung quan trọng cần đặc biệt quan tâm trong thiết kế cầu trên các tuyến đường sắt tốc độ cao (ĐSTĐC). Theo các tiêu chuẩn thiết kế, hiệu ứng này thường được xét đến bằng phân tích mô hình tương tác động lực đoàn tàu - đường ray - kết cấu cầu cho kết quả đủ tin cậy. Bên cạnh đó, tiêu chuẩn thiết kế cũng cho phép sử dụng phương pháp tính toán đơn giản để đánh giá phản ứng động của một số dạng kết cấu cầu giản đơn, tuy nhiên các chỉ dẫn tính chưa thật sự rõ ràng, nhất quán và chưa đề cập đối với dạng cầu liên tục dẫn đến khó khăn khi áp dụng thực tế cho một số trường hợp cần liên tục hóa. Bài báo phân tích khả năng mở rộng phương pháp đơn giản cho một số dạng cầu dầm liên tục nhằm hỗ trợ việc nghiên cứu và thiết kế các cầu trên ĐSTĐC ở Việt Nam.

Từ khóa: Đường sắt tốc độ cao; hiệu ứng động lực; cầu dầm liên tục; phương pháp tính toán đơn giản theo tiêu chuẩn thiết kế.

ABSTRACT

The dynamic behavior of bridge structures under moving train loads is a crucial aspect requiring special attention in bridge design on high-speed railway lines. According to design standards, this effect is typically considered through dynamic interaction model analysis of the train, rail and bridge structure, yielding sufficiently reliable results. In addition, the design standard also allows the use of simple calculation methods to evaluate the dynamic response of some simple bridge structures; however, the calculation guidelines are not really clear and consistent and do not address continuous bridge types, leading to difficulties in practical application for some cases requiring continuous design. This paper analyzes the scalability of a simplified method for several types of continuous girder bridges to support the research and design of bridges on high-speed railways in Vietnam.

Keywords: High-speed railway; dynamic effects; continuous girder bridge; simplified calculation method according to design standards.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống cầu cạn với chủ yếu là dạng kết cấu dầm giản đơn chiều dài nhịp trung bình từ 24 m đến 40 m được sử dụng tỷ lệ lớn (đến hơn 80%) chiều dài trên các tuyến ĐSTĐC. Tuy nhiên, dạng cầu dầm liên tục vẫn có vai trò quan trọng khi vượt các nhịp lớn hơn hoặc khi cần liên tục hóa các nhịp giản đơn với mục đích tăng cường độ cứng và cải thiện khả năng chịu dao động. Tác động của đoàn tàu với nhiều toa xe giống nhau di chuyển với tốc độ cao, gây ra tần số kích thích trùng nhau và gần bằng tần số dao động tự nhiên của cầu, dẫn đến nguy cơ xảy ra cộng hưởng, làm phát sinh hiệu ứng động lực lớn dẫn đến sự gia tăng hiệu ứng tải trọng đối với kết cấu cầu. Vấn đề này được gọi là "hiệu ứng tốc độ do tải trọng di động" và đã là chủ đề của nhiều nghiên cứu lý thuyết, thí nghiệm mô hình và đo lường trên các cây cầu thực tế [4, 5]. Để kiểm soát nguy cơ cộng hưởng, các tiêu chuẩn thiết kế cầu trên ĐSTĐC như Eurocodes, TCVN 13594:2022… dựa trên phân tích ảnh hưởng của yếu tốc vận tốc di động của phương tiện và các yếu tố tác động khác để đưa ra các chỉ dẫn tính toán. Có thể tóm tắt gồm hai hướng kiểm soát:

- Quy định dựa trên triết lý kỹ thuật là không cho phép xảy ra cộng hưởng: Là phương pháp thiết lập giới hạn dưới cho độ cứng của dầm (qua tần số dao động tự nhiên) để tránh nguy cơ

cộng hưởng của kết cấu. Phương pháp này chủ yếu áp dụng cho các tuyến đường sắt vận tốc thiết kế đến 200 km/h. Với các tuyến ĐSTĐC (trên 200 km/h) cũng cho phép áp dụng để đánh giá phản ứng động cho dạng cầu dầm và bản giản đơn nhịp trung bình với quy định chặt chẽ về giới hạn độ cứng (tần số dao động tự nhiên).

- Quy định dựa trên triết lý kiểm soát cộng hưởng dao động: Độ cứng (tần số) của kết cấu được sử dụng linh hoạt hơn, tuy nhiên lại yêu cầu phân tích kết cấu theo mô hình động lực với mô hình tương tác đoàn tàu - đường ray - kết cấu. Nhóm này áp dụng cho phần kết cấu còn lại với trường hợp tuyến đường sắt có vận tốc đoàn tàu lớn hơn 200 km/h [3].

Thực tế khai thác các cầu đường sắt chỉ ra rằng, với sự suy giảm độ cứng của kết cấu nhịp cầu trong quá trình khai thác và tốc độ tàu tăng lên, nguy cơ cộng hưởng có xu thế bất lợi hơn, hiện tượng cộng hưởng đã được quan sát thấy ngay cả ở tốc độ tàu khoảng 200 km/h. Điều này dẫn đến nhu cầu cần có các biện pháp thích hợp, ngay cả khi xem xét đến biên độ thiết kế của các thành phần phi kết cấu [8]. Mặt khác, các nghiên cứu cả về lý thuyết và đo đạc thực tế hầu như tập trung vào dạng dầm giản đơn, rất ít phân tích số được thực hiện để làm rõ các hiện tượng liên quan đến dầm liên tục, cũng như chưa có phương pháp thiết kế đơn giản nào được thiết lập [8, 10]. Điều này có thể là do hệ dầm liên tục là kết cấu siêu tĩnh, chịu ảnh hưởng của các chế độ dao động cao hơn và chiều cao mặt cắt ngang của dầm chính thay đổi theo hướng trục cầu, khiến việc khái quát hóa chúng bằng các công thức lý thuyết trở nên khó khăn hơn.

Từ trạng nêu trên cho thấy cần nghiên cứu mở rộng phương pháp đơn giản nhưng có thể làm rõ bản chất phản ứng động lực để áp dụng cho phân tích động đối với các kết cấu cầu dầm liên tục với đủ độ tin cậy để thay thế cho các phân tích theo mô hình động lực đoàn tàu - đường ray - kết cấu phức tạp, đòi hỏi khối lượng và thời gian tính toán lớn.

2. PHÂN TÍCH PHẢN ỨNG ĐỘNG LỰC CỦA CẦU DƯỚI TÁC DỤNG CỦA ĐOÀN TÀU TỐC ĐỘ CAO THEO PHƯƠNG PHÁP ĐƠN GIẢN THEO MỘT SỐ TIÊU CHUẨN THIẾT KẾ

Với sự phát triển và ngày càng hoàn thiện của các phần mềm phân tích kết cấu chuyên dụng dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn với các mô hình được số hóa đã cho phép thu được kết quả phân tích ứng xử động lực của kết cấu cầu theo mô hình tương tác động lực đoàn tàu - đường ray - kết cấu với độ chính xác cao. Tuy nhiên, phương pháp tính toán đơn giản cũng nhu cầu rất cao và việc đề xuất các phương pháp thiết kế phù hợp là cần thiết [8].

2.1. Phương pháp đơn giản theo Tiêu chuẩn Eurocodes và TCVN 13594:2022

Tiêu chuẩn Eurocodes được dùng làm cơ sở để xây dựng tiêu chuẩn thiết kế cầu trên đường sắt khổ 1.435 mm, tốc độ đến 350 km/h (TCVN 13594:2022) quy định không cần phân tích theo mô hình động lực cho một số dạng cầu dầm và bản giản đơn trên ĐSTĐC (vận tốc lớn hơn 200 km/h) nếu đáp ứng đủ các yêu cầu một trong các trường hợp sau:

- Nhịp giản đơn, chiều dài nhịp L < 40 m, có tỷ lệ tần số dao động xoắn và dao động uốn $f_T/f_1 \geq 1{,}2$ và tỷ lệ vận tốc so với tần số dao động $(v/f_1) \leq (v/f_1)_{lim}$.
- Nhịp giản đơn, chiều dài nhịp L ≥ 40 m, có tần số f_1 nằm trong giới hạn quy định.
- Nhịp giản đơn, chiều dài nhịp L ≥ 40 m, có tần số f_1 nằm ngoài giới hạn quy định nhưng $f_T/f_1 \geq 1{,}2$ và tỷ lệ vận tốc so với tần số dao động $(v/f_1) \leq (v/f_1)_{lim}$.

Khi áp dụng phương pháp đơn giản cho thiết kế phải đưa vào các hệ số động lực. Với các đoàn tàu cao tốc HSLM và đoàn tàu thực, hệ số động lực tính theo công thức:

$$(1+\varphi) = 1+\varphi'+\varphi'' \text{ cho điều kiện bảo trì tiêu chuẩn} \quad (1)$$

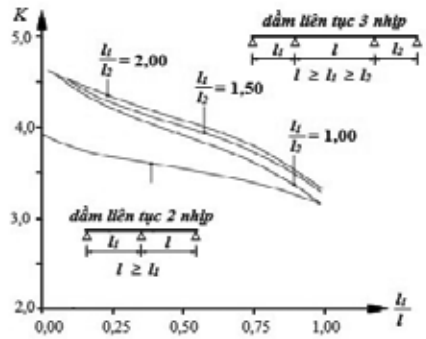
$$(1+\varphi) = 1+\varphi'+0{,}5\varphi'' \text{ cho điều kiện bảo trì cẩn thận} \quad (2)$$

Trong đó: φ′ là phần phụ tải xung kích được tính toán (ứng suất, chuyển vị, gia tốc dầm…), do yếu tố vận tốc di chuyển của mô hình hoạt tải (đoàn tàu) gây ra.; φ″ là phần phụ tải xung kích được tính toán (ứng suất, chuyển vị, gia tốc dầm cầu…), do các khuyết tật tuyến đường và sự khiếm khuyết của đoàn tàu tương ứng.

Các giá trị của φ′ và φ″ được chỉ dẫn xác định tùy thuộc vào giá trị của f_1 và vận tốc thiết kế của đoàn tàu. Tần số tính theo công thức:

$$f_1 = \frac{K^2}{2\pi L_b^2}\sqrt{\frac{E}{m}} \quad (3)$$

E là mô-đun đàn hồi MPa; *I* là mô-men quán tính chống uốn (m^4); *m* là khối lượng phân bố (kg/m); *K* là hệ số không thứ nguyên: với dầm giản đơn *K*= π; với cầu liên tục hai nhịp: *K* lấy theo biểu đồ Hình 1 với đường cong cho cầu hai nhịp, trong đó: L_1 là chiều dài nhịp biên và $L > L_1$; với cầu liên tục ba nhịp *K* lấy theo Hình 1, sử dụng đường cong phù hợp của cầu 3 nhịp, trong đó: L_1 là chiều dài của nhịp biên dài nhất, L_2 là chiều dài của nhịp biên khác và $L > L_1 > L_2$.



Hình 1. Hệ số K đối với các cầu dầm liên tục

- Khi kết cấu có tần số dao động tự nhiên f_1 trong giới hạn và vận tốc dưới 200 km/h thì:

$$\varphi' = \frac{K}{1-K+K^2} \quad \text{với } K < 0{,}76 \quad (4)$$

$$\varphi' = 1{,}325 \quad \text{với } K \geq 0{,}76$$

Ở đây:

$$K = \frac{v}{2L_b f_1} \quad (5)$$

Với: v là tốc độ đoàn tàu (m/s); f_1 là tần số dao động tự nhiên của kết cấu tương ứng với dạng thức (mode) dao động thứ 1 (Hz) tính theo công thức (8); L_b là chiều dài nhịp cầu (m).

$$\varphi'' = \frac{\alpha'}{100}\left[56e^{-\left(\frac{L_b}{10}\right)^2} + 50\left(\frac{L_b f_1}{80} - 1\right)e^{-\left(\frac{L_b}{20}\right)^2}\right] \text{ và } \varphi'' \geq 0 \quad (6)$$

Với: α′ = v/22 nếu v ≤ 22 m/s (79,2 km/h) và α′ =1 nếu v > 22 m/s.

- Khi kết cấu có tần số dao động tự nhiên f_1 không trong giới hạn và vận tốc lớn hơn 200 km/h thì φ′ và φ″ xác định bằng phân tích mô hình động lực [3].

Như vậy, Eurocodes cho phép một số trường hợp thiết kế cầu giản đơn không cần phân tích theo mô hình động lực nhưng lại không có chỉ dẫn rõ ràng về cách xác định hệ số động lực (bằng tính toán đơn giản) khi vận tốc cao hơn 200 km/h.

2.2. Phương pháp đơn giản theo tiêu chuẩn Nhật Bản

Tiêu chuẩn Thiết kế và Bình luận hiện hành về Kết cấu đường sắt - Tiêu chuẩn H16RC của Nhật Bản đã sử dụng phương pháp tính hệ số động lực cho dầm đơn giản từ tham số vận tốc α được thể hiện trong Phương trình (8) có ý nghĩa tương tự như hệ số K của Eurocodes trong công thức (5). Hệ số động lực được tính theo công thức:

$$(1+i) = (1+i_\alpha)(1+i_c) \quad (7)$$

Trong công thức (7):

i là phần phụ tải xung kích xét đến gia tăng hiệu ứng do tác dụng động lực của đoàn tàu;

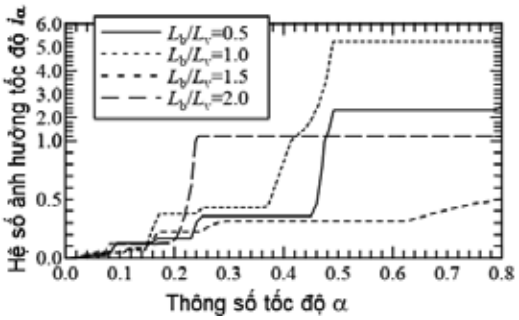
i_α là phần phụ tải xung kích do yếu tố tốc độ, phụ thuộc vào tham số tốc độ α và tỷ lệ không thứ nguyên L_b/L_v giữa chiều dài nhịp cầu L_b và chiều dài toa xe của đoàn tàu L_v.

α là tham số tốc độ tính theo biểu thức:

$$\alpha = \frac{v}{2\, f_1\, L_b} = \frac{V}{7{,}2\, f_1\, L_b} \quad (8)$$

Với V là tốc độ thiết kế của đoàn tàu (km/h); v là tốc độ đoàn tàu (m/s); f_1 là tần số dao động tự nhiên của kết cấu tương ứng với dạng thức (mode) dao động thứ 1 (Hz). Tần số tính theo công thức (3) với hệ số K lấy theo Hình 1.

Hệ số i_α được xác định căn cứ vào α và tỷ lệ L_b/L_v theo biểu đồ trên Hình 2.



Hình 2. Biểu đồ quan hệ giữa α, iα và Lb /Lv

i_c là phần phụ tải xung kích do yếu tố rung động của toa xe đường sắt:

$$i_c = 10/(65+L_b) \quad (9)$$

Đỉnh cộng hưởng do tải trọng di chuyển xảy ra khi mối liên hệ giữa tốc độ tàu V và bước sóng kích thích do tàu thỏa mãn phương trình:

$$V = f_1\, L_v \quad (10)$$

Ngoài ra, đối với cầu nhịp dài và dầm liên tục, tần số kích thích mà toàn bộ nhịp chịu tải cũng rất quan trọng. Đỉnh cộng hưởng tại toàn bộ nhịp được tạo ra khi tốc độ tàu V thỏa mãn mối liên hệ với chiều dài nhịp bằng phương trình:

$$V = f_1\, 2L_b \quad (11)$$

Các công thức (7) đến (11) cho thấy phương pháp phân tích đơn giản của Nhật Bản không giới hạn tốc độ của đoàn tàu và có thể sử dụng cho việc phân tích kết cấu nhịp cầu giản đơn trên ĐSTĐC.

3. MỞ RỘNG PHƯƠNG PHÁP ĐƠN GIẢN THEO TIÊU CHUẨN NHẬT BẢN ĐỂ ĐÁNH GIÁ MỘT SỐ CẦU DẦM LIÊN TỤC TRÊN ĐSTĐC

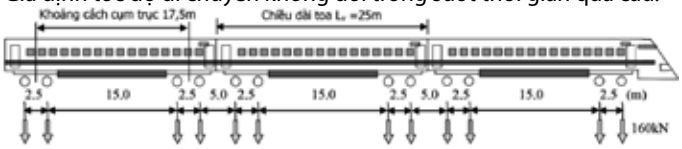
3.1. Phương pháp nghiên cứu

Masakazu UNO và các cộng sự [8] đã nghiên cứu mở rộng phương pháp đơn giản cho cầu dầm giản đơn để phân tích hiệu ứng động lực do đoàn tàu cao tốc Shinkansen gây ra đối với một số dạng cầu dầm liên tục. Nguyên lý của phương pháp là sử dụng các công thức (7) đến (9) và biểu đồ trên Hình 2 để tính toán phần phụ tải xung kích do yếu tố tốc độ di chuyển của đoàn tàu gây ra. Tần số dao động tự nhiên được tính bằng công thức (3) và biểu đồ trên Hình 1 cho trường hợp dầm liên tục và giá trị thấp nhất của các tham số cấu tạo được sử dụng để dự báo an toàn.

Kết quả phân tích theo phương pháp đơn giản theo tiêu chuẩn được Masakazu UNO và cộng sự đối chiếu với kết quả phân tích bằng số bằng phần mềm chuyên dụng DIARIST thực hiện trên mô hình tương tác động lực đoàn tàu - đường ray - kết cấu. Phần phụ tải xung kích tập trung nghiên cứu cho thành phần có ảnh hưởng lớn là i_α. Mô hình đoàn tàu, kết cấu cầu dầm liên tục được mô phỏng thực tế và kết quả đối chiếu so sánh được Masakazu UNO và các cộng sự [8] được trình bày dưới đây.

3.2. Mô hình đoàn tàu

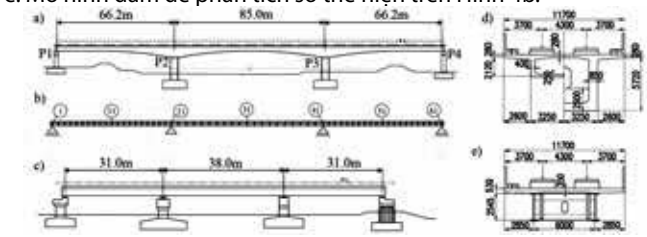
Đoàn tàu Shinkansen tiêu chuẩn và sử dụng mô hình tàu tải 16 toa với chiều dài toa tàu là 25 m, khoảng cách giữa các toa là 17,5 m. Tải trọng trục được đặt là 160 kN dựa trên các đoàn tàu thực tế. Giả định tốc độ di chuyển không đổi trong suốt thời gian qua cầu.



Hình 3. Mô hình đoàn tàu tốc độ cao (Shinkansen) của Nhật Bản

3.3. Mô hình một số dạng cầu dầm liên tục trên ĐSTĐC

Các cầu dầm liên tục được phân tích dựa trên kích thước và thông số mặt cắt ngang trung bình của chúng trên tuyến đường sắt Shinkansen. Các thông số phân tích được xác định dựa trên 4 cầu với dầm liên tục ba nhịp và 2 cầu với dầm liên tục 4 nhịp làm mô hình. Kết cấu ray cho cả dầm hộp PC và dầm liên hợp thép - bê tông cốt thép là ray 60 kg và cấu tạo dạng đường ray tấm bản. Hằng số giảm chấn cầu ξ được lấy bằng 2% dựa trên các phép đo trên dầm đơn giản thực tế. Sơ đồ bố trí chung và cấu tạo mặt cắt ngang của một số loại cầu dầm liên tục điển hình thể hiện trên Hình 4 a,c,d và e. Mô hình dầm để phân tích số thể hiện trên Hình 4b.



Hình 4. Dầm liên tục điển hình của ĐSTĐC: a), b) và d) - Sơ đồ nhịp, mô hình số và mặt cắt ngang dầm hộp BTDƯL; e) và e) - Sơ đồ nhịp và mặt cắt ngang dầm liên hợp thép - bê tông cốt thép

3.4. Đối chiếu kết quả phân tích số và phân tích theo phương pháp đơn giản của tiêu chuẩn Nhật Bản

** Kết quả phân tích:*

Kết quả phân tích phản ứng động theo phương pháp số bằng phần mềm DIARIST được sử dụng để phân tích tần số dao động tiên lượng các đỉnh cộng hưởng. Các thông số cấu tạo chủ yếu và kết quả phân tích tần số cho 6 mô hình cầu dầm liên tục điển hình sử dụng cho ĐSTĐC ở Nhật Bản trình bày trên Bảng 1. Đỉnh cộng hưởng nhận được từ phân tích số được đối chiếu với kết quả phân tích theo phương pháp đơn giản theo các phương trình (10) và (11) giới thiệu trong Bảng 2 lấy làm cơ sở để tính thông số α theo công thức (8).

Công thức (5) và (8) có cùng bản chất vật lý và chỉ ra các tham số vận tốc đoàn tàu (v), chiều dài nhịp (Lb) và tần số cơ bản (f1) có

ảnh hưởng trực tiếp tới phụ tải xung kích do yếu tố tốc dộ (iα). Do cấu tạo phức tạp, đa dạng về kích thước của các công trình cầu thực tế, việc sử dụng công thức (3) và biểu đồ trên Hình 1 để tính toán tần số (f_1) thể hiện còn chưa xét đến yếu tố quan trọng còn như sự thay đổi chiều cao và độ cứng dọc cầu hay các cấu tạo của đường ray, lan can... Khi dùng tham số này để dẫn suất ra tỷ số α theo công thức (8) và hệ số i_α dựa theo tỷ lệ L_b/L_v của biểu đồ trên Hình 2 đến sự khác biệt như thể hiện trong Bảng 3. Biểu đồ phân tích số thể hiện ảnh hưởng của tốc độ tàu V và chiều dài nhịp L_b đến hệ số i_α trên Hình 5.

Bảng 1. Các sơ đồ cầu dầm liên tục được nghiên cứu và thông số kỹ thuật mặt cắt ngang và tần số dao động

Trường hợp	Loại kết cấu Sơ đồ kết cấu nhịp cầu (m)	Chiều cao mặt cắt ngang	Tỷ lệ các nhịp		Thông số kỹ thuật của mặt cắt ngang			Tần số f_1 (Hz)		
			$\frac{L_1}{L_2}$	$\frac{L_1}{L}$	Theo phân tích số E (kN/mm²)	Theo nhịp giản đơn I (m⁴)	Theo biểu đồ hình 1 KL phân bố m (kg/m)			
1	Dầm hộp BTDƯL 66,2+85,0+66,2	Thay đổi	1,00	0,779	31	6,170	44,183	0,785	0.448	0,520
2	Dầm hộp BTDƯL 44,3+60,0+44,3	Thay đổi	1,00	0,738	31	9,861	36,417	1,891	1,252	1,333
3	Dầm hộp BTDƯL 44,3+60,0+60,0+44,3	Thay đổi	1,00	0,738	31	9,861	36,417	1,717	1,252	1,330
4	Thép-liên hợp BT 28,9+34,0+28,9	Không đổi	1,00	0,850	200	0,554	33,578	3,023	2,446	2,530
5	Thép-liên hợp BT 31,0+38,0+31,0	Không đổi	1,00	0,816	200	0,831	39,403	3,025	2,213	2.450
6	Thép-liên hợp BT 31,0+38,0+38,0+31,0	Không đổi	1,00	0,816	200	0,813	39,403	2,805	2,213	2,450

Bảng 2. Kết quả phân tích tần số riêng và tốc độ cộng hưởng

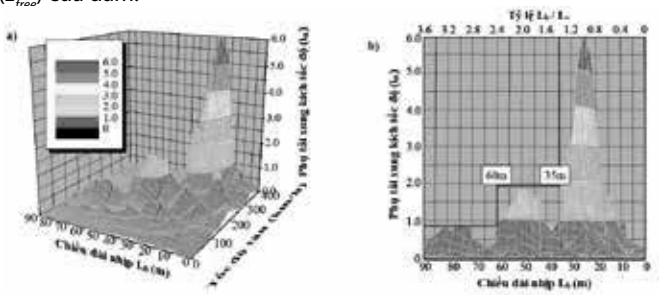
Trường hợp	Tần số tự nhiên (Hz)			Tốc độ cộng hưởng V (km/h)								
		Phương trình (10)			Phương trình (11)		Dựa trên phân tích số					
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Nhịp biên	Nhịp giữa	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
1	0,785	1,449	2,169	71	130	195	374	480	70	130	190	320
2	1,891	3,193	4,174	170	287	376	603	817	170	300	-	-
3	1,674	2,451	3,517	151	221	317	534	723	150	230	2320	390
4	3,023	4,328	5,475	272	390	493	629	740	270	390	-	-
5	3,025	4,513	5,664	272	406	510	675	828	270	340	-	-
6	2,805	3,774	4,961	252	340	446	626	767	250	340	-	-

Kết quả trên Bảng 1 và Bảng 3 cho thấy sự chênh lệch đáng kể về giá trị tần số tính theo phân tích số và phương pháp đơn giản: Tần số dao động tính theo phương pháp đơn giản nhỏ hơn từ -20,5% đến -33,8% đối với dạng dầm liên tục BTDƯL và nhỏ hơn từ -12,7% đến -19,0% đối với dạng dầm liên tục thép - bê tông cốt thép liên hợp. Sự khác biệt về giá trị phụ tải xung kích do tốc độ (i_α) tính theo 2 phương pháp là rất lớn: Với nhịp giữa i_α tính theo phương pháp đơn giản lớn hơn từ +68,3% đến +321,3% đối với dạng dầm liên tục BTDƯL và lớn hơn từ +322% đến +536% đối với dạng dầm liên tục thép - bê tông cốt thép liên hợp; với nhịp biên i_α tính theo phương pháp đơn giản lớn hơn từ +44% đến +304% đối với dạng dầm liên tục BTDƯL và lớn hơn từ +760% đến +839% đối với dạng dầm liên tục thép - bê tông cốt thép liên hợp. Kết quả này trùng với các nghiên cứu của Lee và cộng sự cho ĐSTĐC ở Hàn Quốc [7].

4. ĐIỀU CHỈNH ĐỘ CHÍNH XÁC CỦA PHƯƠNG PHÁP ĐƠN GIẢN HÓA THEO TIÊU CHUẨN NHẬT BẢN

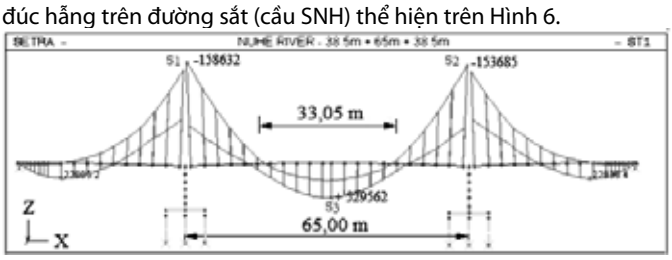
Mặc dù tính toán theo phương pháp đơn giản hóa của tiêu chuẩn Nhật Bản thể hiện mức độ an toàn nhưng độ chênh lệch quá lớn về giá trị i_α sẽ làm phức tạp quá trình phân tích kết cấu. Vấn đề là ở khâu xác định tần số dao động. Nhiều nghiên cứu và công thức (3) cho thấy tần số dao động của kết cấu phụ thuộc vào chiều dài nhịp (L_b). Biểu đồ trên Hình 1 theo quy định của Eurocodes đã xét đến ảnh hưởng của yếu tố liên tục khi điểm đổi dấu của biểu đồ mô-men hay biểu đồ độ võng không đi qua tọa độ tim trụ, tuy nhiên chưa xét đến sự thay đổi độ cứng của dầm do chiều cao mặt cắt thay đổi. Với các cầu liên tục, đặc biệt là các cầu dầm hộp BTDƯL, do yêu cầu công nghệ đúc hẳng dẫn đến chiều cao dầm và độ cứng chống uốn thay đổi đáng kể [5, 6]. Điều này dẫn đến điểm chuyển đổi mô-men

hay chiều của độ võng không ở gối trung gian và khác với chỉ dẫn ở Hình 1. Vì vậy, cần xác định chính xác hơn chiều dài tự do dao động (L_{free}) của dầm.



Hình 5. Ảnh hưởng của tốc độ tàu V và chiều dài nhịp L_b đến hệ số i_α: a) - Ảnh hưởng của tốc độ tàu V và chiều dài nhịp cầu L_b đến phụ tải xung kích i_α; b) - Mối quan hệ giữa chiều dài nhịp cầu L_b và phụ tải xung kích i_α lớn nhất

Theo nhiều nghiên cứu, chiều dài tự do (L_{free}) của nhịp chính của các cầu dạng khung - dầm liên tục có thể được xác định từ biểu đồ bao mô-men thu được trong quá trình thiết kế [3, 5, 6]. Ví dụ về xác định chiều dài tự do thực tế của nhịp chính của một cầu liên tục đúc hẫng trên đường sắt (cầu SNH) thể hiện trên Hình 6.



Hình 6. Ví dụ về xác định chiều dài tự do của nhịp chính cầu liên tục BTDƯL đúc hẫng dựa trên biểu đồ mô-men (cầu SNH)

Bằng phương pháp phân tích biểu đồ mô-men như trên Hình 6, thu được chiều dài tự do như sau:

L_{free} = (0,53 ÷0,85) L_b với dầm liên tục BTDƯL chiều cao mặt cắt thay đổi (12)

L_{free} = (0,87 ÷0,96) L_b với dầm liên tục Thép - BT liên hợp chiều cao mặt cắt không đổi

Tần số dao động tự nhiên được xác định bằng cách áp dụng công thức của dầm giản đơn (1) nhưng với chiều dài tự do thực tế ($L_{free(2)}$) [3]:

$$f_1^{**} = \frac{\pi}{2(L_{free})^2}\sqrt{\frac{E_c I_g}{m}} \quad (13)$$

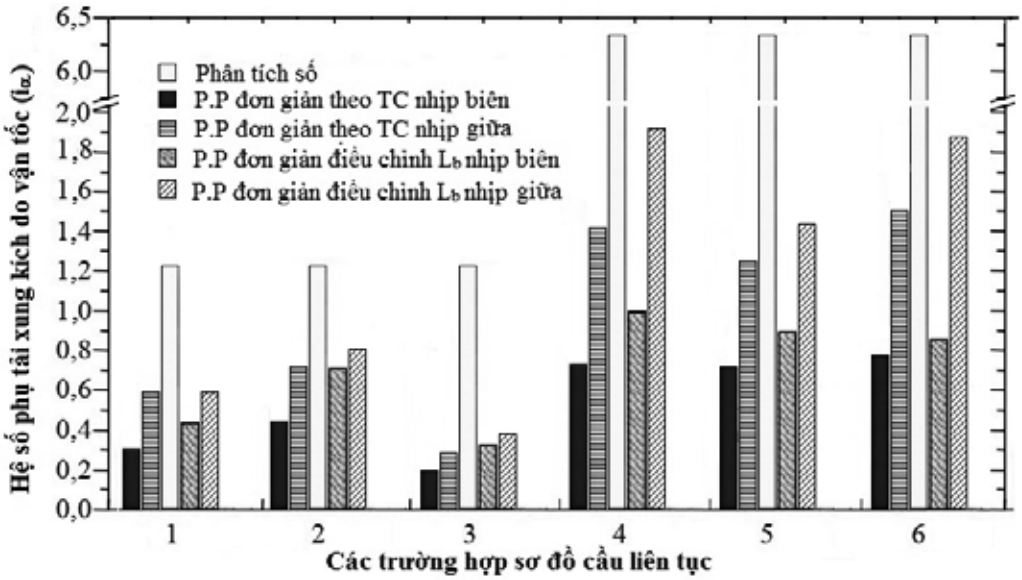
Trong đó: $L_{free(2)}$ là chiều dài tự do thực có xét đến ảnh hưởng tăng độ cứng do các cáp ngoài (m); f_1^{**} là tần số dao động theo mode 1 ứng với chiều dài tự do thực tế (Hz).

Sử dụng công thức (13) tính lại được các thông số liên quan và tính được hệ số i_α bằng phương pháp đơn giản có điều chỉnh theo chiều dài tự do dao động thể hiện trên hình Bảng 3. Với việc điều chỉnh chiều dài tự do của nhịp, mức độ chênh lệch về giá trị phụ tải xung kích do tốc độ (i_α) tính theo theo phương pháp đơn giản đã gần sát hơn với kết quả phân tích sô: Với nhịp giữa i_α lớn hơn từ +14,2% đến +34,8% đối với dạng dầm liên tục BTDƯL và lớn hơn từ +12,9% đến +40,1% đối với dạng dầm liên tục thép - bê tông cốt thép liên hợp; với nhịp biên i_α tính theo phương pháp đơn giản lớn hơn từ +30,5% đến +62,4% đối với dạng dầm liên tục BTDƯL và chênh lệch từ +12,7% đến +27,7% đối với dạng dầm liên tục thép - bê tông cốt thép liên hợp.

Bảng 3. So sánh kết quả phân tích số và kết quả tính toán đơn giản theo tiêu chuẩn thiết kế của Nhật Bản và kết quả tính toán đơn giản có điều chỉnh chiều dài tự do dao động của nhịp

Trường hợp	Phân tích số			P/p đơn giản theo tiêu chuẩn						P/p đơn giản điều chỉnh chiều dài L_b					
	Tần số tự nhiên f_1 (Hz) (*)	Hệ số i_α		Tần số tự nhiên f_1^* (Hz)		Hệ số i_α				Tần số tự nhiên f_1^{**} (Hz) Nhịp biên		Hệ số i_α			
					Nhịp biên		Nhịp giữa					Nhịp giữa			
		Nhịp biên (**)	Nhịp giữa (***)	Giá trị	Sai % với (*)	Giá trị	Sai % với (**)	Giá trị	Sai % với (***)	Giá trị	Sai % với (*)	Giá trị	Sai % với (**)	Giá trị	Sai % với (***)
1	0,785	0,299	0,569	0,520	-33,8	1,210	+304	1.210	+113	0,889	+14,5	0,421	+40,8	0,650	+14,2
2	1,891	0,499	0,719	1,333	-29,5	0,721	+44,5	1,210	+68,3	2,226	+17,7	0,651	+30,5	0,860	+19,6
3	1,674	0,197	0,287	1,330	-20,5	1,210	+514	1,210	+321	2,226	+33,0	0,320	+62,4	0,387	+34,8
4	3,023	0,736	1,370	2,530	-16,3	6,364	+765	6,364	+365	2,942	-2,67	0,950	+29,7	1,920	+40,1
5	3,025	0,678	1,222	2.450	-19,0	6,364	+839	6,364	+536	3.044	+0,63	0,864	+27,4	1,380	+12,9
6	2,805	0,740	1,507	2,450	-12,7	6,364	+760	6,364	+322	2,764	-1,46	0,834	+12,7	1,880	+24,8

Biểu đồ so sánh hệ số i_α thể hiện mức độ gia tăng của phụ tải xung kích do yếu tố tốc độ đoàn tàu theo kết quả phân tích số, kết quả tính theo tiêu chuẩn và kết quả tính theo tiêu chuẩn có xét điều chỉnh chiều dài tự do của nhịp thể hiện trên Hình 7.



Hình 7. Biểu đồ so sánh kết quả phân tích số, kết quả tính toán đơn giản theo tiêu chuẩn thiết kế của Nhật Bản và kết quả tính toán đơn giản có điều chỉnh chiều dài tự do L_b của nhịp

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Nghiên cứu mở rộng phương pháp tính toán đơn giản theo tiêu chuẩn Nhật Bản cho việc đánh giá hệ số gia tăng hiệu ứng động lực do yếu tố vận tốc (i_α) đã thu được một số kết quả thể hiện qua một số kết luận sau đây:

- So sánh kết quả xác định i_α bằng phân tích số với phương pháp tính toán đơn giản cả theo tiêu chuẩn và theo phương pháp có điều chỉnh chiều dài L_b đều lớn hơn so với kết quả phân tích số. Điều này cho thấy tính toán theo các phương pháp đơn giản đều thiên về an toàn. Tuy nhiên, phương pháp tính toán đơn giản theo tiêu chuẩn có độ an toàn quá cao.

- Việc xác định chiều dài tự do dao động của nhịp (L_{free}) là quan trọng ảnh hưởng lớn đến giá trị tần số dao động, cần được xét đến để giảm bớt mức độ an toàn quá lớn và cho phép việc phân tích hiệu ứng động lực của các cầu dầm liên tục trên ĐSTĐC phù hợp thực tế và tiết kiệm chi phí hơn.

- Khi phân tích hiệu ứng động lực cho kết cấu cầu liên tục trên ĐSTĐC có thể sử dụng kết hợp việc xác định tần số dao động tự nhiên (f_1) bằng các phần mềm phân tích kết cấu bằng phương pháp số thông dụng với phương pháp của tiêu chuẩn Nhật Bản để đánh giá hiệu ứng động lực cho cả kết cấu cầu dầm giản đơn và dầm liên tục một cách đơn giản với đủ độ chính xác và tin cậy.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] TCVN 13594-1:2022. Thiết kế cầu đường sắt khổ 1.435 mm, vận tốc đến 350 km/h - Phần 1-10, 2022, 2023.

[2] EN 1990+A2. Basic of Structure Design. EN 1991-2, Action on Bridge - Traffic loads on Bridges.

[3] ACI 358. 1R-92.

[4] AASHTO LRFD Edition 2007: American Association of State Highway and Transportation Officials, for geotechnical design.

[5] Ataei, S., Miri, A. Investigating dynamic amplification factor of railway masonry arch bridges through dynamic load tests. Construction and Building Materials, 183, pp. 693-705, 2018. Internet: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.151.

[6] L. Ma, L., Zhang, W., Cai, C. S., Li, S. The dynamic amplification factors for continuous beam bridges along high-speed railways. Advances in Structural Engineering, 24(11), pp. 2542-2554, 2021. Internet: https://doi.org/10.1177/13694332211003288.

[7] Lee, H.-H., Jeon, J.-C., Kyung, K.-S. Determination of a reasonable impact factor for fatigue investigation of simple steel plate girder railway bridges. Engineering Structures, 36, pp. 316-324, 2012. Internet: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.12.021.

[8] Masakazu UNO, Masamichi SOGABE, Yukihiro TANIMURA, Makoto KANAMORI. A Study on Dynamic Response of the Railway Continuous Girder by Running High-Speed Train. Structural Engineering, Volume 53A (March 2007).

■Ngày nhận bài: 09/3/2026 ■Ngày sửa bài: 18/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 27/3/2026

Nghiên cứu ứng dụng điều khiển thông minh trong quản lý, ổn định nhiệt độ

Research on the application of intelligent control in temperature management and stabilization

> THS LÊ VĂN TÂM
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
Email: tamlv.ddt@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Hiện nay, ứng dụng điều khiển thông minh trong quản lý, giữ ổn định nhiệt độ trong các lò nung đang là vấn đề thu hút được nhiều quan tâm, đặc biệt là trong các ngành công nghiệp luyện thép và lò nung thủy tinh, gốm sứ nhằm mục đích tối ưu hóa năng lượng. Việc ứng dụng các phương pháp điều khiển hiện đại trong đó sử dụng mạng nơ-ron tuy được nghiên cứu nhiều nhưng việc áp dụng phương pháp này vào thực tế còn chưa được phổ biến. Nội dung của bài báo nghiên cứu phương pháp luyện mạng nơ-ron để điều khiển, quản lý, giữ ổn định nhiệt độ lò nhiệt. Kết quả nghiên cứu đã chứng minh tính ứng dụng của mạng nơ-ron và những tính năng ưu việt của nó trong thực tế.

Từ khóa: Điều khiển thông minh; mạng nơ-ron; lò nhiệt.

ABSTRACT

Currently, the application of intelligent control in managing and stabilizing temperature in furnaces is attracting much attention, especially in the steelmaking and glass/ceramic industries, with the aim of optimizing energy. While the application of modern control methods, including neural networks, has been extensively studied, its practical application remains limited. This paper investigates the training of neural networks for controlling, managing and stabilizing furnace temperature. The research results demonstrate the applicability of neural networks and their superior features in practice.

Keywords: Intelligent control; neural networks; heat system.

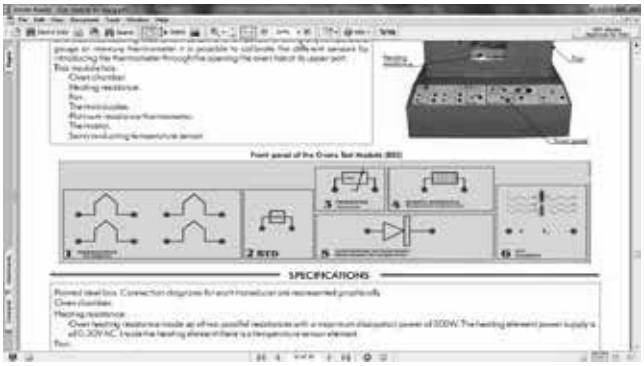
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Lò nhiệt là mô hình phi tuyến và là khâu quán tính nhiệt, để đạt tới nhiệt độ cần cung cấp, mất thời gian khá dài. Lò điện trở là thiết bị biến đổi điện năng thành nhiệt năng thông qua dây đốt và thường được dùng để nung, nấu chảy kim loại màu và hợp kim màu [1]. Với điều khiển kiểu đóng - ngắt (ON-OFF), trong quá trình điều khiển nhiệt, rơ-le nhiệt sẽ đóng ngắt khi nhiệt độ lò thấp hoặc lớn hơn giá trị đặt [2]. Do quán tính của quá trình nhiệt nên phương pháp điều khiển ON-OFF thường có độ sai số đến 10% [3]. Trong các nghiên cứu [6, 7], các nhóm tác giả đã đề xuất nghiên cứu phương pháp điều khiển PID số trong điều khiển lò nhiệt. Tuy nhiên, các bộ điều khiển PID được sử dụng rộng rãi đơn giản, hoạt động tin cậy nhưng chất lượng không cao. Trong những năm gần đây, sự phát triển mạnh mẽ của khoa học kỹ thuật trong công nghệ chế tạo vật liệu mới và công nghệ thông tin đã cho ra đời các bộ vi xử lý mạnh, kích cỡ nhỏ gọn, tiêu thụ điện năng thấp và lý thuyết điều khiển hiện đại có vai trò hết sức quan trọng để giải quyết nhiều vấn đề trên [4, 5]. Bài báo đưa ra phương án xây dựng bộ điều khiển mờ lai, có nghĩa là kết hợp bộ điều khiển PID với logic mờ. Bộ điều khiển mờ được đưa ra là loại SUGENO. Đây là bộ điều khiển kết hợp nguyên lý điều khiển mờ với mạng nơ-ron.

2. TỔNG HỢP VÀ LUYỆN MẠNG NƠ-RON

Mô-đun thực nghiệm trên Hình 1(a) về cơ bản được cấu thành từ một lò nhiệt, nó bao gồm phần sinh nhiệt là một điện trở sấy và phần làm mát là một quạt gió. Nguồn công suất 220 V cấp cho điện trở sấy và nguồn này được điều khiển thông qua tín hiệu điều khiển là 12 VDC. Khi ta tiến hành cấp điện cho điện trở sấy thì nhiệt độ trong lò sẽ tăng lên. Điện áp cấp cho quạt gió là điện áp một chiều trong dải 0 - 12 V. Bằng cách thay đổi điện áp nguồn cấp cho quạt thì ta có thể thay đổi được tốc độ của quạt, tức là thay đổi tốc độ làm mát buồng lò.

a)



b)

Hình 1. Mô hình thực nghiệm (a) và sơ đồ đấu dây (b)

Bộ phận giám sát nhiệt độ của lò là 4 loại cảm biến bao gồm: Cặp nhiệt, nhiệt kế điện trở platin (RTD), nhiệt kế điện tử (NTC) và một cơ chế bán dẫn nhạy với nhiệt độ (điốt). Việc đấu nối các cảm biến nhiệt thực hiện theo sơ đồ đấu dây trên Hình 1b.

Tín hiệu phản hồi nhiệt độ thực tế trong lò thông qua các mạch chuyển đổi sẽ cho biết nhiệt độ thực tế. Căn cứ vào nhiệt độ thực tế của lò, bộ điều khiển có nhiệm vụ tính toán và điều khiển cấp nguồn cho điện trở sấy hay quạt gió để đạt được nhiệt độ đặt và giữ ổn định nhiệt độ trong lò.

Ta tổng hợp và luyện mạng nơ-ron cho bộ điều khiển nhiệt độ theo các bước sau:

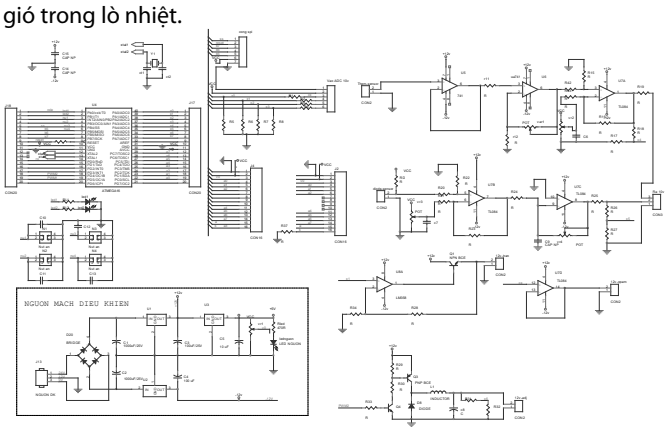
(i) Thiết kế mạch trung gian nhằm chuyển đổi tín hiệu lấy từ cảm biến cấp cho máy tính và truyền tín hiệu từ bộ điều khiển để điều khiển lò nhiệt.

(ii) Điều khiển nhiệt độ thông qua chương trình xây dựng trong matlab để lấy dữ liệu thực tế đưa vào luyện mạng nơ-ron.

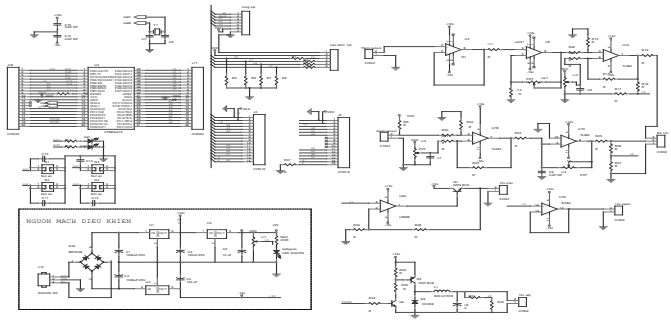
(iii) Từ dữ liệu thực tế thu được ta tiến hành luyện mạng nơ-ron để xây dựng cấu trúc bộ điều khiển nhiệt độ lò.

2.1. Thiết kế mạch trung gian

Mạch có 2 cổng chuyển đổi tương tự đầu vào trên Hình 2a lấy tín hiệu từ cảm biến cấp cho máy tính. Một cổng biến đổi tín hiệu từ cảm biến cặp nhiệt thành tín hiệu dải 0 - 10 V. Một cổng biến đổi tín hiệu từ cảm biến RTD, NTC hoặc điốt thành tín hiệu dải 0 - 10 V. Mạch có 2 cổng ra tương tự trên Hình 2b để điều khiển lò nhiệt. Cổng lặp tương tự 1 biến đổi dải 0 - 10 V thành dải 0 - 12 V phù hợp với tín hiệu điều khiển điện trở sấy. Cổng lặp tương tự 2 biến đổi dải 0 - 10 V thành dải 0 - 12 V có tổng trở đầu ra thấp phù hợp điều khiển quạt gió trong lò nhiệt.



a)



b)

Hình 2. Mạch trung gian

2.2. Chương trình điều khiển lò nhiệt được thiết lập trong Matlab

Để tăng nhiệt độ của lò ta tiến hành cấp điện cho điện trở sấy. Khi nhiệt độ lò đạt giá trị nhiệt độ đặt thì ngắt điện khỏi điện trở sấy. Ngược lại, để giảm nhiệt độ của lò ta tiến hành cấp điện cho quạt gió. Khi nhiệt độ lò bằng giá trị nhiệt độ đặt thì ta tắt quạt. Để giữ ổn định nhiệt độ lò trong suốt quá trình làm việc với khoảng chênh lệch nhiệt độ không quá 2°C ta có thể điều khiển kết hợp điện trở sấy và quạt. Nếu nhiệt độ lò thấp hơn 2°C so với nhiệt độ đặt thì tự động bật điện trở sấy. Nếu nhiệt độ lò cao hơn 1°C so với nhiệt độ đặt thì tự động bật quạt gió.

Bảng 1. Trích dữ liệu luyện mạng nơ-ron

Tín hiệu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
e	-2.1586	-1.6590	-1.1592	-0.6592	-0.1593	0.3407	0.8407	1.3406	1.8403	2.3399
mu	10	10	10	10	10	10	0	0	0	0
mu1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u	10	10	10	10	10	0	0	0	0	0
u1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10

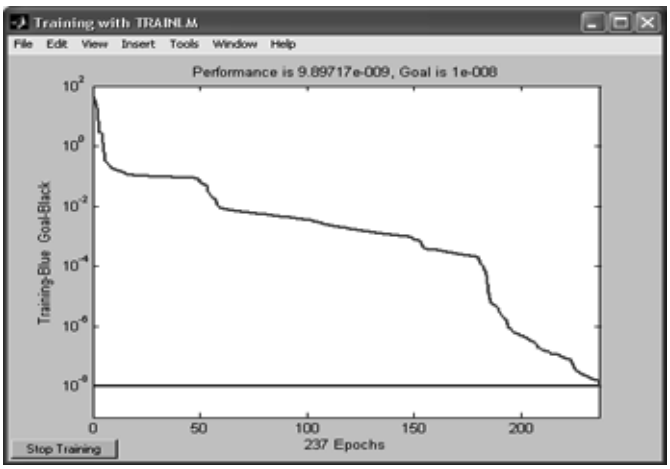
Để nhớ các thông tin thực tế của đầu vào và đầu ra phục vụ cho quá trình luyện mạng ta tiến hành lưu trữ các dữ liệu này dưới dạng các file thông tin. Thông tin đầu vào phục vụ luyện mạng bao gồm ba biến: Biến e là sai lệch giữa nhiệt độ đặt và nhiệt độ thực tế, biến mu và mu1 là biến nhớ trạng thái trước đó của u và u1, trong đó u và u1 là hai biến đầu ra điều khiển quạt gió và điện trở sấy. Thông tin đầu ra gồm 2 biến u và u1. Trích một phần dữ liệu điều khiển lò nhiệt được thể hiện trong Bảng 1.

2.3. Thực hiện luyện mạng nơ-ron để xây dựng cấu trúc bộ điều khiển

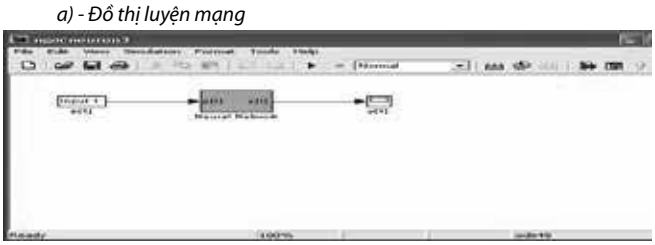
Căn cứ vào dữ liệu thu được ở bước trên ta tiến hành luyện mạng nơ-ron để xây dựng cấu trúc bộ điều khiển lò nhiệt. Chương trình luyện mạng trên phần mềm Matlab như sau:

```
net = newff([-100 100;-20 20;-20 20],[20 10 2],{'tansig' 'tansig' 'purelin'},'trainlm');
net=init(net);
net.trainParam.epochs= 400 %Maximum number of epochs to train
net.trainParam.goal= 0.0001^2 %Performance goal
net.trainParam.show =2 %Epochs between showing progress
net = train(net,D,E);
gensim(net,0.001);
```

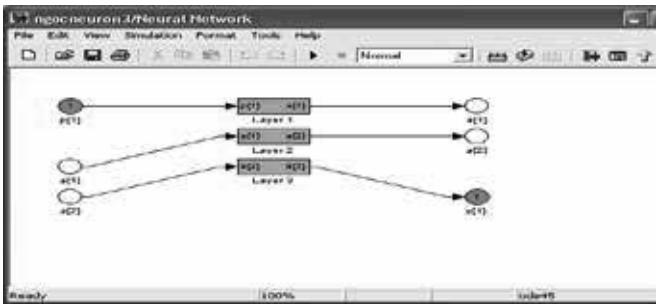
Đồ thị thể hiện quá trình luyện mạng và cấu trúc của mạng được thể hiện ở Hình 3:



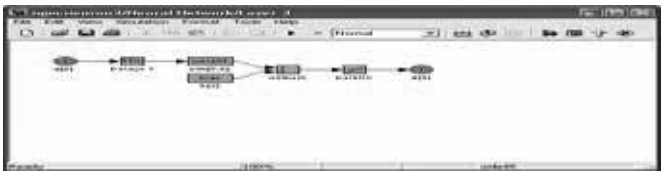
a) - Đồ thị luyện mạng



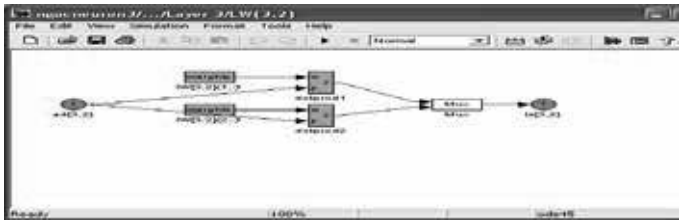
b) - Cấu trúc tổng quát



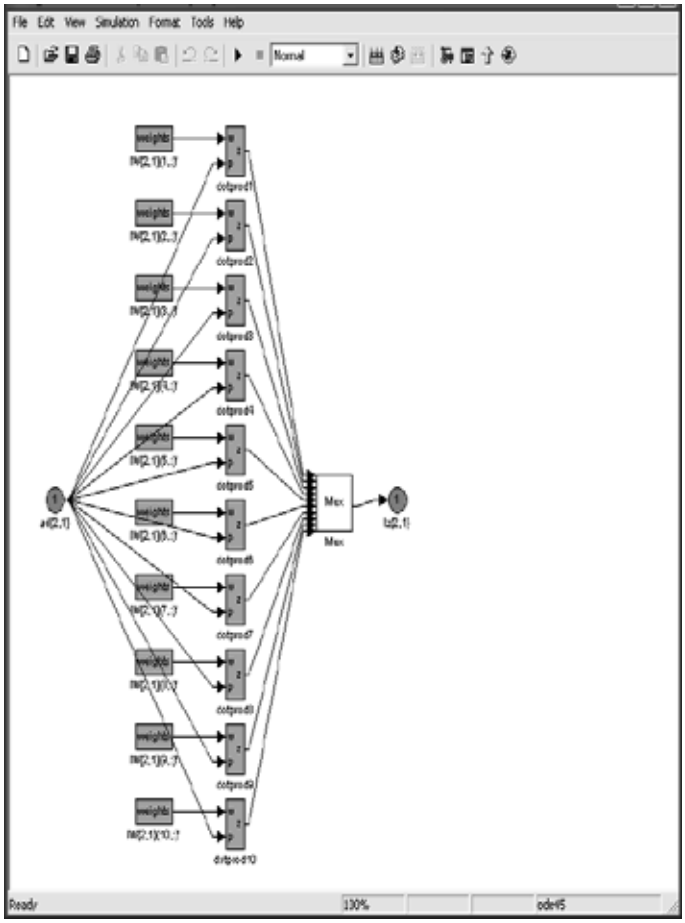
c) - Cấu trúc của khối Neural Network



d) - Cấu trúc của khối Layer 3



e) - Cấu trúc của khối weight thuộc Layer 3



f) - Cấu trúc của khối weight thuộc Layer 2

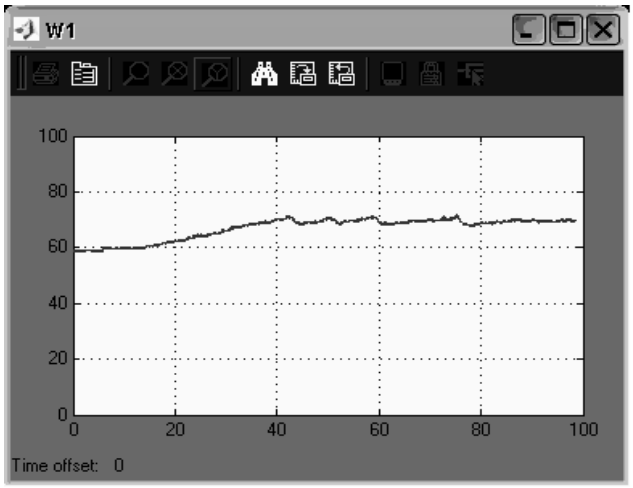
Hình 3. Đồ thị luyện mạng và cấu trúc mạng nơ-ron

Theo chương trình luyện mạng thì số lần luyện tối đa là 400 lần, sai số là 10^{-8}. Khi đạt được một trong hai yếu tố trên thì ngừng luyện. Kết quả luyện mạng thu được trong Hình 3a, khi số lần luyện mạng là 237 lần thì đạt sai số 10^{-8}, khi đó chương trình ngừng luyện và đưa ra kết quả cấu trúc mạng như Hình 3b. Đặc điểm của mạng nơ-ron thu được là mạng có 3 lớp: Lớp đầu vào có 20 nút, lớp ẩn với 10 nút và lớp đầu ra có 2 nút thể hiện trên Hình 3.

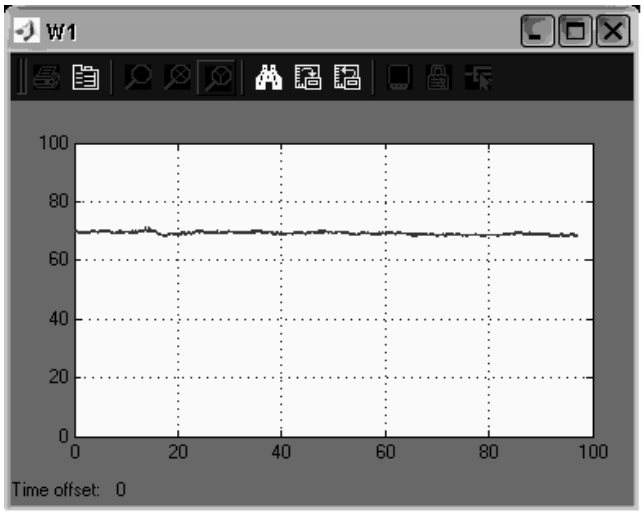
3. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

Từ cấu trúc mạng nơ-ron thu được ta thiết lập mô hình điều khiển lò nhiệt thông qua phần mềm Matlab. Tại thời điểm khảo sát, thông qua tín hiệu phản hồi từ cảm biến thì nhiệt độ của lò đang là 60°C. Ta tiến hành đặt nhiệt độ lò lên 70°C.

Bộ điều khiển gửi tín hiệu điều khiển tới lò thông qua các cổng Analog Output 1 và 2 của card PCI. Kết quả thay đổi nhiệt độ lò được thể hiện trong Hình 4.



a) - Khi tăng nhiệt độ từ 60°C lên 70°C



b) - Thực hiện giữ ổn định nhiệt độ ở 70°C

Hình 4. Kết quả điều khiển nhiệt độ lò nhiệt

4. KẾT LUẬN

Khi sử dụng mạng nơ-ron để điều khiển lò nhiệt đã đem lại kết quả đáng tin cậy. Ngoài việc điều khiển để đạt nhiệt độ mong muốn một cách chính xác, mạng còn có khả năng giữ ổn định nhiệt độ lò nhiệt theo nhiệt độ đặt với sai số không quá 2°C. Đồ thị ổn định nhiệt độ (Hình 4b) là tương đối bằng phẳng. Kết quả thu được đã chứng minh tính năng và khả năng ứng dụng của mạng nơ-ron trong thực tế.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT25-26.60.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Sobota, J. and Schlegel, M. Iterative feedback tuning of PID controller. Process control 2004, pp. 1-16, University of Pardubice, Pardubice, 2004. Internet: http://www.kky.zcu.cz/en/publications.

[2] Ho W. K., Hong Y., Hansson A., Jalmarsson H. & Deng J. W.. Relay auto-tuning of PID controller using interative feedback tuning. Automatica, vol. 39, Issue 1, pp. 149-157, January 2003, doi.org/10.1016/S0005-1098(02)00201-7.

[3] Yu C. C. Autotuning of PID controller-A relay feedback approach. Springer-Verlag, London, 2006, doi.org/10.1007/b137042.

[4] TS Huỳnh Thái Hoàng. Hệ thống điều khiển thông minh. NXB. Đại học Quốc gia TP.HCM, 2006.

[5] Bùi Công Cường, Nguyễn Doãn Phước. Hệ mờ - Mạng nơ ron và ứng dụng. NXB. KH&KT, 2001.

[6] Đặng Thế nhân, Nguyễn Phong Lưu, Nguyễn Văn Đông Hải. Điều khiển nhiệt độ lò nhiệt ứng dụng giải thuật PID số. Tạp chí Khoa học, Đại học Đồng Tháp, số 35, tr. 106-110, 2018. Internet: https://dthujs.vn/index.php/dthujs (Truy cập tháng 02/2026).

[7] Phùng Tiến Duy, Nguyễn Đức Nhật, Nguyễn Đức Anh, Trần Trung Dũng, Nguyễn Duy Hiển, Mai Văn Chung. Thiết kế bộ điều khiển tự chỉnh định tham số PID cho đối tượng lò nhiệt. Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Hùng Vương, tập 19, số 2, tr. 88-100, 2020. Internet: https://www.hvu.edu.vn (Truy cập tháng 02/2026).

■Ngày nhận bài: 10/02/2026 ■Ngày sửa bài: 26/02/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 06/3/2026

Điều khiển tối ưu hệ thống định vị động tàu biển dựa trên thuật toán MPC và bộ quan sát Kalman mở rộng có xét đến ràng buộc điều khiển

Optimal control of marine dynamic positioning system based on MPC algorithm and extended Kalman observer considering control constraints

> TS NGUYỄN HỮU QUYỀN*, THS PHAN ĐĂNG ĐÀO
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email: quyennh.ddt@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu về thiết kế hệ thống điều khiển tối ưu cho định vị động (DP) tàu biển. Để giải quyết các thách thức về nhiễu môi trường và ràng buộc cơ cấu chấp hành, một cấu trúc điều khiển kết hợp giữa thuật toán Điều khiển dự báo mô hình (MPC) và bộ quan sát trạng thái Kalman mở rộng (EKF) đã được đề xuất. Trong đó, EKF đóng vai trò khử nhiễu đo lường và ước lượng các trạng thái vận tốc không đo trực tiếp được. Bộ điều khiển MPC được thiết kế để tối ưu hóa quỹ đạo chuyển động đồng thời đảm bảo các ràng buộc về lực đẩy và góc quay của hệ thống cơ cấu đẩy. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống có khả năng bám quỹ đạo chính xác, vận hành ổn định và tiết kiệm năng lượng hơn so với các phương pháp truyền thống. Kết quả mô phỏng trên phần mềm Matlab/Simulink cho thấy bộ điều khiển MPC đề xuất không chỉ đảm bảo tàu giữ vị trí ổn định với sai số thấp dưới tác động của sóng, gió, dòng chảy mà còn giảm đáng kể mức độ tiêu thụ năng lượng và hiện tượng quá tải của cơ cấu chấp hành so với bộ điều khiển PID thông thường.

Từ khóa: Định vị động tàu biển; điều khiển dự báo mô hình (MPC); bộ quan sát Kalman mở rộng (EKF); ràng buộc điều khiển; tối ưu hóa.

ABSTRACT

This paper presents a study on the design of an optimal control system for marine dynamic positioning (DP). To address challenges regarding environmental disturbances and actuator constraints, a control architecture combining Model Predictive Control (MPC) and an Extended Kalman Filter (EKF) observer is proposed. Within this framework, the EKF is utilized to suppress measurement noise and estimate unmeasurable velocity states. The MPC controller is designed to optimize the motion trajectory while strictly adhering to thrust and azimuth angle constraints of the propulsion system. Simulation results demonstrate that the system achieves high tracking accuracy, operational stability, and improved energy efficiency compared to conventional methods. Simulation results conducted in the Matlab/Simulink environment demonstrate that the proposed MPC controller not only ensures stable positioning with minimal error under the influence of wind, waves and currents but also significantly reduces energy consumption and actuator overload compared to conventional PID controllers.

Keywords: Marine dynamic positioning; Model Predictive Control (MPC); Extended Kalman Filter (EKF); control constraints; optimization.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống định vị động (Dynamic Positioning - DP) đóng vai trò sống còn trong các hoạt động kinh tế biển hiện đại như khoan dầu khí ngoài khơi, hỗ trợ lặn và vận hành tàu cứu hộ. Mục tiêu chính của hệ thống DP là duy trì tự động vị trí và hướng của tàu hoặc bám theo quỹ đạo định trước chỉ bằng cách sử dụng hệ thống cơ cấu đẩy. Tuy nhiên, việc điều khiển chính xác tàu biển luôn đối mặt với những thách thức lớn do đặc tính động lực học phi tuyến mạnh mẽ và tác động của các nhiễu động môi trường không xác định như sóng, gió và dòng chảy.

Trong thực tế vận hành, các tín hiệu đo từ cảm biến (như GPS hay la bàn) thường bị nhiễm nhiễu đo lường đáng kể, đồng thời một số biến trạng thái quan trọng như vận tốc thực của tàu thường

không thể đo đạc trực tiếp một cách chính xác. Do đó, việc thiết kế một bộ quan sát trạng thái (Observer) là vô cùng cần thiết để cung cấp thông tin đầu vào tin cậy cho bộ điều khiển. Thuật toán lọc Kalman mở rộng (EKF) đã chứng minh được hiệu quả trong việc xử lý các thành phần phi tuyến và lọc nhiễu hệ thống cũng như nhiễu đo lường, giúp nâng cao chất lượng ước lượng trạng thái cho tàu.

Về phương diện điều khiển, các cơ cấu đẩy trên tàu luôn có những giới hạn vật lý khắt khe về công suất tối đa và tốc độ thay đổi góc quay. Việc không xem xét các ràng buộc này trong quá trình thiết kế có thể dẫn đến hiện tượng bão hòa cơ cấu chấp hành, gây mất ổn định và làm giảm tuổi thọ thiết bị. Điều khiển dự báo mô hình (Model Predictive Control - MPC) đã trở thành một giải pháp ưu việt cho bài toán DP nhờ khả năng tối ưu hóa quỹ đạo trong khi vẫn đảm bảo tuân thủ nghiêm ngặt các ràng buộc về lực đẩy và góc quay. Nhiều nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc kết hợp MPC với các kỹ thuật phân bổ lực (Control Allocation) và bộ quan sát trạng thái để tối ưu hóa hiệu suất năng lượng và độ chính xác bám vị trí.

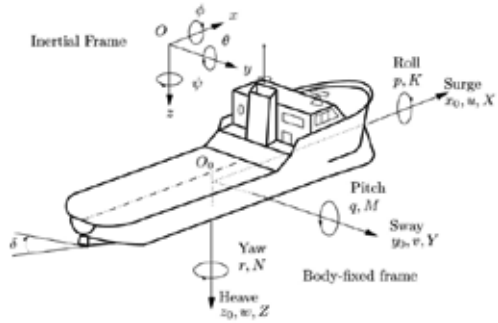
Bài báo tập trung vào việc xây dựng cấu trúc điều khiển tích hợp giữa bộ quan sát Kalman mở rộng (EKF) và thuật toán MPC có xét đến các ràng buộc điều khiển khắt khe. Cấu trúc đề xuất hướng tới việc nâng cao khả năng chống nhiễu, đảm bảo tính bền vững và tối ưu hóa năng lượng cho hệ thống DP tàu biển trong các điều kiện thực tế trên biển.

2. MÔ TẢ CHUYỂN ĐỘNG TÀU THỦY VÀ MÔ HÌNH TOÁN HỌC TÀU THỦY

Chuyển động của tàu thủy được mô tả giống như chuyển động của một vật rắn trong môi trường chất lỏng trong hệ tọa độ gắn với vật rắn (b-frame) $o_o x_o y_o z_o$, trọng tâm của vật rắn trùng với gốc tọa độ gắn vật rắn O_o, được mô tả như Hình 1. Chuyển động của tàu thủy có 6 bậc tự do được đặc trưng bởi các thành phần như Bảng 1 [1, 3]:

Bảng 1. Các loại chuyển động và tham số động học của tàu thủy [1]

STT	Loại chuyển động	Lực và mô-men	Vector vận tốc dài, vận tốc góc	Vị trí và góc Euler
1	trượt dọc (*surge*)	X	u	x
2	trượt ngang (*sway*)	Y	v	y
3	trượt đứng (*heave*)	Z	ω	z
4	lắc ngang (*roll*)	K	p	ϕ
5	lắc dọc (*pitch*)	M	q	θ
6	quay trở (*yaw*)	N	r	ψ



Hình 1. Mô tả thành phần chuyển động tàu thủy trong hệ tọa độ quy chiếu

2.1. Mô hình toán học mô tả chuyển động tàu thủy

2.1.1. Mô hình động học *(Kinematics)*

Mối quan hệ giữa vận tốc trong hệ thân tàu $\underline{\upsilon}=[u\ v\ w\ p\ q\ r]^T \in R^6$ và vận tốc trong hệ cố định $\underline{\eta}=[x\ y\ z\ \phi\ \theta\ \psi]^T \in R^6$ như sau :

$$\dot{\underline{\eta}}=J(\underline{\eta})\underline{\upsilon} \tag{1}$$

Trong đó: $J(\eta)$ là ma trận quay quanh trục Z.

2.1.2. Mô hình động lực học (Dynamics) $\dot{\underline{\eta}}=J(\underline{\eta})\underline{\upsilon}$

Phương trình mô tả chuyển động tàu thủy 6 bậc tự do được đưa ra trong [3] như sau:

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{\upsilon} \\ M\dot{\underline{\upsilon}} + C(\underline{\upsilon})\underline{\upsilon} + D(\underline{\upsilon})\underline{\upsilon} + g(\underline{\eta}) = \underline{\tau} + \underline{n}(\xi) \end{cases} \tag{2}$$

Trong đó:

$\underline{\eta}=[x\ y\ z\ \phi\ \theta\ \psi]^T \in R^6$ là vector vị trí, hướng trong hệ tọa độ trái đất (e-frame);

$J(\underline{\eta}) \in R^6$ là ma trận chuyển đổi;

$\underline{\upsilon}=[u\ v\ w\ p\ q\ r]^T \in R^6$ là vector vận tốc dài và vận tốc góc trong hệ tọa độ gắn với thân tàu (b-frame);

$M = M_{RB} + M_A$, trong đó M_{RB} là ma trận quán tính, M_A là ma trận quán tính do khối lượng nước kèm (added mass);

$C(\underline{\upsilon}) = C_{RB}(\underline{\upsilon}) + C_A(\underline{\upsilon})$, trong đó $C_{RB}(\underline{\upsilon})$ là ma trận Coriolis và hướng tâm, $C_A(\underline{\upsilon})$ là ma trận Coriolis và hướng tâm thủy động lực học;

$D(\underline{\upsilon}) = D + D_n(\underline{\upsilon})$, trong đó D là ma trận giảm chấn tuyến tính, $D_n(\underline{\upsilon})$ là ma trận giảm chấn phi tuyến thủy động lực học;

$\underline{n}(\xi)$ là nhiễu tác động vào tàu thủy bao gồm sóng, gió, dòng chảy đại dương…;

$\underline{\tau}$ là lực và mô-men được tạo ra bởi cơ cấu thực hiện của tàu bao gồm chân vịt, bánh lái.

2.2. Mô hình tàu thủy ba bậc tự do trong hệ thống điều khiển DP tàu thủy [2, 9]

Mô hình tàu thủy (nói chung) 3 bậc tự do xét trên mặt phẳng ngang được rút gọn từ phương trình (2) khi bỏ qua thành phần trượt đứng, lắc ngang, lắc dọc, có dạng:

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{\upsilon} \\ M\dot{\underline{\upsilon}} + C(\underline{\upsilon})\underline{\upsilon} + D(\underline{\upsilon})\underline{\upsilon} + g(\underline{\eta}) = \underline{\tau} + \underline{n}(\xi) \\ \tau = [\tau_u\ \tau_v\ \tau_r]^T \end{cases} \tag{3}$$

Trong đó: $\underline{\eta}=[x\ y\ \psi]^T \in R^3$, $J(\underline{\eta}) \in R^3$, $\underline{\upsilon}=[u\ v\ r]^T \in R^3$

Đối với mô hình tàu thủy 3 bậc tự do xét trong hệ thống điều khiển DP thì:

- Vector g(η) thường đại diện cho lực nổi và trọng trường (hydrostatic forces) tác động lên các bậc tự do như Roll (lắc ngang), Pitch (lắc dọc) và Heave (nhấp nhô).

Mô hình tàu thủy trong hệ thống DP chỉ xét trên mặt phẳng ngang, tàu không có lực phục hồi tự nhiên (không giống như một con lắc hay các bậc tự do ổn định tĩnh). Nếu không có lực đẩy, tàu sẽ trôi tự do chứ không tự quay về vị trí cũ. Do đó, $g(\eta) = 0$.

- Ma trận $C(\underline{\upsilon})$ mô tả các lực xuất hiện khi tàu vừa có vận tốc dài vừa có vận tốc quay. Tuy nhiên, do điều kiện đặc thù của hệ thống DP: Các hệ thống DP được thiết kế để giữ tàu đứng yên hoặc di chuyển với vận tốc cực thấp (vài knot). Khi $\upsilon \approx 0$, các thành phần bậc hai của vận tốc trong ma trận Coriolis υ^2 trở nên rất nhỏ và có thể bỏ qua mà không làm mất tính chính xác của mô hình. Khi xây dựng mô hình toán cho hệ thống điều khiển DP, các thành phần phi tuyến phức tạp như $C(\underline{\upsilon})\underline{\upsilon}$ thường được lược bỏ hoặc gộp chung vào ma trận cản D đã được tuyến tính hóa.

- Ma trận D được định nghĩa là ma trận cản thủy động lực học tuyến tính (Linear damping). Ở vận tốc thấp của tàu DP, lực cản tuyến tính này chiếm ưu thế hơn hẳn so với các lực động học phi

tuyến (Coriolis).

Do đó, mô hình tàu thủy 3 bậc tự do xét trong hệ thống điều khiển DP được viết gọn, theo [2]:

$$\begin{cases} \dot{\underline{\eta}} = J(\underline{\eta})\underline{\upsilon} \\ M\dot{\underline{\upsilon}} + D(\underline{\upsilon})\underline{\upsilon} = \underline{\tau} + \underline{n}(\xi) \\ \tau = [\tau_u\ \tau_v\ \tau_r]^T \end{cases} \quad (4)$$

Trong đó: $\underline{\eta} = [x\ y\ \psi]^T \in R^3, J(\underline{\eta}) \in R^3, \underline{\upsilon} = [u\ v\ r]^T \in R^3$

$\underline{\tau}$ là lực và mô-men được tạo ra bởi cơ cấu đẩy của tàu bao gồm chân vịt chính, chân vịt trợ động, bánh lái.

2.3. Mô hình cơ cấu chấp hành tàu thủy trong hệ thống DP

Trong hệ thống định vị động học (DP), mô hình toán học của cơ cấu đẩy (Thruster Model) là cơ cấu thực hiện nhận tín hiệu điều khiển từ bộ điều khiển tạo ra lực tác động lên thân tàu.

Mô hình này thường được chia thành hai phần chính: Động học của thiết bị đẩy và mô hình phân bổ lực (Thrust Allocation) [4, 10].

2.3.1. Mô hình động lực học của thiết bị đẩy (Thruster Dynamics)

Mỗi thiết bị đẩy không tạo ra lực tức thời mà có một độ trễ nhất định. Mô hình phổ biến nhất là hệ bậc nhất:

$$T_a\dot{\tau}_{act} + \tau_{act} = \tau_{cmd} \quad (5)$$

Trong đó:

τ_{cmd} là lực đẩy yêu cầu từ bộ điều khiển;

τ_{act} là lực đẩy thực tế tạo ra;

T_a là hằng số thời gian (Time constant), đặc trưng cho độ trễ đáp ứng của hệ thống cơ khí/thủy lực.

Các ràng buộc vật lý (Constraints): Đây là phần quan trọng nhất để đưa vào bài toán MPC.

Đối với cơ cấu đẩy trong hệ thống DP thường có ràng buộc về giới hạn độ lớn lực đẩy: $\tau_{min} \le \tau_{act} \le \tau_{max}$ (giới hạn công suất động cơ).

Và ràng buộc tốc độ (Rate limit): $|\dot{\tau}_{act}| \le \dot{\tau}_{max}$ (tốc độ thay đổi lực đẩy để bảo vệ hộp số và cánh chân vịt).

2.3.2. Mô hình lực đẩy dựa trên tốc độ quay (Propeller Model) [11]

Lực đẩy thường tỉ lệ thuận với bình phương tốc độ quay của chân vịt (n):

$$\tau = \rho D^4 K_T(J)n|n| \quad (6)$$

Trong đó:

P là khối lượng riêng của nước biển;

D là đường kính chân vịt;

K_T là hệ số lực đẩy (phụ thuộc vào hệ số tiến J);

n là tốc độ quay (vòng/phút hoặc vòng/giây).

2.3.3. Mô hình phân bổ lực (Thrust Allocation - TA)

Tàu DP thường có nhiều máy đẩy (chân vịt mũi, chân vịt lái, azimuth). Bộ điều khiển sẽ tính ra tổng lực $\tau_{total} = [X, Y, N]^T$ (lực dọc, lực ngang, mô-men quay) và khối TA sẽ giải bài toán:

Trong đó:

U là vector lực của từng máy đẩy riêng lẻ;

B là ma trận cấu hình máy đẩy (Thruster Configuration Matrix), phụ thuộc vào vị trí hình học của các thiết bị đẩy trên thân tàu.

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & \dots \\ -l_{y1} & l_{x1} & \dots \end{bmatrix}$$

Trong đó:

l_{x1}, l_{y2} là khoảng cách từ cơ cấu đẩy đến trọng tâm tàu.

3. XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO MPC DỰA TRÊN NGUYÊN LÝ RỜI RẠC HÓA THEO MÔ HÌNH

Điều khiển dự báo mô hình (Model Predictive Control - MPC) đã được chứng minh là một phương pháp hiệu quả cho hệ thống DP nhờ khả năng xử lý trực tiếp các ràng buộc của cơ cấu chấp hành trong bài toán tối ưu hóa. Việc tích hợp các ràng buộc biên và ràng buộc tốc độ của máy đẩy vào bài toán MPC giúp hạn chế hiện tượng bão hòa và giảm tiêu thụ năng lượng so với các bộ điều khiển PID truyền thống [6, 7].

Xét đối tượng điều khiển có mô hình:

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A(\underline{x}_k)\underline{x}_k + B(\underline{x}_k)\underline{x}_k \\ \underline{y}_k = C(\underline{x}_k)\underline{x}_k + \underline{n}(\xi) \end{cases} \quad (7)$$

Với nhiễu là hằng bất định hoặc hàm biến đổi chậm. Trong đó, $A(\underline{x}_k), B(\underline{x}_k), C(\underline{x}_k)$ đều phụ thuộc trạng thái. Nhiệm vụ điều khiển là xây dựng bộ điều khiển dự báo để có tín hiệu ra $\underline{y}_k$ bám theo tín hiệu đặt $\underline{\omega}_k$, $\underline{y}_k \to \underline{\omega}_k$ với $\{\underline{\omega}_k\}$ là dãy tín hiệu mẫu đặt cho trước và đảm bảo điều kiện ràng buộc tín hiệu điều khiển. Từ mô hình trên được xấp xỉ được bởi mô hình LTI (Linear Time-Invariant).

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A_k\underline{x}_k + B_k\underline{u}_k \\ \underline{y}_k = C_k\underline{x}_k + \underline{n}(\xi) \end{cases} \quad (8)$$

Với $A_k = A(\underline{x}_k), B_k = B(\underline{x}_k), C_k = C(\underline{x}_k)$. Khi đó, ta lại có được: $\underline{y} = F\underline{u} + \underline{d}$, với:

$$\underline{y} = \begin{pmatrix} \underline{y}_{k+1} \\ \vdots \\ \underline{y}_{k+N} \end{pmatrix}, \underline{d} = \begin{pmatrix} \underline{v}_k' \\ \vdots \\ \underline{v}_k' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \hat{C}\hat{A} \\ \vdots \\ \hat{C}\hat{A}^N \end{pmatrix}\underline{x}_k,$$

$$\underline{x}_k = \begin{pmatrix} \underline{x}_k \\ \underline{u}_{k-1} \end{pmatrix}, \underline{u} = \begin{pmatrix} \Delta\underline{u}_k \\ \vdots \\ \Delta\underline{u}_{k+N-1} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Và các ma trận $F, \bar{A}, \bar{B}, \hat{C}$, được xác định như sau:

$$F = \begin{pmatrix} \hat{C}\hat{B} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \hat{C}\hat{A}^{N-1}\hat{B} & \hat{C}\hat{A}^{N-2}\hat{B} & \dots & \hat{C}\hat{B} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} A_k & B_k \\ 0 & I \end{pmatrix}, \hat{B} = \begin{pmatrix} B_k \\ I \end{pmatrix}, \hat{C} = (C_k, 0)$$

Hàm mục tiêu và tối ưu hóa: Sử dụng hàm mục tiêu dạng toàn phương cho mọi thời điểm tín hiệu điều khiển sẽ được tính như sau:

$$\underline{u} = (F^TQ_kF + R_k)^{-1}F^TQ_k(\underline{\omega} - \underline{d}) \quad (11)$$

Và $\underline{u}_k = \underline{u}_{k-1} + (I, 0, \dots, 0)\underline{u}$

4. XÂY DỰNG BỘ ĐIỀU KHIỂN DỰ BÁO ĐIỀU KHIỂN CHUYỂN ĐỘNG TÀU THỦY TRONG HỆ DP THEO QUỸ ĐẠO CHO TRƯỚC

4.1. Xây dựng bộ điều khiển dự báo điều khiển

Từ phương trình số hai trong (4), coi thành phần bất định trong mô hình toán của đối tượng bằng không, có được:

$$M\dot{\vartheta} = [-D(\vartheta)]\vartheta + \tau + \xi \quad (12)$$

Hoặc:

$$M^{-1}M\dot{\vartheta} = M^{-1}[-D(\vartheta)]\vartheta + M^{-1}\tau + n(\varsigma) \quad (13)$$

Đặt $\vartheta = \underline{x}, A'(\underline{x}) = M^{-1}[-D(\vartheta)], B' = M^{-1}$ (13) được viết lại như sau:

$$\dot{\underline{x}} = A'(\underline{x})\underline{x} + B'\tau + n(\varsigma) \quad (14)$$

Mặt khác, khi rời rạc hóa có được: $\dot{\underline{x}} = \frac{\underline{x}_{k+1} - \underline{x}_k}{T}$, với T là chu kỳ trích mẫu, x_k là trạng thái ở thời điểm thứ k. Khi đó, phương trình (14) trở thành:

$$\underline{x}_{k+1} = (I + TA'(\underline{x}_k)\underline{x}_k + TB'\tau + n(\xi) \quad (15)$$

Đặt $A(\underline{x}_k) = I + TA'(\underline{x}_k), B = TB', \tau = \underline{u}_k$. khi đó, mô hình tàu trong hệ DP sau khi rời rạc hóa có dạng song tuyến như sau:

$$\begin{cases} \underline{x}_{k+1} = A(\underline{x}_k)\underline{x}_k + B_k\underline{u}_k + n(\xi) \\ \underline{y}_k = C_k\underline{x}_k + n_k \end{cases} \quad (16)$$

Việc xây dựng bộ điều khiển MPC phản hồi đầu ra theo nguyên lý tách được thực hiện từ mô hình xấp xỉ tuyến tính từng đoạn $\mathcal{H}_k$ với $k = 0, 1, \dots$, theo nguyên lý điều khiển dự báo trong tài liệu [11].

Khối hàm mục tiêu được chọn sẽ là:

$$J_k'(\underline{p}) = \underline{p}^T\left(H_k^TQ_kH_k + R_k\right)\underline{p} + 2\left(\underline{b}_k - \underline{r}_k\right)^T Q_kH_k\underline{p} \underset{\underline{p}}{\to} \min \quad (17)$$

Khối hàm tối ưu hóa: Nhiệm vụ của khối tối ưu hóa là xác định nghiệm của bài toán tối ưu:

$$\underline{p}^* = \arg\min_{\underline{p}\in P} J_k^{/}(\underline{p}) \quad (18)$$

có tập ràng buộc P được suy ra từ điều kiện ràng buộc của cơ cấu đẩy trong hệ thống DP như sau:

Ràng buộc biên (Amplitude Constraints): $u_{min} \le u_k \le u_{max}$ (giới hạn công suất máy đẩy).

Ràng buộc tốc độ (Rate Constraints): $u_{min} \le u_k - u(k-1) \le u_{max}$ (giới hạn tốc độ gia tăng lực đẩy để bảo vệ cơ cấu cơ khí).

4.2. Xây dựng cấu trúc bộ điều khiển

Cấu trúc bộ điều khiển dự báo và bộ quan sát Kalman mở rộng có ràng buộc điều khiển, điều khiển tàu thủy theo qũy đạo trong hệ DP được mô tả như Hình 2.

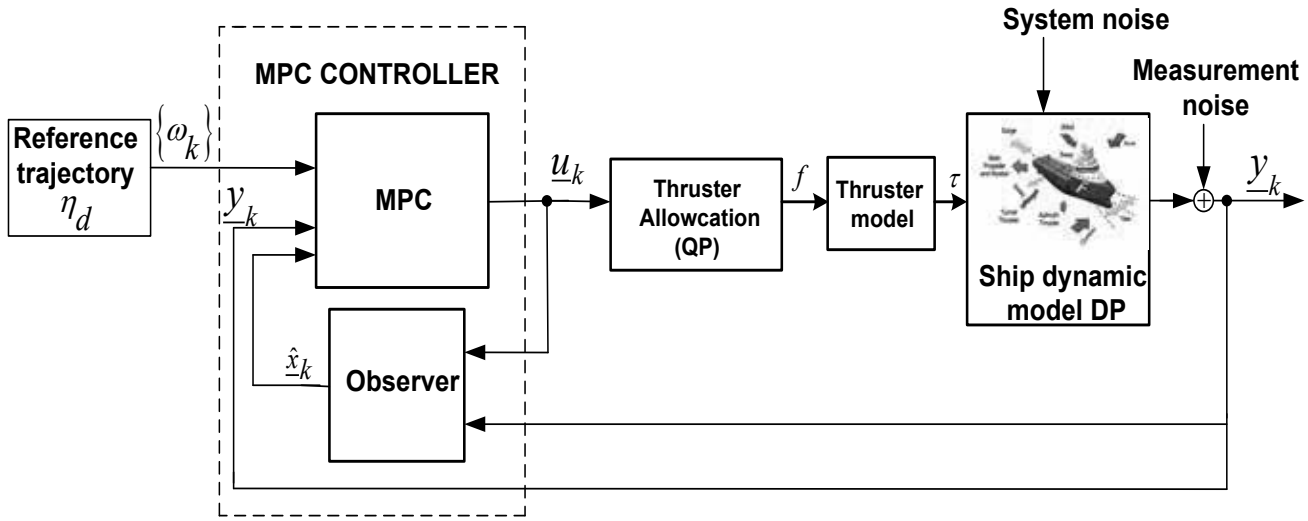
trường (sóng, gió, dòng chảy) và nhiễu đo lường. Do đó, bộ quan sát Observer trong sơ đồ cấu trúc hệ thống đóng vai trò ước lượng các biến trạng thái không đo trực tiếp được và loại bỏ nhiễu. Trong nghiên cứu này, thuật toán Lọc Kalman mở rộng (EKF) được lựa chọn nhờ khả năng xử lý các đặc tính phi tuyến mạnh mẽ của mô hình động học tàu thủy [12].

4.2.2.1. Vai trò của EKF trong sơ đồ điều khiển

Bộ quan sát EKF tiếp nhận hai luồng thông tin chính:

Tín hiệu điều khiển (u_k): Lực đẩy mong muốn từ bộ điều khiển MPC gửi đến hệ thống truyền động.

Tín hiệu phản hồi (y_k): Các giá trị đo thực tế từ cảm biến có



Hình 2. Cấu trúc điều khiển theo mô hình dự báo phản hồi đầu ra hệ song tuyến điều khiển chuyển động tàu thủy theo qũy đạo

Mô hình bộ điều khiển MPC được thiết kế, tính toán như trên.

Từ những phân tích và cấu trúc đưa ra ở trên tổng hợp lại được thuật toán điều khiển dự báo đầu ra cho mô hình song tuyến bao gồm các bước sau:

4.2.1. Thuật toán điều khiển MPC

1. Chọn cửa sổ dự báo N ≥ 6 Gán k = 0, $u_{-1} = 0$.

2. Chọn hai ma trận đối xứng xác định dương Q_k, R_k xác định các ma trận tham số A_k, B_k, C_k và từ đó xác định theo (7).

Xác định ước lượng trạng thái quan sát:

$$\hat{\underline{x}}_k = \underline{x}_k(+) = \underline{x}_k(-) + K_k(\underline{y}_k - \hat{C}_k\underline{x}_k(-))$$

Trong đó: $\underline{x}_k(-) = \hat{A}_{k-1}\underline{x}_{k-1}(+) + \hat{B}_{k-1}\underline{u}_{k-1}$.

Xác định v'_k, z_k, sau đó tính vector theo (11).

3. Tìm nghiệm tối ưu $\underline{p}^*$ của bài toán tối ưu (18) có ràng buộc $u_{min} \le u_k \le u_{max}$ và $u_{min} \le u_k - u(k-1) \le u_{max}$ và hàm mục tiêu cho ở (17).

4. Tính $\underline{u}$ và $\underline{u}_k$ theo (11) rồi đưa $\underline{u}_k$ vào điều khiển đối tượng trong khoảng thời gian trích mẫu.

5. Gán k = k + 1 và quay về bước 2.

4.2.2. Thiết kế bộ quan sát trạng thái dựa trên thuật toán lọc Kalman mở rộng (EKF)

Trong hệ thống định vị động tàu biển (Dynamic Positioning - DP), việc xác định chính xác các trạng thái của tàu như vị trí, hướng và vận tốc là điều kiện tiên quyết để bộ điều khiển dự báo mô hình (MPC) hoạt động hiệu quả. Tuy nhiên, các tín hiệu đo đạc từ cảm biến (GPS, Gyrocompass) thường bị nhiễu bởi các yếu tố môi

chứa nhiễu đo lường (Measurement noise).

Từ các dữ liệu này, EKF thực hiện quá trình đệ quy để đưa ra giá trị ước lượng trạng thái $\hat{x}_k$ tối ưu nhất, giúp bộ điều khiển MPC có cái nhìn chính xác về "trạng thái thực" của tàu tại thời điểm hiện tại và dự báo cho tương lai.

4.2.2.2. Thuật toán toán học của EKF

Mô hình trạng thái phi tuyến của tàu thủy được mô tả dưới dạng rời rạc:

$$\begin{aligned} x_k &= f(x_{k-1}, u_{k-1}) + \zeta_{k-1} \\ y_k &= h(x_k) + \xi_k \end{aligned} \quad (19)$$

Trong đó: ζ_k và ξ_k lần lượt là nhiễu hệ thống (System noise) và nhiễu đo lường (Measurement noise), được giả định là nhiễu trắng Gauss với các ma trận hiệp phương sai Q và R.

Thuật toán EKF thực hiện qua hai giai đoạn chính:

- Giai đoạn 1: Dự báo (Predict)

Ở giai đoạn này, bộ quan sát sử dụng mô hình toán học của tàu để dự đoán trạng thái và hiệp phương sai sai số ở thời điểm tiếp theo:

Dự báo trạng thái: $\hat{x}_{k|k-1} = f(\hat{x}_{k-1}, u_{k-1})$

Dự báo hiệp phương sai: $P_{k|k-1} = F_{k-1}P_{-1}F_{k-1}^T + Q$

(Với F là ma trận Jacobian của hàm phi tuyến f).

- Giai đoạn 2: Cập nhật (Update)

Khi có tín hiệu đo y_k mới, bộ quan sát sẽ hiệu chỉnh giá trị dự báo:

Tính toán hệ số tăng Kalman (Kalman Gain):

$$K_k = P_{k|k-1} = F_{k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1}$$

Cập nhật trạng thái ước lượng: $\hat{x} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k f(y_k - h(\hat{x}_{k|k-1}))$

Cập nhật hiệp phương sai sai số: $P_k = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}$

4.2.2.3. Hiệu quả đối với hệ thống DP

Việc áp dụng EKF vào cấu trúc điều khiển DP giúp hệ thống đạt được các ưu điểm sau:

Khử nhiễu tần số cao: Loại bỏ hiệu quả các thành phần dao động bậc một do sóng gây ra, ngăn chặn tình trạng bộ điều khiển phản ứng quá mức làm tiêu tốn năng lượng và gây mòn cơ cấu đẩy (Thruster).

Ước lượng vận tốc: Cung cấp thông tin vận tốc chính xác mà không cần dùng đến các cảm biến đo vận tốc đắt tiền.

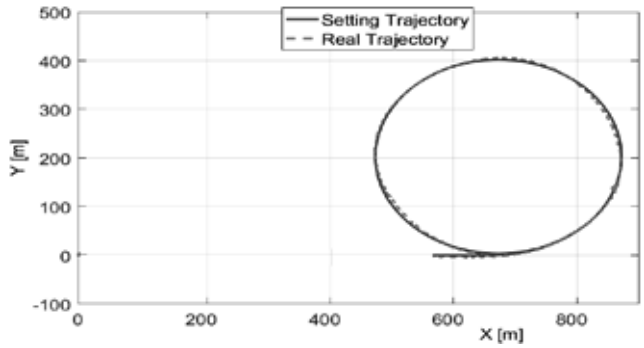
Tính bền vững: Giữ cho hệ thống ổn định ngay cả khi tín hiệu cảm biến bị gián đoạn tạm thời nhờ vào khả năng dự báo dựa trên mô hình động học.

4.3. Mô phỏng kiểm chứng bộ điều khiển MPC có buộc điều khiển trong hệ DP

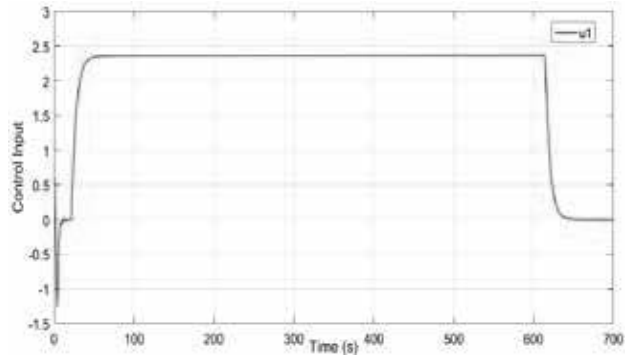
Thông số mô phỏng cho hệ thống DP được chọn trên tàu Mariner Class [2] có chiều dài L=77,7 m, chiều rộng B=20 m và mớn nước thiết kế T=4,6 m, có các thông số hoạt động như sau:

$$D = \begin{bmatrix} 5.024e4 & 0 & 0 \\ 0 & 2.7229e5 & -4.3933e6 \\ 0 & -4.3933e6 & 4.1894e8 \end{bmatrix}; M = \begin{bmatrix} 5.3122e6 & 0 & 0 \\ 0 & 8.8231e6 & 0 \\ 0 & 0 & 3.7454e9 \end{bmatrix}$$

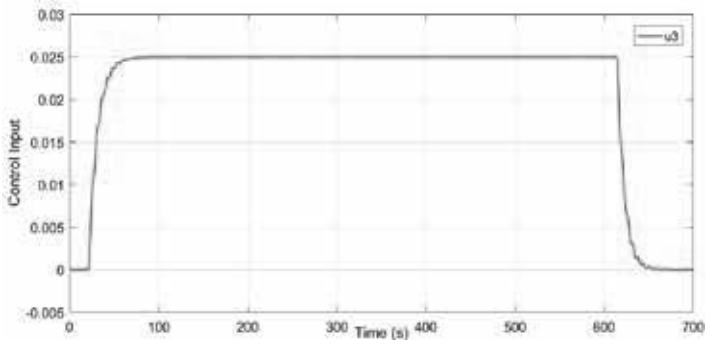
Thông số bộ điều khiển MPC: Chọn cửa sổ dự báo N=10; ma trận xác định dương Q = 4*eye(n*N); R=3*eye(m*N); số tín hiệu ra n=3; số tín hiệu điều khiển m=3. Mô hình tàu không có thành phần bất định. Quỹ đạo tham chiếu $n_d \rightarrow \vartheta_d$ đưa ra thỏa mãn mô hình động học (4) với các trạng thái u_r, v_r, r_r, Ψ_r, T_{ur}, T_{rr}. Giả thiết rằng các thành phần nhiễu hệ thống và nhiễu đo lường tác động lên tàu là các quá trình ngẫu nhiên dừng và có tính Ergodic. Đặc tính này cho phép xác định các tham số thống kê của nhiễu thông qua việc phân tích dữ liệu theo thời gian, phục vụ cho việc thiết kế ma trận hiệp phương sai trong thuật toán EKF. Các ràng buộc điều khiển được lựa chọn u1≤ 2,35 * 10^5 và 0,02 * 10^5 ≤ (u2,u3) ≤ 0,2 * 10^5: Kết quả mô phỏng trên Hình 3.



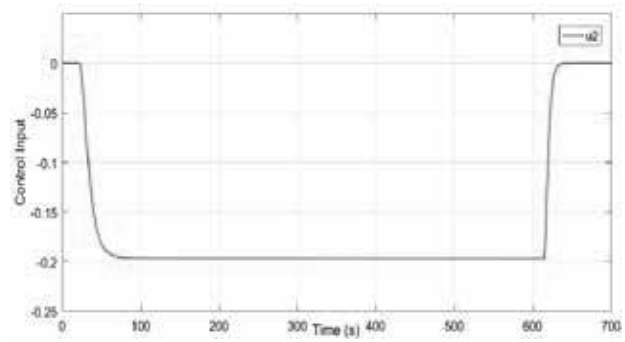
a) - Mô tả quỹ đạo đặt và quỹ đạo thực



b) - Tín hiệu lực đẩy u1 điều khiển chân vịt chính và bánh lái



c) - Tín hiệu lực đẩy u3 điều khiển chân vịt Azimuth thruster trái



d) - Tín hiệu lực đẩy u2 điều khiển chân vịt Azimuth thruster phải

Hình 3. Kết quả mô phỏng bộ điều khiển MPC hệ DP

4.4. Nhận xét kết quả mô phỏng

Kết quả mô phỏng cho thấy bộ điều khiển MPC và bộ quan sát Kalman mở rộng sử dụng cho hệ định vị động (DP) hoạt động tốt. Quỹ đạo thực của tàu bám sát quỹ đạo đặt, sai lệch ban đầu nhanh chóng được triệt tiêu và hệ thống đạt trạng thái ổn định sau một khoảng thời gian ngắn. Các tín hiệu điều khiển lực đẩy biến thiên trơn tru, nằm trong giới hạn ràng buộc tín hiệu điều khiển và không xuất hiện hiện tượng dao động hay bão hòa. Sự phối hợp hợp lý giữa chân vịt chính, bánh lái và các Azimuth thruster giúp hệ thống duy trì vị trí và hướng tàu chính xác ngay cả khi chịu tác động nhiễu. Điều này chứng tỏ bộ điều khiển MPC có khả năng bám quỹ đạo tốt, đảm bảo tính ổn định và phù hợp cho bài toán điều khiển định vị động.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu và đề xuất cấu trúc điều khiển tối ưu cho hệ thống định vị động (DP) tàu biển dựa trên sự kết hợp giữa thuật toán

Điều khiển dự báo mô hình (MPC) và bộ quan sát trạng thái Kalman mở rộng (EKF). Các kết quả đạt được trong nghiên cứu cho phép rút ra một số kết luận chính như sau:

Thứ nhất, việc tích hợp bộ quan sát EKF đóng vai trò quyết định trong việc nâng cao chất lượng tín hiệu phản hồi. Thông qua giả thiết nhiễu môi trường và nhiễu đo lường là các quá trình Ergodic, bộ lọc EKF đã khử hiệu quả nhiễu tần số cao từ cảm biến và ước lượng chính xác các trạng thái vận tốc của tàu. Điều này giúp bộ điều khiển MPC có được thông tin trạng thái tin cậy, tránh hiện tượng phản ứng quá mức đối với nhiễu tức thời.

Thứ hai, thuật toán MPC đã chứng minh được tính ưu việt trong việc xử lý bài toán điều khiển bám quỹ đạo có ràng buộc. Hệ thống không chỉ đảm bảo độ chính xác vị trí mà còn tuân thủ nghiêm ngặt các giới hạn vật lý của cơ cấu đẩy về lực đẩy và tốc độ thay đổi góc quay. Việc tối ưu hóa hàm mục tiêu trong mỗi chu kỳ lấy mẫu đã giúp giảm thiểu năng lượng tiêu thụ, đồng thời bảo vệ hệ thống cơ cấu chấp hành khỏi hiện tượng bão hòa.

Cuối cùng, sơ đồ cấu trúc tích hợp đề xuất có khả năng thích ứng tốt với các điều kiện nhiễu môi trường phức tạp. Kết quả nghiên cứu không chỉ đóng góp về mặt lý thuyết trong việc kết hợp giữa ước lượng tối ưu và điều khiển tối ưu, mà còn có ý nghĩa thực tiễn cao, làm cơ sở cho việc phát triển các phần mềm điều khiển DP nội địa hóa cho tàu biển Việt Nam trong tương lai.

Hướng phát triển tiếp theo của nghiên cứu sẽ tập trung vào việc áp dụng các thuật toán học máy để tự động cập nhật các ma trận hiệp phương sai nhiễu Q và R của bộ lọc EKF, nhằm nâng cao hơn nữa tính thích nghi của hệ thống trong các kịch bản thời tiết cực đoan.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT 25-26.71.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] T. I. Fossen. Marine Control Systems: Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles. Trondheim, Norway: Marine Cybernetics, 2002, ISBN: 978-8292356005.

[2] T. I. Fossen. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2021, doi: 10.1002/9781119575016.

[3] T. Perez and G. C. Goodwin. Constrained predictive control of ship dynamic positioning. Ocean Engineering, vol. 35, no. 16, pp. 1605-1617, Nov. 2008, doi:10.1016/j.oceaneng.2008.08.002.

[4] T. A. Johansen and T. I. Fossen. Control allocation - A survey. Automatica, vol. 49, no. 5, pp. 1087-1103, May 2013, doi:10.1016/j.automatica.2013.01.035.

[5] A. Veksler, T. A. Johansen and F. Borrelli. Dynamic positioning with model predictive control and thruster assisted position mooring. Control Engineering Practice, vol. 56, pp. 115-125, Nov. 2016, doi:10.1016/j.conengprac.2016.08.003.

[6] L. Li, S. Zheng and G. Li. Predictive control for dynamic positioning of vessels with actuator constraints. Journal of Marine Science and Application, vol. 19, no. 1, pp. 120-131, Mar. 2020, doi:10.1007/s11804-020-00138-7.

[7] A. Veksler, T. A. Johansen and F. Borrelli. Dynamic positioning with model predictive control and thruster assisted position mooring. Control Engineering Practice, vol. 56, pp. 115-125, 2016, doi:10.1016/j.conengprac.2016.08.003.

[8] T. D. Nguyen and K. D. Do. Dynamic positioning of ships with actuator constraints: A non-linear model predictive control approach. International Journal of Systems Science, vol. 54, no. 2, pp. 312-328, 2023.

[9] Y. Wang and H. Liu. Efficient quadratic programming solvers for model predictive control in marine systems. IEEE Transactions on Oceanic Engineering, vol. 49, no. 1, pp. 45-58, Jan. 2024.

[10] X. Hu, J. Du and Y. Sun. Robust adaptive control for dynamic positioning of ships. IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 42, no. 4, pp. 826-835, Mar. 2017, doi:10.1109/JOE.2017.2651242. :contentReference[oaicite:1]{index=1}.

[11] Nguyễn Hữu Quyền. Nghiên cứu giải pháp điều khiển bám quỹ đạo tàu thủy có ràng buộc tín hiệu và bất định hàm ở đầu vào. Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, 2019.

[12] Li, Y., & Wu, Z., An Improved Extended Kalman Filter for Ship Dynamic Positioning State Estimation Under Complex Environmental Disturbances. Journal of Marine Science and Engineering, vol. 10, no. 5, p. 642, 2022.

■Ngày nhận bài: 04/3/2026 ■Ngày sửa bài: 17/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 31/3/2026

Ứng dụng mô hình SAM2 trong giám sát và phân tích luồng giao thông đa bối cảnh

Application of SAM2 Model for multi-context traffic flow monitoring and analysis

> THS PHẠM TRUNG MINH*, TS NGUYỄN CẢNH TOÀN
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email: minhpt@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Quản lý giao thông đô thị hiện đại đòi hỏi các giải pháp giám sát thời gian thực với độ chính xác cao. Các hệ thống phát hiện phương tiện giao thông dựa trên hộp giới hạn (bounding box) truyền thống thường gặp sai số lớn khi phương tiện bị che khuất hoặc thay đổi góc nhìn camera. Nghiên cứu này đề xuất kiến trúc kết hợp ba công nghệ tiên tiến YOLO, DeepSORT và SAM2. Hệ thống có khả năng phát hiện, định danh, theo dõi quỹ đạo di chuyển của phương tiện. Ngoài ra, hệ thống còn trích xuất mặt nạ phân đoạn, cho phép phân tích số liệu phương tiện di chuyển theo các hướng khác nhau thông qua đếm phương tiện tại các vùng đa giác dựa trên diện tích giao thoa thực tế thay vì tâm hộp giới hạn. Hệ thống thực nghiệm trên mô hình được huấn luyện chuyển tiếp YOLOv11 đạt độ chính xác mAP@50 tới 97,84%. Việc kết hợp cơ chế bộ nhớ động và xử lý chu kỳ của SAM2 giúp hệ thống duy trì tốc độ khung hình ổn định, khẳng định tiềm năng ứng dụng mạnh mẽ trong các hệ thống giao thông thông minh.

Từ khóa: YOLO; DeepSORT; SAM2.

ABSTRACT

Modern urban traffic management requires real-time monitoring solutions with high accuracy. Traditional vehicle detection systems based on bounding boxes often suffer from significant errors when vehicles are occluded or when camera perspectives change. This study proposes an integrated architecture of three advanced technologies: YOLO, DeepSORT and SAM2. The system is capable of detecting, identifying, and tracking the movement trajectories of vehicles. Furthermore, the system extracts segmentation masks, enabling the analysis of vehicle movement data across different directions by counting vehicles within polygonal zones based on actual intersection area rather than the bounding box centroid. The system was tested on a transfer-learned YOLOv11 model, achieving a mAP@50 accuracy of 97.84%. The combination of SAM2's streaming memory mechanism and interval processing helps the system maintain a stable frame rate, confirming its strong potential for application in intelligent transportation systems.

Keywords: YOLO; DeepSORT; SAM2.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngày nay, các hệ thống giao thông thông minh đang được phát triển một các mạnh mẽ, hướng tới các hệ thống tự động hóa quá trình giám sát, đo lường và phân tích lưu lượng giao thông [1]. Trong những năm qua, các phương pháp học sâu (Deep Learning), đặc biệt là mạng nơ-ron tích chập (CNN) đã thúc đẩy sự phát triển của các hệ thống theo dõi đa đối tượng (Multi-Object Tracking - MOT) [2]. Kiến trúc phổ biến nhất hiện nay là "Tracking-by-Detection", trong đó các mô hình như YOLO (You Only Look Once) được sử dụng để phát hiện các đối tượng, sau đó thuật toán như DeepSORT sẽ liên kết các đối tượng qua các khung hình để tạo thành quỹ đạo di chuyển [2, 3].

Tuy nhiên, giới hạn vật lý của hộp giới hạn (Bounding Box) được xác định từ YOLO và DeepSORT bộc lộ nhiều điểm yếu khi thực hiện phát hiện, giám sát các phương tiện trong điều kiện các tuyến đường giao thông phức tạp, mật độ giao thông cao. Hộp giới hạn là một khối hình chữ nhật thô, bao gồm đối tượng được phát hiện nhưng cũng bao gồm rất nhiều điểm ảnh nền xung quanh đối tượng. Khi các phương tiện di chuyển song song sát nhau hoặc các phương tiện che khuất lẫn nhau, các hộp giới hạn tương ứng các đối tượng sẽ chồng lấp lên nhau, dẫn đến hiện tượng mất dấu (False Negatives) hoặc hoán đổi định danh (ID Switch) khi tiến hành giám sát quỹ đạo di chuyển của các đối tượng. Ngoài ra, khi phương tiện di chuyển theo hướng chéo góc, hướng gần đến camera, hộp giới hạn sẽ có xu hướng phình to bất thường, khiến hệ thống đếm xe đếm nhầm khi hộp giới hạn vô tình chạm vào ranh giới đếm được thiết lập từ trước [4, 5].

Để giải quyết tận hạn chế của hộp giới hạn hình chữ nhật, nghiên cứu này đề xuất một bước chuyển dịch mô hình học từ "Tracking by detection" sang "Tracking by segmentation" thông qua phương pháp kết hợp đồng thời YOLO, DeepSORT và SAM2 [6] vào

cùng một hệ thống hoàn chỉnh. Được giới thiệu bởi Meta AI, SAM2 sử dụng cấu trúc Transformer kết hợp bộ nhớ động (streaming memory), cho phép phân đoạn và theo dõi đối tượng trong video với độ chính xác ở cấp độ điểm ảnh [6]. Bài báo giới thiệu cơ chế sử dụng hộp giới hạn được tạo ra từ YOLO như một nguồn "dữ liệu gợi ý động" làm đầu vào cho SAM2, từ đó trích xuất ra mặt nạ phân đoạn bám sát đường viền thực tế của đối tượng đã được phát hiện. Việc này sẽ loại bỏ các điểm ảnh nền xung quanh đối tượng, cho phép xác định chính xác hơn việc đối tượng đã di chuyển vào một vùng đa giác được định nghĩa từ trước hay chưa. Kết quả sẽ loại bỏ hoàn toàn các lỗi đếm nhầm đối tượng do nhược điểm nhiễu không gian của hộp giới hạn truyền thống.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

2.1. Phát hiện đối tượng theo thời gian thực với YOLO

YOLO đã trải qua nhiều thế hệ phát triển, từ YOLOv1 đến YOLOv11. Điểm mạnh của dòng YOLO là khả năng tối ưu hóa tính toán, cho phép triển khai trên các thiết bị biên với chỉ số FPS (Frames per second) cao. Gần đây, YOLOv11 được đề xuất và đã chứng minh hiệu suất cao trong việc phát hiện các đối tượng nhỏ, đồng thời cải thiện khả năng trích xuất đặc trưng nhờ các module C3k2 và PANet [3] . Nghiên cứu của Bi và cộng sự [1] đã chứng minh tính hiệu quả của phân loại đa hạt (dual granularity) dựa trên nền tảng mô hình YOLO trong phân tích lưu lượng giao thông, tuy nhiên vẫn chỉ dừng ở mức hộp giới hạn.

2.2. Thuật toán theo dõi đa mục tiêu (MOT)

Theo dõi đa đối tượng (Multi-object tracking - MOT) là bài toán nhận diện và duy trì duy nhất một danh tính (ID) cho từng đối tượng xuyên suốt các khung hình trong video. Thuật toán DeepSORT là bản nâng cấp quan trọng của SORT nhờ việc tích hợp thêm mạng nơ-ron sâu (thường là kiến trúc ResNet) để trích xuất các đặc trưng ngoại hình (Appearance features) của đối tượng. Cải tiến này cho phép DeepSORT không chỉ dựa vào chuyển động mà còn sử dụng khoảng cách Cosine để so sánh độ tương đồng về diện mạo, kết hợp với khoảng cách Mahalanobis từ bộ lọc Kalman để dự đoán vị trí. Tuy nhiên, hiệu quả của DeepSORT vẫn phụ thuộc chặt chẽ vào chất lượng của các hộp giới hạn từ mô hình phát hiện ban đầu. Nếu hộp giới hạn bị lệch hoặc chứa quá nhiều nhiễu từ môi trường, độ chính xác của việc duy trì danh tính sẽ bị giảm sút.

2.3. Ứng dụng của SAM2 trong phân đoạn và theo dõi

Mô hình SAM2 đã khắc phục được hạn chế lớn nhất của phiên bản đầu tiên là thiếu khả năng xử lý thông tin theo chuỗi thời gian. Bằng cách tích hợp cơ chế bộ nhớ chú ý (memory attention) để lưu trữ các đặc trưng từ quá khứ, SAM2 có thể nội suy và duy trì mặt nạ phân đoạn của đối tượng xuyên suốt các khung hình một cách mượt mà. Hiện nay, các kiến trúc tiên phong như SAM2MOT [7] và Seg2Track-SAM2 [4] đã khai thác thế mạnh này để thực hiện bài toán theo dõi đa đối tượng (MOT) thông qua việc phân đoạn. Đặc biệt, mô hình SAMURAI [8] còn cải tiến SAM2 bằng cách bổ sung bộ nhớ nhận thức chuyển động khẳng định khả năng theo dõi đối tượng cực kỳ mạnh mẽ mà không cần thực hiện việc huấn luyện lại. Xuất phát từ những công bố này, nghiên cứu của chúng tôi ứng dụng SAM2 theo hướng như một "bộ lọc tinh" (refiner). Nhiệm vụ của nó là biến đổi các kết quả theo dõi thô từ DeepSORT thành các mặt nạ phân đoạn có độ chính xác cao, từ đó tối ưu hóa việc đếm xe trong các không gian giao thông phức tạp.

3. PHƯƠNG PHÁP ĐỀ XUẤT

** Sơ đồ kiến trúc tổng thể:*

Hình 1 mô tả mô hình hệ thống được thiết kế theo một luồng xử lý dữ liệu liên tục, bao gồm: (1) Mô hình phát hiện YOLOv11; (2) trích xuất đặc trưng và theo dõi với DeepSORT; (3) phân đoạn mặt nạ động với SAM2 và (4) phân tích luồng giao thông bằng so sánh tương quan diện tích mặt nạ phân đoạn với diện tích vùng không gian tuyến đường cần kiểm soát.

Hình 1. Sơ đồ khối của phương pháp đề xuất

Mỗi khung hình It tại thời điểm t được đưa vào mạng YOLO. Mạng YOLO sẽ trích xuất đặc trưng và dự đoán các hộp giới hạn Bt = {bt, bt,2,…, bt,n}, lớp phân loại Ct và độ tin cậy St. Để cải thiện độ chính xác định vị hộp giới hạn, YOLOv11 tối ưu hóa hàm suy hao CIoU (Complete intersection over union) theo biểu thức sau:

$$\mathcal{L}_{CIoU} = 1 - IoU + \frac{\rho^2(b, b^{gt})}{c^2} + \alpha v \quad (1)$$

Trong đó:

- P là khoảng cách Euclid giữa tâm của hộp dự đoán và hộp chuẩn (ground truth);
- c là đường chéo của hộp bao quanh nhỏ nhất;
- v là tham số đo lường sự nhất quán của tỷ lệ khung hình.

Mỗi hộp giới hạn bt,i được cắt ra và đưa vào mạng ResNet18 để tạo vector đặc trưng ri có độ dài 128 chiều. DeepSORT sẽ dự đoán vị trí tương lai của phương tiện thông qua bộ lọc Kalman với các thống số tọa độ tâm hộp giới hạn, tỷ lệ khung hình, chiều cao và vận tốc của chúng.

Ma trận chi phí được sử dụng để liên kết các đối tượng giữa các khung hình, được tính toán bằng sự kết hợp giữa khoảng cách Mahalanobis D1 (chuyển động) và khoảng cách D2 Cosine (ngoại hình) như sau:

$$C_{i,j} = \lambda D^1(i,j) + (1-\lambda) D^2(i,j) \quad (2)$$

Thuật toán Hungary (Hungarian Algorithm) sẽ được tiếp tục sử để tối ưu hóa việc xác định và phân bổ định danh ID duy nhất cho các phương tiện. Để chuyển từ mức hộp giới hạn sang mức điểm ảnh, module SAM2 được kích hoạt với kiến trúc Hiera hạng nhẹ (sam2.1_hiera_tiny) cho phép tối ưu tốc độ nội suy. Với mỗi ID đối tượng đã được DeepSORT xác nhận, dữ liệu hộp giới hạn bt,i được sử dụng làm đầu vào cho SAM2, từ đó khung hình hiện tại It kết hợp với dữ liệu bt,i và ngân hàng bộ nhớ (Memory bank) Mt-1 từ các khung hình trước đó để xác định mặt nạ phân đoạn bằng biểu thức:

$$Mask_{t,i} = \Phi_{SAM2}\left(I_t, [\{b_{t,i}\}, M_{t-1}]\right) \quad (3)$$

Nhờ cơ chế chú ý bộ nhớ (memory attention) này, SAM2 sẽ duy trì được hình dáng của phương tiện ngay cả khi hộp giới hạn của YOLO bị nhiễu do một phần của xe bị che khuất [8].

Hệ thống thiết lập các vùng không gian kiểm soát phương tiện dưới dạng các dạng đa giác ảo Pz. Thay vì kiểm tra xem tâm của hộp giới hạn có nằm trong vùng đa giác ảo hay không, cơ chế tính toán phần diện tích giao nhau thực tế giữa mặt nạ phân đoạn đối tượng phương tiện và đa giác ảo được áp dụng như sau:

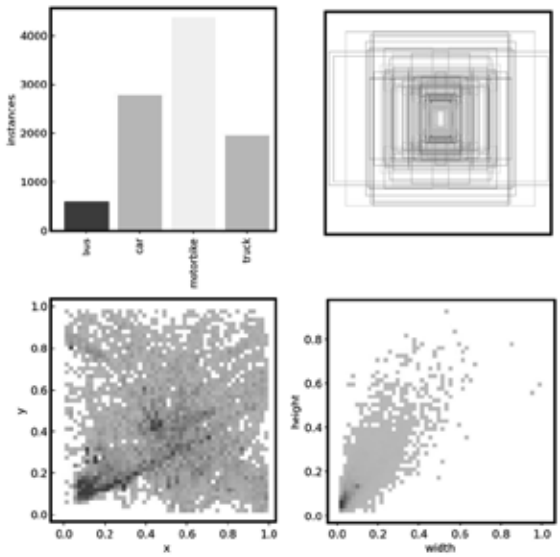
$$Area_{intersect} = Mask_{t,i} \cap P_Z \quad (4)$$

Nếu Areaintersect vượt qua một ngưỡng nhất định, phương tiện được hệ thống ghi nhận là đang di chuyển qua vùng không gian kiểm soát. Phương pháp này loại bỏ hoàn toàn các sai số do hộp giới hạn bị kéo giãn tại các góc ngã tư hoặc nhiễu do điểm ảnh nền quá nhiều [5, 9].

4. THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ

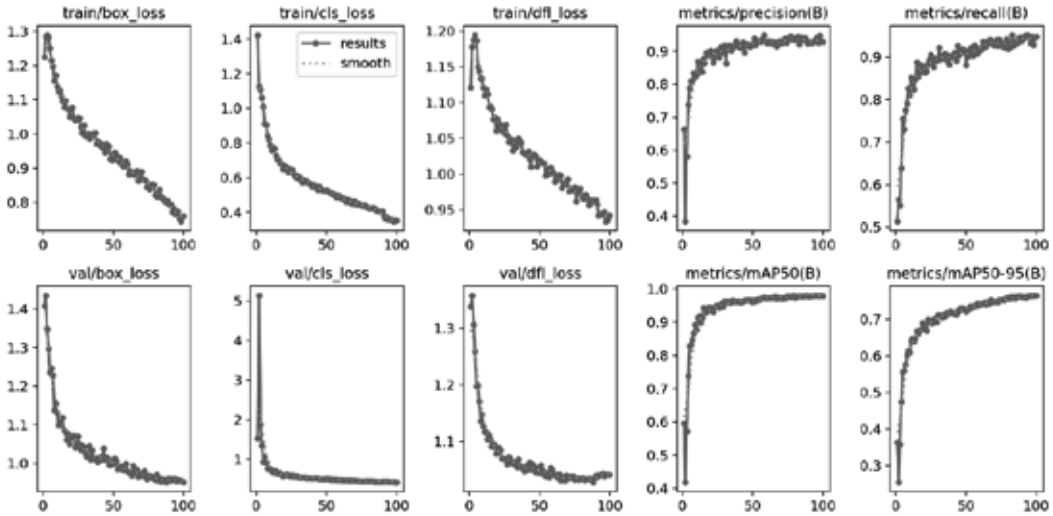
Một tập dữ liệu bao gồm 2.704 hình ảnh được thu thập từ các camera giao thông đặt tại nhiều vị trí khác nhau, với sự đa dạng về góc chụp (nghiêng, chính diện, từ trên cao), điều kiện ánh sáng (ban

ngày, chiều tối) và mật độ phương tiện (từ ít đến đông). Quá trình dán nhãn được thực hiện thủ công bằng các công cụ gán nhãn phổ biến, với file nhãn lưu theo định dạng YOLO (mỗi dòng gồm: *class_id*, *x_center*, *y_center*, *width*, *height* được chuẩn hóa).



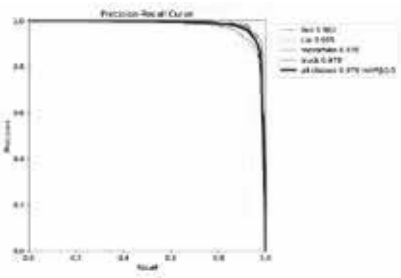
Hình 2. Phân tích tập dữ liệu

Hình 2 thể hiện kết quả phân tích tập dữ liệu. Có 4 lớp phương tiện được gắn nhẫn, phân bố không đồng đều, trong đó lớp *motorbike* chiếm tỷ lệ lớn nhất, tiếp theo là *car*, trong khi *bus* và *truck* có số mẫu ít hơn. Điều này phản ánh đúng thực trạng giao thông tại các đô thị Việt Nam, nơi xe máy chiếm đa số. Các hộp giới có sự đa dạng về kích thước: nhiều hộp nhỏ tương ứng với phương tiện ở xa camera hoặc trong cảnh góc rộng, cùng với các hộp lớn hơn khi phương tiện ở gần. Điều này đặt ra yêu cầu mô hình phát hiện phải xử lý tốt trong trường hợp các đối tượng khác biệt nhau về kích thước. Một số ảnh chứa nhiều phương tiện chồng lấn, dẫn đến các hộp giới gần nhau hoặc giao nhau trên ảnh, đây là những trường hợp khó phát hiện và giám sát, đặc biệt là đối với các mô hình MOT và cũng là lý do thúc đẩy việc sử dụng SAM2 để có thêm thông tin dạng mặt nạ phân đoạn nhằm phục vụ việc phân biệt chính xác các đối tượng.



Hình 3. Các thông số của quá trình huấn luyện

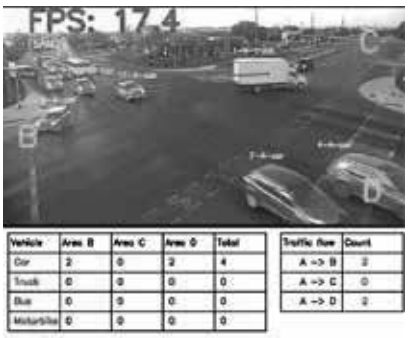
Quá trình huấn luyện chuyển tiếp mô hình YOLOv11 cho kết quả thể hiện mô hình hội tụ rất ổn định (Hình 3). Ngay từ epoch thứ 50, các chỉ số đã đạt ngưỡng rất cao và tiếp tục tối ưu đến epoch cuối cùng (Epoch 100). Tại chu kỳ huấn luyện thứ 100, mô hình đạt được các thông số định lượng rất tốt: Độ chính xác đạt 94,25% (0,94246); Độ nhạy đạt 92,88% (0,92884); độ chính xác trung bình mAP@0,5 đạt 97,84% (0,97837); độ chính xác trung bình mAP@0,5:0,95 đạt 76,41% (0,76405).



Hình 4. Đồ thị hội tụ của các hàm suy hao và chỉ số mAP qua 100 chu kỳ huấn luyện

Việc phân tích hiệu năng của hệ thống giám sát bắt đầu từ nền tảng của mô hình phát hiện đối tượng, nơi các chỉ số định lượng đã chứng minh một sự hội tụ lý tưởng về mặt thống kê. Dựa trên biểu đồ Precision-Recall tại Hình 4, mô hình YOLOv11 sau quá trình huấn luyện chuyển tiếp đã đạt được độ chính xác trung bình (mAP) tại ngưỡng IoU 0,5 lên tới 97,84%, giá trị này thể hiện khả năng nhận diện tốt đối với các loại phương tiện trong bộ dữ liệu thực tế. Đồ thị cho thấy các đường cong của mọi lớp đối tượng đều bám sát góc trên bên phải, biểu thị sự cân bằng tối ưu giữa độ chính xác và độ triệu hồi. Trong đó, các phương tiện có cấu trúc hình thái ổn định như xe buýt và xe tải đạt hiệu suất cao nhất với chỉ số lần lượt là 99,5% và 98,5%. Mặc dù lớp xe máy có kích thước nhỏ và hình dạng thay đổi phức tạp theo góc nhìn, mô hình vẫn duy trì được độ chính xác 95,9%, đảm bảo tính toàn vẹn dữ liệu cho giai đoạn theo dõi tiếp theo. Độ tin cậy cao từ tầng phát hiện này đóng vai trò then chốt, giúp thuật toán DeepSORT giảm thiểu các sai số về định danh và cho phép mô hình SAM2 trích xuất mặt nạ phân đoạn từ các hộp giới hạn với độ chính xác cao, từ đó tối ưu hóa phép tính diện tích giao thoa thực tế trong các vùng đa giác không gian cần giám sát.

a)



b)

Hình 5. Kết quả thực nghiệm: a) - Khung hình I_t; b) - Khung hình I_{t+2}

Kết quả thực nghiệm được minh họa qua Hình 5 (a) và (b), tương ứng với hai thời điểm tại khung hình t và t+2, cho thấy khả năng vận hành đồng bộ của hệ thống trong việc phát hiện, định danh và phân đoạn các thực thể đối tượng phương tiện giao thông. Tại đây, mỗi đối tượng không chỉ được xác định vị trí bằng chấm mầu xám tại vị trí trung tâm và quỹ đạo di chuyển theo vết đường mảnh kéo dài phía sau đối tượng, mà còn được bao phủ bởi mặt nạ phân đoạn từ SAM2, cho phép tách biệt hoàn toàn hình thể phương tiện khỏi nền đường. Ngã tư nghiên cứu được cấu trúc thành 4 vùng giám sát không gian (A, B, C, D) với lớp phủ sẫm màu hơn màu nền đường, nơi hệ thống thực hiện phân tích luồng dữ liệu kép thông qua hai bảng thống kê phụ trợ: Bảng bên trái phản ánh mật độ và chủng loại phương tiện tại từng vùng, trong khi bảng bên phải tập trung vào việc định lượng lưu lượng phương tiện di chuyển từ vùng khởi hành A đến các vùng đích còn lại.

Quan sát đối tượng định danh *ID 7-A-car* giữa hai khung hình. Mặc dù vị trí của phương tiện đã thay đổi đáng kể trên mặt đường khi di chuyển qua các ranh giới vùng phức tạp, việc tích hợp SAM2 đã cho phép hệ thống tính toán diện tích xâm nhập dựa trên hình thái thực tế cấp độ điểm ảnh thay vì chỉ dựa vào các giả định tính toán hình học đơn thuần từ hộp giới hạn. Chính khả năng tinh chỉnh mặt nạ phân đoạn động này đã giúp hệ thống duy trì tính nhất quán trong việc xác nhận trạng thái "đang trong vùng" của phương tiện, từ đó ghi nhận chính xác dữ liệu chuyển vùng vào bảng thống kê lưu lượng bên phải. Kết quả này khẳng định vai trò của SAM2 như một bộ lọc tinh giúp loại bỏ các sai số tích lũy do chuyển động nhanh hoặc góc nhìn camera thay đổi, đảm bảo tính khách quan và độ tin cậy cao cho các báo cáo phân tích luồng giao thông trong các bối cảnh đô thị đặc thù.

5. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, một hệ thống đã được xây dựng và chứng minh tính hiệu quả của một hệ thống trí tuệ nhân tạo đa thể thức trong quản lý luồng giao thông. Sự kết hợp giữa bộ phát hiện tốc độ cao YOLOv11, bộ định danh liên kết DeepSORT và SAM2 tạo ra một bước tiến từ việc "phân tích không gian thô" bằng hộp giới hạn sang "phân tích không gian tinh" bằng phân đoạn điểm ảnh. Kết quả định lượng cho thấy độ tin cậy cực cao của mạng học sâu với mAP@50 lên tới 97,84%. Các kỹ thuật giải quyết che khuất đa đối tượng và xử lý tính toán ngắt quãng giúp mô hình đáp ứng yêu cầu thời gian thực của vấn đề giám sát giao thông. Trong các nghiên cứu tiếp theo, hệ thống có thể được mở rộng sang đo lường động học sinh học và trích xuất không gian 3D của các luồng giao thông phức tạp.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT25-26.86.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Y. Bi, Y. Yin, X. Liu, X. Nie, C. Zou and J. Du. Real-Time Traffic Flow Statistics Based on Dual-Granularity Classification. Int. J. Netw. Dyn. Intell., vol. 2, no. 3, p. 100013, 2023, doi: 10.53941/ijndi.2023.100013.

[2] N. Wojke, A. Bewley and D. Paulus. Simple online and realtime tracking with a deep association metric, in Proceedings - International Conference on Image Processing, ICIP, 2017, pp. 3645-3649, doi: 10.1109/ICIP.2017.8296962.

[3] Y. Zhou, S. Dong, H. Sheng and W. Ke. YED-Net: Yoga Exercise Dynamics Monitoring with YOLOv11-ECA-Enhanced Detection and DeepSORT Tracking. Appl. Sci., vol. 15, no. 13, p. 7354, 2025, doi: 10.3390/app15137354.

[4] D. Mendonça, T. Barros, C. Premebida and U. J. Nunes. Seg2Track-SAM2: SAM2-based Multi-object Tracking and Segmentation, 2026. Internet: https://arxiv.org/abs/2509.11772.

[5] S. Liu, D. Lester, H. Narman, A. Alzarrad and P. Zhu. Depth-Enhanced YOLO-SAM2 Detection for Reliable Ballast Insufficiency Identification, 2026. Internet: https://arxiv.org/abs/2602.18961.

[6] N. Ravi et al. SAM 2: SEGMENT ANYTHING IN IMAGES AND VIDEOS in 13th International Conference on Learning Representations. ICLR 2025, pp. 41175-41218, 2025. Internet: https://arxiv.org/abs/2408.00714.

[7] J. Jiang, Z. Wang, M. Zhao, Y. Li and D. Jiang. SAM2MOT: A Novel Paradigm of Multi-Object Tracking by Segmentation, 2025. Intrenet: https://arxiv.org/abs/2504.04519.

[8] C.-Y. Yang, H.-W. Huang, W. Chai, Z. Jiang and J.-N. Hwang. SAMURAI: Adapting Segment Anything Model for Zero-Shot Visual Tracking with Motion-Aware Memory, 2024. Internet: http://arxiv.org/abs/2411.11922.

[9] P. Zhang, J. Li, C. Wang and Y. Niu. SAM2MS: An Efficient Framework for HRSI Road Extraction Powered by SAM2. Remote Sens., vol. 17, no. 18, p. 3181, 2025, doi: 10.3390/rs17183181.

■Ngày nhận bài: 02/3/2026 ■Ngày sửa bài: 11/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 20/3/2026

Nghiên cứu ứng dụng của hệ thống nhận dạng tự động trong dự đoán hành trình tàu biển

Research on applying the automatic identification system in vessel trajetory prediction

> TS PHẠM VIỆT HƯNG*, THS NGUYỄN PHƯƠNG LÂM
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email: phamviethung@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Hệ thống nhận dạng tự động (AIS) vốn được phát triển để phục vụ công tác tránh va trong điều khiển hoạt động hàng hải. Trong những năm gần đây, dữ liệu của hệ thống AIS không ngừng tăng lên do các quy định chặt chẽ hơn, đồng thời phạm vi phủ sóng của các hệ thống AIS cũng rộng hơn nhờ sự phát triển của các vệ tinh thu dữ liệu AIS cũng như các trạm bờ thu phát AIS. Trong lĩnh vực hàng hải thông minh, việc dự đoán tuyến đường của tàu biển đóng vai trò quan trọng để hỗ trợ ra quyết định tránh va. Nhờ khả năng cung cấp thông tin gần như thời gian thực về vị trí của tàu biển, việc dự đoán hành trình tàu biển dựa trên dữ liệu AIS là một xu hướng phát triển đầy hứa hẹn. Bài báo thực hiện đánh giá độ tin cậy trong việc sử dụng dữ liệu AIS để dự báo hành trình tàu biển. Những kết quả thu được trong tính toán lý thuyết và mô phỏng cho thấy, việc sử dụng dữ liệu AIS trong dự đoán hành trình tàu biển có độ tin cậy cao. Trong tương lai, khi cải thiện mô hình dự đoán, mức độ tin cậy sẽ còn được tăng cường và tin cậy ngay cả trong các điều kiện môi trường, vùng nước phức tạp về hoạt động hàng hải.

Từ khóa: Dữ liệu AIS; dự đoán hành trình tàu biển; tránh va; hàng hải thông minh.

ABSTRACT

The Automatic Identification System (AIS) was originally developed to assist in collision avoidance in maritime operations. In recent years, AIS data has continuously increased as a result of more regulations and the wider coverage of AIS systems with the development of satellite-AIS and shore-based AIS stations. In the field of intelligent maritime navigation, vessel trajetory prediction plays an importance role in supporting collision avoidance decisions. Due to its ability to provide nearly real-time information of the vessel, AIS-based vessel trajetory prediction is a promising development trend. This paper evaluates the reliability of using AIS data for vessel trajetory prediction. The results obtained from theoretical calculations and simulations show that using AIS data in vessel trajetory prediction is highly reliable. In the future, as the predictive model improves, its reliability will be further enhanced, even under complex environmental conditions and the water regions with dense marine traffic.

Keywords: AIS data; vessel trajetory prediction; collision avoidance; intelligent maritime.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

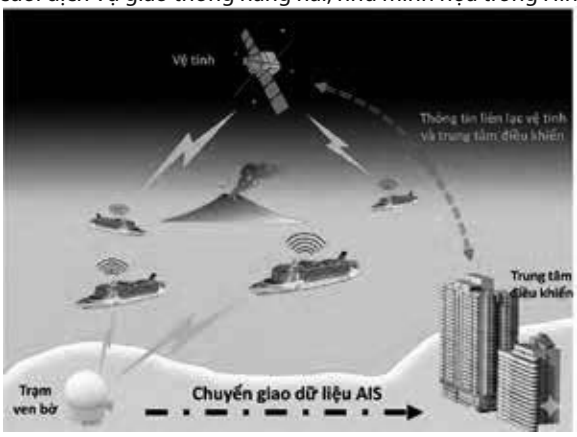
Với sự toàn cầu hóa nhanh chóng và nhu cầu ngày càng tăng về vận tải biển trên toàn thế giới, an toàn hàng hải đã thu hút sự chú ý rất lớn trong cả lĩnh vực hàng hải và thương mại trong thập kỷ qua. Thống kê cho thấy, hơn 90% thương mại thế giới hiện nay được vận chuyển bằng đường biển, nhưng đồng thời một phần đáng kể các tai nạn hàng hải (khoảng 80%) là do lỗi của con người [1, 2]. Những tai nạn này đã gây ra thương vong nghiêm trọng về người, thiệt hại kinh tế và khủng hoảng môi trường. Do đó, tầm quan trọng của an toàn hàng hải đã được nâng lên mức chưa từng có trong ngành Hàng hải [3]. Một hệ thống tránh va hiệu quả (COLAV) là điều cần thiết trong bối cảnh hoạt động hàng hải ngày càng nhộn nhịp. Để tránh va, quỹ đạo tương lai của các tàu gần đó cần phải được dự đoán. Một cách tiếp cận thường được sử dụng hiện nay là giả định tốc độ và hướng đi không đổi (ví dụ: [1]). Bằng cách sử dụng dữ liệu vị trí, hướng đi và tốc độ từ dữ liệu hệ thống nhận dạng tự động (AIS) do tàu truyền đi, có thể thu được các dự đoán chính xác hơn. Tuy nhiên, vì các mẫu từ dữ liệu AIS lịch sử phản ánh tốt nhất hành vi bình thường của tàu, trái ngược với hành vi trong các tình huống gần va chạm, nên các dự đoán dựa trên AIS chủ yếu hữu ích cho các thao tác chủ động nhằm ngăn ngừa các tình huống va chạm có thể xảy ra. Các nguồn dữ liệu nhanh hơn và đáng tin cậy hơn, chẳng hạn như radar phải được sử dụng nếu tình huống đã trở nên nghiêm trọng.

Việc ước tính chính xác hơn quỹ đạo di chuyển trong tương lai của các tàu xung quanh cũng có thể được sử dụng để cải thiện hệ thống nhận thức tình huống. Trên biển, những thách thức về tính tự chủ khác với những thách thức trên đường bộ khi tàu thuyền có thể di chuyển theo mọi hướng. Thêm vào đó, Quy định quốc tế về phòng ngừa va chạm trên biển (COLREGS) ít định lượng hơn và phụ thuộc nhiều vào kinh nghiệm thực tế hơn so với các quy tắc giao thông ô tô tiêu chuẩn, khiến việc dự đoán hành vi của tàu thuyền trong tương lai càng khó khăn hơn. Mặt khác, các mô hình di chuyển của tàu thuyền được tiết lộ bởi dữ liệu AIS lịch sử có khả năng chứa thông tin ngầm định như vị trí nào có thể, an toàn và hợp lý để điều khiển, vì phần lớn tàu thuyền di chuyển trong các tuyến đường và khu vực biển được chỉ dẫn trên bản đồ.

2. HỆ THỐNG NHẬN DẠNG TỰ ĐỘNG VÀ GIẢI PHÁP DỰ ĐOÁN HÀNH TRÌNH TÀU BIỂN

2.1. Cấu trúc hệ thống AIS

Hệ thống AIS là một hệ thống theo dõi tự động toàn cầu bao gồm bộ thu phát trên tàu, bộ thu trạm mặt đất/vệ tinh và thiết bị đầu cuối dịch vụ giao thông hàng hải, như minh họa trong Hình 1.



Hình 1. Cấu trúc tổng quát hệ thống AIS

Bộ thu phát tần số rất cao (VHF) trên tàu tự động phát sóng thông tin động của tàu chủ (bao gồm vị trí tàu, tốc độ, hướng đi, tốc độ quay, điểm đến và thời gian đến dự kiến) cũng như thông tin tĩnh (bao gồm tên tàu, ID MMSI của tàu, ID tin nhắn, loại tàu, kích thước tàu, thời gian hiện tại) trong một tin nhắn AIS. Khoảng thời gian giữa các tin nhắn là từ 2 đến 10 giây, tùy thuộc vào tốc độ của tàu khi đang di chuyển và 3 phút khi tàu đang neo đậu. Trong khi đó, mỗi bộ thu phát cũng nhận được tin nhắn AIS từ các tàu khác trong phạm vi 20 hải lý. Các tin nhắn cũng có thể được nhận bởi một trạm trên bờ, phạm vi phủ sóng điển hình khoảng 60 hải lý hoặc bởi một vệ tinh, phạm vi phủ sóng hơn 400 hải lý. Dữ liệu AIS thu thập được có thể được truyền tải qua khoảng cách xa và lưu trữ với dung lượng lớn, mang lại giá trị to lớn cho việc khai thác dữ liệu hàng hải và định vị thông minh.

2.2. Các hướng tiếp cận trong dự đoán hành trình tàu biển

** Hướng tiếp cận dựa trên phân cụm:*

Các phương pháp dự đoán chuyển động của các đối tượng thường dựa trên việc phân cụm đường đi và thường có thể được chia thành 4 bước chính trong bối cảnh dữ liệu AIS:

- Bước 1. Phân cụm các đường đi trong dữ liệu lịch sử để tạo ra các tập hợp các mẫu đường đi tương tự.
- Bước 2. Phân loại các chuỗi điểm dữ liệu AIS mới đến để gán tàu vào các mẫu đường đi được tìm thấy ở Bước 1.
- Bước 3. Tạo các đường đi đại diện cho hành vi chung trong mỗi mẫu đường đi.
- Bước 4. Dự đoán quỹ đạo tương lai của tàu, ví dụ như dọc theo các đường đi đại diện của chúng hoặc bằng cách sử dụng bộ lọc hạt.

** Hướng tiếp cận dựa tìm điểm lân cận đơn lẻ:*

Hướng tiếp cận dựa trên tìm kiếm điểm lân cận đơn lẻ sẽ được phân tích và đánh giá ở trong bài báo này. Phương pháp này sẽ ước lượng hướng đi và tốc độ trong tương lai tại mỗi thời điểm dựa vào dữ liệu AIS trước đó (dữ liệu lịch sử).

Gọi X là ma trận dữ liệu AIS lịch sử, do đó:

$$X = [X_1 \quad X_2 \quad \dots \quad X_M]^T \tag{1}$$

Trong đó: M là tổng số bản tin AIS và X_i bao gồm các thông tin:

$$X_i = [MMSI_i \quad t_i \quad p_i^T \quad \chi_i \quad v_i] \tag{2}$$

Trong đó: i ∈ 1,2,…, M, $MMSI_i$, t_i, p_i , x_i, v_i lần lượt là số MMSI (Maritime Mobile Service Identity), nhãn thời gian, vector vị trí, hướng so với mặt đất (COG) và tốc độ so với mặt đất (SOG). Vector vị trí có thể được biểu diễn cụ thể hơn là $p_i = [\lambda i \ \varphi_i]^T$, trong đó λi và φ_i là kinh độ và vĩ độ WGS84. Số hiệu MMSI gồm có 9 chữ số và được sử dụng để định danh cho mỗi con tàu. Ma trận X được sắp xếp sao cho các bản tin MMSI có cùng số MMSI được đưa vào 1 nhóm và các bản tin trong mỗi nhóm được sắp xếp theo thứ tự tăng dần của nhãn thời gian.

Một quỹ đạo dự đoán bao gồm K vị trí được dự đoán tại các thời điểm tương ứng. Tại mỗi bước lặp K ∈ 1,…, K, trạng thái dự đoán được tách thành một trạng thái tiên nghiệm (a priori), ký hiệu là $\hat{X}_i^{k-}$, và một trạng thái hậu nghiệm (a posteriori), ký hiệu là $\hat{X}_i^{k+}$. Hai trạng thái này được viết là:

$$\hat{X}_i^{k-} = [MMSI_i \quad \widehat{t^k} \quad \widehat{p^k} \quad \widehat{\chi^{k-}} \quad \widehat{v^{k-}}] \tag{3}$$

và:

$$\hat{X}_i^{k+} = [MMSI_i \quad \widehat{t^k} \quad \widehat{p^k} \quad \widehat{\chi^{k+}} \quad \widehat{v^{k+}}]. \tag{4}$$

Lưu ý rằng MMSI, vector vị trí và nhãn thời gian là giống nhau đối với trạng thái tiên nghiệm và hậu nghiệm. Điểm khác biệt duy nhất là hướng COG dự đoán và tốc độ SOG dự đoán. Hướng và tốc độ dự đoán tiên nghiệm tại bước lặp k, $\widehat{\chi^{k-}}$ và $\widehat{v^{k-1}}$ đại diện cho hướng và tốc độ dự đoán giữa vị trí trước đó $\widehat{p^{k-1}}$ và vị trí hiện tại $\widehat{p^k}$. Tương tự, hướng và tốc độ dự đoán hậu nghiệm tại bước lặp k, $\widehat{\chi^{k+1}}$ và $\widehat{v^{k+1}}$, đại diện cho hướng và tốc độ dự đoán giữa vị trí hiện tại $\widehat{p^k}$ và vị trí tiếp theo $\widehat{p^{k+1}}$.

Tất cả các trạng thái X_i gần với một trạng thái dự đoán tiên nghiệm (a priori) $\hat{X}_i^{k-}$ dựa theo một phép đo khoảng cách, được định nghĩa là lân cận gần (CNs - close neighbors) của trạng thái dự đoán đó. Tập hợp các lân cận gần (CNs) tại một bước dự đoán k cho trước được định nghĩa là:

$$C^k = X_i \mid d(\widehat{p^k}, p_i) \le r_c, \chi_i \in S, X_i \in X \tag{5}$$

Trong đó:

$$d(\widehat{p^k}, p_i) = 2R\left(\left(\left(\frac{\widehat{\phi^k} - \phi_i}{2}\right) + \cos\cos(\phi_i)\ \cos\cos\left(\widehat{\phi^k}\right)\left(\frac{\widehat{\lambda^k} - \lambda_i}{2}\right)\right)^{\frac{1}{2}}\right) \tag{6}$$

là khoảng cách giữa vị trí dự đoán hiện tại và bất kỳ vị trí trong tập dữ liệu AIS được cho bởi quy tắc Haversine, R là bán kính trái đất, r_c là bán kính tìm kiếm và S là một khoảng các góc hướng đi được định nghĩa bởi:

$$S = [\widehat{\chi^{k-}} - \Delta\chi, \widehat{\chi^{k-}} + \Delta\chi] \tag{7}$$

Trong đó: Δx > 0 là độ lệch hướng cực đại. Do vậy, tiêu chí về khoảng cách giới hạn tất cả các CN phải nằm trong một giá trị bán kính nhất định cho trước so với vị trí dự đoán, cũng như có một hướng đi nằm trong độ lệch tối đa so với hướng dự đoán *tiên nghiệm* (a priori). Sau khi tập hợp các CN được tìm thấy xung quanh , giá trị trung bình hoặc trung vị của hướng và tốc độ của các CN được sử dụng để dự đoán hướng và tốc độ của tàu giữa vị trí hiện tại và vị trí tiếp theo, nghĩa là, chúng được sử dụng để tính toán trạng thái *hậu nghiệm* (a posteriori) $\hat{X}_i^{k+}$. Để đơn giản, mọi trạng thái thuộc tập hợp các CN tại bước dự đoán k, nghĩa là tất cả $X_i \in C^K$, bằng:

$$X_c^k = [MMSI_c^k \quad t_c^k \quad p_c^k \quad \widetilde{\chi}_c^k \quad v_c^k]$$

Với c ∈ (1,…,C), trong đó C là số lượng CN tại bước k đã cho.

Cuối cùng, một quỹ đạo dự đoán bắt đầu từ một trạng thái X_i cho trước được định nghĩa là:

$$\widehat{T}_i = \left[\widehat{p^1} \quad \widehat{t^1}\right], \dots, \left[\widehat{p^K} \quad \widehat{t^K}\right] \tag{8}$$

Tương tự, quỹ đạo thực của một con tàu, T_i, bắt đầu từ một trạng thái X_i cho trước, được định nghĩa là:

$$T_i = [p^1 \quad t^1], \dots, [p^L \quad t^L] \tag{9}$$

Trong đó: L là số lượng trạng thái AIS được đo lường trong quỹ đạo. Lưu ý rằng K và L không nhất thiết phải bằng nhau, vì có thể thực hiện nhiều bước dự đoán giữa hai tin nhắn AIS liên tiếp. Cũng lưu ý rằng phần tử đầu tiên trong $\widehat{T}_i$ và T_i là bằng nhau, vì điểm xuất phát cho cả hai quỹ đạo được cho bởi cùng một trạng thái, X_i.

** Các tham số quyết định:* Chiều dài bước Δl quyết định vị trí tiếp theo sẽ được lan truyền bao xa, theo công thức:

$$\widehat{p^{k+1}} = \widehat{p^k} + \Delta l\left[sin\,sin\left(\widehat{\chi^{k+}}\right) f\left(\widehat{\phi^k}\right), cos\,cos\left(\widehat{\chi^{k+}}\right) g\left(\widehat{\phi^k}\right)\right] \tag{10}$$

Trong đó: $f(\widehat{\phi^k})$ và $g(\widehat{\phi^k})$ là các hàm của vĩ độ hiện tại $\widehat{\phi^k}$, dùng để chuyển đổi từ mét sang độ kinh và độ vĩ tương ứng. Chiều dài bước Δl thể hiện độ cong của các tuyến đường biển phía trước. Chiều dài bước ngắn tạo làm cho các vòng cua hẹp hơn và quỹ đạo mượt mà hơn, nhưng làm tăng yêu cầu tính toán. Nếu chiều dài bước dài, thuật toán có thể không đi theo được một số khúc cua và một trạng thái dự đoán rơi vào vùng không có CN nào. Lý tưởng nhất, thuật toán sẽ tự điều chỉnh chiều dài bước cho phù hợp với độ cong phía trước của tàu.

Bán kính tìm kiếm r_c giới hạn các CN phải nằm trong khoảng cách Euclidean tối đa so với vị trí dự đoán hiện tại. Để các vùng tìm kiếm liên tiếp không bị chồng lấn lên nhau, nghĩa là cùng một láng giềng không bao giờ được đánh giá nhiều hơn một lần, mối quan hệ giữa bán kính tìm kiếm và chiều dài bước có thể được thiết lập theo $r_c = \frac{\Delta l}{2}$.

Tham số độ lệch hướng đi tối đa Δx cùng với bán kính tìm kiếm xác định thước đo khoảng cách, như được định nghĩa trong (5). Tham số này là cần thiết nhằm loại trừ các tàu xung quanh di chuyển theo hướng ngược lại với con tàu đang được dự đoán, cũng như để tránh ảnh hưởng từ các tuyến đường biển cắt ngang. Số bước dự đoán k phải được điều chỉnh cho phù hợp với tầm nhìn dự đoán mong muốn.

Thuật toán Dự đoán theo phương pháp tìm kiếm lân cận đơn lẻ

1: Cho X_i
2: **Thiết lập các tham số quyết định**
(a) Δl Chiều dài bước [m]
(b) r_c Bán kính tìm kiếm [m]
(c) $\Delta\chi$ Độ lệch góc hướng đi tối đa [độ]
(d) K Số bước dự đoán
3: Đặt $\widehat{X_i^{1-}} = X_i$
4: **for** k = 1 to K **do**
5: Tìm tất cả các CN X_c^k xung quanh $\widehat{X_i^{k-}}$
6: Tính $\widehat{X_i^{k+}}$ bằng cách:
(a) Tính $\widehat{\chi^{k+}}$ dựa trên X_c^k
(b) Tính $\widehat{v^{k+}}$ dựa trên X_c^k
7: Tính vị trí dự đoán tiếp theo tại thời điểm dự đoán của nó:
(a) Tính $\widehat{p^{k+1}}$ theo (10)
(b) Tính $\widehat{t^{k+1}} = \widehat{t^k} + \frac{\Delta l}{\widehat{v^{k+}}}$
8: Đặt $\widehat{X_i^{(k+1)-}} = \left[MMSI_i \quad \widehat{t^{k+1}} \quad \widehat{p^{k+1}} \quad \widehat{\chi^{k+}} \quad \widehat{v^{k+}}\right]$
9: **end for**

** Dự đoán hướng đi:* Một mô hình vận tốc không đổi được sử dụng bất cứ khi nào $C^k = \emptyset$. Khi $C^k \neq \emptyset$, dự đoán hướng đi hậu nghiệm (a posteriori) tại một bước lặp cho trước, $\widehat{\chi^{k+}}$, được dựa trên hành vi của các CN, như được định nghĩa trong (5). Hai dự đoán hướng đi, dựa trên giá trị trung bình và trung vị của các lân cận, được thực hiện và so sánh.

Vì hướng đi có tính tuần hoàn trong khoảng [0°, 360°], cần phải cẩn trọng khi tính toán hướng đi trung bình của tất cả các CN. Hướng đi trung bình có thể được tính theo:

$$\underline{\chi_c} = \begin{cases} \left(\frac{\underline{s}}{\underline{c}}\right); \text{ nếu } \underline{s} > 0, \underline{c} > 0 \\ \left(\frac{\underline{s}}{\underline{c}}\right) + 180°; \text{nếu } \underline{c} < 0 \\ \left(\frac{\underline{s}}{\underline{c}}\right) + 360°; \text{ nếu } \underline{s} < 0, \underline{c} > 0 \end{cases} \tag{11}$$

Trong đó:

$$\underline{s} = \frac{1}{C}\sum_{c=1}^{C} sin\,sin\left(\chi_c\right) \quad \underline{c} = \frac{1}{C}\sum_{c=1}^{C} cos\,cos\left(\chi_c\right) \tag{12}$$

Giá trị trung bình có nhược điểm là dễ bị ảnh hưởng bởi các giá trị bất thường. Hướng đi trung vị của các CN, ký hiệu là $\widetilde{\chi_c}$, được áp dụng nhằm giảm thiểu tác động này. Tương tự, khi đánh giá hướng đi như một biến tuần hoàn, cũng phải được cân nhắc trong việc tính toán $\widetilde{\chi_c}$.

** Dự đoán tốc độ:* Thay vì giả định tốc độ không đổi trong suốt toàn bộ quá trình dự đoán, tốc độ trung bình hoặc trung vị của các CN, được ký hiệu lần lượt là $\underline{v_c}$ và $\widetilde{v_c}$, có thể được sử dụng. Mặc dù không được thử nghiệm trong bài báo này, việc thực hiện một quá trình chuyển đổi từ sử dụng tốc độ không đổi (và có thể cả hướng đi) tại k = 1 sang các dự đoán hoàn toàn dựa trên các CN khi k tăng lên và độ tin cậy của tin nhắn AIS nhận được cuối cùng giảm xuống.

3. KẾT QUẢ VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG

Bước thời gian, Δt_i, được đặt bằng với khoảng thời gian giữa tin nhắn AIS được trích xuất và tin nhắn AIS nhận được tiếp theo của tàu. Chỉ các tin nhắn tiếp theo có độ chênh lệch thời gian nhỏ hơn t_{max} mới được đánh giá.

Đối với phương pháp đánh giá bước thời gian đơn, kết quả dự đoán so sánh với hướng đi và tốc độ "thực", đây là những giá trị được tính toán dưới dạng các giá trị đường thẳng giữa trạng thái của tàu, X_i, và trạng thái tiếp theo của nó, X_{i+1}, theo:

$$\chi_{true} = atan2\left((\lambda_{i+1} - \lambda_i)\frac{1}{f(\phi_i)}, (\phi_{i+1} - \phi_i)\frac{1}{g(\phi_i)}\right) \tag{13}$$

$$v_{true} = \frac{d(p_{i+1}, p_i)}{t_{i+1} - t_i} \tag{14}$$

Trong đó: $\frac{1}{f(\phi_i)}$ và $\frac{1}{g(\phi_i)}$ là các hàm của vĩ độ hiện tại, Φ_i, dùng để chuyển đổi từ độ kinh và độ vĩ sang đơn vị độ dài và d (p_{i+1},p_i) được cho trong (6).

Bảng 1. Giải thích các phương pháp dự đoán hướng đi và tốc độ

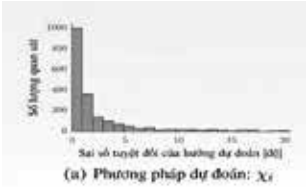
Phương pháp dự đoán	Giải thích
χ_i	Hướng đi của tàu (COG) nhận được cuối cùng từ tin nhắn AIS
$\widetilde{\chi_c}$	Hướng đi trung vị của các CN
$\underline{\chi_c}$	Hướng đi trung bình của các CN
v_i	Tốc độ của tàu (SOG) nhận được cuối cùng từ tin nhắn AIS
$\widetilde{v_c}$	Tốc độ trung vị của các CN
$\underline{v_c}$	Tốc độ trung bình của các CN

Vị trí bắt đầu của một quá trình dự đoán bằng với vị trí bắt đầu thực sự trong phương pháp dự đoán bước thời gian đơn. Do đó, sai số dự đoán là kết quả của sai số hướng đi $\widehat{\chi^{1+}} - \chi_{true}$ và sự khác biệt về chiều dài giữa đường đi thực (một đường thẳng) và chiều dài bước dự đoán. Sự khác biệt thứ hai này còn là một hàm của sai số tốc độ $\widehat{v^{1+}} - v_{true}$ và thời gian dự đoán Δt_i, trong đó Δt_i là bằng nhau đối với vector dự đoán và vector thực. Vì vậy, sai số dự đoán trong phương pháp bước đơn phụ thuộc vào sai số hướng đi và sai số tốc độ và các sai số này được xử lý riêng biệt nhằm đánh giá tác động riêng của từng loại. Hình 2 đến Hình 7 thể hiện sai số tuyệt đối của tất cả các dự đoán theo các tham số như mô tả ở Bảng 1. Để dễ quan sát, các trục của hình được giới hạn để biểu diễn 90% lượng sai số. Cuối cùng, Bảng 2 thể hiện các giá trị sai số toàn phương trung bình (RMSE) và ba phân vị cho các phương pháp dự đoán. Các phân vị được tính toán từ các sai số tuyệt đối.

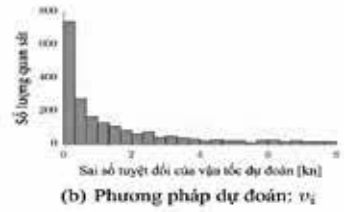
Bảng 2. So sánh các phương pháp dự đoán hướng đi và tốc độ cho phương pháp dự đoán bước thời gian đơn

Phương pháp dự đoán hướng đi/tốc độ	RMSE	Phân vị (thứ 10)	Phân vị (thứ 50)	Phân vị (thứ 90)
χ_i	33,57°	0,142°	1,217°	20,44°
$\widetilde{\chi_c}$	34,19°	0,435°	2,982°	25,52°
$\underline{\chi_c}$	33,83°	0,503°	3,290°	23,19°
v_i	5,801 kn	0,071 kn	0,865 kn	7,786 kn
$\widetilde{v_c}$	5,497 kn	0,273 kn	1,842 kn	7,303 kn
$\underline{v_c}$	5,377 kn	0,405 kn	2,199 kn	7,870 kn

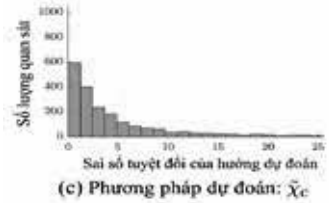
RMSE và các phân vị được sử dụng để đánh giá độ chính xác của phương pháp dự đoán. Trái ngược với các phân vị thấp hơn, RMSE bị ảnh hưởng mạnh với các lỗi lớn. Giá trị RMSE của hướng đi đặc biệt lớn và gây ra bởi một lượng đáng kể các trường hợp tàu quay đầu giữa X_i và X_{i+1} dẫn đến lỗi dự đoán gần 180°. Thuật toán có thể dễ dàng được điều chỉnh để xử lý các tình huống này, ví dụ bằng cách sử dụng thông tin loại tàu được cung cấp bởi thông báo AIS. Dựa trên điều này, các phân vị không bị ảnh hưởng bởi các bất thường trong dự đoán, chẳng hạn như phân vị thứ 50, cung cấp thông tin cụ thể hơn về độ chính xác của dự đoán.



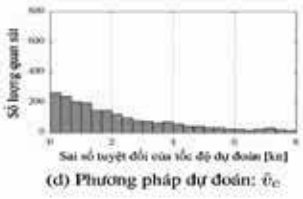
Hình 2. Sai số dự đoán hướng đi theo phương pháp sử dụng hướng cuối cùng nhận được



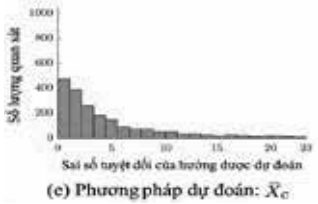
Hình 3. Sai số dự đoán hướng đi theo phương pháp sử dụng tốc độ cuối cùng nhận được



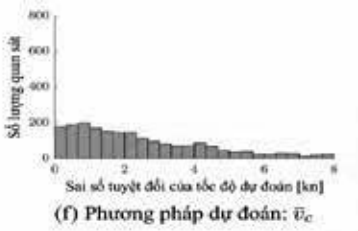
Hình 4. Sai số dự đoán hướng đi theo phương pháp sử dụng hướng đi trung vị các CN



Hình 5. Sai số dự đoán hướng đi theo phương pháp sử dụng tốc độ trung vị các CN



Hình 6. Sai số dự đoán hướng đi theo phương pháp sử dụng hướng đi trung bình các CN



Hình 7. Sai số dự đoán hướng đi theo phương pháp sử dụng tốc độ trung bình các CN

Rõ ràng, khi quan sát Hình 2 và Hình 3, việc sử dụng hướng đi và tốc độ từ tin nhắn AIS gần nhất mang lại các dự đoán về hướng đi và tốc độ chính xác nhất cho một bước thời gian. Tuy nhiên, các dự đoán này giả định con tàu tiếp tục với hướng đi và tốc độ không đổi mà không dựa vào hành vi lịch sử của các CN. Mô hình vận tốc không đổi không sử dụng thông tin trong dữ liệu AIS lịch sử và do đó không phù hợp cho các quỹ đạo đường cong. Ngược lại, các phương pháp tiếp cận dựa trên CN có thể thích ứng với môi trường xung quanh ở mỗi bước dự đoán và có thể xử lý được các đường cong.

4. KẾT LUẬN

Với gia tăng không ngừng của dữ liệu AIS, việc dự đoán hành trình tàu biển dựa trên các dữ liệu AIS quá khứ (dữ liệu AIS lịch sử) sẽ ngày càng được sử dụng rộng rãi và có độ chính xác ngày càng tốt hơn. Khoảng thời gian dự đoán hành trình tàu biển dựa trên phương pháp này có thể đạt đến khoảng 30 phút. Đồng thời, nó có thể dự đoán hành trình với các độ cong của hướng hành trình khác nhau. Tuy nhiên, thuật toán khi thực hiện vẫn còn tồn tại nhiều sai sót nhưng thuật toán có thể vẫn rất phù hợp để hỗ trợ một cách chủ động cho các hệ thống tránh va.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT25-26.74.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Wiegmann, Douglas A. and Scott A. Shappell. A human error approach to aviation accident analysis: The human factors analysis and classification system. Routledge, 2017.

[2] Kim, Hong-Tae, Seong Na and Wook-Hyun Ha. A case study of marine accident investigation and analysis with focus on human error. Journal of the ergonomics society of Korea 30.1, 137-150, 2011.

[3] Knapp, Sabine and Philip Hans Franses. Comprehensive review of the maritime safety regimes: present status and recommendations for improvements. Transport reviews 30.2, 241-270, 2010.

[4] Lee, Jae-Gil, Jiawei Han and Kyu-Young Whang. Trajectory clustering: a partition-and-group framework. Proceedings of the 2007 ACM SIGMOD international conference on Management of data, 2007.

[5] Ester, Martin, et al. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. kdd. vol. 96. no. 34, 1996.

[6] Kalayeh, Mahdi M., et al. Understanding trajectory behavior: A motion pattern approach. arXiv preprint arXiv:1501.00614, 2015.

[7] Jiashun, Chen. A new trajectory clustering algorithm based on TRACLUS. Proceedings of 2012 2nd International Conference on Computer Science and Network Technology. IEEE, 2012.

[8] Kashyap, Shrikant, Sujoy Roy, and Wynne Hsu. Farm: Feature-assisted aggregate route mining in trajectory data. 2009 IEEE International Conference on Data Mining Workshops. IEEE, 2009.

■Ngày nhận bài: 24/02/2026 ■Ngày sửa bài: 03/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 11/3/2026

Xây dựng giải pháp phần cứng IoT giám sát nhiên liệu tàu thủy tương thích với hạ tầng truyền dẫn vệ tinh

Development of an IoT hardware solution for ship fuel monitoring compatible with satellite transmission infrastructure

> TS ĐOÀN HỮU KHÁNH*, PGS.TS ĐINH ANH TUẤN, TS TRƯƠNG CÔNG MỸ
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email: khanhdh.ddt@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Trong bối cảnh chi phí nhiên liệu chiếm tỷ trọng lớn và các quy định khắt khe của IMO về kiểm soát phát thải, việc giám sát tiêu thụ nhiên liệu tàu thủy theo thời gian thực trở thành yêu cầu cấp thiết. Tuy nhiên, hạ tầng truyền dẫn vệ tinh trên các đội tàu vừa và nhỏ tại Việt Nam thường có băng thông thấp và độ ổn định không cao, dẫn đến tình trạng mất mát dữ liệu khi tàu đi vào vùng khuất sóng. Nghiên cứu này đề xuất một giải pháp IoT "Offline-first" chi phí thấp, sử dụng PLC S7-1200 làm bộ thu thập trung tâm và máy tính nhúng (IPC) đóng vai trò cổng kết nối biên (Edge Gateway). Nhóm tác giả đã xây dựng thuật toán duy trì phiên làm việc (Persistent Session) để khắc phục hạn chế về Web Server của PLC, đồng thời phát triển cơ chế đồng bộ dữ liệu "Lưu trữ và Chuyển tiếp" (Store-and-Forward) thích ứng. Kết quả thực nghiệm cho thấy hệ thống đảm bảo tính toàn vẹn dữ liệu 100% ngay cả khi mất kết nối kéo dài, tự động đồng bộ bù dữ liệu khi mạng phục hồi, đồng thời giảm thiểu đáng kể chi phí truyền dẫn vệ tinh nhờ tối ưu hóa gói tin. Giải pháp có khả năng ứng dụng thực tiễn cao, hỗ trợ đắc lực cho công tác quản lý năng lượng đội tàu.

Từ khóa: IoT; giám sát nhiên liệu; đồng bộ dữ liệu; Store-and-Forward; Web Server.

ABSTRACT

In the context of high fuel costs and the strict regulations of the International Maritime Organization (IMO) regarding emission control, real-time monitoring of ship fuel consumption has become an urgent requirement. However, the satellite transmission infrastructure on small and medium-sized fleets in Vietnam often suffers from low bandwidth and poor stability, leading to data loss when ships enter signal blind zones. This study proposes a low-cost "Offline-first" IoT solution utilizing the S7-1200 PLC as the central data acquisition unit and an embedded Industrial PC (IPC) functioning as the Edge Gateway. The authors have developed a Persistent Session algorithm to overcome the limitations of the PLC's Web Server, alongside an adaptive "Store-and-Forward" data synchronization mechanism. Experimental results demonstrate that the system ensures 100% data integrity even during prolonged connectivity losses, automatically synchronizes missing data upon network recovery, and significantly reduces satellite transmission costs through data packet optimization. This solution holds high practical applicability, providing substantial support for fleet energy management.

Keywords: IoT; fuel monitoring; data synchronization; Store-and-Forward; Web Server.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh ngành Hàng hải toàn cầu đang chịu áp lực lớn từ các quy định của Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO) về kiểm soát khí thải và hiệu quả năng lượng [1, 2], việc giám sát tiêu thụ nhiên liệu tàu thủy theo thời gian thực trở thành yêu cầu cấp thiết. Các phương pháp truyền thống dựa trên ghi chép nhật ký tàu (Noon Report) thường có độ trễ lớn và sai số do yếu tố con người, không còn phù hợp với xu hướng chuyển đổi số hiện nay [3].

Gần đây, nhiều nghiên cứu đã đề xuất ứng dụng Internet vạn vật (IoT) để tự động hóa quá trình thu thập dữ liệu trên tàu [4, 5]. Một số nghiên cứu trong nước như nghiên cứu [6] cũng đã bước đầu xây dựng các thiết bị giám sát thông số điện năng, tạo tiền đề cho việc mở rộng sang giám sát nhiên liệu. Tuy nhiên, thách thức lớn nhất khi triển khai IoT hàng hải diện rộng là sự gián đoạn của kết nối vệ tinh. Theo K. Al-Hajri và cộng sự [7], các hệ thống giám sát thời gian thực thường gặp lỗi mất gói tin (packet loss) khi tàu đi vào vùng khuất sóng hoặc khi băng thông vệ tinh bị nghẽn. Các giải pháp sử dụng kiến trúc điện toán đám mây (Cloud Computing) truyền thống bộc lộ nhược điểm về độ trễ và rủi ro mất dữ liệu [8, 9].

Để giải quyết vấn đề này, xu hướng chuyển dịch từ xử lý đám mây sang điện toán biên (Edge Computing) đang được quan tâm đặc biệt. T. Yang và cộng sự [10] đã đề xuất kiến trúc điện toán biên hàng hải (Maritime Edge Computing) để giảm tải cho đường truyền vệ tinh. Mặc dù vậy, các nghiên cứu hiện có như của Hapsari và cộng sự [11] chủ yếu tập trung vào phần cứng đo lường mà chưa giải quyết triệt để bài toán đồng bộ dữ liệu (Data Synchronization) khi mạng chập chờn. Các cơ chế như Store-and-Forward (Lưu trữ và Chuyển tiếp) đã được áp dụng trong mạng cảm biến không dây [12] nhưng chưa được tối ưu hóa cho các thiết bị PLC công nghiệp [13].

Kế thừa các kết quả nghiên cứu trước đó về hệ thống quản lý nguồn [14], nhóm tác giả đề xuất một giải pháp thu thập và đồng bộ dữ liệu nhiên liệu tàu thủy dựa trên cơ chế "Offline-first". Hệ thống sử dụng thuật toán duy trì phiên làm việc bền vững trên PLC S7-1200 để đảm bảo tính toàn vẹn dữ liệu ngay cả trong điều kiện kết nối vệ tinh gián đoạn, khắc phục các hạn chế còn tồn tại [15].

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cấu trúc hệ thống đề xuất

Hình 1. Kiến trúc của hệ thống đề xuất

Hệ thống được thiết kế theo kiến trúc phân tán 3 lớp (Hình 1), tích hợp cơ chế dự phòng dữ liệu ngay từ cấp trường (Field Level) để đảm bảo độ tin cậy tối đa:

- Lớp thiết bị và thu thập (Device Layer): Sử dụng bộ điều khiển khả trình PLC S7-1200 (CPU 1211C). Ngoài chức năng đọc tín hiệu cảm biến và tính toán lưu lượng, PLC được cấu hình tính năng Data Logging để ghi dữ liệu liên tục vào tệp tin CSV trên thẻ nhớ SD tích hợp. Đồng thời, chức năng Web Server được kích hoạt, cho phép truy xuất các tệp tin dữ liệu này thông qua giao thức HTTP. Cơ chế này tạo ra lớp bảo vệ dữ liệu đầu tiên (Local Redundancy), đảm bảo dữ liệu gốc vẫn an toàn ngay cả khi máy tính biên gặp sự cố.

- Lớp xử lý biên (Edge Computing Layer): Trung tâm của hệ thống là máy tính nhúng (IPC) đóng vai trò cổng kết nối thông minh (Edge Gateway). Thay vì sử dụng các giao thức truyền thông công nghiệp truyền thống (như S7 Communication hay Modbus TCP) vốn dễ bị gián đoạn, phần mềm trên IPC thực hiện thu thập dữ liệu bằng cách gửi yêu cầu HTTP (HTTP Requests) tới Web Server của PLC để trích xuất dữ liệu từ các file CSV. Dữ liệu sau đó được lưu trữ vào cơ sở dữ liệu SQL cục bộ (Local Buffer) trước khi tham gia vào quy trình đồng bộ.

- Lớp truyền dẫn (Transmission Layer): Để giải quyết bài toán kết nối qua mạng vệ tinh (VSAT/Inmarsat) với đặc thù không có địa chỉ IP tĩnh (Public Static IP) và tường lửa khắt khe, nghiên cứu ứng dụng giải pháp mạng riêng ảo (VPN) ngang hàng dựa trên giao thức Tailscale (WireGuard). Giải pháp này thiết lập một đường hầm bảo mật (Secure Tunnel) xuyên suốt từ IPC trên tàu về máy chủ bờ.

2.2. Giải pháp thuật toán và phần mềm

Để đảm bảo tính toàn vẹn dữ liệu trong điều kiện kết nối gián đoạn, nhóm tác giả đề xuất và cài đặt hai thuật toán cốt lõi trên thiết bị biên:

2.2.1. Chiến lược quản lý phiên thích ứng (Adaptive Session Strategy)

Do Web Server của PLC S7-1200 áp dụng chính sách Time-out nghiêm ngặt, nghiên cứu phát triển một luồng tác vụ chạy nền (Background Service) hoạt động theo cơ chế "Thăm dò và Tái tạo" (Probe-and-Renew). Thay vì thực hiện đăng nhập lại ở mỗi chu kỳ quét gây lãng phí tài nguyên CPU, hệ thống duy trì một Cookie phiên (Session Cookie) duy nhất.

Quy trình xử lý được thiết kế logic như sau: Hệ thống liên tục gửi yêu cầu HTTP GET kèm Cookie hiện hành. Nếu phản hồi trả về mã thành công (HTTP 200), dữ liệu được phân tích và lưu trữ. Ngược lại, nếu gặp các mã lỗi định danh phiên hết hạn (như HTTP 403 Forbidden hoặc 404 Not Found), một thủ tục tái xác thực (Re-authentication routine) sẽ được kích hoạt tức thời (ngắt ngang chu kỳ nghỉ - sleep interval) để cấp phát Cookie mới và thực thi lại yêu cầu bị lỗi. Cơ chế này đảm bảo dữ liệu không bị mất mát ngay cả tại thời điểm chuyển giao phiên.

2.2.2. Cơ chế đồng bộ dữ liệu thích ứng "Lưu trữ và Chuyển tiếp" (Adaptive Store-and-Forward)

Quy trình hoạt động dựa trên nguyên lý đồng bộ tăng phân (Incremental Synchronization) kết hợp cơ chế tự phục hồi (Self-healing) khi mất kết nối, bao gồm 3 giai đoạn chính:

- Khởi tạo và Kiểm tra đường truyền (Initialization & Connectivity Check): Hệ thống tải cấu hình và thực hiện kiểm tra kết nối ("Ping Heartbeat") định kỳ. Nếu đường truyền vệ tinh bị gián đoạn, chu trình sẽ chuyển ngay sang trạng thái chờ (Sleep) để tiết kiệm tài nguyên xử lý.

- Xác định điểm bù dữ liệu (Handshaking & Data Retrieval): Khi có kết nối, hệ thống thực hiện cơ chế "bắt tay" (handshake) bằng cách truy vấn mốc thời gian dữ liệu mới nhất đang có trên bờ (MAX(LogTime)). Sau đó, tàu sẽ chỉ trích xuất và đóng gói các dữ liệu phát sinh sau mốc thời gian này (WHERE Time > ShoreTime), đảm bảo tính toàn vẹn và tránh trùng lặp dữ liệu.

- Truyền tải và Tối ưu hóa (Transmission & Optimization): Dữ liệu mới (nếu có) được đóng gói và gửi đi theo lô (Batch Insert) nhằm tối ưu hóa băng thông vệ tinh. Sau mỗi chu trình (dù thành công hay thất bại), hệ thống đều kích hoạt chế độ nghỉ (Sleep) từ 5 - 10 giây để giải phóng đường truyền cho các tác vụ vận hành khác.

2.2.3. Phân tích toán học về hiệu quả truyền dẫn

Bên cạnh việc đảm bảo tính toàn vẹn dữ liệu, cơ chế "Store-and-Forward" còn giúp tối ưu hóa chi phí đường truyền vệ tinh thông qua việc giảm thiểu dữ liệu dư thừa (Overhead).

Giả sử hệ thống cần truyền tải N bản ghi dữ liệu trong một chu kỳ T.

Với phương pháp truyền thống (Real-time), mỗi bản ghi được đóng gói và gửi đi riêng lẻ. Tổng dung lượng dữ liệu tiêu thụ $D_{realtime}$ được tính theo công thức:

$$D_{realtime} = \sum_{i=1}^{N} (H_{TCP} + H_{App} + P_i) \quad (1)$$

Trong đó:

H_{TCP} : Kích thước tiêu đề gói tin TCP/IP (Overhead);

H_{App} : Kích thước tiêu đề giao thức ứng dụng (HTTP Header);

P_i : Kích thước dữ liệu thực (Payload) của bản ghi thứ i.

Với giải pháp "Store-and-Forward" đề xuất, dữ liệu được đóng gói thành các Batch (lô). Giả sử kích thước một lô là K bản ghi ($K \gg 1$). Tổng dung lượng D_{batch} là:

$$D_{batch} = \frac{N}{K} \times (H_{TCP} + H_{App}) + \sum_{i=1}^{N} P_i \quad (2)$$

Tỷ lệ tiết kiệm băng thông (Bandwidth Saving Ratio - η) được xác định:

$$\eta = \left(1 - \frac{D_{batch}}{D_{realtime}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

Do K lớn, thành phần Overhead trong D_{batch} giảm đi K lần so với $D_{realtime}$. Điều này chứng minh về mặt lý thuyết rằng giải pháp đề xuất giảm thiểu đáng kể chi phí truyền dẫn vệ tinh.

3. THỰC NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

3.1. Cấu hình hệ thống và triển khai phần mềm

Để kiểm chứng hiệu quả thực tế, nhóm tác giả đã xây dựng mô hình thử nghiệm kết nối giữa tàu và bờ thông qua môi trường mạng giả lập vệ tinh VSAT.

- Phần cứng: Sử dụng PLC S7-1200 làm bộ thu thập dữ liệu gốc (Source) và Máy tính nhúng (Ship IPC) đóng vai trò Gateway biên.

- Phần mềm: Chương trình điều khiển trên Ship IPC được phát triển với thuật toán duy trì phiên (Persistent Session), thực hiện song song hai tác vụ: Thu thập dữ liệu từ PLC (Logging) và đồng bộ dữ liệu về bờ (Pushing).

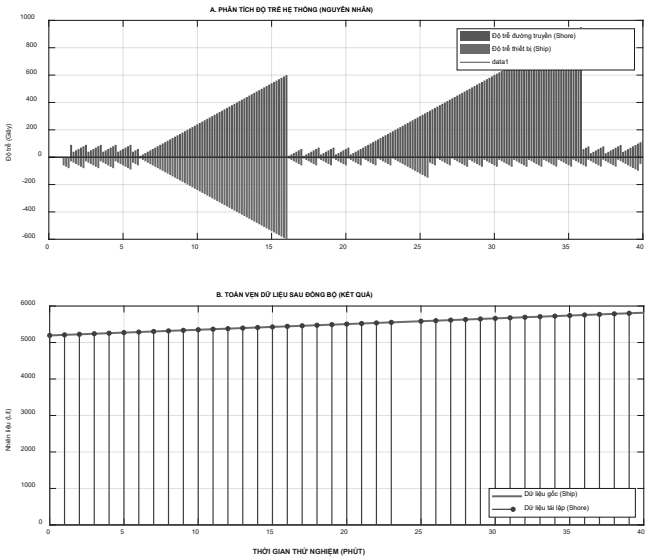
Hình 2. Giao diện nhật ký hoạt động (Log) của phần mềm trên Ship IPC thực hiện chu kỳ quét và đồng bộ dữ liệu

3.2. Kịch bản thử nghiệm

Quá trình thử nghiệm diễn ra trong 40 phút (từ phút thứ 0 đến phút thứ 40), được chia làm 5 giai đoạn nhằm kiểm chứng khả năng tự phục hồi dữ liệu của hệ thống. Kịch bản chi tiết được mô tả trong Bảng 1.

Bảng 1. Kịch bản thử nghiệm khả năng chịu lỗi của hệ thống

Hạng mục/Thời gian (phút)	00 - 06	06 - 16	16 - 21	21 - 36	36 - 40
Giai đoạn	Khởi động	Lỗi cục bộ	Phục hồi	Lỗi đường truyền	Đồng bộ hoàn toàn
Kết nối: Ship IPC ↔ PLC	TỐT	MẤT KẾT NỐI	TỐT	TỐT	TỐT
Kết nối: Ship IPC ↔ Shore IPC	TỐT	TỐT	TỐT	MẤT KẾT NỐI	TỐT



Hình 3. Kết quả thực nghiệm minh họa hoạt động của cơ chế bảo vệ dữ liệu hai lớp (Double Buffering) trong điều kiện lỗi

3.3. Kết quả và thảo luận

Dựa trên dữ liệu vận hành thực tế (Hình 2) và đồ thị phân tích tín hiệu kỹ thuật (Hình 3), hiệu năng của hệ thống được đánh giá qua các khía cạnh sau:

a) Đánh giá khả năng vận hành của phần mềm (Hình 2)

Hình 2 xác nhận phần mềm hoạt động ổn định với chu kỳ quét Ts = 30s. Các thông điệp log ("Tìm thấy...", "Đã nạp...") cho thấy thuật toán đồng bộ hoạt động chính xác theo thời gian thực, tự động phát hiện và xử lý các khối dữ liệu mới phát sinh từ PLC để đẩy về cơ sở dữ liệu SQL Server mà không cần can thiệp thủ công.

b) Phân tích hiệu quả Lớp bảo vệ 1 - Cơ chế đệm cục bộ (Local Buffering)

Quan sát giai đoạn phút 6 - 16 (sự cố mất kết nối nội bộ) trên Biểu đồ A (Hình 3):

- Các thanh trễ nội bộ (hướng âm) biến động, phản ánh sự gián đoạn trong giao tiếp giữa Ship IPC và PLC.

- Tuy nhiên, đối chiếu xuống Biểu đồ B, dữ liệu nhiên liệu tại các mốc thời gian này vẫn được khôi phục đầy đủ ngay sau sự cố. Điều này chứng minh Ship IPC đã thực hiện cơ chế truy xuất ngược (Back-tracing) vào thẻ nhớ PLC để điền đầy các mẫu dữ liệu còn thiếu.

c) Phân tích hiệu quả Lớp bảo vệ 2 - Cơ chế đệm đường truyền (Gateway Buffering)

Trong giai đoạn phút 21 - 36 (mất kết nối vệ tinh), hệ thống đã kích hoạt cơ chế lưu trữ tạm thời (Store & Forward):

- Trên Biểu đồ A (Nguyên nhân): Tại thời điểm phút 36 khi kết nối phục hồi, xuất hiện các thanh trễ truyền dẫn (hướng dương) với biên độ cao đột biến. Đây là dấu hiệu kỹ thuật cho thấy một lượng lớn gói tin bị dồn ứ trong 15 phút mất kết nối đã được đẩy đồng loạt về bờ.

- Trên Biểu đồ B (Kết quả): Mặc dù việc truyền dẫn bị trễ (thể

hiện ở biểu đồ A), nhưng các mẫu dữ liệu tái lập (các que diêm màu đỏ) vẫn xuất hiện đầy đủ và đúng vị trí trên trục thời gian, không có khoảng trống (gap) nào được tạo ra trong giai đoạn này.

d) Kiểm chứng tính toàn vẹn dữ liệu (Data Integrity)

Biểu đồ B (Hình 3) minh họa trực quan quá trình "lấy mẫu rời rạc hóa" (Discrete Sampling) dữ liệu tại bờ:

- Đường nét liền đại diện cho tín hiệu gốc liên tục tại tàu.

- Các "que diêm" (stems) đại diện cho các gói dữ liệu nhận được tại bờ.

- Kết luận: Sự bám sát hoàn hảo của các đỉnh que diêm (Shore) lên đường bao dữ liệu gốc (Ship) - ngay cả trong các giai đoạn biến động độ trễ cao - khẳng định hệ thống đảm bảo tính toàn vẹn 100%, không xảy ra hiện tượng mất gói tin (Packet Loss) hay sai lệch giá trị.

3.4. Kết luận

Kết quả thực nghiệm trên mô hình thực tế đã chứng minh tính đúng đắn của giải pháp. Sự phối hợp giữa phần mềm đồng bộ thông minh (Hình 2) và cơ chế đệm hai lớp (Hình 3) đảm bảo tính liên tục và toàn vẹn của dữ liệu giám sát tàu biển ngay cả trong điều kiện hạ tầng truyền dẫn hạn chế.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thiết kế và chế tạo thành công thiết bị tính toán, giám sát tiêu thụ nhiên liệu tàu thủy thích ứng với điều kiện kết nối vệ tinh gián đoạn. Bằng việc kết hợp kiến trúc điện toán biên với các thuật toán duy trì phiên làm việc và cơ chế đồng bộ "Store-and-Forward", hệ thống giải quyết triệt để bài toán mất dữ liệu khi tàu hoạt động xa bờ. Kết quả thử nghiệm khẳng định hệ thống hoạt động ổn định, tin cậy và có chi phí thấp, phù hợp để triển khai nhân rộng cho đội tàu biển Việt Nam.

Hướng phát triển tiếp theo của đề tài là tích hợp các mô hình Học sâu (Deep Learning) ngay tại thiết bị biên để phát hiện sớm các bất thường trong tiêu thụ nhiên liệu trước khi gửi cảnh báo về bờ.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT25-26.70.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] IMO. Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020. International Maritime Organization, London, 2020.

[2] L. V. Vang, D. V. Vi and P. V. Hung. Solutions for Energy Saving and Emission Reduction on Ships. Journal of Marine Science and Technology, vol. 59, pp. 45-50, 2019.

[3] Đ. A. Tuấn. Ứng dụng công nghệ 4.0 trong quản lý và khai thác kỹ thuật tàu biển. Tạp chí Giao thông vận tải, số 11, 2022.

[4] L. Xu et al. Maritime IoT: an architectural approach. IEEE Internet of Things Journal, vol. 6, no. 2, pp. 2405-2415, 2019.

[5] G. Aloi et al. Enabling IoT at Sea: A Comprehensive Survey on Maritime Internet of Things. IEEE Access, vol. 10, pp. 6372-6396, 2022.

[6] Đ. H. Khánh. Nghiên cứu, thiết kế thiết bị giám sát điện áp, dòng điện đa năng. Tạp chí Khoa học Công nghệ hàng hải, số 58, 2019.

[7] K. Al-Hajri et al. Satellite Communications for Maritime IoT: Challenges and Opportunities. IEEE Wireless Communications, vol. 26, no. 5, pp. 12-18, 2019.

[8] B. S. Shin and K. R. Park. Architecture of satellite communication system for maritime safety. International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 13, no. 5, 2017.

[9] P. P. Ray. A survey on Internet of Things architectures. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, vol. 30, no. 3, pp. 291-319, 2018.

[10] T. Yang et al. A Novel Maritime Edge Computing System for Internet of Vessel. IEEE Internet of Things Journal, vol. 7, no. 12, 2020.

[11] A. A. Hapsari, A. S. Budi, and F. A. F. Dinata. Real-Time Fuel Consumption Monitoring System Integrated With Internet Of Things (IoT). Kapal: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Kelautan, vol. 18, no. 2, pp. 102-110, 2021.

[12] S. Bansal et al. Store and Forward Mechanism for Reliable Data Delivery in IoT. 2020 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), pp. 45-49, 2020.

[13] Siemens AG. SIMATIC S7-1200 Programmable Controller System Manual, 2022.

[14] Đ. H. Khánh, N. Q. Vinh và N. V. Sáng. Nghiên cứu ứng dụng đồng hồ đa năng số trong hệ thống quản lý nguồn PMS tàu thủy. Tạp chí Khoa học Công nghệ hàng hải, 78, số 78, tr. 20-26, 2024.

[15] Microsoft. Azure IoT Edge: Offline capabilities and disconnected operations. Microsoft Documentation, 2023.

■Ngày nhận bài: 24/02/2026 ■Ngày sửa bài: 06/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 18/3/2026

Ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong quản lý và thi công công trình cầu: Tổng quan và định hướng nghiên cứu

Application of artificial intelligence in bridge construction management: Overview and research directions

> **PGS.TS LÊ QUANG HANH**
Trường Đại học Giao thông vận tải
Email: hanhlq@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Trong những năm gần đây, trí tuệ nhân tạo (Artificial Intelligence - AI) đã trở thành một trong những công nghệ cốt lõi thúc đẩy chuyển đổi số trong ngành Xây dựng. Đối với các dự án hạ tầng quy mô lớn như công trình cầu, giai đoạn thi công thường đối mặt với nhiều thách thức về quản lý tiến độ, kiểm soát chất lượng, an toàn lao động và tối ưu hóa nguồn lực. Nghiên cứu này tổng quan các hướng ứng dụng chính của AI trong giai đoạn thi công cầu dựa trên các nghiên cứu khoa học quốc tế gần đây. Kết quả cho thấy AI đang được áp dụng chủ yếu trong 5 lĩnh vực chính, bao gồm: (i) Lập kế hoạch và tối ưu hóa tiến độ thi công dựa trên máy học (machine learning); (ii) giám sát tiến độ thi công tự động bằng thị giác máy tính kết hợp camera và UAV; (iii) kiểm soát chất lượng và phát hiện khuyết tật kết cấu bằng các thuật toán học sâu; (iv) dự báo rủi ro và quản lý an toàn lao động trên công trường và (v) tích hợp AI với BIM và Digital Twin để xây dựng hệ thống quản lý thi công thông minh. Các nghiên cứu cho thấy việc ứng dụng AI có tiềm năng nâng cao đáng kể hiệu quả quản lý thi công, cải thiện độ chính xác trong giám sát công trường và giảm thiểu rủi ro trong các dự án cầu. Tuy nhiên, một số thách thức vẫn tồn tại, bao gồm hạn chế về dữ liệu huấn luyện, khả năng tổng quát hóa của mô hình giữa các dự án khác nhau và việc tích hợp AI vào quy trình quản lý xây dựng truyền thống. Nghiên cứu này góp phần hệ thống hóa các xu hướng nghiên cứu hiện nay và đề xuất các định hướng phát triển cho việc ứng dụng AI trong thi công công trình cầu.

Từ khóa: Trí tuệ nhân tạo (AI); quản lý thi công cầu; thị giác máy tính trong xây dựng; bản sao kỹ thuật số cho hạ tầng; mô hình thông tin xây dựng BIM; phân tích an toàn trong xây dựng.

ABSTRACT

In recent years, Artificial Intelligence (AI) has emerged as one of the key enabling technologies driving digital transformation in the construction industry. For large-scale infrastructure projects such as bridges, the construction phase often faces significant challenges related to schedule management, quality control, construction safety and resource optimization. This study provides a comprehensive review of the major applications of AI in the bridge construction phase based on recent international scientific literature. The findings indicate that AI is primarily applied in five key areas: (i) Construction planning and schedule optimization using machine learning techniques; (ii) automated construction progress monitoring through computer vision integrated with cameras and unmanned aerial vehicles (UAVs); (iii) quality control and structural defect detection using deep learning algorithms; (iv) construction safety management and risk prediction on construction sites and (v) the integration of AI with Building

Information Modeling (BIM) and Digital Twin technologies to develop intelligent construction management systems. Existing studies demonstrate that AI applications have significant potential to enhance construction management efficiency, improve the accuracy of site monitoring and mitigate risks in bridge construction projects. However, several challenges remain, including limitations in training data availability, the generalization capability of AI models across different projects and the integration of AI technologies into conventional construction management workflows. This study contributes to systematizing current research trends and proposes future directions for the application of AI in bridge construction engineering.

Keywords: Artificial intelligence (AI); bridge construction management; computer vision in construction; digital twin for infrastructure; BIM-enabled Construction; construction safety analytics; smart infrastructure systems.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngành Xây dựng toàn cầu từ lâu đã đối mặt với nhiều thách thức như năng suất thấp, mức độ không chắc chắn cao và rủi ro an toàn lớn. So với các ngành công nghiệp sản xuất, tốc độ tăng năng suất của ngành Xây dựng trong nhiều thập kỷ qua là rất chậm [1]. Các dự án hạ tầng quy mô lớn như công trình cầu đặc biệt phức tạp do quy mô lớn, quy trình thi công nhiều giai đoạn và yêu cầu an toàn cao.

Trong bối cảnh đó, trí tuệ nhân tạo (AI) đang nổi lên như một công nghệ mang tính chuyển đổi trong lĩnh vực kỹ thuật xây dựng. Thông qua việc tích hợp học máy (Machine Learning), thị giác máy tính (Computer Vision), robot và công nghệ Digital Twin, AI có khả năng cải thiện đáng kể quá trình ra quyết định, tự động hóa và quản lý an toàn trong quá trình thi công cầu.

Các nghiên cứu gần đây cho thấy ứng dụng AI trong thi công cầu chủ yếu tập trung vào 5 lĩnh vực chính:

1. Lập kế hoạch và tối ưu hóa tiến độ thi công
2. Giám sát tiến độ thi công tự động bằng thị giác máy tính
3. Kiểm soát chất lượng và phát hiện khuyết tật
4. Quản lý an toàn và dự báo rủi ro trong thi công
5. Quản lý thi công thông minh dựa trên BIM và Digital Twin

Kết quả của các nghiên cứu cho thấy việc ứng dụng AI có tiềm năng nâng cao đáng kể hiệu quả quản lý thi công, cải thiện độ chính xác trong giám sát công trường và giảm thiểu rủi ro trong các dự án cầu. Tuy nhiên, một số thách thức vẫn tồn tại, bao gồm hạn chế về dữ liệu huấn luyện, khả năng tổng quát hóa của mô hình giữa các dự án khác nhau và việc tích hợp AI vào quy trình quản lý xây dựng truyền thống. Nghiên cứu này góp phần hệ thống hóa các xu hướng nghiên cứu hiện nay và đề xuất các định hướng phát triển cho việc ứng dụng AI trong thi công công trình cầu.

2. ỨNG DỤNG AI TRONG LẬP KẾ HOẠCH VÀ TỐI ƯU TIẾN ĐỘ THI CÔNG

Lập kế hoạch thi công là một trong những nhiệm vụ quan trọng nhất trong các dự án xây dựng cầu. Các phương pháp truyền thống như CPM và PERT chủ yếu dựa vào kinh nghiệm của chuyên gia và dữ liệu lịch sử.

Trong những năm gần đây, các mô hình học máy đã được phát triển nhằm cải thiện việc lập tiến độ thi công bằng cách học các mẫu dữ liệu từ các dự án trước đó.

Điển hình là, Valdebenito và cộng sự (2024) [3] đã đề xuất một hệ thống lập tiến độ thi công dựa trên AI tích hợp với BIM, cho phép tự động tạo tiến độ thi công từ dữ liệu IFC của mô hình BIM. Kết quả cho thấy hệ thống này cải thiện đáng kể độ chính xác so với các phương pháp lập tiến độ truyền thống.

Tương tự, Zhang và cộng sự (2023) [4] đã sử dụng thuật toán học tăng cường (Reinforcement Learning) để tối ưu hóa phân bổ tài nguyên trong các dự án hạ tầng phức tạp.

Trong thi công cầu, các kỹ thuật này đặc biệt hữu ích cho việc tối ưu hóa các phương pháp thi công như:

- Thi công đúc hẫng cân bằng;
- Thi công đẩy dầm (incremental launching);
- Thi công cầu dây văng;
- Thi công cầu bê tông phân đoạn.

Các phương pháp thi công này có sự phụ thuộc phức tạp giữa các công đoạn, do đó rất phù hợp với các mô hình tối ưu hóa bằng AI.

3. ỨNG DỤNG THỊ GIÁC MÁY TÍNH TRONG GIÁM SÁT TIẾN ĐỘ THI CÔNG CẦU

Thị giác máy tính (Computer Vision) là một trong những lĩnh vực nghiên cứu phát triển mạnh nhất trong ngành tin học xây dựng.

Các hệ thống giám sát thi công hiện đại thường sử dụng camera công trường, drone và UAV để thu thập dữ liệu hình ảnh từ hiện trường. Sau đó, các thuật toán học sâu (Deep Learning) được sử dụng để nhận diện các hoạt động thi công và đánh giá tiến độ dự án.

Yang và cộng sự (2023) [5] đã phát triển một hệ thống nhận dạng thông minh cho giám sát thi công cầu sử dụng mạng nơ-ron tích chập (CNN). Hệ thống có khả năng tự động nhận diện các cấu kiện cầu và ước lượng tiến độ thi công từ dữ liệu ảnh chụp bằng drone.

Golparvar-Fard và cộng sự (2015) [2] là những người tiên phong trong nghiên cứu giám sát tiến độ thi công tự động bằng cách kết hợp thị giác máy tính với mô hình BIM.

Các nghiên cứu gần đây cho thấy hệ thống giám sát dựa trên AI có thể:

- Tự động nhận diện các cấu kiện kết cấu;
- Ước lượng tỷ lệ hoàn thành công việc;
- Phát hiện sự chậm tiến độ.

Các hệ thống này giúp giảm đáng kể nhu cầu kiểm tra hiện trường thủ công.

4. ỨNG DỤNG AI TRONG KIỂM SOÁT CHẤT LƯỢNG THI CÔNG CẦU

Kiểm tra chất lượng là yếu tố quan trọng để đảm bảo an toàn kết cấu trong quá trình thi công cầu.

Theo phương pháp truyền thống, công tác kiểm tra thường được thực hiện bằng quan sát trực tiếp của các kỹ sư. Tuy nhiên, phương pháp này tốn nhiều thời gian và dễ xảy ra sai sót do yếu tố con người.

Các kỹ thuật thị giác máy tính và học sâu hiện nay đã được sử dụng rộng rãi để phát hiện các khuyết tật kết cấu cầu.

Cha và cộng sự (2017) [6] đã phát triển hệ thống phát hiện vết nứt bê tông bằng CNN với độ chính xác cao.

Mostafa và cộng sự (2021) [7] sử dụng hệ thống UAV kết hợp

với học sâu để phát hiện các khuyết tật bề mặt cầu.

Các nghiên cứu gần đây còn kết hợp công nghệ quét laser và photogrammetry với AI để tạo mô hình as-built chính xác của các kết cấu cầu.

Những công nghệ này giúp tự động hóa quá trình kiểm soát chất lượng trong thi công cầu.

5. ỨNG DỤNG AI TRONG QUẢN LÝ AN TOÀN THI CÔNG

An toàn lao động là một trong những vấn đề quan trọng nhất trong thi công cầu.

Các công trình cầu thường có nhiều rủi ro do:

- Làm việc trên cao;
- Nâng hạ cấu kiện nặng;
- Thi công trên sông hoặc biển.

Các nghiên cứu gần đây đã áp dụng AI để giám sát điều kiện an toàn trên công trường.

Fang và cộng sự (2020) [8] đã phát triển hệ thống giám sát an toàn dựa trên thị giác máy tính có khả năng phát hiện các hành vi nguy hiểm của công nhân.

Các nghiên cứu khác sử dụng mô hình học máy để dự báo tai nạn lao động dựa trên dữ liệu an toàn lịch sử.

Các mô hình này có thể xác định các yếu tố rủi ro như:

- Sự mệt mỏi của công nhân;
- Điều kiện làm việc không an toàn;
- Sự cố thiết bị;
- Điều kiện môi trường.

Các hệ thống cảnh báo sớm dựa trên AI có thể giúp giảm đáng kể nguy cơ tai nạn.

6. DIGITAL TWIN VÀ HỆ THỐNG THI CÔNG CẦU THÔNG MINH

Công nghệ Digital Twin gần đây đã trở thành một hướng nghiên cứu quan trọng trong lĩnh vực hạ tầng thông minh.

Digital Twin là bản sao số của một tài sản vật lý được kết nối với dữ liệu thời gian thực từ các hệ thống cảm biến và giám sát.

Trong thi công cầu, Digital Twin có thể tích hợp nhiều nguồn dữ liệu khác nhau như:

- Mô hình BIM;
- Dữ liệu tiến độ thi công;
- Dữ liệu cảm biến;
- Dữ liệu môi trường.

Yishuo và cộng sự (2024) [9], Lu và cộng sự (2020) [10], Wu và cộng sự (2025) [11] đã đề xuất một khung Digital Twin cho quản lý thi công cầu tích hợp BIM và dữ liệu IoT.

Hệ thống cho phép các kỹ sư:

- Theo dõi tiến độ thi công theo thời gian thực;
- Mô phỏng các phương án thi công khác nhau;
- Hỗ trợ ra quyết định trong quản lý dự án.

Digital Twin cũng hỗ trợ dự báo và tối ưu hóa trong các dự án hạ tầng quy mô lớn.

7. THÁCH THỨC VÀ KHOẢNG TRỐNG NGHIÊN CỨU

7.1. Tổng hợp các nghiên cứu tiêu biểu về AI trong thi công công trình cầu

Bảng 1. Bảng tổng hợp các nghiên cứu tiêu biểu về AI trong thi công cầu

Tác giả	Năm	Phương pháp AI	Ứng dụng
Golparvar-Fard	2015	Computer Vision	Giám sát tiến độ
Cha et al.	2017	CNN	Phát hiện vết nứt
Mostafa et al.	2021	UAV + Deep Learning	Kiểm tra cầu
Fang et al.	2020	Deep Learning	Giám sát an toàn
Lu et al.	2020	Digital Twin	Thi công cầu thông minh
Yang et al.	2023	CNN	Giám sát thi công cầu
Zhang et al.	2023	Reinforcement Learning	Tối ưu tiến độ
Valdebenito et al.	2024	AI + BIM	Lập tiến độ tự động

Mặc dù đã có nhiều tiến bộ, việc ứng dụng AI trong thi công cầu vẫn còn nhiều thách thức.

7.2. Thiếu dữ liệu

Các mô hình AI cần lượng dữ liệu lớn để huấn luyện. Tuy nhiên, dữ liệu thi công thường rời rạc và chưa được chuẩn hóa.

7.3. Khả năng tổng quát hóa

Các dự án cầu có thiết kế, môi trường và phương pháp thi công khác nhau. Vì vậy, các mô hình AI được huấn luyện trên một dự án có thể không hoạt động tốt trên dự án khác.

7.4. Tích hợp vào hệ thống quản lý

Nhiều giải pháp AI vẫn ở mức nghiên cứu và chưa được tích hợp đầy đủ vào quy trình quản lý dự án thực tế.

7.5. Tính minh bạch của AI

Trong các dự án hạ tầng quan trọng, các kỹ sư cần các hệ thống AI có khả năng giải thích để hỗ trợ ra quyết định.

8. ĐỀ XUẤT ĐỊNH HƯỚNG NGHIÊN CỨU

Từ tổng quan nghiên cứu và ứng dụng đã được tìm hiểu và phân tích, bài báo đề xuất các định hướng nghiên cứu cụ thể trong tương lai cần tập trung như sau.

8.1. Xây dựng cơ sở dữ liệu thi công chuẩn hóa

Trong bối cảnh chuyển đổi số ngành Xây dựng, đặc biệt đối với lĩnh vực thi công công trình cầu, dữ liệu hiện trường được tạo ra từ nhiều nguồn khác nhau như mô hình BIM, hồ sơ thiết kế, nhật ký thi công, biên bản chất lượng, báo cáo tiến độ và dữ liệu hình ảnh, tuy nhiên vẫn tồn tại ở trạng thái phân tán, không đồng nhất và thiếu chuẩn hóa về cả cấu trúc lẫn ngữ nghĩa. Thực trạng này làm hạn chế khả năng tích hợp, khai thác và đặc biệt là ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong quản lý thi công.

Trên cơ sở đó, hướng nghiên cứu đề xuất tập trung vào việc phát triển một khung chuẩn hóa dữ liệu thi công công trình cầu theo cách tiếp cận tích hợp giữa mô hình thông tin công trình hạ tầng (IFC Bridge), ontology miền và knowledge graph, nhằm xây dựng một cơ sở dữ liệu ngữ nghĩa có khả năng máy hiểu và liên thông.

Trong khung nghiên cứu này, các kỹ thuật AI, đặc biệt là xử lý ngôn ngữ tự nhiên và học máy, được sử dụng để tự động trích xuất, chuẩn hóa và ánh xạ dữ liệu từ các nguồn phi cấu trúc như nhật ký và báo cáo hiện trường vào mô hình dữ liệu chuẩn.

Nghiên cứu không chỉ hướng tới việc nâng cao chất lượng dữ liệu thông qua các tiêu chí như tính đầy đủ, tính nhất quán và khả năng truy vết, mà còn tạo nền tảng cho các ứng dụng nâng cao như phát hiện bất thường, dự báo tiến độ, kiểm soát chất lượng và hỗ trợ ra quyết định trong thi công cầu.

Với cách tiếp cận này, AI không được xem là công cụ độc lập, mà là thành phần trong một hệ sinh thái dữ liệu gồm chuẩn BIM, ontology và knowledge graph, qua đó góp phần hình thành một môi trường dữ liệu chung có ngữ nghĩa, phục vụ hiệu quả cho quản

lý thi công thông minh và phát triển bền vững trong lĩnh vực hạ tầng giao thông.

8.2. Tích hợp AI với BIM và Digital Twin

Sự tích hợp giữa trí tuệ nhân tạo (AI), mô hình thông tin công trình (BIM) và Digital Twin đang mở ra một hướng tiếp cận mới trong quản lý xây dựng, cho phép chuyển từ quản lý dựa trên dữ liệu tĩnh sang hệ thống thông minh dựa trên dữ liệu thời gian thực.

Tuy nhiên, quá trình tích hợp này vẫn gặp nhiều thách thức do sự không đồng nhất về cấu trúc và ngữ nghĩa dữ liệu, cũng như hạn chế trong việc đồng bộ giữa mô hình thiết kế và trạng thái thực tế của công trình. Nghiên cứu này đề xuất một khung tích hợp AI-BIM-Digital Twin, trong đó BIM cung cấp nền tảng dữ liệu kỹ thuật, Digital Twin phản ánh trạng thái vận hành động của công trình và AI đóng vai trò xử lý, phân tích và hỗ trợ ra quyết định.

Việc kết hợp các kỹ thuật AI với các mô hình ngữ nghĩa như ontology và knowledge graph cho phép nâng cao chất lượng dữ liệu, tăng cường khả năng liên thông và khai thác thông tin, đồng thời hỗ trợ các ứng dụng như dự báo tiến độ, phát hiện bất thường và tối ưu hóa nguồn lực. Cách tiếp cận này góp phần xây dựng nền tảng cho các hệ thống quản lý xây dựng thông minh, hướng tới phát triển hạ tầng số hóa và bền vững.

8.3. Phát triển robot thi công cầu thông minh

Sự phát triển của công nghệ robot và trí tuệ nhân tạo đang tạo ra những thay đổi căn bản trong lĩnh vực thi công công trình cầu, đặc biệt trong bối cảnh yêu cầu ngày càng cao về an toàn, chất lượng và hiệu quả thi công. Tuy nhiên, việc ứng dụng robot trong thi công cầu vẫn còn hạn chế do môi trường làm việc phức tạp, điều kiện địa hình đa dạng và thiếu các hệ thống điều khiển thông minh có khả năng thích ứng theo thời gian thực.

Nghiên cứu này đề xuất định hướng phát triển robot thi công cầu thông minh dựa trên sự tích hợp giữa AI, hệ thống cảm biến và mô hình số công trình, cho phép robot thực hiện các nhiệm vụ như lắp dựng, đổ bê tông, kiểm tra chất lượng và giám sát hiện trường với mức độ tự động hóa cao.

Trong đó, AI đóng vai trò xử lý dữ liệu cảm biến, nhận diện môi trường và tối ưu hóa hành vi điều khiển, giúp robot thích ứng với điều kiện thi công thực tế. Đồng thời, việc kết nối với các nền tảng số như BIM và Digital Twin cho phép đồng bộ giữa kế hoạch thi công và trạng thái thực tế, qua đó nâng cao hiệu quả điều phối và kiểm soát.

Kết quả kỳ vọng là một hệ thống robot có khả năng hoạt động an toàn, chính xác và linh hoạt, góp phần thúc đẩy tự động hóa trong thi công cầu và hướng tới xây dựng thông minh, bền vững.

8.4. Hệ thống giám sát thi công tự động

Hệ thống giám sát thi công tự động đang trở thành một thành phần quan trọng trong quá trình chuyển đổi số ngành Xây dựng, đặc biệt đối với các công trình cầu có quy mô lớn và điều kiện thi công phức tạp. Tuy nhiên, các phương pháp giám sát truyền thống chủ yếu dựa vào quan sát thủ công và báo cáo định kỳ, dẫn đến độ trễ thông tin, thiếu tính liên tục và khó phát hiện kịp thời các sai lệch trong quá trình thi công.

Nghiên cứu này đề xuất phát triển một hệ thống giám sát thi công tự động dựa trên sự tích hợp giữa cảm biến, thị giác máy tính và trí tuệ nhân tạo, cho phép thu thập, phân tích và đánh giá dữ liệu hiện trường theo thời gian thực. Hệ thống có khả năng nhận diện trạng thái thi công, theo dõi tiến độ, phát hiện bất thường và hỗ trợ kiểm soát chất lượng thông qua việc xử lý dữ liệu từ hình ảnh, video và các thiết bị đo lường.

Đồng thời, việc kết nối với các nền tảng số như BIM và Digital Twin giúp đồng bộ giữa kế hoạch và thực tế thi công, qua đó nâng cao tính minh bạch và khả năng ra quyết định. Cách tiếp cận này góp phần xây dựng một môi trường thi công thông minh, an toàn và hiệu quả, đáp ứng yêu cầu ngày càng cao của các dự án hạ tầng hiện đại.

8.5. Hệ thống hỗ trợ ra quyết định thông minh cho quản lý hạ tầng

Trong bối cảnh phát triển hạ tầng quy mô lớn và yêu cầu quản lý ngày càng phức tạp, việc ra quyết định hiệu quả đòi hỏi sự tích hợp và khai thác đồng thời nhiều nguồn dữ liệu khác nhau. Tuy nhiên, các hệ thống quản lý truyền thống thường thiếu khả năng phân tích tổng hợp và hỗ trợ ra quyết định theo thời gian thực, dẫn đến việc phản ứng chậm trước các biến động trong quá trình vận hành và bảo trì công trình.

Nghiên cứu này đề xuất phát triển một hệ thống hỗ trợ ra quyết định thông minh cho quản lý hạ tầng dựa trên sự tích hợp giữa trí tuệ nhân tạo, mô hình dữ liệu ngữ nghĩa và các nền tảng số như BIM và Digital Twin. Hệ thống cho phép thu thập, chuẩn hóa và phân tích dữ liệu từ nhiều nguồn, bao gồm dữ liệu vận hành, bảo trì, cảm biến và lịch sử công trình, từ đó cung cấp các khuyến nghị tối ưu về bảo trì, phân bổ nguồn lực và quản lý rủi ro.

Việc áp dụng các mô hình học máy và suy luận trên knowledge graph - đồ thị tri thức giúp nâng cao khả năng dự báo, phát hiện bất thường và đánh giá kịch bản, hỗ trợ người quản lý đưa ra quyết định kịp thời và chính xác. Cách tiếp cận này góp phần xây dựng hệ thống quản lý hạ tầng thông minh, hướng tới tối ưu hóa chi phí vòng đời và đảm bảo tính bền vững của công trình.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Barbosa, F. et al. Executive Summary-Reinventing Construction through a Productivity Revolution. McKinsey Global Institute, February 2017.

[2] Golparvar-Fard, M., Peña-Mora, F., & Savarese, S. Automated progress monitoring using computer vision. Automation in Construction, 2015.

[3] Valdebenito, R. and Eric Forcael. Integrating Artificial Intelligence and BIM in Construction: Systematic Review and Quantitative Comparative Analysis. Applied Science, 5(23):12470, November 2025.

[4] Y Zhang, X Li, Y Teng, Q Shen, S Bai. A Reinforcement Learning Framework for Maximizing the Net Present Value of Stochastic Multi-work Packages Project Scheduling Problem. International Symposium on Advancement of Construction Management and Real Estate, 2023.

[5] H Yang and M Xia. Advancing bridge construction monitoring: AI-based building information modeling for intelligent structural damage recognition. Applied Artificial Intelligence, Taylor & Francis, 2023.

[6] Cha, Y.J., Choi, W. and Büyüköztürk, O. Deep Learning-Based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 32, 361-378, 2017.

[7] Mostafa Aliyari, Enrique López Droguett and Yonas Zewdu Ayele. UAV-Based Bridge Inspection via Transfer Learning. Sustainability, Published by MDPI, Online ISSN: 2071-1050, 13(20):11359, October 2021.

[8] Fang, Q., Li, H., Luo, X. Computer vision for behaviour-based safety in construction: A review and future directions. Advanced Engineering Informatics, vol. 43, 100980, January 2020.

[9] Yishuo Jiang, Shuaiming Su, Shuxuan Zhao, RayY. Zhong, Waishan Qiu, Miroslaw, J. Skibniewski, Ioannis Brilakis, George, Q. Huang. Digital twin-enabled synchronized construction management: A roadmap from construction 4.0 towards future prospect. Developments in the Built Environment, vol. 19, 100512, October 2024.

[10] Q Lu, X Xie, AK Parlikad, JM Schooling. Digital twin-enabled anomaly detection for built asset monitoring in operation and maintenance. Automation in Construction, 2020.

[11] Yuxing Wu, Zhou Li. Digital twin-enabled BIM-blockchain integration for automated and transparent construction progress payments Developments in the Built Environment, vol. 24, 100781, December 2025.

[12] Abdul Raheman Mohammed. Smart Construction Management Using AI. International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, vol. 12, Issue 11, November 2024.

■Ngày nhận bài: 25/02/2026 ■Ngày sửa bài: 07/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 22/3/2026

Xây dựng và kiểm chứng khung mô hình ANFIS - HFIS trong đánh giá rủi ro thi công công trình kè biển Việt Nam

Development and validation of an ANFIS - HFIS Framework for Risk assessment in the Construction of coastal seawall projects in Vietnam

> **NGUYỄN ĐÌNH CHỨC[1], NGUYỄN VĂN SƠN[2,*], NGUYỄN HỮU HUẾ[2]**
[1]Công ty TNHH MTV 59
[2]Trường Đại học Thủy lợi; *Email: sonnv@tlu.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất một khung mô hình đánh giá rủi ro thi công đê, kè biển tại Việt Nam dựa trên hệ suy diễn mờ thần kinh thích nghi (ANFIS). Mô hình cho phép tích hợp đồng thời các nhóm rủi ro kỹ thuật - thi công, tài chính - kinh tế, môi trường - xã hội - biến đổi khí hậu, an toàn - tiến độ và pháp lý - tổ chức vào một chỉ số rủi ro tổng hợp, vừa khai thác được sức mạnh học máy, vừa giữ được khả năng diễn giải bằng luật mờ. Trên cơ sở kiến trúc ANFIS 5 lớp và thuật toán học lai (least squares + gradient descent), bài báo xây dựng chi tiết các mô-đun rủi ro con và mô-đun tổng hợp, mô tả thuật toán, luồng dữ liệu và cách triển khai trong MATLAB/Python. Khung mô hình được kiểm định bằng chia tập huấn luyện/kiểm định/kiểm tra và các chỉ số RMSE, MAE, R^2. Cuối cùng, bài báo đưa ra quy trình sử dụng mô hình như một công cụ CNTT để tính toán rủi ro và phân tích kịch bản "what-if" trong thi công đê, kè biển.

Từ khóa: Rủi ro thi công, đê kè biển, ANFIS, hệ suy diễn mờ, trí tuệ nhân tạo, học máy.

ABSTRACT

This paper proposes a risk assessment framework for the construction of coastal dikes and seawalls in Vietnam based on an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). The proposed model enables the simultaneous integration of multiple risk groups-technical-construction risks, financial-economic risks, environmental-social-climate change risks, safety-schedule risks, and legal-organizational risks-into a comprehensive risk index. The framework leverages the learning capability of machine learning while maintaining interpretability through fuzzy rule-based reasoning.

Based on the five-layer ANFIS architecture and a hybrid learning algorithm (least squares estimation combined with gradient descent), the study develops detailed sub-risk modules and an integrated risk aggregation module. The paper also presents the modeling algorithm, data flow structure, and implementation procedures in MATLAB/Python. The proposed framework is validated using training, validation, and testing datasets, with performance evaluated through RMSE, MAE, and R^2 indicators. Finally, the study proposes a practical workflow for applying the model as an information technology tool for risk computation and "what-if" scenario analysis in coastal dike and seawall construction projects.

Keywords: Construction risk; coastal dikes and seawalls; ANFIS; fuzzy inference system; artificial intelligence; machine learning.

1. GIỚI THIỆU

Thi công công trình đê, kè biển tại Việt Nam diễn ra trong một môi trường chịu tác động mạnh của sóng, gió, bão, triều cường và xu thế xói lở - bồi tụ phức tạp, trong bối cảnh biến đổi khí hậu và nước biển dâng. Các yếu tố địa chất - địa hình dưới nước, điều kiện mặt bằng chật hẹp, yêu cầu bảo vệ dân cư, hạ tầng, du lịch ven biển khiến rủi ro thi công vừa đa dạng, vừa khó kiểm soát.

Rủi ro thi công không chỉ xuất phát từ phía kỹ thuật (ổn định nền, kết cấu, tải trọng sóng) mà còn đến từ tài chính - kinh tế (biến động giá, giải ngân), pháp lý - tổ chức (thủ tục, năng lực chủ thể), môi trường - xã hội (xung đột sinh kế, cảnh quan, khiếu kiện) và an toàn - tiến độ (tai nạn, gián đoạn do thời tiết). Các công cụ truyền thống như ma trận rủi ro, FMEA, AHP/F-AHP giúp nhận diện và xếp hạng rủi ro, nhưng khó mô hình hóa quan hệ phi tuyến giữa nhiều nhóm rủi ro, khó kết hợp dữ liệu định tính với định lượng, và khó tích hợp vào các hệ thống CNTT hỗ trợ ra quyết định.

Hệ suy diễn mờ thần kinh thích nghi (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System - ANFIS) cho phép kết hợp ưu điểm của mạng nơ-ron và logic mờ: học từ dữ liệu để hiệu chỉnh tham số, đồng thời giữ lại cấu trúc luật mờ dễ diễn giải. Tuy nhiên, khi số đầu vào tăng, số luật của hệ mờ tăng theo hàm mũ. Để khắc phục, bài báo đề xuất khung mô hình ANFIS - hệ suy diễn mờ phân tầng (HFIS) cho đánh

giá rủi ro thi công đê, kè biển Việt Nam. Ý tưởng là chia bài toán thành các mô-đun rủi ro con (kỹ thuật, tài chính, môi trường - xã hội, an toàn, pháp lý), mỗi mô-đun được mô hình hóa bằng ANFIS, rồi tổng hợp bằng một mô-đun mờ ở tầng trên.

Mục tiêu của bài báo là:

• Mô tả chi tiết kiến trúc, thuật toán và quy trình xây dựng mô hình ANFIS - HFIS phục vụ đánh giá rủi ro thi công đê, kè biển.

• Trình bày quy trình kiểm định mô hình bằng các chỉ số RMSE, MAE, R^2và phân tích độ nhạy.

• Đề xuất quy trình sử dụng mô hình như một công cụ CNTT/học máy trong thực hành tính toán rủi ro và phân tích kịch bản cho các dự án đê, kè biển.

2. CƠ SỞ THUẬT TOÁN VÀ KIẾN TRÚC MÔ HÌNH

2.1. Kiến trúc ANFIS và thuật toán học lai

ANFIS là một mạng nhiều lớp tương đương với hệ suy diễn mờ bậc 1, trong đó các tham số hàm thành viên và hệ số tuyến tính của hàm kết quả được tối ưu hóa tự động bằng dữ liệu.

Xét hệ mờ Sugeno bậc 1 hai đầu vào x, y với hai luật:

• Luật 1: Nếu $x$là A_1và $y$là B_1thì $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$

• Luật 2: Nếu $x$là A_2và $y$là B_2thì $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$

+ Kiến trúc ANFIS gồm 5 lớp:

• Lớp 1 - Mờ hóa: Mỗi nút biểu diễn một hàm thành viên (MF) $\mu_{A_i}(x), \mu_{B_j}(y)$, đầu ra $O_{1,i} = \mu_{A_i}(x)$.

• Lớp 2 - Luật mờ: Mỗi nút ứng với một luật, tính độ kích hoạt: $w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y)$.

• Lớp 3 - Chuẩn hóa: $\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_j w_j}$.

• Lớp 4 - Hàm kết luận: Đầu ra: $\bar{w}_i f_i = \bar{w}_i(p_i x + q_i y + r_i)$.

• Lớp 5 - Tổng hợp: Đầu ra mô hình: $f = \sum_i \bar{w}_i f_i$.

+ Thuật toán học lai (Hybrid learning): Kết hợp giữa phương pháp bình phương tối thiểu và thuật toán hạ dốc trong mỗi vòng lặp huấn luyện (epoch). Quá trình huấn luyện được thực hiện qua hai giai đoạn chính: Forward pass (lan truyền xuôi) và Backward pass (lan truyền ngược). Việc kết hợp hai phương pháp tối ưu này giúp mô hình đạt được tốc độ hội tụ nhanh và độ chính xác cao, đã được chứng minh hiệu quả trong nhiều bài toán mô hình hóa, dự báo và đánh giá rủi ro.

2.2. Hệ suy diễn mờ phân tầng (HFIS)

Trong hệ mờ phẳng, nếu mỗi đầu vào có m hàm thành viên và có n đầu vào, số luật có thể lên tới m^n, gây bùng nổ luật, chi phí tính toán cao và giảm khả năng diễn giải. HFIS khắc phục bằng cách chia bài toán thành các hệ mờ con; mỗi hệ xử lý một nhóm biến đầu vào tương đối đồng nhất, sau đó đầu ra các hệ con được sử dụng làm đầu vào cho hệ mờ cấp cao hơn. Mỗi hệ con chỉ bao gồm khoảng 3-6 biến đầu vào, do đó số lượng luật mờ được duy trì ở mức hợp lý, giúp giảm độ phức tạp tính toán và tránh hiện tượng "bùng nổ luật". Cách tổ chức các mô-đun theo từng nhóm rủi ro cho phép mô phỏng cách thức đánh giá của chuyên gia, trong đó các rủi ro thường được xem xét theo các nhóm như kỹ thuật - thi công, tài chính - kinh tế, môi trường - xã hội, an toàn - tiến độ, và các yếu tố pháp lý - tổ chức. Cấu trúc phân cấp tạo điều kiện mở rộng hệ thống một cách linh hoạt, cho phép bổ sung thêm các nhóm rủi ro mới mà không làm thay đổi hoặc phá vỡ cấu trúc tổng thể của mô hình.

3. THIẾT KẾ KHUNG MÔ HÌNH ANFIS - HFIS CHO RỦI RO THI CÔNG ĐÊ, KÈ BIỂN

3.1. Cấu trúc khái niệm của mô hình

Bài toán được mô hình hóa như sau:

• Đầu vào tổng thể X: tập các biến rủi ro $x_1, x_2, \dots, x_n$được chia thành các nhóm:

✓ X_{tech}: sóng, mực nước, địa chất nền, giải pháp kết cấu, biện pháp thi công, kinh nghiệm tương tự, điều kiện mặt bằng…

✓ X_{fin}: biến động giá, dự phòng chi phí, năng lực tài chính nhà thầu, tình trạng giải ngân…

✓ X_{env}: nhạy cảm sinh thái, xung đột sinh kế - du lịch, yêu cầu cảnh quan, tác động kịch bản BĐKH…

✓ X_{safe}: mức độ an toàn, thiết bị bảo hộ, quy trình, kinh nghiệm, phụ thuộc "cửa sổ thời tiết"…

✓ X_{org}: thủ tục pháp lý, GPMB, chất lượng lập dự án, năng lực quản lý…

• Đầu ra:

✓ Chỉ số rủi ro trung gian: $R_{tech}, R_{fin}, R_{env}, R_{safe}, R_{org}$;

✓ Chỉ số rủi ro tổng hợp: R_{total}, chuẩn hóa $[0, 10]$và gán mức ngôn ngữ (rất thấp → rất cao).

3.2. Thiết kế hàm thành viên và tập luật

Đối với các biến định lượng như: chiều cao sóng, mực nước, tỷ lệ vượt chi phí, số ngày chậm tiến độ,…Các giá trị này cần được chuẩn hóa về cùng một thang đo (ví dụ từ 0-1 hoặc 0-10) để mô hình dễ xử lý và so sánh.

Đối với các biến đánh giá từ chuyên gia như: năng lực nhà thầu, mức độ an toàn, xung đột trong thi công,…Các biến này thường được chấm điểm theo thang Likert (1-5 hoặc 1-7) nên không cần chuẩn hóa, giữ nguyên miền giá trị ban đầu. Để biểu diễn các mức đánh giá như "rất thấp - thấp - trung bình - cao - rất cao", sử dụng hàm thuộc dạng tam giác hoặc hình thang, vì các dạng này đơn giản và giúp kết quả dễ hiểu, dễ giải thích..

Luật mờ trong mô-đun rủi ro: Tập luật mờ của mô hình có thể được xây dựng theo hai cách. Thứ nhất, các luật IF-THEN có thể được hình thành dựa trên kinh nghiệm và kiến thức của chuyên gia, trong đó các nhận định chuyên môn được chuyển đổi và ánh xạ sang các hàm thuộc tương ứng. Thứ hai, các luật cũng có thể được tạo tự động thông qua các công cụ trong MATLAB như genfis để sinh ra cấu trúc ban đầu của hệ mờ. Sau đó, các tham số của mô hình sẽ được tinh chỉnh thông qua quá trình huấn luyện bằng thuật toán ANFIS nhằm nâng cao độ chính xác của mô hình.

Ví dụ: Nếu điều kiện sóng trong thi công ở mức cao, nền công trình yếu và biện pháp thi công chưa phù hợp, thì mức rủi ro kỹ thuật được đánh giá là rất cao.

4. THUẬT TOÁN XÂY DỰNG VÀ HUẤN LUYỆN MÔ HÌNH

4.1. Thuật toán tổng quát

Đầu vào: Ma trận dữ liệu rủi ro D, mỗi dòng là một giai đoạn/công trình, gồm các biến rủi ro và (nếu có) nhãn rủi ro nhóm/tổng hợp.

Đầu ra: Bộ mô-đun ANFIS con đã huấn luyện; Mô-đun HFIS/ANFIS tổng hợp; Các file mô hình.

(1) Xây dựng mô hình ANFIS–HFIS

Bước 1. Tiền xử lý dữ liệu

Trước khi xây dựng mô hình, dữ liệu cần được xử lý để đảm bảo độ tin cậy và tính nhất quán. Quá trình này bao gồm việc làm sạch dữ liệu bằng cách loại bỏ hoặc thay thế các giá trị bị thiếu, đồng thời xử lý các giá trị ngoại lệ có thể gây sai lệch kết quả phân tích. Các biến định lượng được chuẩn hóa về một miền giá trị chuẩn nhằm tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình huấn luyện mô hình. Đối với các biến định tính, dữ liệu được mã hóa thành các mức giá trị tương ứng với các hàm thuộc trong hệ mờ.

Bước 2. Phân tách dữ liệu theo nhóm rủi ro

Từ tập dữ liệu tổng thể (D), dữ liệu được chia thành các tập con tương ứng với từng nhóm rủi ro trong nghiên cứu, bao gồm: rủi ro kỹ thuật ((D_{tech})), rủi ro tài chính ((D_{fin})), rủi ro môi trường ((D_{env})), rủi ro an toàn ((D_{safe})) và rủi ro tổ chức ((D_{org})).

Mỗi tập dữ liệu con bao gồm các biến đầu vào của nhóm rủi ro tương ứng ((X_{group})) và nhãn đầu ra biểu thị mức rủi ro của nhóm ((R_{group})).

Bước 3. Khởi tạo hệ suy luận mờ (FIS) cho từng mô-đun

Đối với mỗi nhóm rủi ro, một hệ suy luận mờ Sugeno được xây dựng theo hai cách:

- Cách 1 - dựa trên tri thức chuyên gia: Các luật IF-THEN được xây dựng dựa trên kinh nghiệm và kiến thức của chuyên gia.
- Cách 2 - bán tự động: Sử dụng các thuật toán sinh FIS như genfis với phương pháp grid partitioning hoặc subtractive clustering để tự động tạo cấu trúc hệ Sugeno ban đầu từ dữ liệu của từng nhóm.

Bước 4. Huấn luyện các mô đun bằng ANFIS

Dữ liệu của mỗi nhóm được chia thành ba phần: Tập huấn luyện (60-70%); Tập kiểm tra chéo/validation (15-20%); Tập kiểm thử/test (15-20%).

Sau đó thiết lập các tham số huấn luyện như số vòng lặp, mục tiêu sai số và tỷ lệ dữ liệu. Quá trình huấn luyện được thực hiện bằng thuật toán ANFIS, sử dụng phương pháp học lai giữa bình phương tối thiểu và gradient descent. Trong quá trình huấn luyện, mô hình tại vòng lặp có sai số nhỏ nhất sẽ được lựa chọn nhằm hạn chế hiện tượng quá khớp.

Bước 5. Xây dựng và huấn luyện mô đun tổng hợp

Sau khi huấn luyện các mô đun con, giá trị rủi ro của từng nhóm được tính toán cho toàn bộ dữ liệu. Các giá trị này được sử dụng làm đầu vào cho mô-đun tổng hợp để xác định mức rủi ro tổng thể (R_{total}) của hệ thống.

Bước 6. Lưu trữ và tài liệu hóa mô hình

Sau khi hoàn tất huấn luyện, các mô hình được lưu trữ dưới dạng file (ví dụ: .fis trong MATLAB hoặc đối tượng mô hình trong Python). Đồng thời cần xây dựng tài liệu mô tả chi tiết mô hình, bao gồm: danh sách biến đầu vào và đầu ra, dạng hàm thuộc, tập luật suy luận chính và phạm vi áp dụng của mô hình.

4.2. Triển khai trong MATLAB và Python

Trong MATLAB, các bước chính gồm:

- Dùng genfis hoặc xây sugfis để sinh FIS ban đầu;
- Dùng anfisOptions + anfis để huấn luyện, với dữ liệu train và optional checking;
- Dùng evalfis để suy diễn trên tập test và trong giai đoạn sử dụng.

Trong Python, có thể:

- Dùng thư viện mã nguồn mở (ví dụ các gói ANFIS, simpful) hoặc tự hiện thực theo kiến trúc;
- Tận dụng numpy/PyTorch cho xử lý vector hóa và lan truyền ngược;
- Gói mô hình thành class RiskANFISModule và TotalRiskHFIS.

5. KIỂM ĐỊNH VÀ HIỆU CHUẨN MÔ HÌNH

5.1. Chiến lược chia tập và tiêu chí đánh giá

Để đánh giá khả năng tổng quát hóa, dữ liệu cho mỗi mô-đun được chia: Tập huấn luyện: 60-70%; Tập kiểm định: 15-20%; Tập kiểm tra: 15-20%, chỉ dùng một lần sau cùng để đánh giá.

Các chỉ số đánh giá: RMSE - độ lệch bình phương trung bình; MAE - độ lệch tuyệt đối trung bình; R^2hoặc hệ số tương quan giữa giá trị dự báo và giá trị mục tiêu; Đồ thị thực tế , dự báo và phân tích phần dư.

5.2. Thuật toán kiểm định

1) Kiểm định mô hình

Sau khi hoàn thành quá trình xây dựng và huấn luyện mô hình, bước tiếp theo là tiến hành kiểm định nhằm đánh giá độ chính xác và khả năng dự báo của hệ ANFIS-HFIS.

Đối với từng mô đun rủi ro thành phần, mô hình được huấn luyện trên tập dữ liệu học và đồng thời theo dõi sai số trên tập kiểm định trong suốt quá trình huấn luyện. Mô hình tối ưu được lựa chọn tại vòng lặp có giá trị sai số trên tập kiểm định nhỏ nhất, nhằm hạn chế hiện tượng quá khớp. Sau khi lựa chọn mô hình tối ưu, hiệu quả dự báo của mô hình được đánh giá trên tập kiểm tra thông qua các chỉ số thống kê phổ biến, bao gồm: RMSE - sai số bình phương trung bình căn bậc hai; MAE - sai số tuyệt đối trung bình; R^2 - hệ số xác định phản ánh mức độ phù hợp của mô hình.

Đối với mô đun tổng hợp, quy trình kiểm định được thực hiện tương tự như trên. Dữ liệu đầu vào của mô đun này bao gồm các giá trị rủi ro nhóm R_{group}, trong khi đầu ra là mức rủi ro tổng thể R_{total}của hệ thống. Mô hình được huấn luyện và đánh giá trên các tập dữ liệu để xác định khả năng tổng hợp rủi ro của hệ ANFIS–HFIS.

2) Phân tích trực quan kết quả dự báo

Để đánh giá sâu hơn hiệu quả của mô hình, các phân tích trực quan được thực hiện, bao gồm: Vẽ biểu đồ phân tán giữa giá trị thực tế và giá trị dự báo đối với R_{group}và R_{total}; Phân tích phân bố phần dư nhằm phát hiện các sai lệch hệ thống hoặc xu hướng sai số trong mô hình.

3) Phân tích độ nhạy của mô hình

Nhằm xác định mức độ ảnh hưởng của các biến đầu vào đến kết quả đánh giá rủi ro, một phân tích độ nhạy được thực hiện theo các bước sau:

- Lựa chọn một số cấu hình công trình hoặc giai đoạn thi công điển hình;
- Thay đổi lần lượt từng biến đầu vào trong một khoảng hợp lý (thường từ ±10-20%) trong khi giữ nguyên các biến còn lại;
- Ghi nhận sự thay đổi tương ứng trong các giá trị R_{group}và R_{total}, từ đó xác định mức độ quan trọng tương đối của từng biến đầu vào đối với kết quả đánh giá rủi ro.

Quy trình kiểm định và đánh giá trên phù hợp với các phương pháp kiểm định mô hình học máy và hệ suy luận mờ-nơ-ron (ANFIS) thường được áp dụng trong các nghiên cứu và ứng dụng kỹ thuật.

6. HƯỚNG DẪN SỬ DỤNG MÔ HÌNH TRONG TÍNH TOÁN RỦI RO THI CÔNG

6.1. Luồng sử dụng mô hình

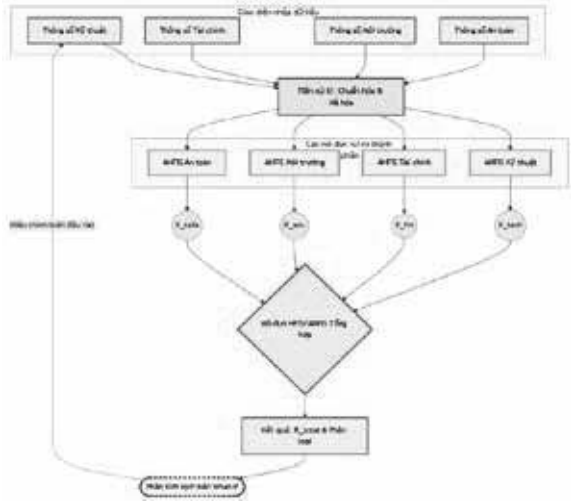
Trong thực tế, mô hình có thể được đóng gói thành một công cụ hỗ trợ quyết định, với quy trình sau:

b1) Nhập dữ liệu công trình/giai đoạn thi công

b2) Tính toán chỉ số rủi ro nhóm

b3) Tính toán chỉ số rủi ro tổng hợp

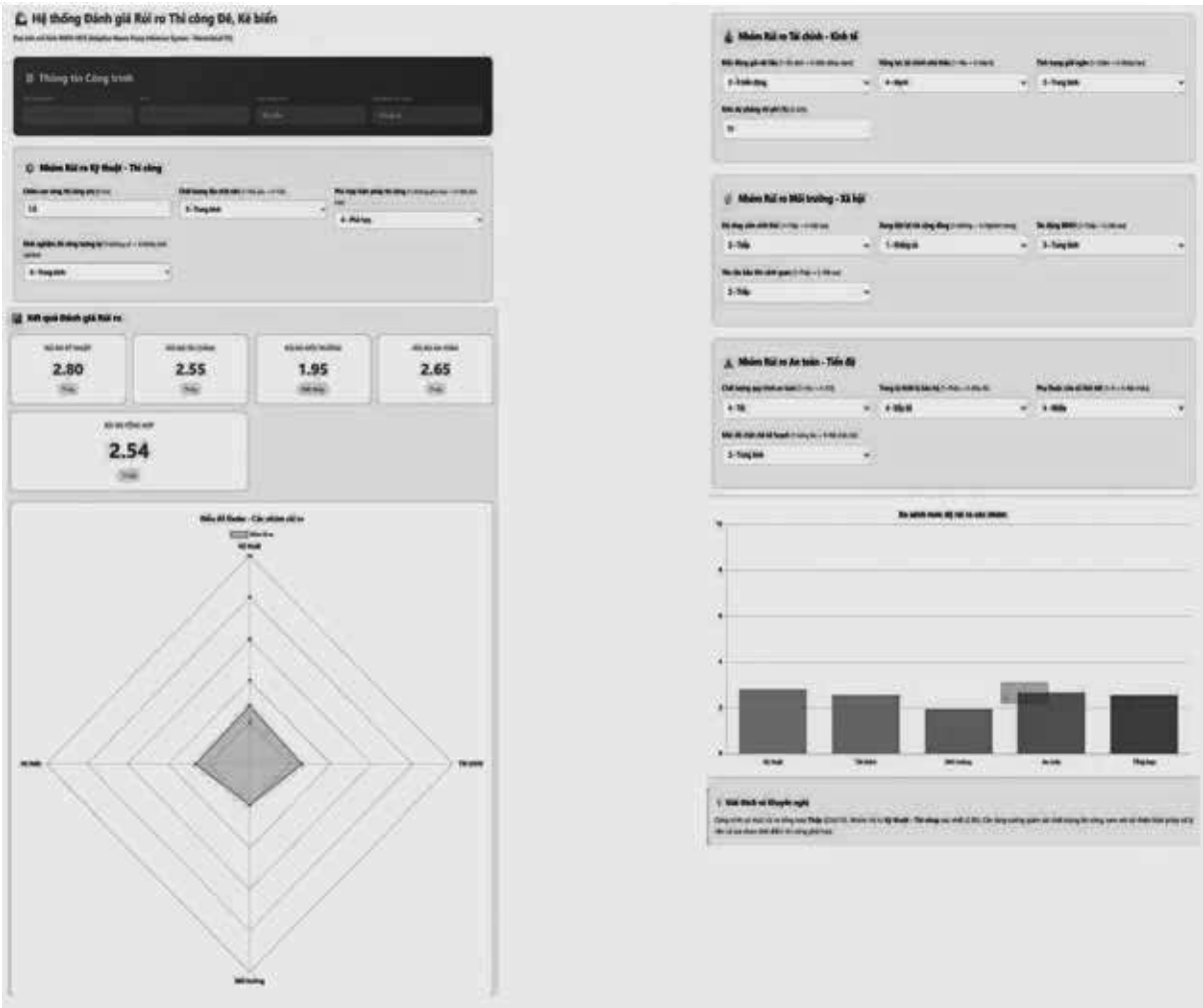
b4) Phân tích kịch bản "what-if"



Hình 1. Sơ đồ luồng quy trình của mô hình

6.3. Một số giao diện và kết quả tính toán từ mô hình

Một số giao diện và kết quả tính từ mô hình được trình bày như Hình 2.



Hình 2. Giao diện của mô hình tính

7. KẾT LUẬN

Bài báo đã trình bày một khung mô hình ANFIS - HFIS cho bài toán đánh giá rủi ro thi công đê, kè biển tại Việt Nam, với trọng tâm là:

- Mô tả rõ kiến trúc ANFIS 5 lớp và thuật toán học lai, và cách tổ chức thành hệ mờ phân tầng để xử lý nhiều nhóm rủi ro mà không bùng nổ luật.
- Đề xuất các thuật toán xây dựng và kiểm định mô hình khả thi trong môi trường MATLAB/Python, phù hợp với thực hành học máy.
- Đưa ra quy trình sử dụng mô hình như một công cụ CNTT: nhập dữ liệu, tính R_{group}, R_{total}, phân tích kịch bản "what-if", từ đó hỗ trợ lựa chọn phương án thi công, thời vụ, biện pháp kỹ thuật và tổ chức phù hợp.

Mô hình đã ghép nối một cách hệ thống nền tảng thuật toán ANFIS - HFIS với bài toán rủi ro thi công công trình ven biển Việt Nam, đồng thời chuyển hóa thành quy trình - thuật toán dễ chuẩn hóa và tự động hóa.

Khung mô hình trình bày trong bài chứng minh tính khả thi của việc áp dụng học máy và trí tuệ nhân tạo trên nền tảng logic mờ cho quản lý rủi ro thi công công trình phòng chống thiên tai tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Jang, J.-S. R., ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 23(3), 665-685, 1993.

[2] Salleh, M. N. M., Talpur, N. U. H., Hussain, K., & Ibrahim, M. F., Taxonomy of adaptive neuro-fuzzy inference system in modern engineering sciences, Frontiers in Artificial Intelligence, 4, 735469, 2021.

[3] MathWorks, Neuro-adaptive learning and ANFIS, in Fuzzy Logic Toolbox Documentation (R2024a), The MathWorks, Inc., 2024.

[4] MathWorks, Train adaptive neuro-fuzzy inference systems, in Fuzzy Logic Toolbox Documentation (R2024a), The MathWorks, Inc., 2024.

[5] Aher, S. S., Mhatre, V., Kadu, S., & Ranjan, A., Adaptive neuro-fuzzy inference system guided objective function for automated IMRT planning, Frontiers in Artificial Intelligence, 8, 1523390, 2025.

[6] Casualty Actuarial Society, Canadian Institute of Actuaries, & Society of Actuaries, Applying fuzzy logic to risk assessment and decision-making, 2013.

[7] World Bank, Resilient shores: Vietnam's coastal development between opportunity and disaster risk, Washington, DC: World Bank, 2020.

[8] Jang, J.-S. R. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 23(3), 665–685, 1993.

[9] Mrinal, K., Adaptive network-based fuzzy inference system (ANFIS) as a tool for system identification with special emphasis on training data reduction, Master's thesis, Indian Institute of Technology Guwahati, 2012.

■Ngày nhận bài: 05/3/2026 ■Ngày sửa bài: 20/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 28/3/2026

Nâng cao chất lượng xử lý tín hiệu cho kính hiển vi giao thoa ánh sáng trắng

Improving signal processing quality for white light interference microscopes

> LÊ KIM THƯ*, TRẦN THANH SƠN, LÊ ANH TUẤN, LÊ VĂN NHU
Học viện Kỹ thuật quân sự; *Email: Thulk@gmail.com

TÓM TẮT

Kính hiển vi theo nguyên lý giao thoa ánh sáng trắng (WLI) đang ngày càng phát triển và dần chiếm ưu thế trong lĩnh vực đo lường cũng như phân tích bề mặt. Với khả năng xử lý tín hiệu và tái tạo bề mặt 3D của vật một cách chính xác đến cấp nanomet đã chứng minh đây là một kỹ thuật rất mạnh mẽ trong việc ứng dụng để phân tích và đo các bề mặt vi cấu trúc. Kết quả của việc khôi phục bề mặt vật phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau như độ ổn định của nguồn sáng khảo sát, sai số trong bước dịch chuyển áp điện, chất lượng của bộ ảnh giao thoa trên cảm biến camera, thuật toán xử lý tín hiệu hay tín hiệu nhiễu tạp không mong muốn,... Vì vậy trong phương pháp đề xuất lần này đã tích hợp hai bước cho việc xử lý tín hiệu giao thoa ánh sáng trắng. Đầu tiên, bộ ảnh giao thoa được tiền xử lý cho từng bức ảnh bằng thuật toán BM3D để khử bớt nhiễu ảnh. Sau đó, sử dụng thuật toán biến đổi nhanh Fourier để lọc tín hiệu kết hợp với thuật toán làm khớp tín hiệu đường bao để xác định chính xác nhất chiều cao bề mặt. Kết quả thực nghiệm khảo sát phương pháp đề xuất trên các biên dạng mô phỏng với các mức nhiễu cao khác nhau đã thể hiện sự cải tiến rõ rệt so với các phương pháp truyền thống.

Từ khóa: Đo lường quang học; giao thoa ánh sáng trắng; biến đổi Fourier nhanh.

ABSTRACT

Microscopes based on the White Light Interferometry (WLI) principle are increasingly developing and gradually gaining dominance in the fields of metrology and surface analysis. Along with the capability of signal processing and 3D surface reconstruction with nanometer-level accuracy, it has proven to be a powerful technique for analyzing and measuring micro-structured surfaces. The results of surface reconstruction depend on various factors such as the stability of the light source, errors in the piezoelectric scanning steps, the quality of the interferograms on the camera sensor, signal processing algorithms, or unwanted noise signals. Therefore, this proposed method integrates a two-step process for White Light Interferometry signal processing. First, the set of interferograms is pre-processed frame-by-frame using the BM3D algorithm to reduce image noise. Subsequently, the Fast Fourier Transform (FFT) algorithm is used for signal filtering combined with an envelope fitting algorithm to determine the surface height with maximum precision. Experimental results surveying the proposed method on simulated profiles with various high noise levels have demonstrated significant improvements compared to traditional methods.

Keywords: Optical measurements; white light interference; fast Fourier transform.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong thời kỳ công nghiệp hiện đại, sự bùng nổ của các lĩnh vực mũi nhọn như công nghệ bán dẫn, cơ khí chính xác và quang điện tử đã đặt ra yêu cầu ngày càng cao cho đo lường và phân tích đặc tính cấu trúc bề mặt. Việc kiểm soát được bề mặt đến cỡ nanomet không chỉ giúp khảo sát chi tiết cấu trúc vi mô của vật, mà còn đặt ra yêu cầu cấp thiết về các giải pháp đo lường hiện đại có khả năng loại bỏ nhiễu để đạt độ chính xác cao nhất. Trước bối cảnh đó, phương pháp giao thoa WLI đã khẳng định đây là một trong những giải pháp đo lường biên dạng bề mặt 3D ưu việt (Lei, et al., 2016). Ưu thế vượt trội của phương pháp này nằm ở khả năng thực hiện phép đo không tiếp xúc đã loại bỏ được nguy cơ làm biến dạng bề mặt đồng thời cung cấp độ phân giải theo chiều dọc trục đạt tới cỡ nanomet với dải đo rộng và thời gian xử lý nhanh.

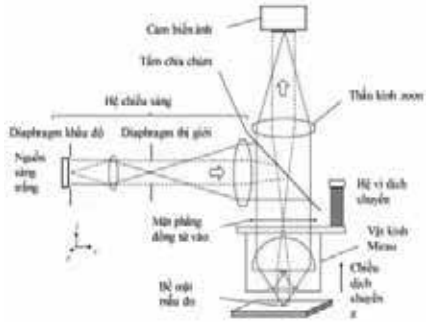
Về mặt kỹ thuật, WLI tái tạo cấu trúc ba chiều của bề mặt thông qua việc phân tích chuỗi tín hiệu vân giao thoa thu được khi quét dọc trục. Tuy nhiên, độ chính xác của quá trình này bị ảnh hưởng bởi các nguồn nhiễu phức tạp từ môi trường thực tế như rung động cơ học, sai số của bộ dịch chuyển áp điện (PZT) (Chen, et al., 2023), cũng như nhiễu hạt và nhiễu nhiệt sinh ra từ cảm biến hình ảnh. Sự hiện diện của các thành phần tạp âm này làm biến dạng hình dạng đường bao tín hiệu, dẫn đến sai lệch trong việc xác định vị trí có hiệu quang lộ bằng không (ZOPD), từ đó gây ra sai số đáng kể trong kết quả đo lường cuối cùng. Vì vậy, việc loại bỏ các nguồn nhiễu này là rất quan trọng để đạt độ chính xác đo lường cao hơn (Thong, et al., 2024).

Ngày nay, một số kỹ thuật truyền thống như tách đường bao (Envelope) hay biến đổi nhanh Fourier (FFT) (S.Ma, et al., 2011) đã được áp dụng rộng rãi để xử lý tín hiệu giao thoa tuy nhiên chúng

vẫn tồn tại những hạn chế nhất định. Các phương pháp này chủ yếu tập trung vào xử lý tín hiệu giao thoa mà không giải quyết việc tiền xử lý các hình ảnh vân giao thoa. Để khắc phục các nhược điểm trên, nghiên cứu này đề xuất một quy trình xử lý tín hiệu cải tiến, kết hợp giữa bước tiền xử lý áp dụng thuật toán khử nhiễu BM3D cho từng hình ảnh vân giao thoa (Lebrun, 2012) với các bước lọc nhiễu tiên tiến trong miền không gian và phân tích phổ trong miền tần số để tái tạo biên dạng 3D (Thong, et al., 2025). Cách tiếp cận này không chỉ giải quyết được bài toán nhiễu nền ngay từ dữ liệu thô để nâng cao chất lượng ảnh giao thoa, mà còn tối ưu hóa quá trình trích xuất tín hiệu, giúp giảm thiểu sai số trung phương (RMSE) xuống mức thấp nhất và tái tạo bề mặt vật thể với độ chính xác cấp độ nanomet.

2. PHƯƠNG PHÁP

Sơ đồ mô tả nguyên lý của phương pháp giao thoa ánh sáng trắng được thể hiện trên Hình 1. Trong sơ đồ này, nguồn sáng trắng được chuẩn trực thông qua hệ chiếu sáng và truyền đến bộ chia chùm tia. Tại đây, ánh trắng được truyền đến vật kính hiển vi Mirau và gương bán phản xạ nằm trong vật kính này tách chùm tia thành hai thành phần: Một chùm chiếu lên mẫu đo rồi phản xạ lại và một chùm chiếu lên gương phẳng tham chiếu rồi sau đó phản xạ lại. Hai chùm tia này đi qua thấu kính hội tụ, gặp nhau và tạo ảnh giao thao trên mặt phẳng cảm biến ảnh. Tín hiệu WLI tuân theo nguyên lý chồng chất ánh sáng, cường độ tổng của tín hiệu giao thoa ánh sáng trắng cực đại ở vị trí có hiệu quang trình bằng 0 (vị trí ZOPD).



Hình 1. Sơ đồ quang học mô tả nguyên lý hệ thống WLI

Một bộ dịch chuyển áp điện (PZT) cho phép dịch chuyển chính xác vật kính hiển vi dọc theo chiều trục dọc làm cho hiệu quang trình của hai chùm sáng phản xạ từ bề mặt mẫu đo và bề mặt gương tham chiếu thay đổi. Từ đó thu được một tập hợp hình ảnh giao thoa tại các vị trí dịch chuyển của bộ PZT. Sau khi thu được kết quả giao thoa trên các vị trí dọc trục, thông qua các thuật toán xử lý tín hiệu dọc trục để tìm ra vị trí ZOPD. Các vị trí này sẽ được sử dụng để tái tạo lại biên dạng 3D của bề mặt vật mẫu đo. Cường độ tín hiệu dọc trục thu được từ đầu thu camera được biểu diễn như sau:

$$I(z) = I_B + \beta I_B \, exp\left[-\left(\frac{z-z_0}{L_c}\right)^2\right] cos\left[\frac{4\pi}{\lambda_0}(z-z_0) + \varphi\right] \quad (1)$$

Trong đó, I_B là cường độ nền, β là độ tương phản vân, L_c là độ dài kết hợp của nguồn sáng, λ_0 là bước sóng trung tâm của nguồn sáng, z là vị trí quét dọc trục, z_0 là vị trí ZOPD cần tìm và φ là độ lệch pha của chùm sáng phản xạ từ bề mặt mẫu đo và chùm sáng phản xạ từ bề mặt gương phẳng tham chiếu. Để tiện cho phép biến đổi Fourier, đặt hàm đường bao tín hiệu là $g(z-z_0) = \beta I_B \exp\left[-\left(\frac{z-z_0}{L_c}\right)^2\right]$.

$$I(z) = I_0 + g(z-z_0)\cos\left(\frac{4\pi}{\lambda_0}(z-z_0) + \varphi\right) \quad (2)$$

Trong miền tần số, biến đổi Fourier của tín hiệu dọc trục như sau:

$$\mathcal{F}\,(I(z)) = 2\pi I_B \delta(k) + \beta G(k) e^{-z_0 k j} * \frac{1}{2}\left[e^{\varphi j - j\cdot\frac{4\pi z_0}{\lambda_0}}\,\delta\left(k - \frac{4\pi}{\lambda_0}\right) + e^{j\cdot\frac{4\pi z_0}{\lambda_0} - \varphi j}\,\delta\left(k + \frac{4\pi}{\lambda_0}\right)\right] \quad (3)$$

Trong đó, $\delta(k)$ là hàm xung với $k = 4\pi/\lambda_0$ là tần số góc không gian, *G(k)* là biến đổi Fourier của hàm đường bao, e là cơ số tự nhiên và j là biểu thị đơn vị ảo của số phức.

Sau khi biến đổi nhanh Fourier tín hiệu dọc trục, phổ biên độ tín hiệu thu được biểu hiện sự phân tách rõ rệt giữa các thành phần tín hiệu. Cụ thể, phổ tín hiệu bao gồm ba thành phần chính: Thành phần tần số thấp (DC) tại gốc tọa độ thể hiện cho cường độ nền I_B; hai đỉnh phổ đối xứng nằm ở vùng tần số dương và âm tương ứng với thông tin của vân giao thoa và các thành phần nhiễu tạp âm. Đặc điểm phân tách này trong miền tần số cho phép thiết lập các cửa sổ lọc để giữ lại 3 thùy phổ (DC, thùy dương và thùy âm) từ đó loại bỏ hiệu quả các tín hiệu nhiễu không mong muốn nằm ngoài băng thông hữu ích.

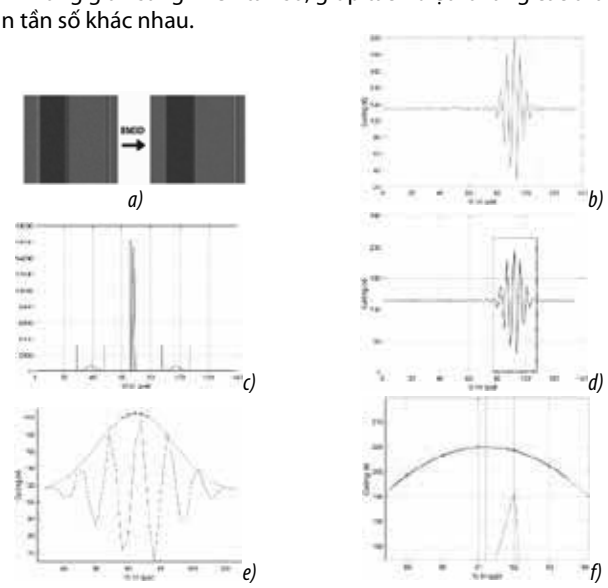
Trong khuôn khổ nghiên cứu phương pháp đề xuất này, điểm cải tiến quan trọng nằm ở việc tích hợp khâu tiền xử lý tín hiệu giao thoa bằng thuật toán BM3D trước khi thực hiện các phân tích phổ tần số truyền thống. Khác với phương pháp biến đổi Fourier nhanh (FFT) thuần túy chỉ hiệu quả trong việc cắt bỏ các thành phần nhiễu nằm ngoài cửa sổ lọc, việc bổ sung bước tiền xử lý này giải quyết triệt để vấn đề nhiễu ngẫu nhiên nằm lẫn bên trong dải tần hữu ích bằng cách làm sạch dữ liệu hình ảnh vân giao thoa ngay từ đầu vào, phương pháp đề xuất giúp loại bỏ các nhiễu dư thừa và các gai tín hiệu bất thường, tạo tiền đề cho việc trích xuất đường bao và tìm đỉnh ZOPD chính xác hơn.

Các bước thực hiện của phương pháp đề xuất:

- Bước 1 (Hình 2a): Trước khi trích xuất tín hiệu dọc trục, bộ ảnh giao thoa thu được từ camera thường bị ảnh hưởng của nhiễu không mong muốn. Để lọc bớt các tín hiệu nhiễu trên từng bức ảnh cần thông qua bước tiền xử lý bằng bộ lọc BM3D.

- Bước 2 (Hình 2b): Sau khi hoàn tất quá trình khử nhiễu, hệ thống sẽ đọc toàn bộ dữ liệu của chuỗi ảnh đã được tiền xử lý. Thuật toán sẽ trích xuất tín hiệu cường độ sáng tại cùng một vị trí pixel qua tất cả các bước dịch chuyển của bộ PZT theo phương thẳng đứng tạo ra tín hiệu dọc trục cho từng điểm ảnh, biểu diễn sự biến thiên cường độ sáng theo chiều cao quét.

- Bước 3 (Hình 2c): Tín hiệu dọc trục thu được thường chứa đựng cả tín hữu ích lẫn các thành phần nhiễu. Để phân tích sâu hơn, sử dụng thuật toán Biến đổi nhanh Fourier (Fast Fourier Transform - FFT). Phép biến đổi này có nhiệm vụ chuyển đổi tín hiệu dọc trục từ miền không gian sang miền tần số, giúp tách biệt rõ ràng các thành phần tần số khác nhau.



Hình 2. a) Tiền xử lý BM3D; b) Tín hiệu dọc trục; c) FFT và giữ 3 thùy; d) iFFT và lọc vùng; e) Làm khớp hàm đường bao; f) Tìm đỉnh hàm làm khớp

- Bước 4 (Hình 2c): Trên phổ tần số thu được, tín hiệu hữu ích cần giữ lại thường tập trung năng lượng tại thành phần một chiều (DC) và hai dải biên đối xứng. Tại bước này, thuật toán sẽ thực hiện thao tác lọc dải thông bằng cách giữ lại ba thùy chính của tín hiệu biến đổi Fourier nhanh (gồm thành phần DC và hai đỉnh phổ đối xứng), đồng thời cắt bỏ hoàn toàn các thành phần tần số nằm ngoài ba vùng này. Việc loại bỏ các vùng biên giúp triệt tiêu các nhiễu không mong muốn, trong khi việc giữ lại đủ ba thùy giúp tín hiệu giao thoa vẫn giữ được tính toàn vẹn thông tin sau khi xử lý.

- Bước 5 (Hình 2d): Sau khi đã lọc sạch nhiễu trong miền tần số, ta cần đưa tín hiệu trở lại dạng ban đầu để xác định vị trí ZOPD. Thuật toán sẽ thực hiện biến đổi ngược Fourier (inverse FFT) để chuyển tín hiệu từ miền tần số quay về miền không gian. Kết quả thu được lúc này là một tín hiệu giao thoa sạch, mượt mà hơn rất nhiều so với tín hiệu gốc ban đầu.

- Bước 6 (Hình 2d): Mặc dù tín hiệu đã được lọc nhiễu trong miền tần số, nhưng để đảm bảo độ chính xác cao nhất, ta cần lựa chọn vùng khảo sát tối ưu nhất. Thuật toán tạo một cửa sổ có độ rộng thích hợp để cắt lấy vùng tín hiệu hữu ích nhất (vùng có độ tương phản vân cao nhất) và loại bỏ các tín hiệu rìa hoặc nhiễu dư thừa còn sót lại ở hai đầu tín hiệu.

- Bước 7 (Hình 2e, 2f): Từ tín hiệu có ích giữ lại sẽ được xác định đường bao (envelope Do việc lấy mẫu rời rạc có thể không trùng với đỉnh thật sự của tín hiệu, ta sử dụng thuật toán làm khớp đường bao với một hàm bậc 2 để nội suy vị trí đỉnh của đường bao đó. Cực đại của hàm parabol này chính là vị trí ZOPD mang thông tin về chiều cao thực sự của điểm ảnh đó trên mẫu vật. Quá trình này được lặp lại cho toàn bộ các pixel trong vùng khảo sát, và tập hợp tất cả các giá trị chiều cao của từng pixel sẽ tái tạo nên chiều cao bề mặt 3D hoàn chỉnh của bề mặt vật thể với độ chính xác cấp nanomet.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Để đánh giá một cách trực quan tính hiệu quả và độ tin cậy của phương pháp xử lý tín hiệu giao thoa ánh sáng trắng được đề xuất - tích hợp thuật toán khử nhiễu BM3D trong miền không gian và phân tích biến đổi Fourier nhanh (FFT) trong miền tần số, một mẫu vật đo mô phỏng có hình mặt nghiêng và mặt cầu được sử dụng. Dữ liệu đầu vào là tập ảnh mô phỏng vân giao thoa ánh sáng trắng được tạo ra mô tả tương tự như cách bộ dịch chuyển áp điện PZT và cảm biến camera hoạt động trong hệ thống kính hiển vi. Các thông số thực nghiệm của hệ thống được khai báo bao gồm: Bước quét dọc trục của bộ dịch chuyển áp điện PZT là 60 nanomet, kích thước của camera là 640x480 pixel, kích thước mỗi pixel là 482 nanomet, độ phóng đại vật kính hiển vi là 20X.

Bên cạnh đó, cách tham số thực nghiệm trong công thức được cài đặt như: Cường độ nền I_B là 115, độ tương phản vân β là 0.8, độ rộng quang phổ là 100 nanomet và bước sóng trung tâm λ_0 là 550 nanomet. Tuy nhiên, các tín hiệu giao thoa thực tế không chỉ chứa các tín hiệu sạch mà còn bao gồm các thành phần nhiễu không mong muốn từ nhiều nguồn khác nhau, do đó nhiễu Guassian được chủ động đưa vào tín hiệu mô phỏng với mức nhiễu SNR (là thước đo mức tín hiệu mong muốn với tín hiệu nhiễu) có đơn vị là dB. Kết quả mô phỏng tập trung đánh giá vào sai số bình phương trung bình gốc (RMSE) và sai số tuyệt đối trung bình (MAE). Đây là hai chỉ số quan trọng để xác định mức độ sai lệch giữa biên dạng bề mặt tái tạo lại được và biên dạng bề mặt gốc ban đầu của vật đo.

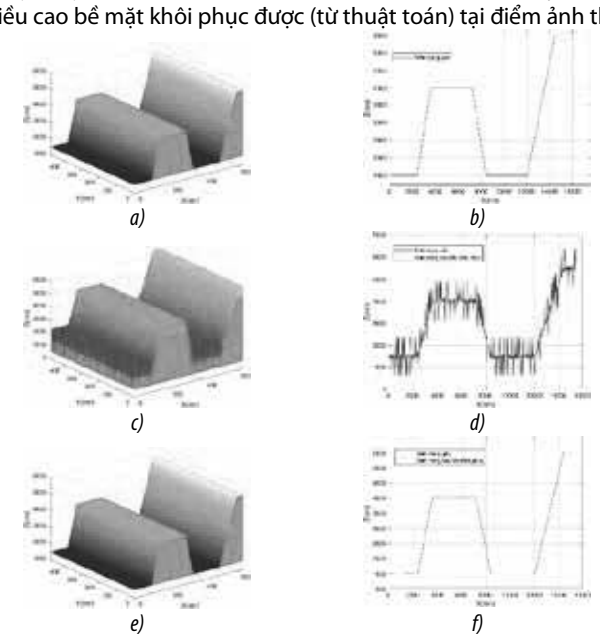
Cụ thể, sai số bình phương trung bình gốc (RMSE) là chỉ số dùng để đánh giá độ chính xác của việc tái tạo bề mặt 3D bằng cách đo mức độ sai lệch giữa chiều cao bề mặt khôi phục được (từ thuật toán đề xuất) so với chiều cao bề mặt lý thuyết (từ mẫu mô phỏng ban đầu). Công thức RMSE được xác định như sau:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4)$$

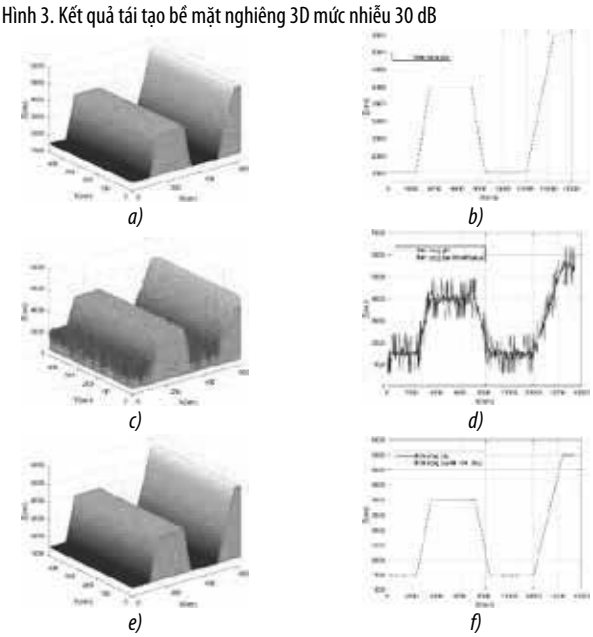
MAE là chỉ số đánh giá độ chính xác tổng quát của phép đo. Cho biết trung bình mỗi điểm ảnh trên bề mặt tái tạo bị sai lệch bao nhiêu so với bề mặt thực tế, bất kể là sai lệch dương (cao hơn) hay âm (thấp hơn). Công thức MAE được xác định như sau:

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} | y_i - \hat{y}_i | \quad (5)$$

Trong đó, N là tổng số lượng điểm ảnh (pixels) trong vùng khảo sát bề mặt; i là chỉ số của điểm ảnh với i=1,2,..,N; y_i là giá trị chiều cao lý thuyết (từ mẫu mô phỏng) tại điểm ảnh thứ i và $\hat{y}_i$ là giá trị chiều cao bề mặt khôi phục được (từ thuật toán) tại điểm ảnh thứ i.



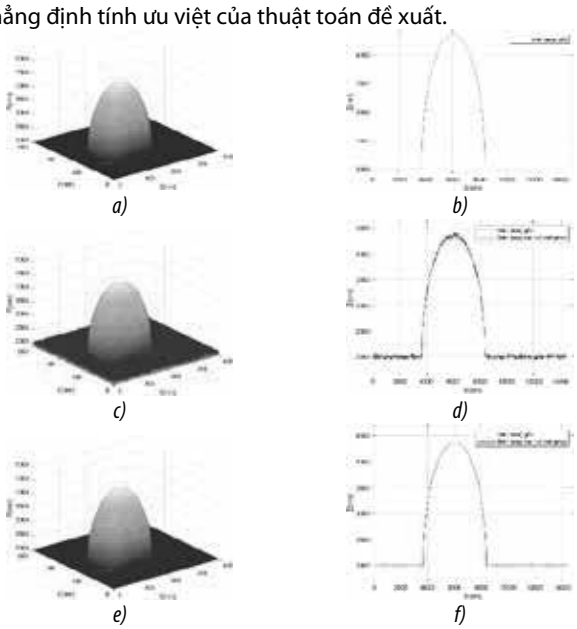
Hình 3. Kết quả tái tạo bề mặt nghiêng 3D mức nhiễu 30 dB



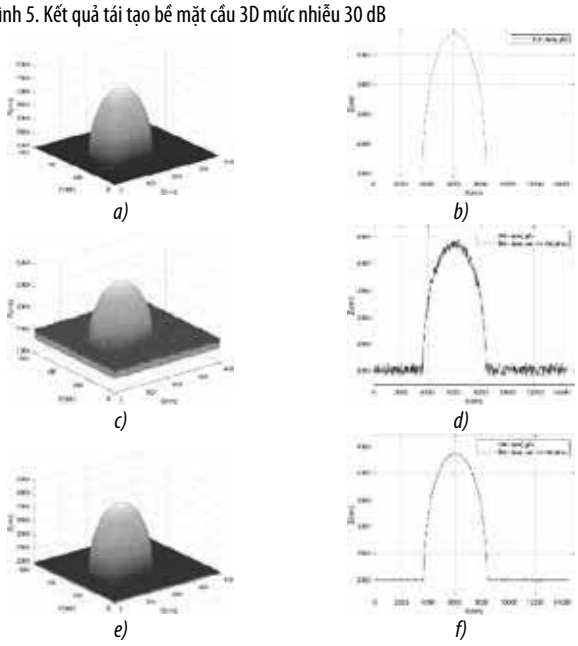
Hình 4. Kết quả tái tạo bề mặt nghiêng 3D mức nhiễu 20 dB

Một bề mặt nghiêng chuẩn với độ cao thay đổi từ 1500 nm đến 5500 nm đã được thiết lập làm dữ liệu tham chiếu như thể hiện ở Hình (3a, 4a) và (3b, 4b). Tín hiệu giao thoa mô phỏng sau đó được tác động bởi nhiễu trắng Gaussian ở mức độ 30 dB và 20 dB nhằm giả lập điều kiện đo lường thực tế. Quan sát kết quả của phương pháp FFT truyền thống tại Hình (3c, 4c) và (3d, 4d), có thể thấy bề

mặt tái tạo bị biến dạng nghiêm trọng do ảnh hưởng của nhiễu. Ngược lại, phương pháp đề xuất cho thấy khả năng khôi phục vượt trội thể hiện qua Hình (3e, 4e) và (3f, 4f). Biên dạng sau khi khôi phục trùng gần như hoàn toàn với biên dạng gốc, chứng tỏ sai số đã được giảm thiểu đáng kể. Tại cùng mức nhiễu 20 dB, sai số RMSE của phương pháp đề xuất chỉ còn 6.045 nm, thấp hơn rất nhiều lần so với phương pháp FFT. Đặc biệt tại mức nhiễu 30 dB, sai số RMSE chỉ còn 1.946 nm. Sự chênh lệch lớn về sai số giữa hai phương pháp này đã khẳng định tính ưu việt của thuật toán đề xuất.



Hình 5. Kết quả tái tạo bề mặt cầu 3D mức nhiễu 30 dB



Hình 6. Kết quả tái tạo bề mặt cầu 3D mức nhiễu 20 dB

Bên cạnh các bề mặt phẳng của vật, khả năng đáp ứng của thuật toán đối với các cấu trúc có độ cong liên tục cũng được kiểm chứng thông qua mô hình chỏm cầu với độ cao thay đổi từ 2000 nm đến hơn 4000 nm, như minh họa tại Hình (5a, 6a) và (5b, 6b). Khi chịu tác động của nhiễu Gaussian, phương pháp FFT truyền thống cho thấy sự hạn chế rõ rệt trong việc duy trì độ trơn mượt của bề mặt. Trên Hình (5c, 6c) và (5d, 6d), có thể thấy biên dạng tái tạo bị bao phủ bởi các gợn nhiễu dày đặc, khiến đường cong thực tế bị răng cưa hóa và lệch so với biên dạng gốc. Phương pháp đề xuất đã thể hiện khả năng xử lý vượt trội hơn, đặc biệt là khả năng bảo toàn cấu trúc hình học của vật thể. Các số liệu thống kê cho thấy sự cải thiện độ chính xác cao. Tại mức nhiễu 20 dB, sai số RMSE giảm mạnh xuống còn 12.354 nm, thấp hơn khoảng 5 lần so với phương pháp cũ. Đáng chú ý hơn, tại mức nhiễu 30dB, biên dạng bề mặt được khôi phục với độ chính xác rất cao, đạt mức sai số RMSE chỉ 2.574 nm.

Dựa vào kết quả mô phỏng cho thấy thực tế việc tái tạo lại bề mặt 3D của vật bị ảnh hưởng rất nhiều bởi các nhiễu không mong muốn từ môi trường như chấn động cơ học, sai lệch của bộ dịch chuyển áp điện (PZT), bụi bẩn, cũng như nhiễu hạt ngẫu nhiên sinh ra từ cảm biến thu tín hiệu giao thoa. Việc xuất hiện của các thành phần nhiễu tạp này làm sai lệch hình dạng đường bao tín hiệu dẫn đến sai lệch trong việc xác định vị trí ZOPD và từ đó gây ra sai số trong việc tái tạo lại bề mặt 3D. Phương pháp xử lý tín hiệu WLI đề xuất này đã kết hợp việc tiền xử lý ảnh giao thoa để loại bỏ đáng kể các nhiễu ngẫu nhiên bằng việc làm sạch từng bức ảnh giao thoa ánh sáng trắng với xử lý tín hiệu giao thoa dọc trục trong miền tần số và làm khớp tín hiệu sau khi xử lý trong miền tần số đã cho thấy khả năng tái tạo lại chính xác biên dạng và độ cao của vật ngay trong điều kiện làm việc có nhiễu cao.

4. KẾT LUẬN

Phương pháp đề xuất nâng cao chất lượng xử lý tín hiệu giao thoa ánh sáng trắng cho kính hiển vi giao thoa đã thể hiện được chất lượng khôi phục đáng tin cậy và hiệu quả hơn đáng kể so với các phương pháp truyền thống khác. Điểm mới của phương pháp đã thể hiện việc tích hợp bước tiền xử lý từng bức ảnh trên cảm biến đầu thu để cho tập ảnh giao thoa đầu vào đạt chất lượng tốt hơn, kết hợp nhuần nhuyễn với các bước lọc tín hiệu trong miền tần số và thuật toán làm khớp tín hiệu đường bao trong miền không gian đã hình thành nên một phương pháp xử lý tối ưu chặt chẽ. Cơ chế này giúp loại bỏ triệt để các thành phần nhiễu tần số cao và các sai số do rung động môi trường, từ đó giảm thiểu đáng kể sai số tích lũy trong quá trình xử lý và tái tạo biên dạng 3D cho bề mặt vật mẫu đo. Các kết quả thực nghiệm đã chứng minh tính hiệu quả thực tiễn của phương pháp và có khả năng trong việc ứng dụng vào các hệ thống đo lường quang học cũng như phân tích cấu trúc bề mặt trong các lĩnh vực kỹ thuật đòi hỏi độ khắt khe về sai số cấp nanomet.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Chen, W., Xiong, Y., Chen, J. & Chen, S., Accurate white light phase-shifting interferometry under PZT scanning error. Optics and Lasers in Engineering, Volume 169, p. 107728, 2023.

[2] Lebrun, M., An Analysis and Implementation of the BM3D Image Denoising Method. Image Processing On Line, Volume 2, pp. 175-213, 2012.

[3] Lei, Z. et al., A novel surface recovery algorithm in white light interferometry. Measurement, Volume 80, pp. 1-11, 2016.

[4] S.Ma, et al., Micro-profile measurement based on windowed Fourier transform in white-light scanning interferometry. Optics Communications, Volume 284, pp. 2488-2493, 2011.

[5] Thong, N. D., Hai, L. H. & Nhu, L. V., Enhanced accuracy in surface profile reconstruction in white light interferometry using the BM3D algorithm in conjunction with fast Fourier transform. Results in Optics, Volume 21, pp. 1-9, 2025.

[6] Thong, N. D., Hai, L. H., Thi, N. Q. & Nhu, L. V., Improving Accuracy Measurement of Surface Profile in White Light Interference with Effect of Noise. s.l., s.n, 2024.

■Ngày nhận bài: 09/3/2026 ■Ngày sửa bài: 19/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 27/3/2026

Nghiên cứu thuật toán di truyền (GA) tối ưu hóa tham số luật điều khiển PID cho hệ thống giảm lắc Rotor Magnus tàu thủy

A study on genetic algorithm (GA)-based optimization of PID controller parameters for a ship roll stabilization system using a magnus rotor

> THS PHẠM TẤT TIỆP, PGS.TS NGUYỄN VĂN SƯỚNG*, THS BÙI VĂN HƯNG
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email: nguyenvansuong@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất phương pháp sử dụng thuật toán di truyền (Genetic Algorithm - GA) để tối ưu hóa tham số bộ điều khiển PID cho hệ thống giảm lắc tàu thủy ứng dụng Rotor Magnus. Mô hình động lực học lắc ngang được xây dựng dạng phi tuyến, có xét đến nhiễu do sóng điều hòa tác động lên tàu. Mô-men điều khiển của rotor Magnus được mô hình hóa theo nguyên lý tuần hoàn, tỷ lệ với tốc độ quay rotor và tốc độ quay bị ràng buộc bão hòa ở mức ±1.500 rpm. Tiêu chí tối ưu được lựa chọn là hiệu quả giảm lắc tương đối RRC (Rolling Reduction Criterion), tính theo độ lệch chuẩn (RMS) của góc lắc trước và sau điều khiển. Kết quả mô phỏng số cho thấy bộ PID tối ưu bởi GA đạt RRC trên 80%, giảm đáng kể mức lắc so với trường hợp không điều khiển và duy trì biên độ lắc nhỏ ổn định trong suốt khoảng thời gian mô phỏng.

Từ khóa: Rotor Magnus; giảm lắc tàu; PID; thuật toán di truyền; RRC; mô phỏng số.

ABSTRACT

This paper proposes a method that uses a Genetic Algorithm (GA) to optimize the parameters of a PID controller for a ship roll reduction system employing a Magnus rotor. The roll dynamics are modeled as a third-order nonlinear system, taking into account harmonic wave-induced disturbances acting on the ship. The Magnus rotor control moment is formulated based on circulation theory, proportional to the rotor rotational speed, and constrained by saturation at ±1,500 rpm. The selected optimization criterion is the Rolling Reduction Criterion (RRC), computed from the standard deviation (RMS) of the roll angle before and after control. Numerical simulation results show that the GA-tuned PID controller achieves an RRC above 80%, significantly reducing roll motion compared with the uncontrolled case and maintaining a small, stable roll amplitude throughout the simulation period.

Keywords: Magnus rotor; ship roll stabilization; PID; genetic algorithm; RRC; numerical simulation.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong hoạt động hàng hải hiện đại, hiện tượng lắc ngang (roll motion) luôn được coi là một trong những yếu tố bất lợi lớn nhất, ảnh hưởng trực tiếp đến độ an toàn, khả năng khai thác, sự thoải mái của thuyền viên và hành khách, cũng như tuổi thọ kết cấu và thiết bị trên tàu. Việc nghiên cứu các giải pháp nhằm giảm thiểu dao động lắc ngang vì thế mang ý nghĩa khoa học và thực tiễn sâu sắc.

Trong số các phương pháp ổn định hiện nay, hệ thống Rotor Magnus (RM) được đánh giá là một giải pháp tiên tiến, thân thiện môi trường và phù hợp với định hướng phát triển bền vững của ngành Hàng hải. Cơ chế sinh mô-men giảm lắc dựa trên hiệu ứng Magnus không chỉ mang lại hiệu quả giảm lắc đáng kể mà còn có những ưu điểm vượt trội: Hoạt động hiệu quả ở tốc độ thấp (khi tàu di chuyển chậm, neo đậu hoặc điều động tại cảng), thiết kế gọn nhẹ, tiết kiệm năng lượng và không ảnh hưởng đến không gian khai thác hàng hóa [1, 2].

Mặc dù vậy, hiệu quả của hệ thống RM phụ thuộc quyết định vào chất lượng bộ điều khiển. Trong đó, bộ điều khiển PID với ưu

điểm đơn giản và dễ triển khai vẫn chiếm vị trí phổ biến, nhưng khả năng đạt tối ưu lại phụ thuộc mạnh vào việc lựa chọn các tham số. Các phương pháp chỉnh định cổ điển thường chưa đáp ứng được yêu cầu đối với hệ thống phi tuyến và chịu tác động của bất định như hệ thống ổn định giảm lắc [1, 2].

Trong thực tế, PID là bộ điều khiển phổ biến nhờ cấu trúc đơn giản, dễ triển khai. Song, chỉnh định PID theo kinh nghiệm thường khó đạt tối ưu khi hệ phi tuyến và có nhiễu. Bài báo này đề xuất sử dụng thuật toán di truyền (GA) để tối ưu tham số K_P, K_I, K_D của PID nhằm cực đại hóa hiệu quả giảm lắc RRC dựa trên RMS của góc lắc. Đây là tiêu chí trực tiếp phản ánh hiệu quả giảm lắc trong miền thời gian, phù hợp cho đánh giá thực nghiệm/mô phỏng.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT CỦA HỆ THỐNG ỔN ĐỊNH LẮC ROTOR MAGNUS

2.1. Mô-men điều khiển sinh ra bởi hiệu ứng Magnus

Tín hiệu điều khiển trong chương trình là tốc độ quay của rotor $u = n(rpm)$, giới hạn bởi:

$$u \in \left[-u_{\max}\,;\, u_{\max}\right] \quad (1)$$

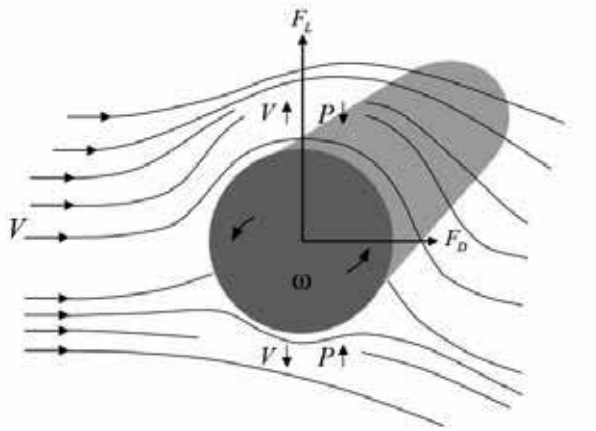
Quy đổi tốc độ quay sang tốc độ góc với đơn vị rad/s:

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60} \quad (2)$$

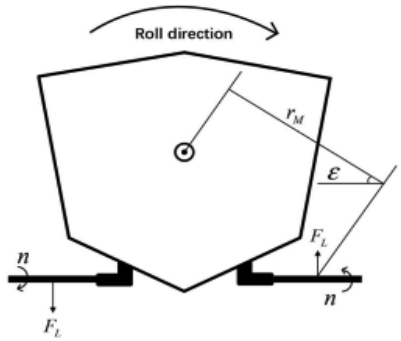
Hiệu ứng Magnus xuất hiện khi một vật thể quay trong dòng chất lỏng, tạo ra lực nâng vuông góc với hướng dòng chảy. Lực nâng F_L do rotor tạo ra được xác định dựa trên định lý Kutta-Joukowski như sau[4,5]:

$$F_L = 2\pi a^2 \rho l V \omega \quad (3)$$

Trong đó: ρ là khối lượng riêng của nước biển; V là vận tốc dòng chảy tương đối; l là chiều dài rotor; a là bán kính và ω là tốc độ góc quay của rotor.



Hình 1. Lực nâng do hiệu ứng Magnus tác dụng lên xi-lanh quay



Hình 2. Thiết bị ổn định lắc Rotor Magnus được lắp đặt trên tàu

Khi bộ ổn định Rotor Magnus hoạt động thì cánh xi-lanh thực hiện đồng thời cả chuyển động quay và dao động xoay trục, lực nâng sẽ phụ thuộc vào tốc độ góc quay của Rotor ω và tần số góc dao động quanh trục của cánh tới tần số góc ω_o. Kết hợp với phương trình (Levin et al., 2019) [5, 6], mô-men thiết bị điều khiển ổn định lắc Rotor Magnus được xác định theo công thức [5, 6, 7]:

$$K_M = F_L . r_{rw} \quad (4)$$

Với r_{rw} là cánh tay đòn lực do bộ ổn định Rotor Magnus được xác định bởi công thức:

$$r_{rw} = r_M . \cos\varepsilon \quad (5)$$

2.2. Mô hình động lực học lắc của tàu gắn thiết bị giảm lắc Rotor Magnus

Gọi φ là góc lắc (rad), $\dot{\varphi}$ là tốc độ góc. Chuyển động lắc ngang của tàu (roll motion) khi xét đến mô-men điều khiển K_M và mô-men nhiễu động do sóng gió K_W có thể được biểu diễn bởi phương trình vi phân phi tuyến bậc hai [3, 5, 6]:

$$(I_x + \Delta I_x)\ddot{\varphi} + B_1\dot{\varphi} + B_2\left|\dot{\varphi}\right|\dot{\varphi} + C_1\varphi + C_2\varphi^3 = 2K_M + K_W \quad (6)$$

Trong đó: B_1, B_2 là các hệ số dập tắt dao động lắc của tàu; C_2 là các hằng số liên quan đến các thông số của tàu; C_1 là tích của lượng giãn nước và chiều cao thế vững ban đầu của tàu; I_x là mô-men quán tính của thân tàu; ΔI_x là mô-men quán tính bổ sung; D là lượng giãn nước của tàu; GM là chiều cao thế vững ban đầu của tàu; α_f là góc nghiêng tác động của sóng lên thân tàu.

Với:

$$B_1 = \frac{2n_1\sqrt{DGM(I_x + \Delta I_x)}}{\pi}$$

$$B_2 = \frac{3n_2(\mathrm{I_x} + \Delta \mathrm{I_x})}{4}$$

$$C_1 = D.GM$$

$$C_2 = \frac{-D.GM}{\varphi_{fl}^2}$$

Với φ_{fl} là góc ngập nước, n_1 và n_2 là các hệ số được xác định như Bảng 1 [10].

Bảng 1. Bảng xác định hệ số n theo loại tàu

Loại tàu	n_1	n_2
Tàu khách	0,05	0,0125
Tàu hàng	0,03	0,0155
Tàu cá	0,1	0,0140

Biến đổi phương trình (6) ta được:

$$\ddot{\varphi} = -\frac{C_1\varphi}{I_x + \Delta I_x} - \frac{C_2\varphi^3}{I_x + \Delta I_x} - \frac{B_1\dot{\varphi}}{I_x + \Delta I_x} - \frac{B_2\left|\dot{\varphi}\right|\dot{\varphi}}{I_x + \Delta I_x} + \frac{2K_M}{I_x + \Delta I_x} + \frac{K_W}{I_x + \Delta I_x} \quad (7)$$

3. THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN PID VỚI GA TỐI ƯU THAM SỐ CHO HỆ THỐNG ỔN ĐỊNH GIẢM LẮC ROTOR MAGNUS

3.1. Bộ điều khiển PID

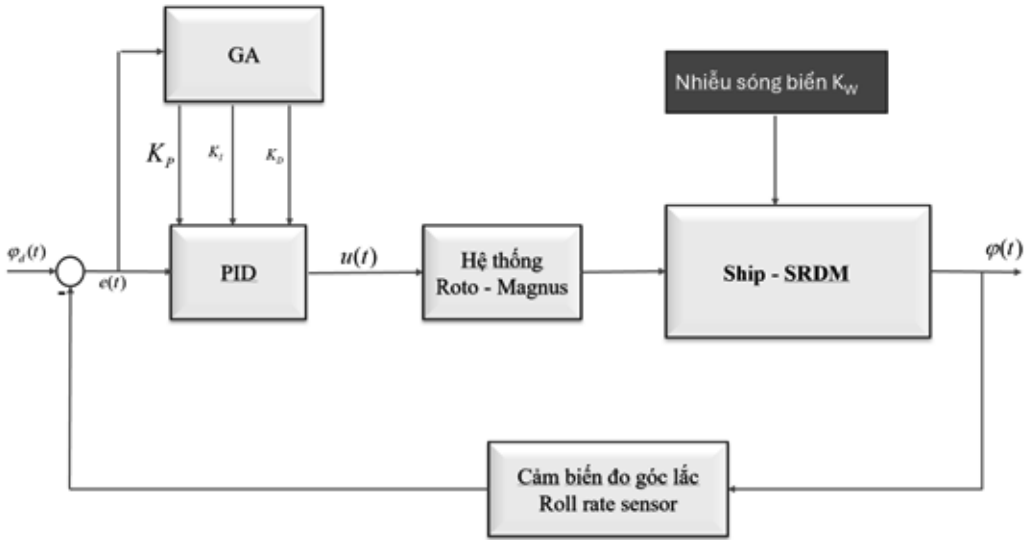
Thuật toán điều khiển đầu tiên được áp dụng cho hệ thống ổn định giảm lắc Rotor Magnus được nghiên cứu bởi Lihua Liang [3]. Bộ điều khiển PID kinh điển được xác định bởi công thức:

$$u_{PID}(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t)dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

Ở đây, $e(t)$ là sai số góc lắc giữa giá trị mong muốn và giá trị thực; $u(t)$ là đầu ra của bộ điều khiển PID; SRDM (Ship Roll Dynamics model) là mô hình động học của tàu thủy khi lắc ngang. Mục tiêu điều khiển là đưa góc lắc về giá trị mong muốn $\varphi_d(t) \to 0$, do đó:

$$e(t) = \varphi_d(t) - \varphi(t) = -\varphi(t) \quad (9)$$

Sơ đồ mô tả cấu trúc của hệ thống điều khiển giảm lắc ngang bằng hệ thống rotor magnus như sau:



Hình 3. Mô hình cấu trúc điều khiển hệ thống ổn định giảm lắc Rotor Magnus

Sơ đồ Hình 3 mô tả hệ thống điều khiển hồi tiếp sử dụng bộ điều khiển PID để điều khiển giảm góc lắc về giá trị mong muốn. Đầu vào của PID là sai số *e*(*t*) đầu ra của PID là tốc độ quay của Rotor Magnus *u*(*t*). Sai số *e*(*t*) là đầu vào của giải thuật di truyền GA là cơ sở để tối ưu hóa các thông số của bộ điều khiển PID: K_P, K_I, K_D.

3.2. Thuật toán di truyền GA tối ưu hóa các hệ số điều khiển PID

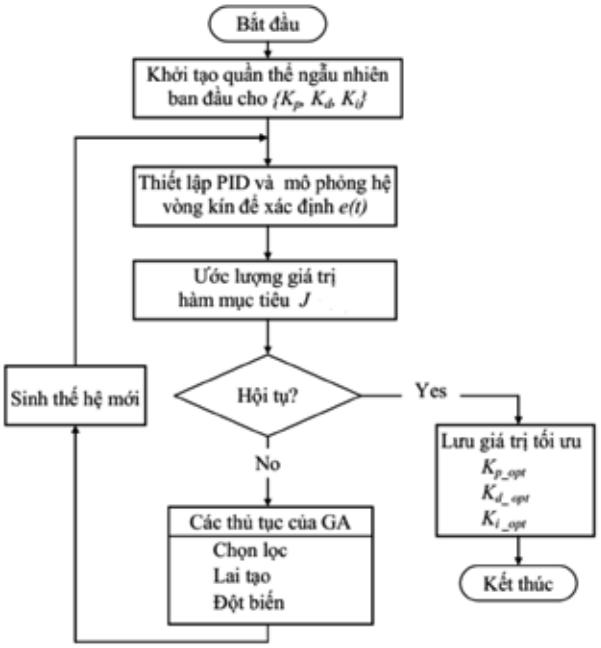
Thuật toán di truyền (Genetic Algorithm - GA) là một phương pháp tối ưu hóa dựa trên tiến hóa tự nhiên và đã được nghiên cứu, phát triển rộng rãi trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật [9, 10]. Nhờ khả năng tìm kiếm toàn cục và ít phụ thuộc vào dạng tuyến tính hay khả vi của hàm mục tiêu, GA đã được đề xuất áp dụng cho nhiều bài toán tối ưu tham số trong các hệ thống điều khiển như chỉnh định PID cho hệ cơ-điện, điều khiển quá trình công nghiệp, hệ dao động cơ học, robot cũng như các bài toán tối ưu kết cấu và tối ưu năng lượng. Các kết quả công bố cho thấy GA có thể cải thiện đáng kể chất lượng đáp ứng động, tăng độ bền vững trước nhiễu và bất định so với các phương pháp chỉnh định cổ điển, đặc biệt trong các hệ phi tuyến và đa tham số.

Tuy nhiên, đối với hệ thống ổn định giảm lắc tàu sử dụng Rotor Magnus, các nghiên cứu còn rất hạn chế; phần lớn công trình hiện nay tập trung vào mô hình hóa lực/mô-men Magnus [3, 4, 5, 6, 7, 8], thiết kế điều khiển theo kinh nghiệm hoặc sử dụng các chiến lược điều khiển bền vững khác, trong khi hướng tiếp cận tối ưu hóa tham số PID bằng GA chưa được khảo sát một cách hệ thống. Do đó, việc nghiên cứu áp dụng GA để tối ưu bộ tham số PID cho hệ Rotor Magnus là cần thiết, nhằm tạo ra một quy trình chỉnh định có tính tự động, tối ưu và phù hợp hơn với đặc tính phi tuyến và nhiễu sóng của bài toán giảm lắc trong thực tế.

Trong nghiên cứu này, GA được sử dụng để xác định bộ tham số tối ưu của bộ điều khiển PID cho hệ thống ổn định giảm lắc Rotor Magnus, tức tìm $\{K_P^{out}, K_I^{out}, K_D^{out}\}$ sao cho hàm mục tiêu (10) đạt giá trị tốt nhất trong miền tìm kiếm đã xác định.

$$Fitness = \min\{J\} \quad (10)$$

Quy trình tối ưu được thực hiện theo các bước và được minh họa bằng lưu đồ thuật toán GA–PID như trình bày ở Hình 4.



Hình 4. Lưu đồ tiến trình giải thuật di truyền để xác định bộ thông số PID [10]

Để đánh giá hiệu quả giảm lắc người ta dùng công thức RRC - Rolling Reduction Criterion.

$$RRC = \frac{\varphi_{unres} - \varphi_{res}}{\varphi_{unres}} \times 100(\%) \quad (11)$$

Trong đó: φ_{unres} là góc lắc khi không có điều khiển; φ_{res} là góc lắc khi có điều khiển với bộ tham số K. Theo tiêu chuẩn đánh giá chất lượng giảm lắc khi RRC càng lớn thì mức độ giảm lắc càng tốt so với lắc tự do.

GA trong MATLAB giải bài toán tối thiểu hóa. Trong khi đó, mục tiêu mong muốn của bài toán là tối đa hóa RRC. Vì vậy, hàm mục tiêu (fitness/cost) được chuyển đổi dưới dạng:

$$J(K) = 100 - RRC(K) \quad (12)$$

Theo các công thức 10, 11 và 12, việc tối thiểu hóa giá trị J đồng nghĩa với tối đa hóa giá trị RRC.

Các tham số của giải thuật di truyền trong nghiên cứu này được lựa chọn như sau: Quá trình tiến hóa qua 40 thế hệ (generation =40), kích thước quần thể 40 (populationsize=40), miền tìm kiếm tham số theo chương trình $K_P \in [0,20000]$, $K_I \in [0,5000]$, $K_D \in [0,5000]$. Nghiệm tốt nhất là bộ tham số làm J nhỏ nhất, tương ứng RRC lớn nhất.

4. MÔ PHỎNG SỐ

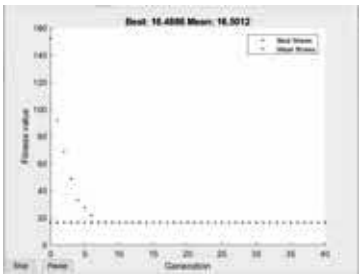
Trong phần này, mô phỏng số được thực hiện nhằm chứng minh hiệu quả của bộ điều khiển đề xuất trong môi trường MATLAB 2020a. Phương pháp Euler được sử dụng để giải các phương trình vi phân, với thời gian lấy mẫu là 0,001 giây và tổng thời gian mô phỏng là 200 giây. Các tham số của mô hình động lực học tàu thủy được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Thông số động học của tàu và hệ thống ổn định Rotor Magnus

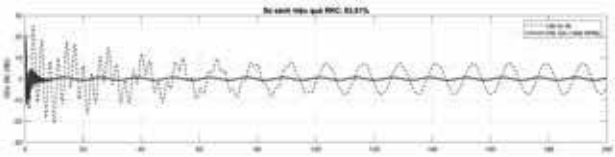
Thông số	ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
Chiều dài xi-lanh Magnus	L	3	M
Chiều dài toàn bộ của tàu	Loa	76	M
Lượng giãn nước	D	1,4573x10^6	Kg
Chiều cao mạn tàu	H	4,6	M
Chiều cao thế vững	GM	1,15	M
Chiều rộng tàu	B	11.5	M
Mô-men quán tính	$I_x + \Delta I_x$	3,438x10^6	kg.m
Góc ngập nước	θ_{fl}	39° = 0,68 rad	
Hệ số thử nghiệm	n_1	0,031	
Hệ số thử nghiệm	n_2	0,0152	

Để kiểm nghiệm ưu điểm của bộ điều khiển PID sử dụng thuật toán GA để tìm kiếm các thông số của bộ điều khiển, trong nghiên cứu này mô phỏng được thực hiện với ba trạng thái với nhiễu sóng biển thay đổi. Cụ thể:

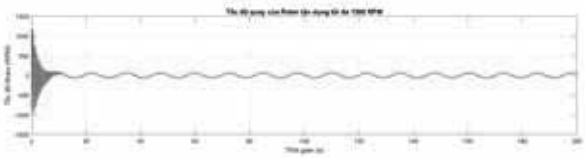
- Kết quả mô phỏng trạng thái 1: Góc lắc ban đầu 20 độ, tốc độ lắc 0,1 rad/s, phương trình nhiễu sóng biển $K_W = C_1$x0,12xsin(0,5*t*).



Hình 5. Đồ thị hội tụ GA ở trạng thái 1



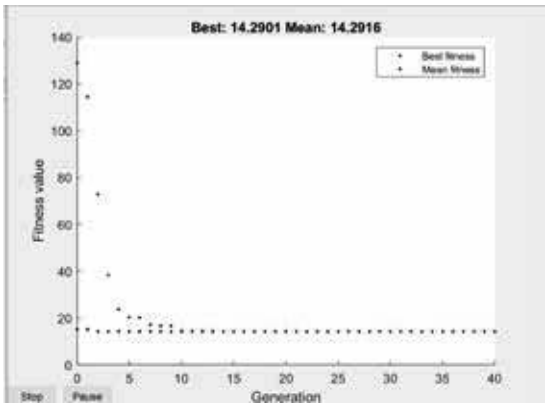
Hình 6. So sánh góc lắc giữa lắc tự do và hệ điều khiển PID-GA ở trạng thái 1



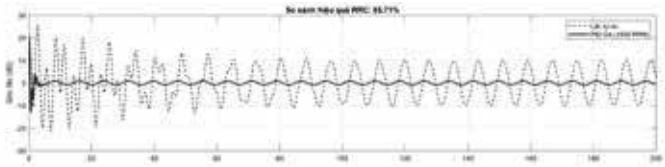
Hình 7. Kết quả mô phỏng thể hiện tốc độ quay của Rotor (giới hạn rotor ±1.500 rpm ở trạng thái 1

Ở trạng thái 1, bộ tham số PID tối ưu thu được là K_P = 1.569, K_I = 2.865, K_D = 767,44 với giới hạn rotor ±1.500 rpm. Kết quả đạt *RRC* = 83,51% cho thấy góc lắc giảm mạnh so với lắc tự do, đáp ứng sau quá độ duy trì biên độ nhỏ ổn định. Giá trị fitness giảm rất nhanh trong vài thế hệ đầu và sau đó gần như giữ ổn định, cho thấy GA hội tụ sớm về vùng nghiệm tốt (Hình 5). Trường hợp lắc tự do (nét đứt) duy trì dao động cưỡng bức biên độ tương đối lớn do nhiễu sóng liên tục, trong khi PID-GA (đường liền) dập nhanh dao động về vùng biên độ nhỏ và ổn định quanh 0 (Hình 6). Tốc độ rotor có xung điều khiển lớn ở giai đoạn đầu để triệt nhanh năng lượng dao động ban đầu, sau đó chuyển sang dao động nhỏ dạng gần điều hòa để bù nhiễu sóng ở trạng thái xác lập. Tín hiệu điều khiển luôn nằm trong giới hạn ±1.500 rpm, cho thấy bộ PID-GA thỏa ràng buộc cơ cấu chấp hành và có tính khả thi thực tế (Hình 7). Như vậy, GA tối ưu PID cho thấy khả năng hội tụ tốt và nhanh, đồng thời bộ PID-GA mang lại hiệu quả giảm lắc cao (83,51%). Hệ được dập lắc nhanh sau quá độ và duy trì biên độ nhỏ ổn định trong suốt thời gian mô phỏng, trong khi rotor hoạt động trong giới hạn tốc độ cho phép và chỉ cần tác động mạnh ở giai đoạn đầu.

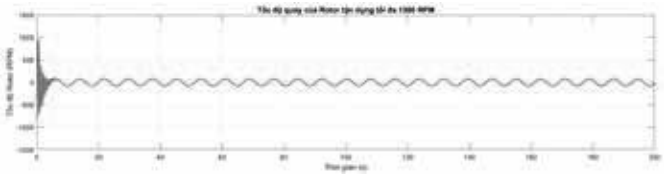
- Kết quả mô phỏng trạng thái 2: Góc lắc ban đầu 20 độ, tốc độ lắc 0,1 rad/s, phương trình nhiễu sóng biển: $K_W = C_1$x0,15xsin(0,8*t*).



Hình 8. Đồ thị hội tụ GA ở trạng thái 2



Hình 9. So sánh góc lắc giữa lắc tự do và hệ điều khiển PID-GA ở trạng thái 2

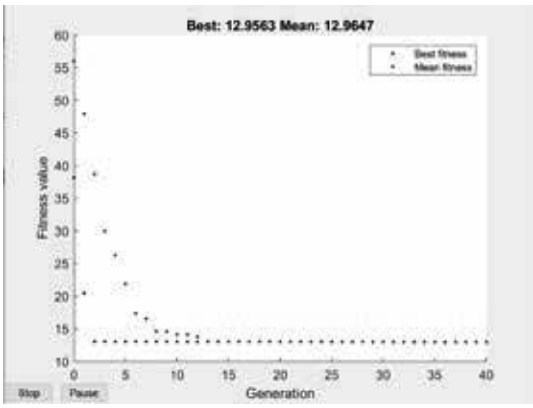


Hình 10. Kết quả mô phỏng thể hiện tốc độ quay của Roto (giới hạn roto ±1.500 rpm ở trạng thái 2

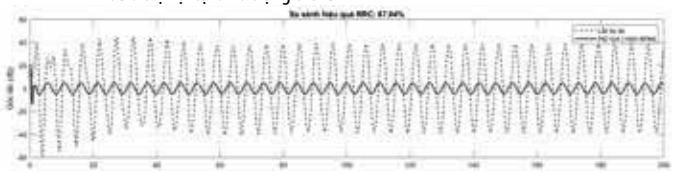
Ở trạng thái 2, bộ tham số PID tối ưu thu được là K_P = 1.091,85, K_I = 4.515,55, K_D = 805,43 với giới hạn rotor ±1.500 rpm, đạt *RRC* = 85,71%. So với trạng thái 1 (*RRC* = 83,51%), hiệu quả giảm lắc tăng thêm ~2,2% dù nhiễu sóng mạnh/nhanh hơn, cho thấy GA vẫn tìm được bộ PID thích nghi tốt với điều kiện kích động mới. Đồng thời, fitness hội tụ về Best ≈ Mean = 14,29 thấp hơn trường hợp 1 (Best≈16,49), khẳng định chất lượng nghiệm tối ưu tốt hơn (Hình 8 so

với Hình 5). Trên đồ thị góc lắc, PID-GA tiếp tục dập nhanh dao động về biên độ nhỏ ổn định quanh 0 trong khi lắc tự do duy trì dao động cưỡng bức lớn (Hình 9 so với Hình 6). Tốc độ rotor vẫn có xung lớn lúc đầu và sau đó dao động điều hòa nhỏ, luôn nằm trong ±1.500 rpm (Hình 10), tương tự trạng thái 1. Như vậy, qua hai trạng thái có nhiễu khác nhau, phương pháp GA-PID cho kết quả ổn định và bền vững: Luôn hội tụ nhanh, thỏa ràng buộc cơ cấu và duy trì mức giảm lắc cao (>80%), thậm chí cải thiện khi điều kiện sóng thay đổi.

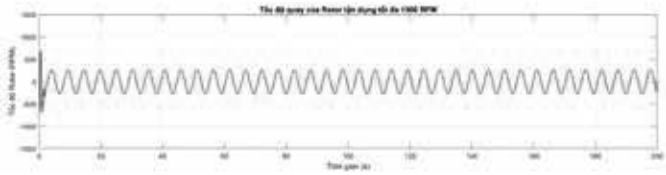
- *Kết quả mô phỏng trạng thái 3:* Góc lắc ban đầu 20 độ, tốc độ lắc 0,1 rad/s, phương trình nhiễu sóng biển $K_W = C_1 x0{,}5 x\sin(1{,}2t)$.



Hình 11. Đồ thị hội tụ GA ở trạng thái 3



Hình 12. So sánh góc lắc giữa lắc tự do và hệ điều khiển PID-GA ở trạng thái 3



Hình 13. Kết quả mô phỏng thể hiện tốc độ quay của roto (giới hạn roto ±1.500 rpm ở trạng thái 3

Ở trạng thái 3, bộ tham số PID tối ưu thu được là $K_P = 930{,}85$, $K_I = 4.468{,}33$, $K_D = 680{,}75$ với giới hạn rotor ±1.500 rpm. Kết quả đạt *RRC* = 87,04% cao hơn trạng thái 1 (83,51%) và trạng thái 2 (85,71%), cho thấy GA vẫn duy trì hiệu quả giảm lắc tốt ngay cả khi điều kiện kích động thay đổi. Giá trị fitness hội tụ về Best=12.9563, Mean=12.9647 (tương ứng *RRC* = 87,04%), đồng thời Best xấp xỉ Mean chứng tỏ quần thể đã hội tụ ổn định (Hình 11). Trên đồ thị góc lắc, trường hợp lắc tự do (nét đứt) có biên độ dao động cưỡng bức rất lớn, trong khi PID-GA (đường liền) làm giảm mạnh biên độ và duy trì dao động nhỏ quanh 0 (Hình 12). Tốc độ rotor xuất hiện xung lớn ở giai đoạn đầu, sau đó dao động điều hòa rõ rệt để bù nhiễu sóng ở trạng thái xác lập và luôn nằm trong giới hạn ±1.500 rpm, thể hiện tính khả thi của cơ cấu chấp hành (Hình 13). Nhìn tổng thể 3 trạng thái, khi biên độ/tần số nhiễu tăng, GA tự điều chỉnh bộ (K_P, K_I, K_D) để giữ RRC luôn > 83% và có xu hướng tăng dần, chứng tỏ phương pháp GA-PID có tính thích nghi và độ bền vững tốt trước thay đổi điều kiện sóng.

Như vậy, kết quả mô phỏng trên ba trạng thái nhiễu sóng khác nhau cho thấy bộ điều khiển PID-GA đề xuất có khả năng giảm lắc hiệu quả và ổn định, với RRC luôn lớn hơn 80%, dập nhanh dao động về biên độ nhỏ trong khi tín hiệu điều khiển rotor luôn thỏa giới hạn ±1.500 rpm, qua đó khẳng định tính bền vững và khả thi của phương pháp trong các điều kiện khảo sát.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đề xuất phương pháp tối ưu hóa tham số bộ điều khiển PID cho hệ thống ổn định giảm lắc tàu sử dụng Rotor Magnus dựa trên giải thuật di truyền (GA) trong điều kiện động lực học lắc phi tuyến và chịu nhiễu sóng điều hòa. Quy trình thiết kế được xây dựng trên mô hình lắc phi tuyến bậc ba có xét cản phi tuyến, mô-men phục hồi phi tuyến, mô-men nhiễu sóng và ràng buộc giới hạn tốc độ rotor ở mức ±1.500 rpm nhằm đảm bảo tính khả thi triển khai.

Ba kịch bản mô phỏng với các mức kích động khác nhau đã được thực hiện để đánh giá hiệu quả thuật toán. Kết quả cho thấy GA hội tụ nhanh và ổn định, tìm được bộ $\{K_P^{out}, K_I^{out}, K_D^{out}\}$ giúp giảm mạnh góc lắc so với trường hợp không điều khiển; chỉ số giảm lắc RRC luôn lớn hơn 80% trong cả ba trạng thái và tín hiệu điều khiển luôn thỏa giới hạn cơ cấu chấp hành.

Hai đóng góp nổi bật của nghiên cứu gồm: (i) Đề xuất một quy trình chỉnh định PID tự động dựa trên GA, tối ưu trực tiếp theo tiêu chí giảm RMS/STD góc lắc (RRC), phù hợp với bài toán chịu kích động sóng liên tục; (ii) đánh giá hiệu quả trong điều kiện ràng buộc bão hòa tốc độ rotor, qua đó phản ánh sát hơn khả năng ứng dụng thực tế của hệ Rotor Magnus.

Tuy nhiên, nghiên cứu hiện mới dừng ở mô phỏng và chưa xét đầy đủ các yếu tố như động học cơ cấu rotor, giới hạn công suất, trễ và nhiễu môi trường phức tạp (sóng-gió-dòng chảy ngẫu nhiên theo phổ). Trong hướng phát triển, nhóm tác giả sẽ mở rộng hàm mục tiêu theo hướng đa tiêu chí (giảm lắc-năng lượng-bão hòa), xét nhiễu theo phổ sóng và tiến hành thử nghiệm thực nghiệm để kiểm chứng tính hiệu quả trong điều kiện khai thác.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số: DT.25-26.02.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] TS Nguyễn Văn Sướng. Tự động điều khiển tàu thủy. NXB. Hàng hải, 2021.

[2] Biying Liu. Study on modern ship stabilizer technology. Science, Engineering and Technology. vol. 72, pp. 788-79, 2023.

[3] L. Liang, P. Zhao, S. Zhang, J. Yuan and Y. Wen. Simulation and analysis of Magnus rotating roll stabilizer at low speed. Ocean Eng., vol. 142, pp. 491-500, 2017.

[4] L. Liang, Y. Jiang and P. Zhao. Backstepping sliding mode control design for Magnus rotating roll stabilizer at low speed, in Proc. IEEE. International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), IEEE, Changchun, China, pp. 1937-1942, 2018

[5] Jian-feng Lin, Yang Han, Yang Han, Yu-min Su and Zuo-tian Zhang. Magnus anti-rolling system for ships at zero speed. Transactions on Transportation Electrification - Reg 2020 -12-1203.R1, 2020.

[6] Ozturk, D. Performance of a Magnus effect-based cylindrical roll stabilizer on a full-scale Motor-yacht. Ocean. Eng. 218, 108247, 2020.

[7] Mingxiao Sun, Houxin Lian, Tiantian Luan, Xiaoshuang Zhang, Baoqi Wu, Hanxu Wang. Lift analysis and anti - rolling control system design of Magnus rotating roll. Ocean Engineering 290, 2023.

[8] Mingxiao Sun, HongyuYe, Jianxu Liu, Tiantian Luan, Houxin Lian. Analysis of lift-drag characteristics and design of collaborative anti-rolling control system for variable-diameter Magnus rotating roll stabilizer. Ocean Engineering 324, 2025.

[9] Ngôn, N.C. Tối ưu hóa bộ điều khiển PID bằng giải thuật di truyền. Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ, 9, 241-248, 2008.

[10] Zhao, J., Xi, M. Self-Tuning of PID Parameters Based on Adaptive Genetic Algorithm. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 782, 2020.

■Ngày nhận bài: 24/02/2026 ■Ngày sửa bài: 04/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 11/3/2026

Phân tích ảnh hưởng của biến dạng đàn hồi đến sai lệch động học của cơ cấu hồi nhanh dạng máy bào ngang

Analysis of the effect of elastic deformation on kinematic deviation in a planer-type qick-return mechanism

> TS NGUYỄN SỸ NAM
Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội
Email: namns@huce.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày mô hình hóa và phân tích dao động của cơ cấu máy bào ngang khi xét đến tính đàn hồi của thanh truyền theo cả phương dọc và uốn. Mô hình động lực học được thiết lập bằng phương trình Lagrange dạng nhân tử, trong đó biến dạng được xấp xỉ bằng phương pháp Ritz-Galerkin. Hệ phương trình vi phân-đại số được giải số cho hai trường hợp: cơ cấu rắn và cơ cấu đàn hồi. Kết quả cho thấy mô hình đề xuất phù hợp với phương pháp Newton-Euler trong trường hợp rắn. Khi xét đến đàn hồi, xuất hiện dao động chồng lên chuyển động chính, gây sai lệch rõ rệt tại các vùng đảo chiều. Dao động uốn chiếm ưu thế và ảnh hưởng đáng kể đến đặc tính động lực học của cơ cấu.

Từ khóa: Dao động tuần hoàn; máy bào ngang; khâu đàn hồi; phương pháp nhân tử Lagrange.

ABSTRACT

This paper presents the modeling and vibration analysis of a quick-return (horizontal planer-type) mechanism considering both longitudinal and transverse elasticity of the connecting rod. The dynamic model is formulated using Lagrange equations with multipliers, and elastic deformations are approximated via the Ritz - Galerkin method. The resulting differential-algebraic equations are solved for both rigid and flexible cases. The results show good agreement with the Newton-Euler method in the rigid case. When flexibility is included, additional oscillations appear, causing noticeable deviations, especially near stroke reversal positions. Transverse vibrations dominate and significantly affect the dynamic behavior of the mechanism.

Keywords: Periodic oscillation; quick-return mechanism; elastic link; lagrange multiplier method.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong các hệ thống máy công cụ, việc biến đổi chuyển động quay thành chuyển động tịnh tiến không đối xứng đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao năng suất gia công. Một trong những cơ cấu điển hình là cơ cấu máy bào ngang (quick-return mechanism), trong đó hành trình làm việc và hành trình hồi có thời gian khác nhau, cho phép rút ngắn chu kỳ gia công và tăng hiệu quả làm việc của máy. Nhờ đặc tính này, cơ cấu quick-return được ứng dụng rộng rãi trong các máy bào, máy cưa và các thiết bị gia công có tải trọng không đối xứng [1].

Trong các mô hình truyền thống, các khâu của cơ cấu thường được giả thiết là vật rắn tuyệt đối nhằm đơn giản hóa bài toán phân tích. Tuy nhiên, cùng với xu hướng thiết kế cơ cấu theo hướng nhẹ và làm việc ở tốc độ cao, các khâu trở nên mảnh hơn, dẫn đến sự xuất hiện đáng kể của biến dạng đàn hồi. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng biến dạng đàn hồi có thể gây rung động, làm tăng phản lực tại các khớp và làm suy giảm độ chính xác làm việc của cơ cấu [2]. Do đó, việc xây dựng mô hình động lực học có xét đến tính đàn hồi của các khâu là cần thiết để phản ánh chính xác đặc tính làm việc của hệ.

Đối với cơ cấu máy bào ngang, việc xét đến khâu đàn hồi làm xuất hiện các đặc trưng động lực học phức tạp. Beale và Scott [3] đã nghiên cứu cơ cấu quick-return với thanh truyền đàn hồi được mô hình hóa như một dầm Euler-Bernoulli và thiết lập phương trình chuyển động bằng nguyên lý Hamilton. Kết quả cho thấy chuyển động quay của tay quay tạo ra các hệ số biến thiên theo thời gian trong phương trình động lực học, từ đó có thể dẫn đến dao động tham số và các vùng mất ổn định động lực học. Điều này cho thấy rằng ngay cả trong điều kiện kích thích đơn giản, hệ vẫn có thể xuất hiện các đáp ứng động lực học phi tuyến phức tạp.

Trong khuôn khổ động lực học hệ nhiều vật, các cơ cấu có khâu đàn hồi thường được mô tả bằng phương trình Lagrange với nhân tử ràng buộc, dẫn đến hệ phương trình vi phân - đại số phi tuyến [4], [5]. Để biểu diễn biến dạng đàn hồi, các phương pháp xấp xỉ như Ritz - Galerkin hoặc phần tử hữu hạn được sử dụng nhằm rời rạc hóa bài toán liên tục thành hệ hữu hạn bậc tự do [6] - [9]. Các phương pháp này đã được áp dụng hiệu quả trong phân tích các cơ cấu nhiều khâu phức tạp, chẳng hạn như cơ cấu sáu khâu có thanh nối đàn hồi, nhằm đánh giá ảnh hưởng của biến dạng đến độ chính xác chuyển động và đặc tính động lực học của hệ [2], [10], [11].

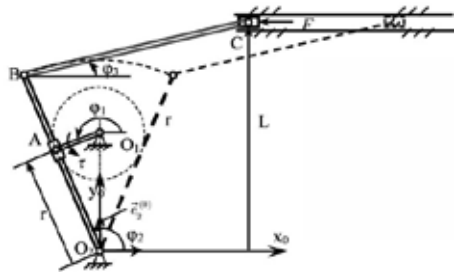
Bên cạnh đó, bài toán điều khiển các cơ cấu đàn hồi cũng nhận được nhiều sự quan tâm. Các phương pháp điều khiển cổ điển như PD/PID được sử dụng rộng rãi do tính đơn giản và dễ triển khai, tuy nhiên hiệu quả hạn chế trong việc triệt tiêu dao động đàn hồi [13], [15]. Các nghiên cứu trong lĩnh vực robot đàn hồi cho thấy sự tương tác giữa chuyển động lớn và dao động đàn hồi làm cho bài toán điều khiển trở nên phức tạp hơn đáng kể [16] -[18]. Ngoài ra, từ góc độ lý thuyết dao động phi tuyến, các hệ có tham số biến thiên theo thời gian có thể xuất hiện cộng hưởng tham số và các hiện tượng mất ổn định, đòi hỏi các phương pháp phân tích chuyên sâu [19], [20].

Mặc dù đã có nhiều công trình nghiên cứu liên quan, vẫn tồn tại một số hạn chế đáng kể. Thứ nhất, phần lớn các nghiên cứu tập trung vào các cơ cấu đơn giản hoặc giả thiết biến dạng nhỏ, chưa phản ánh đầy đủ đặc tính động lực học của các cơ cấu làm việc ở tốc độ cao. Thứ hai, các nghiên cứu về ổn định động lực học và dao động tham số trong cơ cấu máy bào ngang còn hạn chế, đặc biệt khi xét đến sự tương tác giữa chuyển động cưỡng bức và biến dạng đàn hồi. Ngoài ra, việc tích hợp giữa mô hình động lực học phi tuyến và thiết kế điều khiển nhằm giảm rung vẫn chưa được nghiên cứu một cách hệ thống.

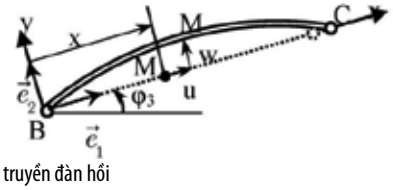
Xuất phát từ những vấn đề trên, bài báo này tập trung xây dựng mô hình động lực học phi tuyến của cơ cấu máy bào ngang có xét đến tính đàn hồi của khâu truyền động. Phương pháp Lagrange kết hợp với kỹ thuật xấp xỉ dạng được sử dụng để thiết lập hệ phương trình chuyển động. Trên cơ sở mô hình thu được, các phân tích số được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của biến dạng đến sai lệch động học, trễ chuyển động của cơ cấu.

2. MÔ HÌNH CƠ HỌC VÀ MÔ HÌNH ĐỘNG LỰC HỌC

Máy bào ngang có sơ đồ như Hình 1. Cơ cấu gồm các khâu: *Khâu 1* là thanh O_1A được coi như vật rắn, O_1A có chiều dài l_1, khối lượng m_1, khối tâm C_1 nằm trên thanh $O_1C_1 = a_1$, mômen quán tính I_{O1}, chịu tác dụng của mômen phát động τ; khâu 2 là cần lắc O_2B, coi như vật rắn, chiều dài l_2, khối lượng m_2, khối tâm C_2, $O_2C_2 = a_2$, mômen quán tính I_{O2}; khâu 3 là thanh truyền BC, là thanh đàn hồi, khối lượng m_3, chiều dài l_3, phân bố khối lượng trên một đơn vị chiều dài là $\mu = m_3/l_3$. Khâu 4 là con trượt A, được coi là khối lượng m_4; Khâu 5 là con trượt C, có gắn khâu chấp hành (mũi cắt, bàn ép), coi như khối lượng m_5. Lực cắt F tác dụng vào con trượt C. *Giả thiết:* thanh BC là thẳng, trục thanh trùng với trục trung hòa trước khi biến dạng; bỏ qua ma sát trượt của con trượt 4 và cần lắc 3, bỏ qua ma sát các ổ trục. Kích thước $O_1O_2 = l_0$.



Hình 1. Sơ đồ cơ cấu máy bào ngang



Hình 2. Thanh truyền đàn hồi

Chọn hệ trục tọa độ cố định $O_2x_0y_0$, O_2x_0 phương ngang, O_2y_0 phương đứng, các véctơ đơn vị của hệ trục là $\vec{e}_1^{(0)}, \vec{e}_2^{(0)}$; hệ tọa độ tương đối Bxy gắn vào BC với Bx ≡ BC, các véctơ đơn vị của hệ trục là $\vec{e}_1, \vec{e}_2$. Gọi u, w là biến dạng dọc tương đối và biến dạng uốn tương đối của điểm M trên thanh đàn hồi BC (Hình 2). Điều kiện biên của biến dạng uốn và dọc tại hai đầu bản lề:

$$w(0,t) = w(l_3,t) = 0 \quad (1)$$

$$u(0,t) = 0, u(l_3,t) = u_C \quad (2)$$

Ta có vị trí các khâu:

$$\vec{r}_A = l_1\cos\phi_1\vec{e}_1^{(0)} + (l_0 + l_1\sin\phi_1)\vec{e}_2^{(0)} \quad (3)$$

$$\vec{r}_B = l_2\cos\phi_2\vec{e}_1^{(0)} + l_2\sin\phi_2\vec{e}_2^{(0)} \quad (4)$$

$$\vec{r}_M = \vec{r}_B + (x+u)\vec{e}_1 + w.\vec{e}_2 \quad (5)$$

Phương trình liên kết của cơ cấu có cấu trúc mạch vòng: như Hình 1, ta có hai phương trình liên kết:

$$\begin{aligned} f_1 &= l_1\sin(\phi_1 - \phi_2) + l_0\cos\phi_2 = 0 \\ f_2 &= l_2\sin\phi_2 + (l_3 + u_C)\sin\phi_3 - L = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

Động năng của hệ:

$$T = T_{O1A} + T_{O2B} + T_{BC} + T_A + T_C \quad (7)$$

trong đó: $T_{O_1A} = \frac{1}{2}I_{O_1}\dot{\phi}_1^2$; $T_{O_2B} = \frac{1}{2}I_{O_2}\dot{\phi}_2^2$;

$T_A = \frac{1}{2}m_4v_A^2 = \frac{1}{2}m_4l_1^2\dot{\phi}_1^2$; $T_C = \frac{1}{2}m_5v_C^2$

Động năng thanh đàn hồi BC. Áp dụng lý thuyết dầm Euler-Bernoulli cho thanh đàn hồi, động năng của thanh có dạng:

$$\begin{aligned} T_{BC} &= \frac{1}{2}\int_0^{l_3}\mu\dot{\vec{r}}_M^2dx_1 = \frac{1}{2}\int_0^{l_3}\mu\Big[l_2^2\dot{\phi}_2^2 + \dot{u}^2 + \left(w^2 + (x+u)^2\right)\dot{\phi}_3^2 + \dot{w}^2 + \\ &+2l_2(x+u)\dot{\phi}_2\dot{\phi}_3\cos(\phi_2-\phi_3) - \\ &-2l_2\dot{\phi}_2\dot{u}\sin(\phi_2-\phi_3) + 2l_2w\dot{\phi}_2\dot{\phi}_3\sin(\phi_2-\phi_3) + \\ &+2l_2\dot{w}\dot{\phi}_2\cos(\phi_2-\phi_3) + 2(x+u)\dot{w}\dot{\phi}_3 - 2w\dot{u}\dot{\phi}_3\Big]dx \end{aligned} \quad (8)$$

Thế năng biến dạng:

$$\Pi = \frac{1}{2}EA\int_0^{l_3}\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2dx + \frac{1}{2}EI\int_0^{l_3}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)^2dx \quad (9)$$

Giả thiết biến dạng là nhỏ, các chuyển vị uốn không ảnh hưởng đến chuyển vị dọc và ngược lại. Sử dụng phương pháp khai triển theo các dạng riêng (Ritz-Galerkin), dao động uốn và dao động dọc có dạng:

$$w(x,t) = \sum_{i=1}^{N_1}X_i(x).q_i(t)\,;\, u(x,t) = \sum_{k=1}^{N_2}Y_k(x).p_k(t) \quad (10)$$

trong đó: q_i, p_k là các tọa độ đàn hồi; X_i, Y_k là các hàm dạng riêng của dầm hai đầu bản lề [4], [13]:

$$X_i = \sin\left(\frac{i\pi}{l_3}x\right), \quad Y_k(x) = \sin\left(\frac{2k-1}{2}\frac{\pi x}{l_3}\right) \quad (11)$$

Gọi η_j là các tọa độ suy rộng trong đó bao gồm tọa độ các khâu rắn ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 và tọa độ dạng riêng của khâu đàn hồi q_i, p_k:

$$\mathbf{s} = \left[\phi_1\ \phi_2\ \phi_3\ q_1\ q_2\ \cdots\ q_{N1}\ \ p_1\ p_2\ \cdots\ p_{N_2}\right]^T$$

Phương trình Lagrange dạng nhân tử viết cho hệ hôlônôm

$$\begin{aligned} &\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{s}_j}\right) - \frac{\partial T}{\partial s_j} = \\ &= -\frac{\partial \Pi}{\partial s_j} - \left(\sum_{k=1}^{2}\lambda_k\frac{\partial f_k}{\partial s_j}\right) + Q_j,\ j = 1,2,\ldots N_1 + N_2 + 3 \end{aligned}, \quad (12)$$

với λ_1, λ_2 là các nhân tử Lagrange, Q_j là lực suy rộng không có thế ứng với tọa độ suy rộng η_j, tính được:

$$Q_{\phi_1} = \tau\ ;\quad Q_{\phi_2} = Fl_2 \sin\phi_2\ ;$$

$$Q_{\phi_3} = F\left(l_3 + \sum_{k=1}^{N_2} \alpha_k . p_k\right)\sin\phi_3\ ;$$

$$Q_{p_k} = -\alpha_k F\cos\phi_3\ ;\ Q_{q_i} = 0 \qquad (13)$$

Thay các biểu thức từ (7) đến (11) và (13) vào phương trình (12) ta thu được phương trình dao động lực học mô ta chuyển động của cơ cấu có dạng:

$$\mathbf{M}(\mathbf{s})\ddot{\mathbf{s}} + \Phi_s^T(\mathbf{s})\lambda = \mathbf{p}_1(\mathbf{s},\dot{\mathbf{s}},t) \qquad (14)$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{s}) = 0 \qquad (15)$$

trong đó **M**(**s**) là ma trận khối lượng, $\mathbf{\Phi}_s$ là ma trận Jacobi ràng buộc, **f**(**s**) là phương trình liên kết (6) viết lại dạng véc tơ $\mathbf{f} = [f_1\ \ f_2]^T$.

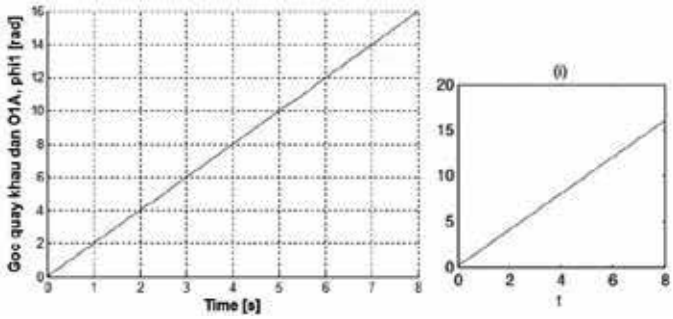
Hệ phương trình thu được là hệ vi phân – đại số, dạng tường minh của phương trình xem ở phần Phụ lục.

3. TÍNH TOÁN ĐỘNG LỰC HỌC CƠ CẤU MÁY BÀO NGANG

3.1. Tính toán dao động so sánh động lực học cơ cấu rắn

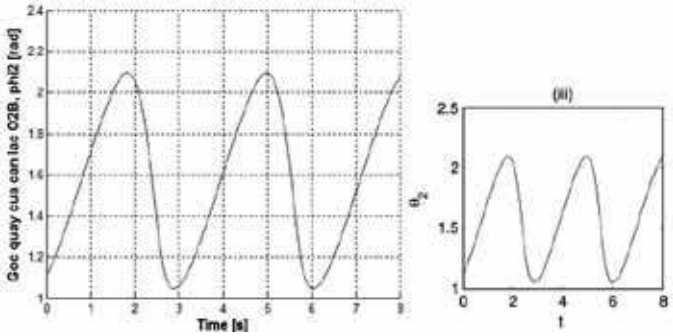
Cho các tọa độ biến dạng bằng 0 ở phương trình (14) và (15) ta có các phương trình viết cho cơ cấu rắn.

Thông số và điều kiện đầu: Thông số cơ cấu được cho như [12], đây là cơ cấu máy bào ngang loại nhỏ: l_2 = 8 cm, l_0 =4 cm, l_1 = 2 cm, l_3 = 3 cm, L = 8 cm, m_1 = 0,049 (kg), m_2 = 0,198 (kg), m_3 = 0,074 (kg), m_4 = 0,015 (kg), m_5 = 0,15 kg, I_{O1} = 2,881x10^{-6} kgm^2, I_{O2} = 1,103x10^{-4} kgm^2. Mô men đặt vào khâu dẫn được chọn là $\tau = 0{,}1(10 - \dot{\varphi}_1)\,\mathrm{Nm}$. Cần chú ý rằng mômen này sẽ giữ cho khâu dẫn quay gần như đều (với vận tốc quanh 10 rad/s). Kết quả tính toán được so sánh với phương pháp Newton-Euler trong tài liệu [53]. Trong tài liệu [53] này, bằng phương pháp Newton-Euler tác giả đã thiết lập được phương trình động lực học cho cơ cấu với 42 phương trình vi phân đại số (so với nghiên cứu này là 5 phương trình vi phân-đại số). Thông số cơ cấu và các điều kiện hoàn toàn tương tự nhau.



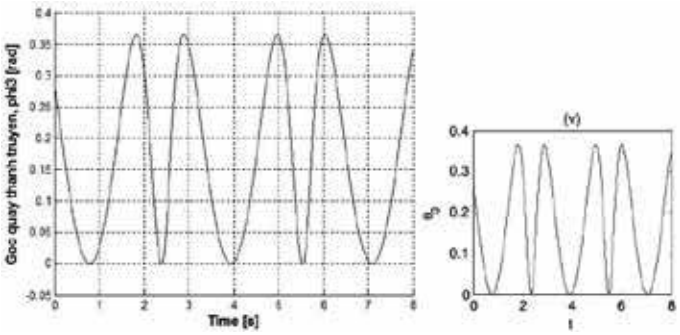
a) Nghiên cứu này *b) Tài liệu [12]*

Hình 3. Góc quay của khâu dẫn O_1A



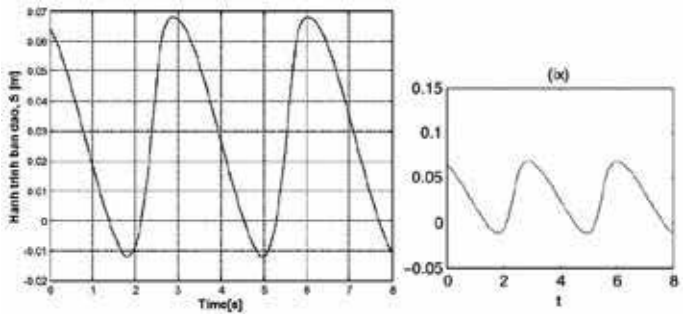
a) Nghiên cứu này *b) Tài liệu [12]*

Hình 4. Góc quay thanh truyền BC



a) Nghiên cứu này *b) Tài liệu [12]*

Hình 5. Góc quay thanh truyền BC



a) Nghiên cứu này *b) Tài liệu [12]*

Hình 6. Hành trình chạy bàn dao

Nhận xét 1: Kết quả so sánh trên các Hình 3-6 cho thấy đáp ứng động học của cơ cấu thu được bằng phương pháp Lagrange dạng nhân tử trùng khớp rất tốt với kết quả từ phương pháp Newton-Euler trong tài liệu [12]. Cụ thể, các đại lượng đặc trưng như góc quay khâu dẫn Hình 3, góc quay thanh truyền Hình 4 và Hình 5 và hành trình bàn dao Hình 6 đều có dạng biến thiên tuần hoàn, biên độ và pha gần như trùng nhau giữa hai phương pháp. Điểm đáng chú ý là sai khác giữa hai kết quả là không đáng kể trong toàn bộ chu kỳ chuyển động, đặc biệt tại các vùng có biến thiên nhanh (gần điểm đảo chiều của hành trình), nơi thường nhạy cảm với sai số mô hình. Điều này chứng tỏ rằng mô hình thiết lập bằng phương pháp Lagrange không chỉ đảm bảo tính đúng đắn về mặt lý thuyết mà còn có độ ổn định số cao. Ngoài ra, việc giảm số phương trình từ hệ lớn (42 phương trình trong [12]) xuống hệ gọn hơn (5 phương trình vi phân-đại số) nhưng vẫn giữ được độ chính xác tương đương là một ưu điểm nổi bật. Điều này cho thấy cách tiếp cận bằng tọa độ suy rộng kết hợp với nhân tử Lagrange là hiệu quả cho bài toán cơ cấu có ràng buộc, đặc biệt trong việc giảm độ phức tạp tính toán mà không làm suy giảm độ tin cậy của kết quả.

3.2. Tính toán dao động tuần hoàn của cơ cấu đàn hồi

Trường hợp sử dụng 3 dạng riêng đầu của biến dạng, tức (10), (11) có $N_1 = N_2 = 3$ (3 tần số đầu của dao động đàn hồi).

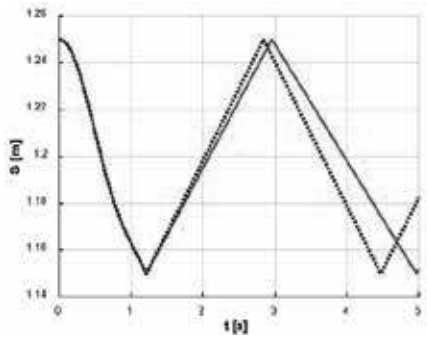
Chọn điều kiện đầu cho cơ cấu: Biến dạng ban đầu được chọn các $q_i(0) = p_k(0) = 0$, và vận tốc của nó $\dot{q}_i(0) = \dot{p}_k(0) = 0$. Điều kiện đầu được chọn cũng tương tự như cơ cấu rắn là góc khâu dẫn φ_{10} = 0, vận tốc góc khâu dẫn $\dot{\phi}_{10} = 0$. Thay điều kiện đầu vào phương trình liên kết ta giải được các góc ban đầu $\varphi_{20} = 87{,}09^o\,(1{,}520\,rad)$, $\varphi_{30} = 0{,}05901^o\,(0{,}00103\,rad)$

Thông số: l_2 = 1 m, l_0 = 0,59997 m, l_1 = 2 cm, l_1/l_0 = 0,1, l_3 = 1,2 m, L = 1 m, m_1 = 0,04290 (kg), m_2 = 7,15 (kg), μ = 7,15kg/m, *bxh* = 0,05x0,05 m, m_5 = 0,15 kg, E = 0,7x10^{11} N/m^2, I = 0,5208 x10^{-6} m^4.

Mô phỏng tính toán số: Để mô phỏng một mômen được đặt vào khâu dẫn dưới dạng:

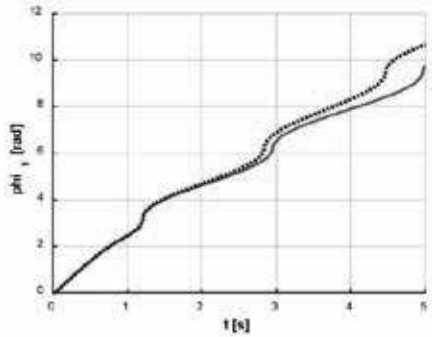
$$\tau(t) = \begin{cases} \tau_0 \sin(2\pi t / T_m) & t \le T_m \\ 0 & t \ge T_m \end{cases} \quad (16)$$

với τ_0 là biên độ, T_m là chu kỳ của mô men phát động. Tính toán trong trường hợp cơ cấu thanh truyền đàn hồi tiến hành song song với trường hợp cơ cấu rắn. Thông số cơ cấu và momen được chọn hoàn toàn tương tự nhau. Trường hợp biên độ momen phát động τ_0 = 0.2 Nm, chu kỳ T_m = 1s, ta có đáp ứng động lực học như trên Hình 7 - 11:



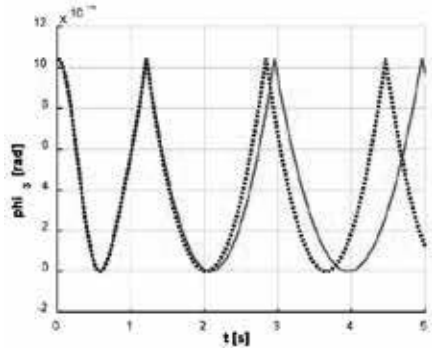
Hình 7. Hành trình bàn dao

.... cơ cấu rắn, —— cơ cấu đàn hồi



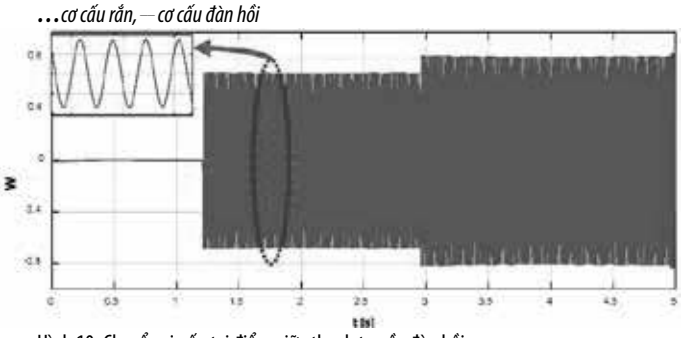
Hình 8. Góc khâu dẫn OA

...cơ cấu rắn, — cơ cấu đàn hồi

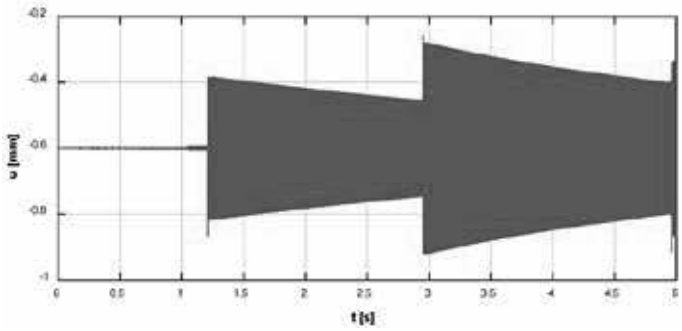


Hình 9. Góc thanh truyền BC

...cơ cấu rắn, — cơ cấu đàn hồi



Hình 10. Chuyển vị uốn tại điểm giữa thanh truyền đàn hồi



Hình 11. Chuyển vị dọc của thanh truyền đàn hồi

Nhận xét 2: Các kết quả trên Hình 7 - 11 cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa cơ cấu rắn và cơ cấu có khâu đàn hồi, thể hiện qua cả đáp ứng động học tổng thể và biến dạng cục bộ của thanh truyền. Trước hết, trên Hình 7 (hành trình bàn dao), quỹ đạo của cơ cấu đàn hồi vẫn giữ được dạng tuần hoàn giống cơ cấu rắn, tuy nhiên xuất hiện các dao động nhỏ chồng lên chuyển động chính. Biên độ sai lệch tăng lên rõ rệt tại các vùng chuyển tiếp giữa hành trình làm việc và hành trình hồi, cho thấy ảnh hưởng của biến dạng đàn hồi là đáng kể trong các pha có gia tốc lớn. Trên Hình 8 và Hình 9, góc quay của khâu dẫn và thanh truyền trong trường hợp đàn hồi có xu hướng lệch pha nhẹ so với cơ cấu rắn, đồng thời xuất hiện dao động cao tần. Đặc biệt, Hình 10 và Hình 11 cung cấp cái nhìn rõ ràng về bản chất đàn hồi của hệ. Chuyển vị uốn tại điểm giữa thanh truyền Hình 10 dao động tuần hoàn với biên độ đáng kể. Trong khi đó, chuyển vị dọc Hình 11 có biên độ nhỏ hơn nhưng vẫn thể hiện rõ tính tuần hoàn, chứng tỏ dao động dọc và uốn cùng tồn tại.

Tổng thể, kết quả cho thấy biến dạng đàn hồi không chỉ ảnh hưởng đến chuyển vị cục bộ mà còn gây sai lệch đáng kể trong chuyển động tổng thể của cơ cấu. Sai lệch này mang tính chu kỳ và có xu hướng tích lũy theo thời gian, do đó không thể bỏ qua trong các bài toán thiết kế chính xác hoặc điều khiển cơ cấu máy bào ngang.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng mô hình động lực học phi tuyến của cơ cấu máy bào ngang có xét đến tính đàn hồi của thanh truyền theo cả phương dọc và uốn trên cơ sở phương trình Lagrange dạng nhân tử kết hợp với phương pháp Ritz-Galerkin. Hệ phương trình vi phân-đại số thu được cho phép mô tả đầy đủ sự tương tác giữa chuyển động cứng và biến dạng đàn hồi của cơ cấu.

Kết quả tính toán cho thấy mô hình đề xuất cho độ chính xác cao khi so sánh với phương pháp Newton-Euler trong trường hợp cơ cấu rắn, đồng thời giúp giảm đáng kể số lượng phương trình cần giải. Khi xét đến tính đàn hồi, xuất hiện dao động chồng lên chuyển động chính, gây sai lệch đáng kể về chuyển vị và góc quay, đặc biệt tại các vùng đảo chiều. Dao động uốn chiếm ưu thế so với dao động dọc và có xu hướng bị kích thích mạnh bởi chuyển động tuần hoàn của hệ, cho thấy khả năng xuất hiện các hiệu ứng dao động tham số.

Các kết quả cũng chỉ ra rằng trong điều kiện làm việc với tốc độ thấp hoặc tải trọng nhỏ, ảnh hưởng của biến dạng đàn hồi có thể bỏ qua. Tuy nhiên, khi tốc độ hoặc kích thích tăng, biến dạng trở nên đáng kể và cần được xét đến trong quá trình phân tích, thiết kế và điều khiển nhằm đảm bảo độ chính xác và ổn định của cơ cấu.

Nghiên cứu này cung cấp cơ sở cho các bài toán mở rộng như tối ưu hóa thiết kế, phân tích ổn định động lực học và phát triển các phương pháp điều khiển giảm rung cho cơ cấu máy bào ngang trong điều kiện làm việc thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] W.-H. Hsieh and C.-H. Tsai, "A study on a novel quick return mechanism," Trans. Can. Soc. Mech. Eng., vol. 33, no. 3, pp. 487-498, 2009.

[2] N. S. Nguyen and D. H. Tran, "Dynamics modeling and analysis of six-bar planar linkage mechanism with flexible coupler-links," Adv. Sci. Technol. Res. J., vol. 19, no. 5, pp. 31-45, 2025.

[3] D. G. Beale and R. A. Scott, "The stability and response of a flexible rod in a quick return mechanism," J. Sound Vib., vol. 141, no. 2, pp. 277-289, 1990.

[4] N. V. Khang, N. S. Nam, and N. V. Quyen, "Symbolic linearization and vibration analysis of constrained multibody systems," Arch. Appl. Mech., vol. 88, pp. 1369-1384, 2018.

[5] A. A. Shabana, Dynamics of Multibody Systems, 4th ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2013.

[6] O. A. Bauchau and J. I. Craig, Structural Analysis, Springer, 2009.

[7] R. Schwertassek and O. Wallrapp, Dynamics of Multibody Systems, Springer, 1999.

[8] A. A. Shabana, "Flexible multibody dynamics: Review of past and recent developments," Multibody Syst. Dyn., vol. 1, pp. 189-222, 1997.

[9] H. Bremer, Elastic Multibody Dynamics, Springer, 2008.

[10] G. R. Pennock and A. Israr, "Kinematic analysis and synthesis of an adjustable six-bar linkage," Mech. Mach. Theory, vol. 44, pp. 306-323, 2009.

[11] G. S. Soh and J. M. McCarthy, "The synthesis of six-bar linkages as constrained planar 3R chains," Mech. Mach. Theory, vol. 43, pp. 160-170, 2008.

[12] J. J. Uicker, G. R. Pennock, and J. E. Shigley, Theory of Machines and Mechanisms, Oxford Univ. Press, 2017.

[13] N. V. Khang, N. S. Nam, and N. P. Dien, "Modelling and control of a four-bar mechanism with a flexible coupler link," in Robotics and Mechatronics, Springer, 2019.

[14] M. Wasfy and A. Noor, "Computational strategies for flexible multibody systems," Appl. Mech. Rev., vol. 56, pp. 553-613, 2003.

[15] A. Al-Bender, "Vibration control of flexible mechanical systems," Mech. Syst. Signal Process., vol. 22, pp. 1021-1043, 2008.

[16] W. J. Book, "Recursive Lagrangian dynamics of flexible manipulator arms," Int. J. Robot. Res., vol. 3, no. 3, pp. 87-101, 1984.

[17] S. Dwivedy and P. Eberhard, "Dynamic analysis of flexible manipulators: A review," Mech. Mach. Theory, vol. 41, pp. 749-777, 2006.

[18] Y. Sakawa, F. Matsuno, and S. Fukushima, "Modeling and control of flexible manipulators," IEEE Trans. Robot. Autom., vol. 1, pp. 124-131, 1985.

[19] A. H. Nayfeh and D. T. Mook, Nonlinear Oscillations, Wiley, 1979.

[20] L. Meirovitch, Principles and Techniques of Vibrations, Prentice Hall, 1997.

PHỤ LỤC

*) Phương trình viết cho tọa độ suy rộng ϕ_1, ta có :

$$\left(I_{O_1}+m_4 l_1^2\right)\ddot{\phi}_1=\tau-l_1\cos\left(\phi_1-\phi_2\right)\lambda_1 \tag{17}$$

*) Phương trình viết cho tọa độ suy rộng ϕ_2, ta có :

$$\begin{aligned}&\left(I_{O_2}+m_5 l_2^2\sin^2\phi_2+\mu l_2^2 l_3\right)\ddot{\phi}_2+\left[m_5 l_2\left(l_3+\sum_{k=1}^{N_2}\alpha_k.p_k\right)\sin\phi_2\sin\phi_3+\mu l_2\cos\left(\phi_2-\phi_3\right)\left(\frac{l_3^2}{2}+\sum_{k=1}^{N_2}H_k p_k\right)+\mu l_2\sin\left(\phi_2-\phi_3\right)\sum_{i=1}^{N_1}C_i q_i\right]\ddot{\phi}_3\\&+\mu l_2\cos\left(\phi_2-\phi_3\right)\sum_{i=1}^{N_1}C_i\ddot{q}_i-m_5 l_2\sin\phi_2\cos\phi_3\sum_{k=1}^{N_2}\alpha_k\ddot{p}_k-\mu l_2\sin\left(\phi_2-\phi_3\right)\sum_{k=1}^{N_2}H_k\ddot{p}_k+m_5 l_2^2\dot{\phi}_2^2\sin\phi_2\cos\phi_2+2m_5 l_2\dot{\phi}_3\sin\phi_2\sin\phi_3\sum_{k=1}^{N_2}\alpha_k\dot{p}_k\\&+m_5 l_2\left(l_3+\sum_{k=1}^{N_2}\alpha_k.p_k\right)\dot{\phi}_3^2\sin\phi_2\cos\phi_3+2\mu l_2\dot{\phi}_3\cos\left(\phi_2-\phi_3\right)\sum_{k=1}^{N_2}H_k\dot{p}_k+\mu l_2\dot{\phi}_3^2\sin\left(\phi_2-\phi_3\right)\left(\frac{l_3^2}{2}+\sum_{k=1}^{N_2}H_k p_k\right)+2\mu l_2\dot{\phi}_3\sin\left(\phi_2-\phi_3\right)\sum_{i=1}^{N_1}C_i\dot{q}_i\\&-\mu l_2\dot{\phi}_3^2\cos\left(\phi_2-\phi_3\right)\sum_{i=1}^{N_1}C_i q_i=F l_2\sin\phi_2+\left(l_1\cos\left(\phi_1-\phi_2\right)+l_0\sin\phi_2\right)\lambda_1-l_2\cos\phi_2.\lambda_2\end{aligned} \tag{18}$$

*) Phương trình viết cho tọa độ suy rộng ϕ_3

$$\begin{aligned}&\left[m_5 l_2\left(l_3+\sum_{k=1}^{N_2}\alpha_k p_k\right)\sin\varphi_2\sin\varphi_3+\mu l_2\cos\left(\varphi_2-\varphi_3\right)\left(\frac{l_3^2}{2}+\sum_{k=1}^{N_2}H_k p_k\right)+\mu l_2\sin\left(\varphi_2-\varphi_3\right)\sum_{i=1}^{N_1}C_i q_i\right]\ddot{\varphi}_2+\mu\left(\sum_{i=1}^{N_1}D_i+\sum_{i=1}^{N_1}\sum_{k=1}^{N_2}n_{ik}p_k\right)\ddot{q}_i\\&+\left[\left(l_3+\sum_{k=1}^{N_2}\alpha_k p_k\right)^2 m_5\sin^2\varphi_3+\mu\sum_{i=1}^{N_1}\sum_{j=1}^{N_1}m_{ij}q_i q_j+\mu\left(\frac{l_3^3}{3}+2\sum_{k=1}^{N_2}F_k p_k+\sum_{k=1}^{N_2}\sum_{l=1}^{N_2}b_{kl}p_k p_l\right)\right]\ddot{\varphi}_3-\left[m_5\left(l_3+\sum_{k=1}^{N_2}\alpha_k p_k\right)\sin\varphi_3\cos\varphi_3\sum_{k=1}^{N_2}\alpha_k+\mu\sum_{i=1}^{N_1}\sum_{k=1}^{N_2}n_{ik}q_i\right]\ddot{p}_k\\&+m_5\dot{\varphi}_3^2\sin\varphi_3\cos\varphi_3\left(l_3+\sum_{k=1}^{N_2}\alpha_k p_k\right)^2+2\mu\dot{\varphi}_3\sum_{i=1}^{N_1}\sum_{j=1}^{N_1}m_{ij}\dot{q}_i q_j+2m_5\dot{\varphi}_3\sin^2\varphi_3\left(l_3+\sum_{k=1}^{N_2}\alpha_k p_k\right)\sum_{l=1}^{N_2}\alpha_l\dot{p}_l+m_5 l_2\dot{\varphi}_2^2\cos\varphi_2\sin\varphi_3\left(l_3+\sum_{k=1}^{N_2}\alpha_k p_k\right)\\&+2\mu\dot{\varphi}_3\left(\sum_{k=1}^{N_2}F_k\dot{p}_k+\sum_{k=1}^{N_2}\sum_{l=1}^{N_2}b_{kl}\dot{p}_k p_l\right)-\mu l_2\dot{\varphi}_2^2\sin\left(\varphi_2-\varphi_3\right)\left(\frac{l_3^2}{2}+\sum_{k=1}^{N_2}H_k p_k\right)+\mu l_2\dot{\varphi}_2^2\cos\left(\varphi_2-\varphi_3\right)\sum_{i=1}^{N_1}C_i q_i=F\left(l_3+\sum_{k=1}^{N_2}\alpha_k p_k\right)\sin\varphi_3-\left(l_3+\sum_{k=1}^{N_2}\alpha_k p_k\right)\cos\varphi_2\lambda_2\end{aligned} \tag{19}$$

*) Phương trình viết cho tọa độ suy rộng q_i:

$$\mu l_2\ddot{\phi}_2\cos\left(\phi_2-\phi_3\right)C_i+\mu\ddot{\phi}_3\left(D_i+\sum_{k=1}^{N_2}n_{ik}p_k\right)+\mu\sum_{j=1}^{N_1}m_{ij}\ddot{q}_j-\mu l_2\dot{\phi}_2^2\sin\left(\phi_2-\phi_3\right)C_i+2\mu\dot{\phi}_3\sum_{k=1}^{N_2}n_{ik}\dot{p}_k-\mu\dot{\phi}_3^2\sum_{j=1}^{N_1}m_{ij}q_j=-EI\sum_{j=1}^{N_1}k_{ij}q_j \tag{20}$$

*) Phương trình viết cho tọa độ suy rộng p_k

$$\begin{aligned}&-\left(m_5 l_2\sin\phi_2\cos\phi_3\alpha_k+\mu l_2\sin\left(\phi_2-\phi_3\right)H_k\right)\ddot{\phi}_2-\left[m_5\left(l_3+\sum_{l=1}^{N_2}\alpha_l p_l\right)\sin\phi_3\cos\phi_3\alpha_k+\mu\sum_{i=1}^{N_1}n_{ik}q_i\right]\ddot{\phi}_3+\left(m_5\cos^2\phi_3\alpha_k\sum_{l=1}^{N_2}\alpha_l+\mu\sum_{l=1}^{N_2}b_{kl}\right)\ddot{p}_l\\&-2m_5\dot{\phi}_3\cos\phi_3\sin\phi_3\alpha_k\sum_{l=1}^{N_2}\alpha_l\dot{p}_l-m_5 l_2\dot{\phi}_2^2\cos\phi_2\cos\phi_3\alpha_k-m_5\dot{\phi}_3^2\cos^2\phi_3.\alpha_k\left(l_3+\sum_{l=1}^{N_2}\alpha_l p_l\right)\\&-\mu l_2\dot{\phi}_2^2\cos\left(\phi_2-\phi_3\right)H_k-2\mu\dot{\phi}_3\sum_{i=1}^{N_1}n_{ik}\dot{q}_i-\mu\left(F_k+\sum_{l=1}^{N_2}b_{kl}p_l\right)\dot{\phi}_3^2=-EA\sum_{l=1}^{N_2}g_{kl}p_l-\alpha_k F\cos\phi_3-\lambda_2\alpha_k\sin\phi_3\end{aligned} \tag{21}$$

■Ngày nhận bài: 24/02/2026 ■Ngày sửa bài: 04/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 11/3/2026

Đánh giá khả năng phân loại lớp phủ bề mặt của thuật toán Machine Learning và Deep Learning trên ảnh PlanetScope - Trường hợp nghiên cứu tại phường Long An, tỉnh Tây Ninh

Assessing the performance of Machine Learning and Deep Learning algorithms in surface land cover classification using Planet Scope imagery: A case study of Long An Ward, Tay Ninh Province

> TS VĂN NGỌC TRÚC PHƯƠNG, THS NGUYỄN TRỌNG NHÂN, THS LÊ THIÊN BẢO*
Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường TP Hồ Chí Minh
*Email: ltbao@hcmunre.edu.vn

TÓM TẮT

Khả năng phân loại lớp phủ bề mặt từ ảnh PlanetScope có độ phân giải cao được đánh giá theo hai hướng tiếp cận tiên tiến là thuật toán Random Forest của Machine Learning và U-Net của Deep Learning, được triển khai trên ArcGIS Pro. Kết quả cho thấy cả hai mô hình đạt độ chính xác cao với RF có độ chính xác toàn cục OA = 0,92, F1-Score = 0,92 và Kappa =0,89, trong khi U-Net có OA = 0,94, F1-Score = 0,93 và Kappa = 0,91. Mặc dù mức chênh lệch về độ chính xác không lớn nhưng U-Net thể hiện ưu thế nhất quán trên các chỉ số đánh giá, đặc biệt đối với các lớp có phản xạ trung gian nhờ khả năng khai thác hiệu quả cấu trúc không gian thông qua kiến trúc tích chập sâu. Ngược lại, RF có tính ổn định dựa trên đặc trưng phổ và yêu cầu dữ liệu huấn luyện không lớn, nhưng hạn chế trong xử lý các lớp có sự chồng lấn phổ hoặc cấu trúc không gian phức tạp, qua đó minh chứng tiềm năng của học sâu trong bối cảnh phân loại lớp phủ bề mặt ở khu vực có cấu trúc đô thị không gian phức tạp.

Từ khóa: Lớp phủ bề mặt; học máy; học sâu; PlanetScope.

ABSTRACT

This paper evaluates the capability of classifying land cover from high-resolution PlanetScope imagery using two advanced approaches: The Random Forest algorithm from Machine Learning and the U-Net model from Deep Learning, implemented in ArcGIS Pro. The results show that both models achieve high accuracy, with Random Forest obtaining an Overall Accuracy (OA) of 0.92, an F1-Score of 0.92 and a Kappa coefficient of 0.89, while U-Net achieves an OA of 0.94, an F1-Score of 0.93 and a Kappa of 0.91. Although the difference in accuracy is relatively small, U-Net consistently outperforms across evaluation metrics, particularly for classes with intermediate spectral responses, due to its ability to effectively capture spatial structures through deep convolutional architecture. In contrast, Random Forest demonstrates strong stability based on spectral features and requires a relatively small amount of training data, but it is more limited in handling classes with spectral overlap or complex spatial structures. These findings highlight the potential of deep learning for land-cover classification in areas characterized by complex urban spatial structures.

Keywords: Land cover; machine learning; deep learning; PlanetScope.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Phân loại lớp phủ bề mặt đóng vai trò quan trọng trong quản lý tài nguyên đất cung cấp thông tin cần thiết để đánh giá hiện trạng, hỗ trợ theo dõi biến động bề mặt theo không gian và thời gian, đặc biệt tại các đô thị phát triển nhanh [1]. Trong bối cảnh đô thị hóa và chuyển đổi mục đích sử dụng đất diễn ra mạnh mẽ, nhu cầu xây dựng bản đồ lớp phủ có độ chi tiết cao và cập nhật thường xuyên ngày càng cấp thiết. Do đó, ứng dụng viễn thám trong phân loại lớp phủ trở thành giải pháp quan trọng nhằm hỗ trợ quy hoạch đô thị bền vững.

Sự phát triển của viễn thám cho phép giám sát bề mặt trái đất nhanh chóng thông qua các vệ tinh, đồng thời cung cấp dữ liệu đa thời gian có phạm vi bao phủ toàn cầu [2-4]. Tuy nhiên, hạn chế về độ phân giải không gian và chu kỳ lặp chụp tương đối dài, làm giảm khả năng nhận dạng chi tiết đối tượng [5]. Trong những năm gần đây, vệ tinh PlanetScope với độ phân giải không gian 3 m và chu kỳ lặp hằng ngày đã mang lại lợi thế rõ rệt so với Landsat (30 m, 16 ngày) và Sentinel-2 (10 m, 5 - 10 ngày) trong phân loại và theo dõi biến động ngắn hạn [5-7]. Mặc dù số kênh phổ còn hạn chế, độ phân giải không gian và thời gian cao giúp nâng cao độ tin cậy phân loại, nhờ đó, ảnh PlanetScope ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong quản lý tài nguyên và môi trường [5, 8, 9].

Cùng với sự phát triển của trí tuệ nhân tạo, các thuật toán Machine Learning (ML) và Deep Learning (DL) được ứng dụng phổ biến trong phân loại ảnh vệ tinh [10]. Các mô hình ML truyền thống như Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM) đã được sử dụng hiệu quả trong nhiều nghiên cứu [11, 12]. Trong đó, RF được áp dụng phổ biến nhờ khả năng xử lý dữ liệu đa chiều, hạn chế quá khớp và duy trì độ ổn định cao ngay cả khi số lượng mẫu huấn luyện không lớn [11]. Đối với Deep Learning, các kiến trúc như CNN, FCN, U-Net, SegNet được ứng dụng trong phân đoạn ảnh, trong đó, U-Net nổi bật nhờ cấu trúc encoder-decoder kết hợp skip connection giúp bảo toàn thông tin không gian chi tiết và nâng cao độ chính xác khi xử lý ảnh độ phân giải cao [8, 13, 14].

Trên cơ sở đó, bài báo đánh giá khả năng phân loại lớp phủ bề mặt từ ảnh PlanetScope bằng thuật toán RF và U-Net được tích hợp trong ArcGIS Pro. Hiệu quả mô hình được đánh giá thông qua độ chính xác toàn cục, hệ số Kappa và F1-Score, đồng thời so sánh khả năng thể hiện ranh giới không gian và mức độ chi tiết của kết quả phân loại. Kết quả góp phần cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn phương pháp phù hợp và thúc đẩy ứng dụng dữ liệu PlanetScope cùng các mô hình học máy, học sâu trong viễn thám.

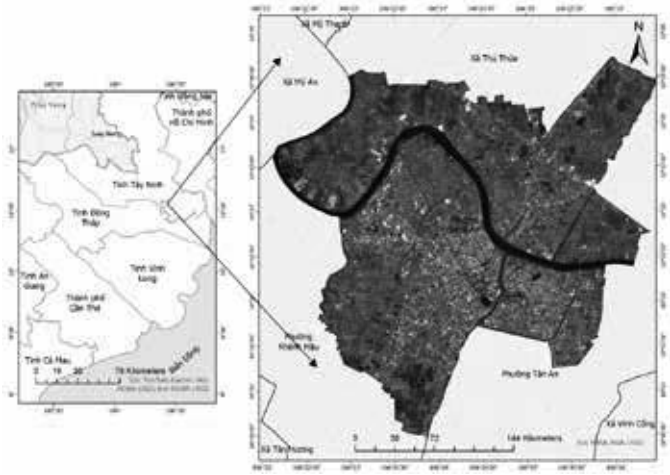
2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Dữ liệu nghiên cứu

Bài báo sử dụng ảnh PlanetScope có độ phân giải không gian 3 m gồm kênh Blue, Green, Red và cận hồng ngoại - NIR, được thu thập ngày 04/01/2026 với độ phủ mây dưới 5% từ Planet Explorer. Ảnh được xử lý ở mức độ Level 3B bao gồm hiệu chỉnh hình học theo hệ tọa độ phẳng phép chiếu UTM múi chiếu 48N và hiệu chỉnh khí quyển, đồng thời chuyển đổi về giá trị phản xạ bề mặt nhằm nâng cao chất lượng và khả năng phân biệt các lớp phủ.

2.2. Khu vực nghiên cứu

Phường Long An là trung tâm chính trị, kinh tế và văn hóa của địa phương và là cầu nối giữa TP.HCM và vùng đồng bằng sông Cửu Long, được thể hiện qua Hình 1. Năm 2019, được công nhận là đô thị loại II và đến năm 2025 sáp nhập thành phường Long An, tỉnh Tây Ninh, qua đó đánh dấu bước chuyển quan trọng trong phát triển không gian đô thị. Trong giai đoạn 2016 - 2025, khu vực này chịu tác động mạnh của quá trình đô thị hóa và chuyển đổi mục đích sử dụng đất [15], làm biến động nhanh lớp phủ bề mặt. Do đó, việc xây dựng bản đồ lớp phủ có độ chính xác cao là cần thiết nhằm hỗ trợ quy hoạch, quản lý đất đai.



Hình 1. Khu vực nghiên cứu tại phường Long An

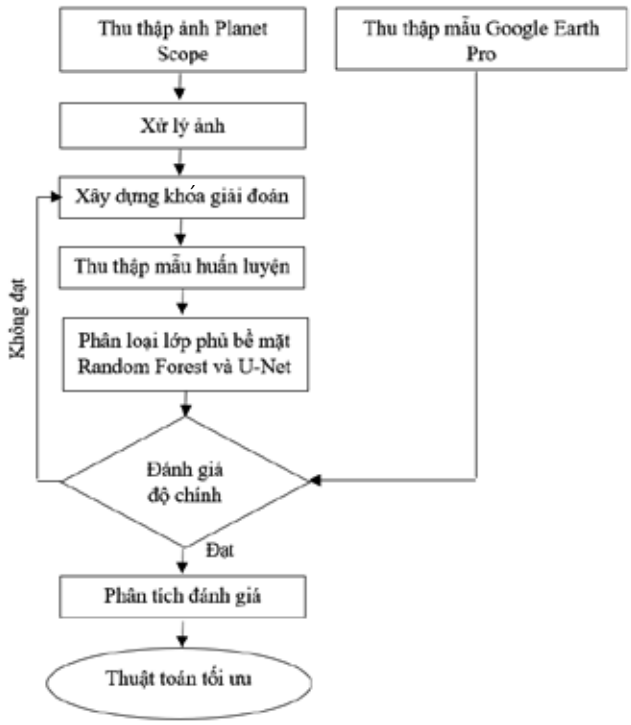
2.3. Phương pháp nghiên cứu

Về phương pháp phân loại ảnh vệ tinh, bài báo sử dụng thuật toán RF và U-Net, trong đó RF là thuật toán học máy có giám sát thuộc nhóm học tổ hợp, được xây dựng từ nhiều cây quyết định huấn luyện trên các tập mẫu bootstrap và đưa ra kết quả theo nguyên tắc bỏ phiếu đa số. Đồng thời, RF giúp giảm phương sai, hạn chế quá khớp và nâng cao độ ổn định mô hình. Nhờ khả năng xử lý dữ liệu đa chiều và khai thác đặc trưng phổ - không gian, RF phù hợp với ảnh viễn thám độ phân giải cao như PlanetScope và dễ triển khai và hoạt động hiệu quả ngay cả khi số lượng mẫu huấn luyện không lớn [11]. Đối với U-Net là kiến trúc mạng nơ-ron tích chập thuộc học sâu dùng cho phân đoạn ảnh. Mô hình có cấu trúc encoder-decoder đối xứng, trong đó encoder trích xuất đặc trưng còn decoder khôi phục kích thước không gian để tạo bản đồ phân loại ở mức pixel. Các skip connections giúp bảo toàn thông tin chi tiết, nhờ đó U-Net khai thác tốt đặc trưng không gian, đặc biệt hiệu quả với ảnh viễn thám độ phân giải cao [14].

Về phương pháp đánh giá hiệu quả phân loại áp dụng các chỉ số Overall Accuracy (OA), Kappa, Producer's Accuracy (PA), User's Accuracy (UA) và F1-Score. Trong đó, F1-Score là chỉ số tổng hợp giữa Precision (UA) và Recall (PA), phản ánh tốt hiệu quả phân loại khi dữ liệu giữa các lớp không cân bằng. Ngoài ra, sự khác biệt về khả năng thể hiện ranh giới không gian, mức độ chi tiết và tính nhất quán giữa các lớp phủ cũng được phân tích nhằm làm rõ ưu, nhược điểm của từng phương pháp trong điều kiện dữ liệu ảnh PlanetScope.

Quy trình đánh giá khả năng phân loại ảnh của hai thuật toán được thể hiện qua Hình 2, trong đó, lớp phủ được chia thành: BMKT (nhà, khu công nghiệp, giao thông, công trình xây dựng… [16]), thảm thực vật, mặt nước và đất trống. Do ảnh đã được tiền xử lý, bài báo thực hiện cắt ảnh theo ranh giới phường và tổ hợp màu giả để hỗ trợ giải đoán. Mẫu huấn luyện được phân bố đều trong khu vực và số hóa dạng polygon, với số lượng khác nhau tùy theo đặc trưng và mức độ phân bố của từng lớp [17]. Cụ thể: BMKT 210 mẫu (24.962 pixel), thảm thực vật 304 mẫu (35.609 pixel), mặt nước 60 mẫu (12.154 pixel) và đất trống 30 mẫu (6.790 pixel). Dữ liệu đánh giá được thu thập từ ảnh độ phân giải cao trên Google Earth với 100 điểm cho mỗi lớp, riêng BMKT có 200 điểm do phân bố phức tạp và chiếm ưu thế trong khu vực đô thị. Trong nghiên cứu này, RF và

U-Net được tích hợp sẵn trong phần mềm ArcGIS Pro giúp cho quá trình huấn luyện và đánh giá kết quả một cách nhanh chóng.



Hình 2. Quy trình thực hiện

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả phân loại lớp phủ

Tận dụng công cụ tích hợp sẵn trong ArcGIS Pro hỗ trợ triển khai thuật toán ML và DL, bài báo sử dụng cùng một bộ mẫu huấn luyện để thực hiện phân loại lớp phủ bề mặt. Trong đó, Hình 3 trình bày kết quả phân loại bằng thuật toán U-Net và Hình 4 thể hiện kết quả từ RF.

Hình 3. Phân loại bằng thuật toán U-Net

Hình 4. Phân loại bằng thuật toán Random Forest

Qua Hình 3, Hình 4 và thống kê diện tích lớp phủ tại Bảng 1 cho thấy mặc dù RF và U-Net đều có tổng diện tích khu vực là 34,95 km^2, sự khác biệt đáng kể xuất hiện trong phân bố diện tích từng lớp phủ bề mặt. Điều này phản ánh sự khác nhau trong cơ chế trích xuất đặc trưng và mô hình hóa không gian của hai thuật toán. Đối với diện tích BMKT của RF cao hơn (8,85 km^2) so với U-Net (7,17 km^2) với chênh lệch 1,68 km^2. Xu hướng này có thể liên quan đến đặc điểm phân loại dựa trên từng pixel của RF, phụ thuộc chủ yếu vào đặc trưng phổ. Trong môi trường đô thị - nông nghiệp xen kẽ, các bề mặt như đất khô, công trình xây dựng hoặc ruộng sau thu hoạch có thể có phản xạ phổ tương đồng với vật liệu không thấm, dẫn đến hiện tượng gán nhãn dư thừa.

Ngược lại, U-Net cho diện tích thảm thực vật lớn hơn (22,43 km^2) so với RF (21,49 km^2). Nhờ khả năng khai thác không gian thông qua kiến trúc encoder-decoder và cơ chế skip connections, U-Net có xu hướng duy trì tính liên tục hình thái của các mảng xanh và giảm nhiễu cục bộ. Điều này đặc biệt quan trọng trong khu vực đô thị có cấu trúc phân mảnh cao. Đối với lớp mặt nước, sự khác biệt giữa hai mô hình là không đáng kể, cho thấy đặc trưng phổ của lớp này tương đối ổn định và dễ nhận diện. Trong khi đó, diện tích đất trống được U-Net ước tính lớn hơn RF, cho thấy sự khác biệt trong cách hai mô hình xử lý các khu vực chuyển tiếp phổ và bề mặt có độ phản xạ trung gian. Bên cạnh đó, vào thời điểm thu nhận ảnh (04/01/2026) trùng với giai đoạn chuyển tiếp giữa các vụ lúa tại khu vực này. Sau khi kết thúc vụ Thu - Đông, nhiều diện tích ruộng đang trong quá trình thu hoạch, xử lý tàn dư thực vật, làm đất hoặc chờ xuống giống vụ Đông - Xuân. Ở giai đoạn này, bề mặt ruộng chưa được che phủ bởi thảm thực vật phát triển hoàn chỉnh, dẫn đến tín hiệu phổ thể hiện đặc trưng của lớp đất trống trên ảnh viễn thám.

Bảng 1. Thống kê diện tích lớp phủ (km^2)

Lớp phủ bề mặt	Thuật toán	
	RF	U-Net
BMKT	8,85	7,17
Thảm thực vật	21,49	22,43
Mặt nước	2,19	1,83
Đất trống	2,42	3,52
Tổng	34,95	34,95

Tổng thể, RF thể hiện ưu thế về tính ổn định và khả năng tổng quát hóa dựa trên đặc trưng phổ, trong khi U-Net cho thấy lợi thế trong việc khai thác cấu trúc không gian và duy trì tính nhất quán hình thái. Sự khác biệt này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc lựa chọn thuật toán phù hợp với đặc điểm cảnh quan và mục tiêu ứng dụng trong nghiên cứu phân loại lớp phủ bề mặt.

3.2. Kết quả đánh giá độ chính xác

Bảng 2. Ma trận sai số của thuật toán UNet

Lớp phủ bề mặt BMKT		Loại giải đoán				Tổng	UA
		Thảm thực vật	Mặt nước	Đất trống			
Loại thực	BMKT	196	2	2	0	200	0,98
	Thảm thực vật	4	90	9	3	106	0,85
	Mặt nước	0	2	86	1	89	0,97
	Đất trống	0	6	3	96	105	0,91
Tổng		200	100	100	100	500	
PA		0,98	0,9	0,86	0,96		

Độ chính xác toàn cục của mô hình U-Net đạt 94%, cho thấy khả năng phân loại cao và ổn định giữa các lớp phủ bề mặt được thể hiện qua Bảng 2. Sai số nhà sản xuất (PA) dao động 0,86 - 0,98 và sai số người dùng (UA) 0,85 - 0,98, phản ánh độ tin cậy tốt. Cụ thể, lớp BMKT đạt độ chính xác cao nhất (PA = 0,98; UA = 0,98). Mặt nước cũng có độ tin cậy cao (UA = 0,97; PA = 0,86). Đất trống đạt PA = 0,96 và UA = 0,91, nhưng còn nhầm lẫn với thảm thực vật. Lớp thảm thực vật có độ chính xác thấp hơn (PA = 0,90; UA = 0,85) do tương đồng phổ với đất trống và mặt nước ở các khu vực thực vật thưa hoặc đất ẩm. Nhìn chung, U-Net khai thác tốt thông tin không gian và duy trì cấu trúc hình thái đối tượng, cho thấy tính phù hợp trong phân loại lớp phủ ở khu vực đô thị - nông nghiệp phức tạp.

Bảng 3. Ma trận sai số của Random Forest

Lớp phủ bề mặt BMKT		Loại giải đoán				Tổng	UA
		Thảm thực vật	Mặt nước	Đất trống			
Loại thực	BMKT	197	**2**	1	19	219	0,90
	Thảm thực vật	2	93	1	5	101	0,92
	Mặt nước	1	2	98	1	102	0,96
	Đất trống	0	3	0	75	78	0,96
Tổng		200	200	100	100	100	500
PA		0,98	0,99	0,93	0,98	0,75	

Thuật toán RF đạt độ chính xác tổng thể 92% cho thấy hiệu năng phân loại khá cao. Trong Bảng 3 cho thấy giá trị PA dao động 0,75 - 0,99 và UA từ 0,90 - 0,96, phản ánh độ tin cậy tương đối tốt giữa các lớp. Lớp BMKT có PA cao nhất (0,99) nhưng UA = 0,90 do nhầm lẫn với đất trống. Lớp mặt nước đạt độ chính xác cao và ổn định (PA = 0,98; UA = 0,96). Thảm thực vật cũng đạt kết quả khá tốt (PA = 0,93; UA = 0,92) nhưng vẫn có nhầm lẫn với các lớp lân cận. Ngược lại, đất trống có PA thấp nhất (0,75) dù UA = 0,96, cho thấy nhiều mẫu bị phân loại nhầm sang BMKT. Nhìn chung, RF hoạt động hiệu quả với các lớp có đặc trưng phổ rõ ràng, nhưng gặp khó khăn khi phân biệt các lớp có sự chồng lấn phổ, đặc biệt giữa đất trống và BMKT.

Đánh giá tham số F1-Score tại Bảng 4 cho thấy cả hai thuật toán RF và U-Net đều đạt độ tin cậy cao với F1 trung bình lần lượt là 0,92 và 0,93, cho thấy mức độ chính xác tổng thể tương đương. Tuy nhiên, sự khác biệt thể hiện rõ ở từng lớp, cụ thể U-Net vượt trội hơn so với RF qua lớp BMKT (tương ứng 0,98 so với 0,94) và đất trống (tương ứng 0,94 so với 0,84), phản ánh khả năng khai thác thông tin không gian và xử lý tốt các lớp có tính chuyển tiếp phổ. Ngược lại, RF cho kết quả tốt hơn ở lớp thảm thực vật (0,93 so với 0,87) và mặt nước (0,97 so với 0,91), cho thấy ưu thế trong các lớp có đặc trưng phổ rõ ràng và ổn định. Nhìn chung, RF phù hợp với các lớp có tính tách biệt phổ cao, trong khi U-Net có lợi thế trong môi trường có tính khác biệt cao và cấu trúc không gian phức tạp.

Bảng 4. Đánh giá tham số F1-Score

Lớp phủ bề mặt	F1-Score	
	RF	U-net
BMKT	0,94	0,98
Thảm thực vật	0,93	0,87
Mặt nước	0,97	0,91
Đất trống	0,84	0,94
Tổng	0,92	0,93

Đánh giá tổng quát trong Bảng 5 cho thấy U-Net đạt hiệu năng cao hơn RF với OA = 0,94; F1-Score = 0,93 và Kappa = 0,91, trong khi RF lần lượt đạt 0,92; 0,92 và 0,89. Mặc dù mức chênh lệch không lớn, U-Net vẫn thể hiện sự cải thiện nhất quán trên các chỉ số đánh giá, cho thấy khả năng phân loại và mức độ phù hợp tốt hơn đối với ảnh có độ phân giải cao. Giá trị Kappa cao hơn phản ánh mức độ đồng thuận tốt sau khi hiệu chỉnh yếu tố ngẫu nhiên, còn F1-Score cao cho thấy sự cân bằng tốt giữa Precision và Recall. Ưu thế của U-Net đến từ khả năng học đặc trưng không gian phân cấp và khai thác đồng thời thông tin phổ và đối tượng không gian lân cận. Trong khi đó, RF dựa trên phân loại theo từng pixel nên hạn chế hơn trong việc mô hình hóa cấu trúc không gian phức tạp. Tuy nhiên, RF vẫn là phương pháp hiệu quả khi dữ liệu huấn luyện thấp. Kết quả cho thấy các mô hình học sâu có tiềm năng cao trong phân loại lớp phủ bề mặt từ ảnh độ phân giải cao, đặc biệt trong môi trường đô thị có cấu trúc không gian phức tạp.

Bảng 5. Tham số đánh giá độ chính xác

Tham số đánh giá	Thuật toán	
	RF	U-net
Overall Accuracy (OA)	0,92	0,94
F1-Score	0,92	0,93
Kappa	0,89	0,91

3.3. Thảo luận

Kết quả thực nghiệm cho thấy cả RF và U-Net đều đạt hiệu quả cao trong phân loại lớp phủ bề mặt từ ảnh viễn thám độ phân giải cao. RF có ưu điểm về tính ổn định, khả năng nhận diện tốt và yêu cầu dữ liệu huấn luyện tương đối ít, nhưng chủ yếu dựa trên đặc

trưng phổ theo từng pixel nên còn hạn chế khi xử lý các lớp có sự chồng lấn phổ hoặc cấu trúc không gian phức tạp. Ngược lại, U-Net khai thác tốt thông tin không gian và duy trì tính liên tục hình thái nhờ kiến trúc tích chập sâu giúp cải thiện độ chính xác. Tuy nhiên, mô hình học sâu thường đòi hỏi tài nguyên tính toán lớn và phụ thuộc nhiều vào quy mô cũng như chất lượng dữ liệu huấn luyện.

Trong bài báo này, ArcGIS Pro đóng vai trò nền tảng tích hợp, cho phép triển khai đồng thời các phương pháp ML, DL trong cùng một môi trường xử lý, từ tiền xử lý ảnh, xây dựng mẫu huấn luyện, huấn luyện mô hình đến đánh giá độ chính xác (OA, F1-score, Kappa). Tuy vậy, kết quả vẫn chịu ảnh hưởng bởi tính đại diện của dữ liệu huấn luyện, đặc biệt với các lớp có đặc trưng phổ tương đồng. Ngoài ra, bài báo chỉ so sánh hai mô hình, do đó cần được kiểm chứng thêm với các mô hình Deep Learning khác. Trong các nghiên cứu tiếp theo, việc mở rộng dữ liệu huấn luyện, tích hợp ảnh đa thời gian hoặc đa cảm biến, cũng như thử nghiệm các kiến trúc học sâu và phương pháp kết hợp mô hình (ensemble) có thể giúp nâng cao độ chính xác và tính ổn định của kết quả phân loại.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đánh giá khả năng phân loại lớp phủ bề mặt từ ảnh viễn thám độ phân giải cao thông qua hai hướng tiếp cận: Học máy truyền thống (RF) và học sâu (U-Net). Kết quả cho thấy cả hai mô hình đều đạt độ chính xác cao, trong đó U-Net thể hiện ưu thế về OA, F1-Score và hệ số Kappa. Điều này cho thấy tiềm năng của các mô hình học sâu trong việc khai thác đồng thời đặc trưng phổ và cấu trúc không gian, đặc biệt trong bối cảnh cảnh quan đô thị - nông nghiệp phức tạp. Tuy nhiên, hiệu năng ổn định và yêu cầu dữ liệu huấn luyện không quá lớn của RF cho thấy phương pháp này vẫn phù hợp trong các nghiên cứu có nguồn lực hạn chế. Sự khác biệt giữa hai mô hình chủ yếu xuất hiện ở các lớp có tính chuyển tiếp phổ cao, qua đó nhấn mạnh vai trò của thông tin không gian trong nâng cao độ chính xác phân loại. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở cho việc lựa chọn thuật toán phù hợp trong phân loại lớp phủ bề mặt và hỗ trợ các nghiên cứu tiếp theo về giám sát biến động sử dụng đất, quy hoạch đô thị và quản lý tài nguyên bền vững.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] N T Hồng, K Q Lập, N T Tuyết. Applications of remote sensing technology coatings mapping (Case study for the coastal area of Hoai Nhon district, Binh Dinh province). TNU Journal of Science and Technology, vol. 59, 87-91, 2016.

[2] D Phiri, M Simwanda, S Salekin, V R Nyirenda, Y Murayama, M Ranagalage. Sentinel-2 Data for Land Cover/Use Mapping: A Review. Remote Sens, vol. 12, 2291, 1-35, 2020.

[3] E Bojago, G Tadila, M Masha. Monitoring spatio-temporal changes in land use, land cover and NDVI using MODIS data in Ethiopia's Gambela region. Discov Appl Sci, vol.7, 1361, 2025.

[4] M Ninad, K Ashok, G Jyoti, P Puja, T Sumithra. A Complete Study of Remote Sensing-Sentinel-2 Satellite Data for Land Use/Land Cover (LULC) Analysis. Panamerican Mathematical Journal, vol. 35, 1, 231-249, 2025.

[5] O M Alegbeleye, Y O Rotimi, P Shomide. Land use land cover (LULC) analysis in Nigeria: a systematic review of data, methods and platforms with future prospects. Bull Natl Res Cent 48, vol. 127, 2024.

[6] P R Davi, H Haiyan, H Rasmus, S M Vitor. A global analysis of the temporal availability of PlanetScope high spatial resolution multi-spectral imagery, Remote Sensing of Environment, vol. 264, 112586, 2021.

[7] A Siham. PlanetScope contributions compared to Sentinel-2 and Landsat-8 for LULC mapping. Remote Sensing Applications: Society and Environment, vol. 27, 100774, 2022.

[8] T V Trinh. GEOBIA and Machine Learning for aquaculture mapping with PlanetScope imagery in Thi Nai Lagoon, Vietnam. Remote Sensing Applications: Society and Environment, vol. 40, 101756, 2025.

[9] T Rodrigues, F Takahashi, A Dias, T Lima, E Alcântara. Machine learning-based Cerrado land cover classification using PlanetScope imagery. Remote Sensing, vol. 17(3), 480, 2025.

[10] A A Adegun, S Viriri, J R Tapamo. Review of deep learning methods for remote sensing satellite images classification: experimental survey and comparative analysis. Journal of Big Data, vol. 10, 93, 2023.

[11] P T Noi, M Kappas. Comparison of Random Forest, k-Nearest Neighbor and Support Vector Machine Classifiers for Land Cover Classification Using Sentinel-2 Imagery. Sensors, vol. 18(1), 18, 2018.

[12] X Pan, J Zhao. High-Resolution Remote Sensing Image Classification Method Based on Convolutional Neural Network and Restricted Conditional Random Field. Remote Sens, vol. 10, 920, 2018.

[13] I Dimitrovski, V Spasev, S Loshkovska, I Kitanovski. U-Net ensemble for enhanced semantic segmentation in remote sensing imagery. Remote Sensing, vol. 16(12), 2077, 2024.

[14] P Vianna, R Farias. U-Net and SegNet performances on lesion segmentation of breast ultrasonography images. Research on Biomedical Engineering, vol. 37(2), 171-179, 2021.

[15] N T Nhân, H N Dung, V N T Phương, L T Bảo. Phân tích xu hướng mở rộng BMKT trong quá tình đô thị hóa tại phường Long An bằng ảnh Sentinel 2 giai đoạn 2016-2025. Tạp chí Trắc địa - Bản đồ, 12, 5-18, 2026.

[16] P V Tùng, N V Trung, N H Long, N Đ Hùng. Quan trắc sự mở rộng BMKT bằng dữ liệu ảnh Spot-5 và Sentinel-2 ở khu vực thành phố Hồ Chí Minh. Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất, 59, 69-76, 2018.

[17] S Shetty, P K Gupta, M Belgiu, S K Srivastav. Assessing the Effect of Training Sampling Design on the Performance of Machine Learning Classifiers for Land Cover Mapping Using Multi-Temporal Remote Sensing Data and Google Earth Engine. Remote Sens, vol.13, 1433, 2021.

■Ngày nhận bài: 24/02/2026 ■Ngày sửa bài: 06/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 16/3/2026

Dự báo độ ổn định Marshall của SMA bằng mô hình Rừng cây ngẫu nhiên có sử dụng kỹ thuật tối ưu hóa các siêu tham số

Predicting the Marshall stability of Stone Mastic Asphalt using the Random Forest model with hyperparameter optimization methods

> PGS.TS MAI THỊ HẢI VÂN*, TS LÊ THANH HẢI, KS NGUYỄN XUÂN MẠNH
Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải
*Email: vanmth@utt.edu.vn

TÓM TẮT

SMA là vật liệu được sử dụng phổ biến trong xây dựng đường, đặc biệt là với đường ô tô có lưu lượng xe lớn và tải trọng trục nặng. Để thiết kế thành phần và đánh giá chất lượng hỗn hợp SMA cần dựa vào nhiều chỉ tiêu cơ lý, trong đó độ ổn định Marshall (MS) là một chỉ tiêu quan trọng. Bộ dữ liệu sử dụng trong nghiên cứu được thu thập từ thí nghiệm, gồm 144 dữ liệu với 9 biến đầu vào và 1 tham số đầu ra. Sau quá trình huấn luyện, kiểm tra và tối ưu hóa các siêu tham số, một mô hình Rừng cây ngẫu nhiên tối ưu đã được lựa chọn để dự báo MS của SMA. Mô hình RF đề xuất có khả năng dự báo rất chính xác MS (R2 kiểm tra = 0,9128). Ngoài ra, biểu đồ SHAP cũng được xây dựng để dự báo mức độ ảnh hưởng của các biến đầu vào đối với MS.

Từ khóa: SMA; máy học; độ ổn định Marshall; Rừng cây ngẫu nhiên.

ABSTRACT

Stone Mastic Asphalt (SMA) is a pavement material widely used in road construction, particularly for highways subjected to heavy traffic and high axle loads. The design of SMA mixtures and the evaluation of their quality require consideration of multiple mechanical properties, among which Marshall Stability (MS) is a key performance indicator. The dataset used in this study was obtained from laboratory experiments conducted, which consists of 144 samples, including nine input variables and one output parameter. After model training, validation and hyperparameter optimization, an optimal Random Forest (RF) model was developed to predict the Marshall Stability of SMA mixtures. The proposed RF model demonstrates high predictive accuracy, achieving a testing coefficient of determination of R2= 0.9128. Furthermore, SHAP analysis was employed to quantify and interpret the influence of input variables on MS.

Keywords: Stone Mastic Asphalt (SMA); Machine learning; Marshall stability; Random Forest.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Stone Mastic Asphalt (SMA) là hỗn hợp gồm hai thành phần Mastic và đá dăm, trong đó Mastic gồm cốt liệu mịn, bột đá, nhựa đường và chất ổn định. SMA có cấp phối gián đoạn, với hàm lượng cốt liệu thô lớn đan xen với cốt liệu nhỏ tạo nên bộ khung đá vững chắc (đá chèn đá). Chất ổn định (sợi cellulose hoặc sợi khoáng) được đưa vào hỗn hợp trong quá trình trộn khô để ngăn chặn hiện tượng bị chảy nhựa đường trong quá trình trộn, vận chuyển, đầm nén và khai thác sau này. Nghiên cứu này tập trung vào loại SMA có sử dụng sợi cellulose. Do có nhiều ưu điểm như độ bền cao, khả năng chống lún vệt bánh xe, kháng nứt mỏi tốt [1], vì vậy SMA ngày càng được sử dụng rộng rãi trong kết cấu mặt đường ô tô có lưu lượng xe lớn và tải trọng trục nặng [2].

Các chỉ tiêu cơ lý của hỗn hợp SMA như MS, độ dẻo Marshall… là những chỉ tiêu quan trọng để đánh giá khả năng chịu tải và mức độ ổn định của bê tông nhựa. Phương pháp phổ biến hiện nay để xác định MS của SMA là thí nghiệm truyền thống, cần nhiều thời gian, chi phí, kết quả phụ thuộc vào tay nghề của thí nghiệm viên và thiết bị thí nghiệm [3]. Hơn nữa, mối quan hệ giữa MS và các thông số đầu vào của SMA có tính phi tuyến, khó biểu diễn chính xác bằng các mô hình hồi quy tuyến tính truyền thống. Do đó, cần một phương pháp hiện đại, dự báo nhanh, chính xác và tận dụng

được cơ sở dữ liệu thí nghiệm sẵn có về MS của SMA.

Hiện nay, mô hình máy học đã được ứng dụng vào nhiều lĩnh vực, trong đó chuyên ngành vật liệu. Trong đó, mô hình Rừng cây ngẫu nhiên (RF) được đánh giá cao nhờ khả năng mô hình hóa các quan hệ phi tuyến phức tạp, ít bị hiện tượng quá khớp, đồng thời cho phép đánh giá mức độ quan trọng của các biến đầu vào đối với biến đầu ra [4]. Những đặc điểm này cho thấy RF là công cụ tiềm năng trong việc dự báo các chỉ tiêu cơ học của bê tông nhựa, trong đó có MS của SMA. Mặc dù vậy, các nghiên cứu sử dụng mô hình RF để dự báo MS của hỗn hợp SMA hầu như chưa có. Ngoại trừ nghiên cứu [5] đã sử dụng mô hình trí tuệ nhân tạo kết hợp và mô hình vector máy hỗ trợ để dự báo MS của hỗn hợp SMA. Tuy nhiên, nghiên cứu này sử dụng bộ dữ liệu hạn rất hạn chế, chỉ 60 dữ liệu. Ngoài ra, việc tối ưu hóa siêu tham số (Hyperparameter Optimization) cho các mô hình chưa được thực hiện bài bản, thường dừng ở tham số mặc định hoặc tìm kiếm thủ công, chưa khai thác hết tiềm năng dự báo.

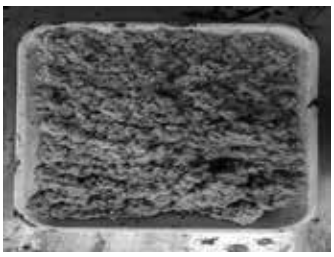
Dựa trên cơ sở dữ liệu nhiều hơn (gồm 144 dữ liệu) thu được từ thí nghiệm do nhóm tác giả thực hiện, nghiên cứu này đã sử dụng mô hình RF với kỹ thuật tối ưu hóa các siêu tham số bằng phương pháp tìm kiếm theo lưới để dự báo MS của SMA. Đây là hướng tiếp cận cần thiết, khoa học, nhằm tạo ra công cụ dự báo MS nhanh chóng, chính xác, tiết kiệm thời gian và chi phí, đồng thời cung cấp những hiểu biết sâu sắc, có giá trị thực tiễn về các yếu tố đầu vào ảnh hưởng đến MS của SMA.

2. THÀNH PHẦN VẬT LIỆU, THÀNH PHẦN CẤP PHỐI, MÔ TẢ THÍ NGHIỆM, VÀ THU THẬP CƠ SỞ DỮ LIỆU

2.1. Thành phần vật liệu

Cốt liệu thô, cốt liệu mịn và bột khoáng sử dụng trong nghiên cứu là cốt liệu nghiền, được khai thác từ các mỏ đá khu vực miền Bắc Việt Nam.

Chất ổn định được bổ sung vào hỗn hợp nhằm ngăn ngừa hiện tượng chảy nhựa. Chất ổn định được sử dụng trong nghiên cứu là sợi cellulose ARBOCEL ZZ 8/1 do Công ty JRS, Cộng hòa Liên bang Đức cung cấp (Hình 1).



Hình 1. Sợi cellulose

Các loại nhựa đường được sử dụng do Công ty TNHH Nhựa đường Petrolimex cung cấp, bao gồm: Nhựa đường 60/70 và nhựa đường cải tiến (PMB-I, PMB-III).

2.2. Thành phần cấp phối

Đối tượng nghiên cứu là SMA có kích cỡ hạt lớn nhất danh định bằng 12,5 mm. SMA được thiết kế theo tiêu chuẩn AASHTO M325 với hàm lượng cốt liệu thô (lượng cốt liệu tích lũy trên sàng 4,75 mm) lần lượt là 71,2%, 72,4%, 74,2% 75,2% và 76,1%.

2.3. Mô tả thí nghiệm và thu thập dữ liệu

Các thí nghiệm Marshall được tiến hành tại Phòng thí nghiệm của Trường Đại học Công nghệ GTVT theo Tiêu chuẩn ASTM D6927, thực hiện trên các mẫu hình trụ, sử dụng búa đầm tiêu chuẩn và khuôn hình trụ. Cốt liệu được sấy khô đến khối lượng không đổi ở nhiệt độ 105^{0}C, sau đó được phối trộn theo cấp phối thiết kế và gia nhiệt trong tủ sấy đến nhiệt độ quy định. Nhựa đường được gia nhiệt nhằm đạt độ nhớt tương ứng là 170 ± 20 cP cho quá trình trộn và 280 ± 30 cP cho quá trình đầm nén. Cốt liệu thô, cốt liệu mịn và bột khoáng được trộn đều bằng máy trộn bê tông nhựa dung tích 30 lít, sau đó sợi cellulose được thêm vào trộn. Nhựa đường được đưa vào thùng trộn cuối cùng (Hình 2).

Hình 2. Máy trộn bê tông nhựa dung tích 30 lít

Khuôn chứa mẫu được đặt vào giá đỡ và tiến hành đầm với 50 chày cho mỗi mặt. Sau khi đầm, mẫu được để nguội đến nhiệt độ phòng. Các mẫu được đặt trên bề mặt phẳng, cứng ở nhiệt độ phòng trong thời gian 24 giờ (Hình 3). Sau thời gian này, mẫu được tháo ra khỏi khuôn.

Hình 3. Mẫu sau khi đầm

Các mẫu thí nghiệm được ngâm trong bể ổn nhiệt ở 60°C trong thời gian 40 phút, đồng thời duy trì nhiệt độ ở mức 60 ± 1°C (Hình 4). Sau đó, mẫu được lấy ra khỏi bể và tiến hành gia tải nén (Hình 5). Máy nén được gia tải với tốc độ không đổi 50 ± 5 mm/phút cho đến khi mẫu bị phá hoại. Hệ thống đo biến dạng LVDT được kết nối với bộ ghi tải trọng - biến dạng. Tổng cộng 144 dữ liệu về MS được thu thập.

Hình 4. Ngâm mẫu ở nhiệt độ 60 ± 1oC

Hình 5. Nén mẫu Marshall

3. CƠ SỞ DỮ LIỆU

Trên cơ sở gồm 144 dữ liệu thu được từ các thí nghiệm mô tả ở Mục 2, tiến hành xử lý và phân tích dữ liệu. Bộ dữ liệu gồm 9 tham số đầu vào là các yếu tố ảnh hưởng đến MS của SMA (ký hiệu là V_1,V_9) và một tham số đầu ra là MS. Bảng 1 trình bày các thông tin chi tiết về cơ sở dữ liệu.

Bảng 1. Phân tích cơ sở dữ liệu

Tên biến	Cốt liệu tích lũy trên sàng 4,75 mm	Khối lượng riêng ở 25°C	Độ kim lún ở 25°C	Điểm chớp cháy	Điểm hóa mềm	Hàm lượng nhựa 60/70	Hàm lượng nhựa PMB I	Hàm lượng nhựa PMB III	Hàm lượng sợi Cellulose	Độ ổn định Marshall
Đơn vị	%	g/cm3	0,1mm	°C	°C	%	%	%	%	kN
Ký hiệu	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	MS
Vai trò	Đầu vào	Đầu vào	Đầu vào	Đầu vào	Đầu vào	Đầu vào	Đầu vào	Đầu vào	Đầu vào	Đầu ra
Số lượng	144	144	144	144	144	144	144	144	144	144
Trung bình	74,335	1,032	54,021	265,951	74,340	1,739	0,903	3,808	0,260	9,074
Độ lệch chuẩn	1,610	0,003	6,633	27,493	17,807	2,825	2,271	3,271	0.170	1,230
Nhỏ nhất	71,17	1,027	48	248	48,1	0	0	0	0	6,4
25%	74,2	1,03	51	248	48,1	0	0	0	0,2	8,142
50%	75,2	1,034	51	248	86	0	0	5,5	0,3	9,315
75%	75,2	1,034	64,5	310	89	5,475	0	6,55	0,3	9,902
Lớn nhất	76,1	1,037	64,5	310	89	7	7,5	7,5	0,5	11,68

Sau khi thu thập và xử lý, bộ dữ liệu được chuẩn hóa bằng Min-Max Scaler và phân chia thành 2 phần: Phần dữ liệu huấn luyện (70%) và phần dữ liệu kiểm tra (30%). Trong đó, phần dữ liệu huấn luyện được sử dụng để đào tạo, phần dữ liệu kiểm tra được sử dụng để kiểm tra mô hình RF.

4. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

4.1. Mô hình rừng cây ngẫu nhiên (Random Forest - RF)

Rừng cây ngẫu nhiên (RF) là một mô hình học máy sử dụng thuật toán có giám sát, do Leo Breiman đề xuất [4]. Nguyên tắc hoạt động của RF là xây dựng nhiều cây quyết định độc lập từ các tập con dữ liệu được lấy mẫu ngẫu nhiên (bootstrap), rồi tổng hợp kết quả dự báo của các cây để đưa ra kết quả cuối cùng. Nguyên tắc hoạt động này giúp mô hình RF có khả năng giảm phương sai, hạn chế hiện tượng quá khớp và nâng cao độ ổn định so với các mô hình cây đơn lẻ. Mô hình RF có ưu điểm nổi bật là khả năng mô hình hóa các mối quan hệ phi tuyến phức tạp và xử lý rất hiệu quả dữ liệu có nhiễu. Ngoài ra, mô hình còn cho phép đánh giá mức độ quan trọng của các biến đầu vào, hỗ trợ phân tích và giải thích kết quả. Chính vì vậy, mô hình RF thường được sử dụng trong các bài toán dự báo về vật liệu, đặc biệt là vật liệu bê tông nhựa.

4.2. Phương pháp tìm kiếm theo lưới để tối ưu hóa các siêu tham số của mô hình máy học

Để nâng cao hiệu suất dự báo của mô hình, kỹ thuật tinh chỉnh siêu tham số (Hyperparameter tuning) thường được sử dụng. Đây là quá trình tìm kiếm và chọn lựa giá trị tối ưu cho các siêu tham số trong mô hình máy học. Có nhiều phương pháp tối ưu hóa siêu tham số, trong nghiên cứu này sử dụng phương pháp tìm kiếm theo lưới (Grid Search). Đầu tiên sẽ lựa chọn các siêu tham số quan trọng của mô hình để tối ưu hóa. Tiếp theo, lựa chọn các miền khảo sát và các giá trị mắt lưới cho từng siêu tham số. Tiến hành khảo sát có hệ thống tất cả các tổ hợp trong miền tìm kiếm tham số. Với mỗi tổ hợp, mô hình được huấn luyện và đánh giá bằng kỹ thuật xác thực chéo. Bộ siêu tham số tối ưu được lựa chọn dựa trên tiêu chí khả năng dự báo chính xác cao nhất, mô hình ổn định nhất. Phương pháp Grid Search cho phép lựa chọn siêu tham số một cách toàn diện và đáng tin cậy, đặc biệt phù hợp với các mô hình có số lượng siêu tham số không lớn.

4.3. Đánh giá hiệu suất dự báo của mô hình máy học

Trong nghiên cứu này, hiệu suất dự báo của các mô hình được đánh giá thông qua 3 chỉ tiêu thống kê, gồm hệ số xác định (R^2), sai số tuyệt đối trung bình (MAE) và sai số bình phương trung bình (RMSE). Các chỉ tiêu này được xác định theo công thức (1), (2), (3). Trong đó, R^2 có giá trị từ 0 đến 1, khi R^2 càng gần tới 1 khả năng dự báo của mô hình càng chính xác và ngược lại. Các sai số MAE, RMSE càng gần tới 0 thì hiệu suất dự báo của mô hình cao và ngược lại.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{k}\left(v_i - \overline{v}_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{k}\left(v_i - \overline{v}\right)^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\left(v_i - \overline{v}_i\right)^2} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\left(v_i - \overline{v}_i\right) \quad (3)$$

Trong đó: v_i là MS xác định từ thí nghiệm (giá trị thực tế); $\overline{v}_i$ là MS được dự báo bởi mô hình RF; k là số dữ liệu; $\overline{v}$ là giá trị trung bình của v_i.

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

5.1. Quá trình tối ưu hóa siêu tham số của mô hình RF bằng phương pháp tìm kiếm theo lưới

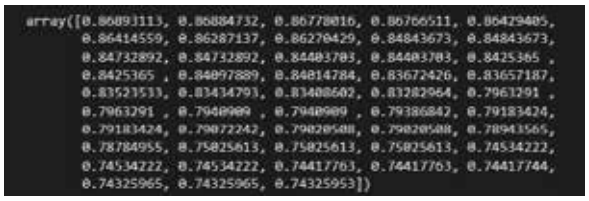
Trong nghiên cứu này, mô hình RF được tối ưu hóa siêu tham số bằng phương pháp tìm kiếm theo lưới nhằm nâng cao độ chính xác dự báo MS của SMA. Ba siêu tham số quan trọng được lựa chọn để tối ưu hóa là: n_estimators - số lượng cây quyết định trong mô hình; max_depth - độ sâu tối đa của cây và min_samplesleaf - số lượng mẫu tối thiểu tại mỗi nút lá. Các tham số còn lại của mô hình RF lấy giá trị mặc định. Các siêu tham số quan trọng là các tham số mà khi giá trị của nó thay đổi ảnh hưởng nhiều đến hiệu suất dự báo của mô hình.

Quá trình tối ưu các siêu tham số của mô hình được bắt đầu bằng cách chọn các miền tìm kiếm để khảo sát (Bảng 2). Việc lựa chọn các siêu tham số quan trọng cũng như miền khảo sát của chúng dựa trên kinh nghiệm thực tế, các nghiên cứu trước đây và thử nghiệm sơ bộ nhằm đảm bảo hiệu quả tính toán và tránh hiện tượng quá khớp.

Bảng 2. Miền giá trị khảo sát của các siêu tham số

STT	Siêu tham số	Miền tìm kiếm
1	n_estimators	[50, 100, 300, 500]
2	max_depth	[None, 5, 10]
3	min_samples_leaf	[1, 3, 5, 7]

Với miền tìm kiếm trên, tổng cộng 48 tổ hợp siêu tham số (4x3x4) được khảo sát. Đối với mỗi tổ hợp, mô hình RF được huấn luyện và kiểm tra thông qua phương pháp xác thực chéo 5 lần (k-fold cross-validation) trên tập dữ liệu huấn luyện nhằm đảm bảo tính khách quan và giảm sai lệch do phân chia dữ liệu. Kết quả dự báo của 48 mô hình RF sẽ được đánh giá dựa vào giá trị R^2 và Std (độ lệch chuẩn) của tập dữ liệu xác thực. R^2 càng gần đến 1, hiệu suất dự báo của mô hình càng tốt, Std càng nhỏ, mô hình càng ổn định. Các giá trị này được xác định bằng cách lấy trung bình của 5 lần xác thực chéo. Điều đáng chú ý ở đây là quá trình tối ưu hóa các siêu tham số chỉ thực hiện với tập dữ liệu đào tạo (70%) mà không thực hiện với tập dữ liệu kiểm tra (30%), có nghĩa là quá trình kiểm tra mô hình hoàn toàn không biết đến tập dữ liệu huấn luyện. Điều này làm tăng tính khách quan và khả năng dự báo chính xác của mô hình máy học. Kết quả khảo sát của các mô hình RF được thể hiện trên Hình 6.



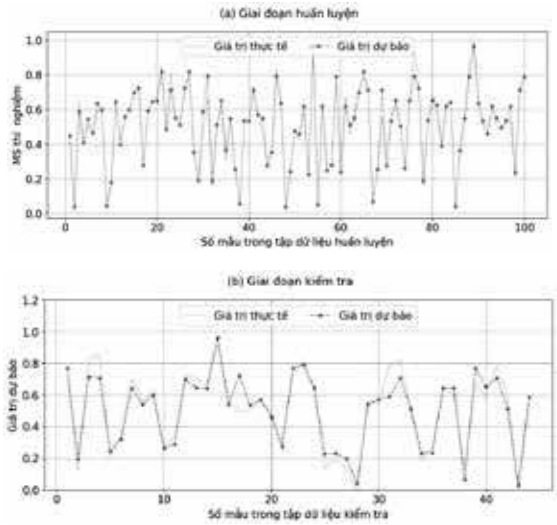
Hình 6. Kết quả khảo sát các mô hình RF ở tất cả các lần tìm kiếm theo giá trị R^2 của giai đoạn xác thực (xếp theo thứ tự từ lớn đến nhỏ)

Kết quả của 10 mô hình RF cho hiệu suất dự báo cao nhất được trình bày trong Bảng 3.

Kết quả trên Bảng 3 cho thấy mô hình RF tối ưu nhất (xếp hạng 1) có hiệu suất dự báo R^2 = 0,868931133 và Std = 0,081496254) được tìm thấy ở lần chạy thứ 34 với cấu trúc như sau: max_depth = 10; min_samples_leaf = 1, n_estimators = 300. Các tham số còn lại của mô hình lấy theo giá trị mặc định. Đây sẽ là mô hình RF tối ưu được đề xuất để dự báo MS của SMA và phân tích các yếu tố ảnh hưởng.

5.2. Kết quả dự báo độ ổn định Marshall bằng mô hình RF tối ưu

Hình 7 mô tả hiệu suất dự báo của mô hình RF thông qua sự chênh lệch hay trùng hợp giữa giá trị MS thí nghiệm với MS dự báo cho phần dữ liệu huấn luyện (Hình 7a) và phần dữ liệu kiểm tra (Hình 7b). Kết quả cho thấy, ở giai đoạn huấn luyện, hầu hết các giá trị MS dự báo trùng với giá trị MS thí nghiệm. Ở giai đoạn kiểm tra, kết quả có sự sai khác nhiều hơn (chẳng hạn mẫu số 3, 4, 17, 31, 32). Tuy nhiên, sự sai khác là không đáng kể. Vì vậy hiệu suất dự báo của mô hình RF đề xuất là chính xác.

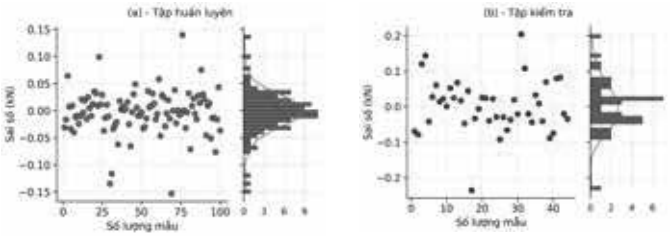


Hình 7. Biểu đồ chênh lệch giữa giá trị MS thí nghiệm với MS dự báo: a) - Giai đoạn huấn luyện; b) - Giai đoạn kiểm tra

Bảng 3. Kết quả tối ưu hóa các siêu tham số của 10 mô hình RF tối ưu nhất

Thứ tự lần chạy	Các tham số quan trọng của mô hình RF			Giai đoạn xác nhận		Xếp hạng
	max_depth	min_samples_leaf	n_estimators	R^2	Std	
0	None	1	50	0,862871366	0,07886004	7
1	None	1	100	0,864145592	0,078938582	6
2	None	1	300	0,868847317	0,081546194	2
3	None	1	500	0,867780158	0,081653355	3
4	None	3	50	0,848436725	0,081125898	9
5	None	3	100	0,84732892	0,079967046	10
32	10	1	50	0,862704287	0,079274829	8
33	10	1	100	0,864294046	0,078856315	5
34	**10**	**1**	**300**	**0,868931133**	**0,081496254**	**1**
35	10	1	500	0,867665109	0,081604324	4
36	10	3	50	0,848436725	0,081125898	9

Ngoài ra, kết quả dự báo của mô hình RF còn được mô tả trên biểu đồ phân phối sai số giữa các giá trị MS dự đoán và MS thí nghiệm (Hình 8). Trên Hình 8a thể hiện ở giai đoạn huấn luyện, kết quả dự báo của mô hình là đáng tin cậy (thể hiện ở sai số nhỏ), tập trung trong khoảng từ -0,05 đến 0,05 kN, chỉ có một vài mẫu có sai số 0,15 kN. Hình 8b thể hiện ở giai đoạn kiểm tra sai số có lớn hơn so với ở giai đoạn huấn luyện, sai số tập trung trong khoảng từ - 0,1 kN đến 0,1 kN. Tuy nhiên, các sai số này là nhỏ, cho thấy hiệu khả dự báo của mô hình RF đề xuất đáng tin cậy.



Hình 8. Biểu đồ sai số giữa giá trị MS dự báo với giá trị MS thực nghiệm: a) - Huấn luyện; b) - Kiểm tra

Kết quả mô hình RF dự báo MS của SMA đạt hiệu suất rất cao, sai số nhỏ, cụ thể là $R^2_{\text{kiểm tra}}$ = 0,9128; $MAE_{\text{kiểm tra}}$ = 0,0551 (kN), $RMSE_{\text{kiểm tra}}$ = 0,0729 (kN). Chi tiết kết quả dự báo được trình bày trong Bảng 4.

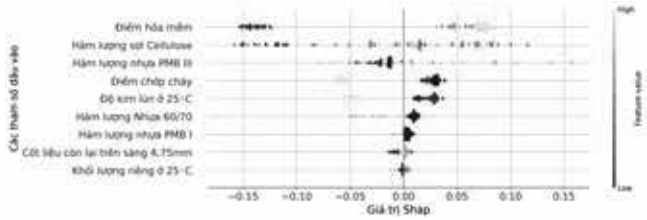
Bảng 4. Kết quả dùng mô hình RF để dự báo MS

Giai đoạn	**RMSE** (kN)	**MAE** (kN)	**R^2**
Huấn luyện	0,04024	0,0276	0,9681
Kiểm tra	0,0729	0,0551	0,9128

5.3. Phân tích mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đến độ ổn định Marshall của SMA bằng biểu đồ SHAP

Để phân tích tầm quan trọng và mức độ ảnh hưởng của các tham số đầu vào đến MS của SMA bằng mô hình RF thể hiện trên biểu đồ SHAP (Hình 9). Trục hoành biểu diễn giá trị SHAP, nếu càng lệch sang bên phải thể hiện đặc trưng đó có xu hướng làm tăng MS, nếu càng lệch về bên trái thể hiện xu hướng làm giảm MS. Màu sắc từ tím, xanh đến vàng tương ứng với mức độ ảnh hưởng từ thấp đến cao của từng đặc trưng, giúp làm rõ hơn mối quan hệ giữa giá trị đầu vào và tác động đến biến đầu ra. Hình 9 cho thấy, điểm hóa mềm có ảnh hưởng lớn nhất và ảnh hưởng tích cực đến MS, các giá trị cao (màu vàng) chủ yếu cho SHAP dương tức là MS tăng và ngược lại. Điều này hoàn toàn phù hợp với nguyên lý vật liệu bê tông nhựa. Nhựa đường là vật liệu nhớt, dẻo không có điểm chảy xác định rõ ràng, khi tăng nhiệt độ, nhựa đường trở nên mềm dẻo, giảm nhớt. Vì vậy, nhựa đường có điểm hóa mềm cao sẽ giúp làm "cứng" nhựa đường, giảm biến dạng dư, tăng khả năng đàn hồi của nhựa đường, do đó sẽ nâng cao độ ổn định và tăng khả năng chống biến dạng của hỗn hợp bê tông nhựa. Hàm lượng sợi cellulose cũng có đóng góp "dương" rõ rệt, không những có tác dụng chống chảy nhựa mà còn có khả năng đan chéo dọc ngang, hình thành kết cấu mạng không gian, đồng thời ngăn cản sự trơn trượt giữa các hạt, liên kết tổng thể hỗn hợp SMA. Ngược lại, độ kim lún ở 25°C có xu hướng cho SHAP âm khi giá trị lớn, điều này đã phản ánh chính xác tính chất của nhựa đường. Độ kim lún thể hiện độ đặc quánh nhựa đường, nhựa đường có độ kim lún cao khi gặp nhiệt độ cao sẽ dễ bị biến dạng, gây hiện tượng chảy nhựa, làm mất ổn định hỗn hợp SMA. Hàm lượng nhựa 60/70 và nhựa PMB I thể hiện tác động hai chiều, phản ánh tính phi tuyến và sự phụ thuộc vào mức hàm lượng tối ưu. Hàm lượng nhựa PMB III có xu hướng đóng góp dương khi tăng, cho thấy hiệu quả cải thiện tính đàn hồi và liên kết của vữa nhựa.

Các tham số liên quan đến cấp phối cốt liệu (hàm lượng cốt liệu còn lại trên sàng 4,75 mm) và khối lượng riêng ở 25°C có ảnh hưởng nhỏ hơn nhưng ổn định, phản ánh vai trò hỗ trợ của khung cốt liệu. Nhìn chung, kết quả SHAP phù hợp với nguyên lý vật liệu của SMA, trong đó đặc tính nhựa và ổn định vữa nhựa giữ vai trò chi phối MS.



Hình 9. Biểu đồ SHAP

6. KẾT LUẬN

Với kỹ thuật tối ưu hóa các siêu tham số bằng phương pháp tìm kiếm theo lưới, dựa trên bộ dữ liệu thu được từ thí nghiệm, nghiên cứu đã đề xuất được một mô hình RF để dự báo MS của SMA. Kết quả dự báo của mô hình RF rất chính xác thể hiện ở giá trị R^2 rất cao, sai số nhỏ ở cả hai giai đoạn huấn luyện và kiểm tra, cụ thể là ở giai đoạn huấn luyện: $R^2_{\text{huấn luyện}}$= 0,9681; $MAE_{\text{huấn luyện}}$ = 0,0276 (kN), $RMSE_{\text{huấn luyện}}$ = 0,04024 (kN); ở giai đoạn kiểm tra: $R^2_{\text{kiểm tra}}$= 0,9128; $MAE_{\text{kiểm tra}}$ = 0,0551 (kN), $RMSE_{\text{kiểm tra}}$ = 0,0729 (kN). Thông qua biểu đồ giá trị SHAP, mô hình RF cũng dự báo được mức độ ảnh hưởng của các tham số đầu vào đến MS, kết quả là điểm hóa mềm, hàm lượng sợi cellulose có ảnh hưởng lớn nhất và ảnh hưởng dương đến MS, trong khi độ kim lún ở 25°C có ảnh hưởng âm đến MS. Các tham số hàm lượng cốt liệu còn lại trên sàng 4,75 mm và khối lượng riêng ở 25°C có ảnh hưởng nhỏ nhất đến MS. Nhìn chung, kết quả SHAP phù hợp với nguyên lý vật liệu của SMA.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] A. I. Al-Hadidy and Y. Tan. Mechanistic analysis of ST and SBS-modified flexible pavements. Construction and Building Materials, vol. 23, no. 8, pp. 2941-2950, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.023.

[2] S. K. Govindaraju, N. Gopanahally Chandrasekharaiah, G. Ganesh, S. Siddaraju, U. Mallaiah Sudhamani and H. K. Ramaraju. Laboratory performance of sustainable stone matrix asphalt mixtures utilizing electric arc furnace slag and waste plastic. Journal of Road Engineering, vol. 5, no. 3, pp. 343-352, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.jreng.2025.01.003.

[3] H.-V. T. Mai, M. H. Nguyen and H.-B. Ly. Development of machine learning methods to predict the compressive strength of fiber-reinforced self-compacting concrete and sensitivity analysis. Construction and Building Materials, vol. 367, p. 130339, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130339.

[4] L. Breiman. Random forests. Machine learning, vol. 45, no. 1, pp. 5-32, 2001.

[5] H.-L. Nguyen et al. Development of Hybrid Artificial Intelligence Approaches and a Support Vector Machine Algorithm for Predicting the Marshall Parameters of Stone Matrix Asphalt. Applied Sciences, vol. 9, no. 15, Aug. 2019, doi: 10.3390/app9153172.

■Ngày nhận bài: 09/3/2026 ■Ngày sửa bài: 24/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 09/4/2026

Nghiên cứu thuật toán lọc và phân cụm mục tiêu trên biển cho hệ thống radar hàng hải

Research on algorithms for sea target filtering and clustering in marine radar systems

> TS NGUYỄN MẠNH CƯỜNG*, THS VŨ VĂN RỰC
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email: nguyenmanhcuong@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu về ảnh mục tiêu radar hàng hải, trong đó đi sâu vào nghiên cứu thuật toán ước lượng điểm mốc đại diện dựa trên ảnh radar và đề xuất phương pháp sử dụng các tham số chuyển động của các mục tiêu trên biển. Đề xuất một thuật toán để phân lớp toàn bộ ảnh quét radar, tương ứng với giá trị cường độ tín hiệu nằm trong khoảng tín hiệu nhỏ nhất và lớn nhất nhằm tính toán điểm mốc đại diện của mục tiêu trên biển với độ chính xác tương đối. Sai số trung bình bình phương của điểm mốc đại diện ước lượng được so sánh với tín hiệu nhận được lớn nhất theo khoảng cách và phương vị trên màn hình. Trên cơ sở điểm mốc đại diện của mục tiêu và các tham số chuyển động của mục tiêu đề ra phương pháp phân cụm mục tiêu và những đặc trưng của mục tiêu, đề xuất thuật toán bám mục tiêu cải thiện hiệu quả trong việc sử dụng các đặc trưng của mục tiêu phức tạp để nâng cao chất lượng lọc bám mục tiêu đa điểm chói trên biển của radar hàng hải. Phương pháp phân cụm và lọc bám mục tiêu sử dụng thuật toán cung cấp sai số trung bình nhỏ nhất khi xác định vị trí mục tiêu theo cự ly và theo phương vị.

Từ khóa: Radar hàng hải; điểm mốc đại diện; phân cụm mục tiêu; lọc mục tiêu; bám mục tiêu.

ABSTRACT

This paper presents research on marine radar target imagery, focusing on an algorithm for estimating the representative mark point based on radar images and proposing a method that utilizes the moving parameters of sea targets. An algorithm is developed for layering the entire radar scan image, corresponding to the minimum and maximum signal strength values, to calculate the representative mark point of a sea target with relative accuracy. The mean square error of the estimated representative mark point is compared with the maximum received signal in terms of range and azimuth on the screen. Based on the representative mark point and motion parameters, a method for target clustering, as well as for filtering targets and their characteristics is proposed. Furthermore, a target tracking algorithm is presented and the superiority of using the characteristics of complex targets is evaluated to improve the quality of multi-point luminosity target tracking. The tracking method using this algorithm provides the smallest average error when determining the target's position in terms of range and azimuth.

Keywords: Marine radar; representative mark point; target clustering; filtering target; Tracking target.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh giao thông hàng hải toàn cầu ngày càng gia tăng đột biến, việc đảm bảo an toàn và tối ưu hóa hiệu quả hoạt động đã trở thành một thách thức lớn. Đối với số lượng, chủng loại mục tiêu lớn và ảnh hưởng từ các yếu tố môi trường nhiễu biển đòi hỏi các thông tin cung cấp về mục tiêu phải nhanh, liên tục và có độ chính xác cao, trong đó kích thước và quỹ đạo mục tiêu mang nhiều ý nghĩa thực tiễn để tránh va và đảm bảo an toàn hàng hải [1, 2].

Việc lọc, bám quỹ đạo mục tiêu trên biển hiện tại được thực hiện thông qua việc nâng cao độ chính xác của các máy thu radar

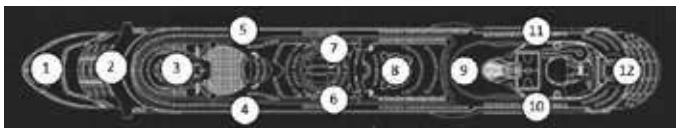
hoặc ứng dụng các mô hình thuật toán xử lý quỹ đạo để đảm bảo độ chân thực của quỹ đạo lọc, bám theo thời gian thực [3, 4]. Cả hai cách tiếp cận trên sẽ tồn tại những nhược điểm như tính chất đa điểm đối với một mục tiêu biển có kích thước xác định. Các thuật toán lọc, bám theo các dạng khác nhau sẽ cho ra các hình ảnh mục tiêu và dạng quỹ đạo khác nhau [5, 6].

Tuy ảnh radar có độ phân giải cao nhưng trong điều kiện quan sát thực tế nhiễu nền thường làm biến dạng mạnh hình ảnh mục tiêu quan sát được, vì vậy cần phải phát triển các thuật toán xử lý ảnh radar nhằm thu được các tham số tọa độ mục tiêu chính xác, ổn định nhằm xử lý thông tin radar và các tham số chuyển động của các mục tiêu trên biển [7]. Bài báo giải quyết vấn đề đó bằng việc xác định điểm mốc đại diện của hình ảnh mục tiêu, xử lý phân lớp ảnh mục tiêu sau đó dùng thuật toán K-means để ước lượng và phân cụm điểm chói mục tiêu làm cơ sở cho thuật toán lọc, bám quỹ đạo mục tiêu.

2. MỤC TIÊU TRÊN BIỂN VÀ ĐIỂM MỐC ĐẠI DIỆN MỤC TIÊU

2.1. Mô hình tín hiệu phản xạ mục tiêu trên biển

Khi thu tín hiệu phản xạ trở về, biên độ và pha của từng tia sóng phản xạ luôn có sự thay đổi phụ thuộc vào hình dạng, kích thước, vị trí của mục tiêu và yếu tố tác động của môi trường xung quanh. Với mục tiêu có kích thước lớn, tâm tán xạ không phải là một điểm, mà sẽ là một tập hợp các phần tử phản xạ nhất định, phụ thuộc vào diện tích phản xạ hiệu dụng các bề mặt phản xạ thành phần, bước sóng của trạm radar, khoảng cách từ anten radar tới các bề mặt phản xạ thành phần. Việc thiết lập mô hình tín hiệu có ích phản xạ từ mục tiêu phức tạp có thể thực hiện bằng cách tính toán các tín hiệu phản xạ từ các điểm "sáng nhất" của diện tích phản xạ hiệu dụng mục tiêu, mà được biểu diễn dưới dạng các phản xạ điểm (được gọi là điểm chói).



Hình 1. Mô hình tàu cỡ trung bình phân chia thành 12 điểm phản xạ

Để mô tả tín hiệu phản xạ, đầu tiên, cần thiết lập vector tọa độ các điểm chói r_i trong hệ tọa độ liên kết với mục tiêu, vector pháp tuyến của diện tích phản xạ hiệu dụng đối với từng điểm chói thứ n_i, các góc giới hạn quan sát a_i, vector bán kính r_o hướng tới mục tiêu và các góc không gian của mục tiêu so với vị trí ăng-ten. Với trường hợp tổng quát là không gian ba chiều, sẽ có:

$$f(r_i, n_i, a_i)\begin{cases} r_i = (x_i, y_i, z_i) \\ n_i = (x_{ni}, y_{ni}, z_{ni}) \\ a_i = (a_1 ... a_n) \end{cases} \quad (1)$$

khi chuyển tọa độ ghép với mục tiêu sang tọa độ gắn với đầu đo radar bằng ma trận dạng:

$$F(a,b,c) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(c) & \sin(c) & 0 \\ -\sin(c) & \cos(c) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(b) & 0 & -\sin(b) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(b) & 0 & \cos(b) \end{pmatrix} \quad (2)$$

Trong đó: *i, n, a, b* và *c* tương ứng là chỉ số của điểm chói và số lượng các điểm chói các góc trong không gian ba chiều của mục tiêu.

2.2. Đặc điểm của mục tiêu trên biển

Điều kiện để radar quan trắc được mục tiêu thì kích thước vật lý của xung thăm dò của radar phải có cùng kích thước vật lý của điểm chói. Độ phân giải được xác định bởi hai tham số là độ dài xung và độ dài của cung tương ứng với độ rộng búp sóng anten trong mặt phẳng phương vị l_θ

Trong đó:

$$l_\theta = \theta \times r \quad (3)$$

và độ phân giải có dạng:

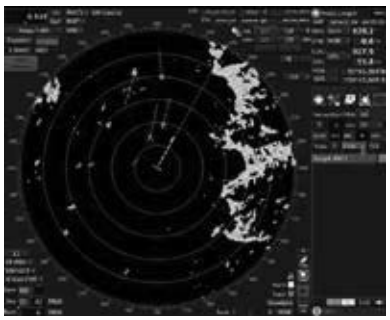
$$\delta \simeq \tau \times l_\theta = f(r) \quad (4)$$

Tính chất và hiện tượng đa điểm dấu phát hiện của mục tiêu khi bị phát hiện và theo dõi bởi radar xác định mục tiêu nào đó sẽ phụ thuộc vào dải cự ly quan trắc. Nghĩa là ở vùng cự ly cận xa, trung bình và gần, khi thỏa mãn điều kiện $l_{mt} \gg \max(\tau, \theta, \lambda)$ mục tiêu radar có thể trở thành mục tiêu phức tạp với đa điểm dấu phát hiện. Còn ở dải cự ly xa, điều kiện trên không thỏa mãn, mục tiêu sẽ chuyển thành lớp các mục tiêu điểm.

3. CÁC THAM SỐ VÀ THUỘC TÍNH CỦA ĐIỂM MỐC ĐẠI DIỆN

3.1. Xử lý ảnh mục tiêu trên biển

Trong phạm vi quan sát của đài radar số lượng mục tiêu rất lớn, trong đó đa số là tàu cá, tàu hàng, tàu container... Do kích thước các mục tiêu khác nhau, dẫn đến kích thước ảnh trên màn hình cũng khác nhau. Ảnh của các mục tiêu phân bố trên nhiều ô cự ly và ô phương vị với màu sắc khác nhau dựa trên mức năng lượng phản xạ về. Giả thiết màn hình đài radar có kích thước 18.500x1.650 điểm ảnh, tương ứng với 18.500 ô cự ly độ phân giải $\Delta r = 10m$ và 1.650 ô phương vị độ phân giải $\Delta\beta = 0,22^o$. Hình 2 mô tả hình ảnh màn hình radar trong thực tế.



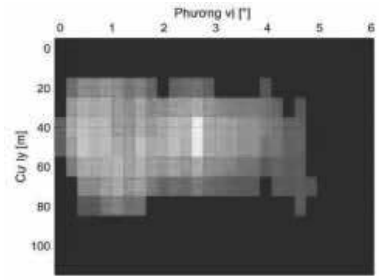
Hình 2. Màn hình radar

Để phân tích một đặc tính của các loại mục tiêu trong vùng quan sát, bài báo sử dụng 3 lớp mục tiêu đại diện cho các loại mục tiêu trong vùng quan sát. Dữ liệu các mục tiêu này được lấy liên tiếp 15 chu kỳ quét của đài radar. Trên cơ sở kết quả phân tích 3 lớp mục tiêu này và sẽ đề xuất phương án xử lý thời gian thực cho tất cả các mục tiêu trong vùng không gian quan sát của đài radar.

Các phần tử của ma trận điểm dấu $A_{nm}[n, m, \rho_{nm}]$, trong đó $n = 1, 2, ... N$; $m = 1, 2, ... M$ là một điểm ảnh nằm ở ô cự ly thứ *n* có tọa độ $x_n = n \times \Delta r$ và ô phương vị thứ *m* có tọa độ dài $y_m = m \times \Delta\beta \times x_n$ có giá trị cường độ ρ_{nm} trong khoảng từ 0 đến 255.

Mỗi dạng mục tiêu sẽ có kích thước ảnh khác nhau phụ thuộc vào kích thước vật lý của mục tiêu, cự ly của mục tiêu. Đối với các mục tiêu sử dụng để khảo sát, tàu cá có kích thước nhỏ chiếm số lượng điểm ảnh ít nhất (từ 30 đến 60 điểm ảnh), tàu hàng có kích thước trung bình tương ứng với số lượng điểm ảnh ở mức trung bình (từ 100 đến 150 điểm ảnh), tàu container có kích thước lớn bình chiếm số lượng điểm ảnh nhiều nhất (từ 300 đến 400 điểm ảnh). Sau mỗi chu kỳ quét kích thước ảnh mục tiêu và giá trị cường độ các điểm ảnh thay đổi do sự thăng giáng của tín hiệu phản xạ từ mục tiêu radar.

Mục tiêu phức tạp là mục tiêu có nhiều điểm chói (là tập hợp các giá trị A_{ij} có cường độ cực trị so với vùng lân cận). Trên Hình 3 là ảnh mục tiêu radar nằm tương ứng ở các ô cự ly trên màn hình.



Ảnh mục tiêu radar

STT	1181	1182	1183	1184	1185	1186	1187	1188	1189	1190	1191	1192	1193	1194	1195	1196	1197	1198	1199	1200	1201	1202	1203
4537	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4538	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4539	0	31	45	44	56	48	35	42	26	0	26	30	33	25	0	0	0	0	20	0	0	0	0
4540	0	58	76	72	82	60	49	66	44	46	60	63	75	54	45	39	38	38	33	26	0	21	0
4541	26	73	94	87	90	62	55	82	61	76	90	87	109	75	68	59	52	52	41	36	25	26	0
4542	25	65	95	90	91	79	64	93	73	80	93	84	108	72	65	59	48	48	35	34	25	26	0
4543	0	40	75	73	83	89	65	86	63	57	67	57	75	51	46	42	34	34	22	27	22	24	0
4544	0	0	45	44	61	73	52	61	38	28	33	29	39	29	26	24	21	21	0	21	20	23	20
4545	0	0	21	21	35	42	32	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0
4546	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4547	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ma trận điểm dấu tương ứng

Hình 3. Ảnh mục tiêu và ma trận điểm dấu tương ứng

3.2. Ước lượng tâm các vùng chói và điểm mốc đại diện mục tiêu

Các công trình nghiên cứu sử dụng ảnh radar nhị phân hóa để xác định điểm mốc đại diện mục tiêu mà không tính đến trọng số về mức cường độ mỗi điểm ảnh (cường độ tín hiệu phản xạ từ mục tiêu) [8, 9]. Tâm ảnh nhị phân là tâm hình học của mặt cắt ảnh 3D theo mức cường độ xác định. Tâm này có xu hướng thay đổi mạnh khi hình dạng mặt cắt bị thay đổi, hình dạng này đối với mục tiêu biển thay đổi tương đối nhanh qua các chu kỳ.

Giả sử ảnh radar được chia thành K lớp, tồn tại L vùng chói thuộc một mục tiêu ký hiệu là $D_1, D_2,...D_L$ với mức cường độ tương ứng ký hiệu là $\rho_1, \rho_2,... \rho_L$, tọa tâm các vùng chói được ký hiệu tương ứng là $C_1(x_1, y_1), C_2(x_2, y_2),...C_l(x_l, y_l)... C_L(x_L, y_L), l=1,2,...,L$. Như vậy, giá trị cường độ của một lớp thứ i được tính theo công thức:

$$\rho_i = \rho_{\min} + i\Delta_K \quad (5)$$

Trong đó:

$$\Delta_K = \frac{\rho_{\max} - \rho_{\min}}{K}; i = 1,2,...,K$$

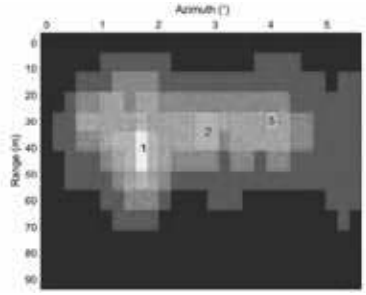
$\rho_{\min}$ là giá trị cường độ nhỏ nhất khác 0 của ảnh;

$\rho_{\max}$ là giá trị cường độ lớn nhất của ảnh.

Như vậy, điểm mốc đại diện mục tiêu được tính khi sử dụng tâm các vùng chói và giá trị cường độ ký hiệu là $C(x_c, y_c)$. Tọa độ trọng tâm ảnh radar được tính khi sử dụng toàn bộ tọa độ điểm ảnh và giá trị cường độ điểm ảnh của tất cả các điểm ảnh thuộc mục tiêu ký hiệu là $C_0(x_0, y_0)$.

Phương pháp ước lượng điểm mốc đại diện mục tiêu sử dụng các vùng chói với giả thiết đã phân cụm thành công các vùng chói vào một mục tiêu, được chia làm 3 bước:

- Bước 1: Xác định kích thước, số lượng các vùng chói bằng cách phân lớp ảnh mục tiêu. Trên Hình 4 minh họa một ảnh mục tiêu được chia thành 6 lớp (các lớp được phân biệt bằng các màu khác nhau), lớp 1 không có vùng chói (do giá trị cường độ là nhỏ nhất), các lớp còn lại có 3 vùng chói (được đánh số từ 1 đến 3). Như vậy, các vùng chói là tập hợp các điểm nằm liền nhau có cùng cường độ và lớn hơn cường độ các điểm ảnh xung quanh.



Hình 4. Số lượng và kích thước vùng chói đối với tàu container

Để thỏa mãn yêu cầu phân lớp, trước tiên phải gán mỗi lớp 1 giá trị. Sau đó, chuyển các giá trị cường độ điểm ảnh của ma trận ảnh mục tiêu về giá trị các lớp theo phương thức đánh số các lớp từ 1 đến K, các lớp có giá trị cường độ tương ứng là $Class[1]$ từ ρ_{min} đến ρ_1, $Class[i]$ từ ρ_{i-1} đến ρ_i,...$Class[K]$ từ ρ_{K-1} đến ρ_{max}. Chuyển ma trận điểm ảnh $A_{nm}(n, m, \rho_{nm})$ sang ma trận giá trị lớp theo phương thức sau: Nếu cường độ điểm ảnh $\rho_{nm} \in Class[i]$ thì gán giá trị điểm ảnh $A_{nm}(n, m, \rho_{nm}) = AT_{nm}(n, m, i)$, trong đó $n=1...N$, $m=1... M$, $i=1...K$. Khi đó, ma trận $AT_{nm}(n, m, i)$ là ma trận mã hóa bởi các lớp, các điểm ảnh khi đó sẽ có các giá trị cường độ tương ứng là ρ_i.

- Bước 2: Ước lượng tâm các vùng chói. Tọa độ tâm của các vùng chói được xác định như xác định tâm của ảnh nhị phân như mô tả dưới đây:

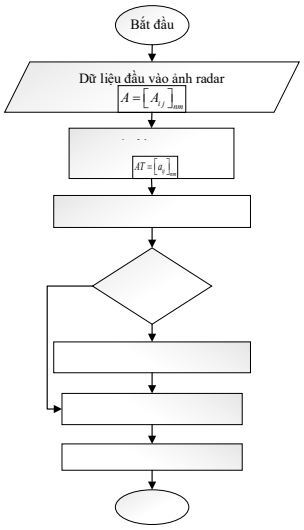
$$x_l \approx \frac{1}{S_l} \sum_{(i,j \in D_l)} x_i p_l(i); y_l \approx \frac{1}{S_l} \sum_{(i,j \in D_l)} y_j p_l(j); S_l = \sum_{(i,j \in D_l)} 1 \quad (6)$$

Với S_l là tổng số điểm ảnh thuộc miền D_l, $p_l(i)$ là tổng số điểm ảnh theo cột i thuộc miền D_l, $p_l(j)$ là tổng số điểm ảnh theo hàng thứ j thuộc miền D_l. Như vậy, biểu thức (6) áp dụng ước lượng tọa độ tâm các vùng chói của ảnh radar sau khi phân lớp.

- Bước 3: Phân cụm và ước lượng tọa độ của mục tiêu sử dụng tâm các vùng chói và mức cường độ vùng. Sau khi xác định được tọa độ tâm của các vùng chói $D_1, D_2,...D_L$, điểm mốc đại diện của mục tiêu radar $C(x_c, y_c)$ được xác định theo công thức sau:

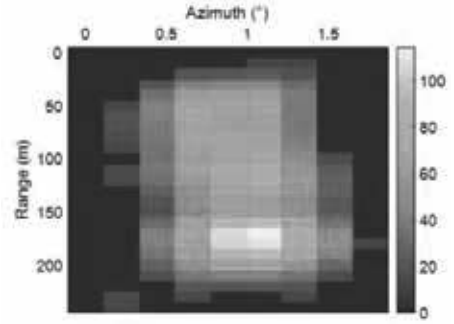
$$x_c = \frac{\sum_{l=1}^{L} x_l \times \rho_l}{\sum_{l=1}^{L} \rho_l}; y_c = \frac{\sum_{l=1}^{L} y_l \times \rho_l}{\sum_{l=1}^{L} \rho_l} \quad (7)$$

Lưu đồ thuật toán xử lý dữ liệu radar theo tia (tuần tự theo từng góc phương vị) được trình bày trên Hình 5.

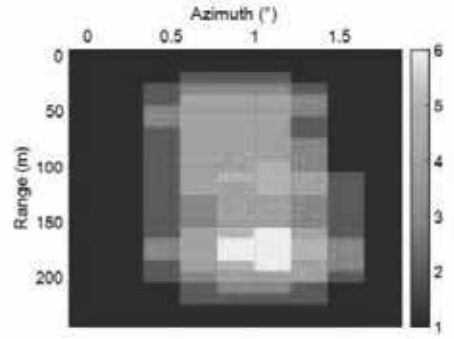


Hình 5. Lưu đồ thuật toán tìm vùng cực trị

Căn cứ vào phân tích 3 nhóm mục tiêu, đề xuất chia ảnh radar thành 6 lớp, mỗi lớp cách nhau 30 đơn vị giá trị cường độ, với giá trị cường độ nhỏ nhất ρ_{min} = 20, giá trị cường độ lớn nhất ρ_{max} = 200. Giá trị số lớp và khoảng cách các lớp có thể thay đổi trong quá trình tính toán tùy thuộc vào ảnh mục tiêu radar. Kết quả phân lớp ảnh radar được chỉ ra trên Hình 6 đối với mục tiêu có nhiều vùng chói khác nhau.



Ma trận ảnh gốc



Ma trận ảnh sau phân lớp

Hình 6. Vùng chói của tàu mục tiêu

4. THUẬT TOÁN PHÂN CỤM VÀ LỌC BÁM MỤC TIÊU TRÊN BIỂN

4.1. Thuật toán phân cụm đa điểm chói mục tiêu

Thuật toán phân cụm K-means được ứng dụng trong thống kê toán để xác định các ước lượng có độ hợp lý cực đại. Mỗi vòng lặp của thuật toán luôn trước tiên tính toán giá trị kỳ vọng của hàm hợp lý, sau đó xác định ước lượng hợp lý cực đại khi tăng các giá trị kỳ vọng. Giá trị cực đại này sẽ được sử dụng cho vòng lặp tiếp sau. Vòng lặp sẽ chỉ dừng khi hội tụ. Bản chất của thuật toán K-means là ở chỗ thực hiện cực tiểu hóa tổng *J* bình phương độ lệch của các điểm x_i so với tâm cụm v_k, nghĩa là:

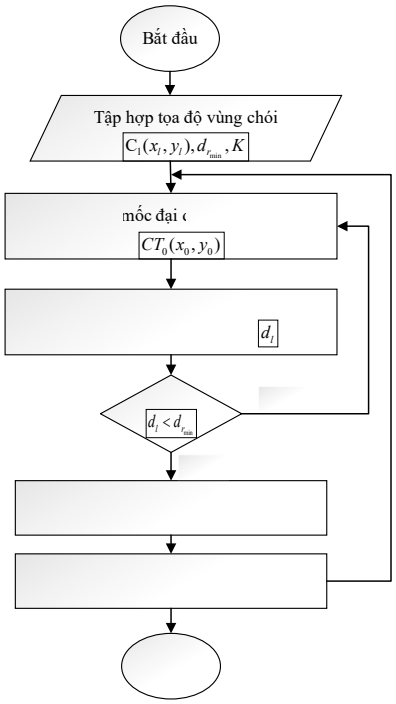
$$J = \sum_{k=1}^{K} \sum_{x_i \in S_k} \rho^2(x_i, v_k) \rightarrow \min(S) \quad (8)$$

Với K là số các cụm, ρ là hàm tính độ lệch của các điểm.

Như vậy, với thuật toán *K* - means, trong từng vòng lặp, tâm cụm v_k đã được xác định ở vòng lặp trước sẽ được tính lại $v_k \rightarrow v'_k$ đối với từng cụm; sau đó, các vector con lại được phân lại thành các cụm mới để sao cho:

$$x_i \in S'_k \text{ nếu } \rho(x_i, v_k) \rightarrow \min(\mathrm{k} = 1 \div \mathrm{K}) \quad (9)$$

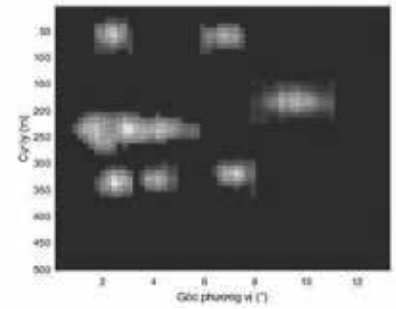
Thuật toán sẽ kết thúc tại vòng lặp xác định nào đó khi tâm cụm không bị thay đổi trạng thái. Trong thuật toán K-means mỗi cụm điểm chói được đặc trưng bởi một tâm. Tâm là điểm đại diện nhất cho một cụm và có giá trị bằng trung bình của toàn bộ các quan sát nằm trong cụm. Tâm đại điện của cụm được tính theo công thức (7) của tất cả các điểm nằm trong cụm đó. Lưu đồ thuật toán được thể hiện trên Hình 7.



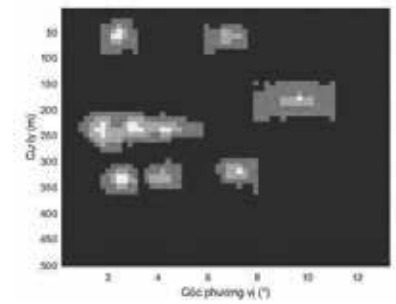
Hình 7. Lưu đồ thuật toán K-means phân cụm điểm chói

4.2. Kết quả phân cụm và lọc bám mục tiêu theo thuật toán K-means

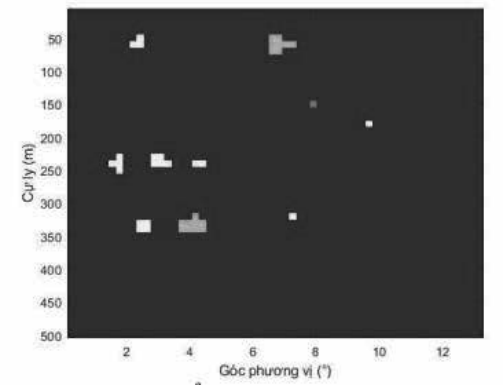
Kết quả phân cụm điểm chói sử dụng ảnh radar gồm 6 mục tiêu được thể hiện trên Hình 8, trong đó có 3 ảnh mục tiêu có kích thước nhỏ dạng tàu cá và 3 ảnh mục tiêu có kích thước lớn hơn dạng tàu hàng. Quá trình xử lý phân lớp ảnh thành 6 mức cường độ, các vùng chói của mục tiêu xuất hiện có kích thước, hình dạng và mức năng lượng khác nhau trên Hình 8c. Các điểm chói mục tiêu nằm rải rác trong vùng quan sát, từ đó tiếp tục thực hiện thuật toán phân cụm điểm chói mục tiêu.



a) - Ảnh mục tiêu radar



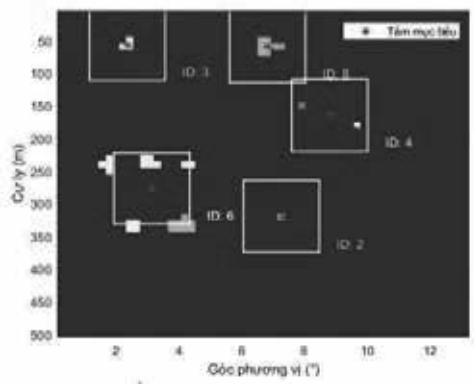
b) - Kết quả xử lý phân lớp theo cường độ



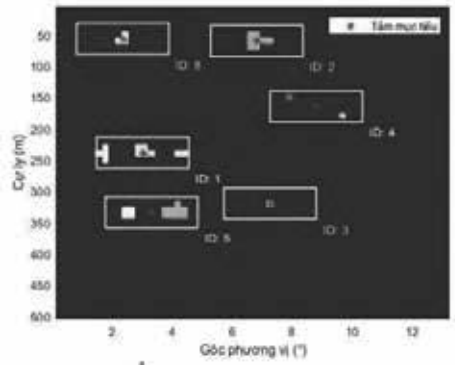
c) - Các điểm chói mục tiêu

Hình 8. Kết quả xử lý phân lớp ảnh radar theo cường độ

Hình 9a thể hiện kết quả phân cụm điểm chói mục tiêu theo thuật toán K-means với kích thước cửa sổ 10x10 tương ứng theo cự ly 10 ô cự ly và 10 ô phương vị. Hình 9b là kết quả K-means với kích thước 5x16 (Hình 9b) tức là 5 ô cự ly, 16 ô phương vị. Ảnh phân cụm điểm chói mục tiêu theo cửa sổ hình vuông kích thước 10x10 gây ra hiện tượng phân cụm nhầm các điểm chói mục tiêu có ID 1 và ID 5 dẫn đến xuất hiện mục tiêu ID 6. Trong khi đó sử dụng các ô cửa sổ hình chữ nhật có kích thước 5x16 ô việc phân cụm theo thuật toán K-means giúp tách các mục tiêu đơn lẻ.



a) - Cửa sổ bám mục tiêu kích thước 10x10



b) - Cửa sổ bám mục tiêu kích thước 5x16

Hình 9. Kết quả áp dụng thuật toán K-means cho 6 mục tiêu

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã thực hiện phân tích ảnh các mục tiêu đại diện cho ba lớp tàu chính trong vùng quan sát của trạm radar. Đối với các mục tiêu độ lệch chuẩn của điểm mốc đại diện theo cự ly và phương vị theo các quy tắc chia lớp khác nhau là khác nhau. Chia 6 lớp mục tiêu phù hợp với bài toán xử lý thời gian thực toàn màn hình radar và cho kết quả xác định điểm mốc đại diện có độ lệch chuẩn tương đối nhỏ, từ khoảng 0,5 đến 1,5 ô theo cự ly và phương vị, phù hợp với độ phân giải màn hình radar trong thực tế. Giá trị cường độ tín hiệu nhỏ nhất là 20, lớn nhất là 200 kết quả tính điểm mốc đại diện của mục tiêu đáp ứng độ chính xác tương đối tốt, sai số trung bình bình phương ước lượng điểm mốc đại diện mục tiêu so với tâm năng lượng nhỏ hơn 1 cell theo cự ly và nhỏ hơn 2 cell theo phương vị.

Thuật toán đề xuất xử lý ảnh radar có nhiều ưu điểm hơn so với các phương pháp nhị phân ảnh radar. Ngoài việc xác định điểm mốc đại diện ảnh radar còn mang nhiều thông tin chuyển động của mục tiêu nhằm nâng cao chất lượng lọc bám quỹ đạo mục tiêu trên biển. Thuật toán xác định vùng chói của các mục tiêu trên biển có thể phân loại được các các loại mục tiêu phức tạp khác nhau, giúp sĩ quan vận hành có thể phán đoán tình huống và quỹ đạo dựa vào điểm mốc đại diện mang đặc trưng về năng lượng phản xạ. Một trong những đặc trưng quan trọng là số điểm chói, năng lượng các vùng chói có thể có thể ước lượng hướng dọc trục thân tàu khi mục tiêu di chuyển.

Ưu điểm của thuật toán K-means là đơn giản, hiệu quả. Hạn chế của thuật toán là phải xác định được số lượng cụm cụ thể ở đầu vào thuật toán, không thích hợp cho bài toán phân cụm khi dữ liệu chưa xác định rõ số cụm hoặc các cụm có kích thước khác nhau. Thuật toán K-means chỉ tính đến khoảng cách giữa tâm cụm và tâm các vùng chói mà không sử dụng các đặc trưng được khai thác. Để giải quyết các vấn đề trên, đề xuất áp dụng thuật toán phân cụm dữ liệu dựa trên logic mờ và bộ lọc Kalman với các đặc trưng của mục tiêu đa điểm chói sẽ tiếp tục được nghiên cứu và trình bày ở các công trình tiếp sau.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT25-26.76.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyễn Mạnh Cường, Hoàng Thọ Tu, Nguyễn Trọng Lưu, Nguyễn Ngọc Đông. Lý thuyết và xử lý tín hiệu ra đa. Học viện Kỹ thuật Quân sự, NXB. Quân đội, 2022.

[2] Ahmadreza Amirzadeh and Ali Karimpour. An interacting Fuzzy-Fading-Memory-based Augmented Kalman Filtering method for maneuvering target tracking. Digital Signal Processing, 23(5), pp. 1678-1685, 2013.

[3] Hamza Bounaceur, Ali Khenchaf and Jean-Marc Le Caillec. Analysis of small sea-surface targets detection performance according to airborne radar parameters in abnormal weather environments. Sensors, 22(9), p. 3263, 2022.

[4] Lan Du and L Bin. SAR Image Target Detection Algorithm Based On Convolution Neural Network. Journal of Electronics & Information Technology, 38, pp. 3017-3025, 2016.

[5] Jaya Shradha Fowdur, Marcus Baum and Frank Heymann. Real-world marine radar datasets for evaluating target tracking methods. Sensors, 21(14), p. 4641, 2021.

[6] Rosa Gonzales-Martinez, et al. Hyperparameters tuning of faster R-CNN deep learning transfer for persistent object detection in radar images. IEEE Latin America Transactions, 20(4), pp. 677-685, 2022.

[7] Mingjie Lv and Chen Zhou. Study on sea clutter suppression methods based on a realistic radar dataset. Remote Sensing, 11(23), p. 2721, 2019.

[8] B Pandeeswari, J Sutha and M Parvathy. A novel synthetic aperture radar image change detection system using radial basis function-based deep convolutional neural network. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 12(1), pp. 897-910, 2021.

[9] Chen, Z.; Guo, H.; Yang, J.; Jiao, H.; Feng, Z.; Chen, L.; Gao, T. Fast vehicle detection algorithm in traffic scene based on improved SSD, Measurement, 201, 2022.

■Ngày nhận bài: 09/3/2026 ■Ngày sửa bài: 24/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 09/4/2026

Chỉ số HPR và chủ trương thí điểm phát triển nhà ở thương mại giá phù hợp tại Việt Nam

The Housing Price-to-Income Ratio (HPR) and the Pilot policy for Affordable commercial housing development in Vietnam

> PGS.TS.KTS PHẠM TRỌNG THUẬT
Bộ môn Kiến trúc Nhà ở, Trường Đại học Kiến trúc TP.HCM
Email: thuat.phamtrong@uah.edu.vn

TÓM TẮT

Trong những năm gần đây, giá nhà tại các đô thị lớn của Việt Nam tăng nhanh hơn đáng kể so với thu nhập của người dân, làm suy giảm khả năng tiếp cận nhà ở của nhóm thu nhập trung bình. Theo một số ước tính thị trường, chỉ số HPR (House Price to Income Ratio) tại Hà Nội và TP.HCM hiện đã vượt mức 30 lần, cao hơn nhiều so với ngưỡng bền vững 3-5 lần thường được khuyến nghị trong các nghiên cứu quốc tế. Điều này cho thấy sự mất cân đối ngày càng rõ giữa giá nhà và năng lực tài chính của hộ gia đình đô thị [1], [2].

Trong bối cảnh đó, Bộ Xây dựng đang lấy ý kiến góp ý cho Nghị quyết thí điểm phát triển nhà ở thương mại giá phù hợp nhằm tạo thêm một phân khúc trung gian giữa nhà ở xã hội và nhà ở thương mại thông thường. Chính sách này dự kiến áp dụng một số cơ chế ưu đãi như rút gọn thủ tục đầu tư, mở rộng khả năng tiếp cận đất đai, hỗ trợ tín dụng và quy định lợi nhuận định mức đối với chủ đầu tư, đồng thời hạn chế chuyển nhượng trong thời gian nhất định để đảm bảo phục vụ nhu cầu ở thực.

Bài viết sử dụng chỉ số HPR cùng các chỉ số bổ trợ như PIR và PTI để phân tích khả năng chi trả nhà ở tại Việt Nam, đồng thời đánh giá tác động tiềm năng của chính sách thí điểm nêu trên. Kết quả cho thấy việc phát triển nhà ở thương mại giá phù hợp là cần thiết, nhưng hiệu quả của chính sách phụ thuộc lớn vào khả năng tạo lập quỹ đất phù hợp, thiết kế hệ thống tín dụng dài hạn và xây dựng cơ chế theo dõi định kỳ các chỉ số khả năng chi trả nhà ở [3].

Trên cơ sở đó, bài viết khuyến nghị một số định hướng chính sách nhằm đưa giá nhà về vùng chi trả phù hợp hơn với thu nhập của hộ gia đình đô thị, góp phần hướng tới sự phát triển bền vững của thị trường nhà ở Việt Nam.

Từ khóa: HPR; nhà ở thương mại giá phù hợp; chính sách nhà ở; thị trường nhà ở; thu nhập.

ABSTRACT

In recent years, housing prices in Vietnam's major cities have increased significantly faster than household incomes, thereby reducing housing affordability for middle-income groups. According to several market estimates, the House Price to Income Ratio (HPR) in Hanoi and Ho Chi Minh City has now exceeded 30, far above the commonly recommended sustainable threshold of 3-5 in international studies. This indicates a growing imbalance between housing prices and the financial capacity of urban households [1], [2].

In this context, the Ministry of Construction is seeking public comments on a draft resolution piloting the development of affordable commercial housing, aiming to create an intermediate segment between social housing and conventional commercial housing. The proposed policy includes several incentive mechanisms such as streamlined investment procedures, improved access to land, credit support, and regulated profit margins for developers, while also imposing restrictions on resale within a certain period to ensure that housing serves genuine residential needs.

This paper employs the HPR alongside complementary indicators such as PIR and PTI to analyze housing affordability in Vietnam and to assess the potential impacts of the proposed pilot policy. The findings suggest that the development of affordable commercial housing is necessary; however, its effectiveness largely depends on the ability to secure appropriate land reserves, design long-term credit systems, and establish mechanisms for periodic monitoring of housing affordability indicators [3].

Based on these findings, the paper proposes several policy directions aimed at bringing housing prices closer to levels affordable for urban households, thereby contributing to the sustainable development of Vietnam's housing market.

Keywords: HPR; affordable commercial housing; housing policy; housing market; income.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Thị trường nhà ở Việt Nam những năm gần đây bộc lộ một nghịch lý ngày càng rõ. Nguồn cung căn hộ không hẳn biến mất, những loại căn hộ phù hợp với khả năng chi trả của người có thu nhập trung bình lại thu hẹp nhanh chóng. Giá bán sơ cấp căn hộ trung bình năm 2025 tại Hà Nội đã đạt khoảng 100 triệu đồng/m^2, tăng gần 40% so với năm trước; tại TP.HCM khoảng 111 triệu đồng/m^2. Với mức giá này, một căn hộ 75 đến 80 m^2 thường vượt mốc 3 tỷ đồng và trong nhiều trường hợp dao động quanh 7,5 đến 8,9 tỷ đồng nếu tính theo giá bình quân toàn thị trường.

Trong khi đó, thu nhập bình quân của người lao động năm 2025 chỉ khoảng 8,4 triệu đồng mỗi tháng; khu vực thành thị khoảng 10,1 triệu đồng. Thu nhập bình quân quý IV năm 2025 tại Hà Nội đạt khoảng 12,3 triệu đồng mỗi tháng, còn tại TP.HCM vào khoảng 9,7 triệu đồng. Điều này cho thấy thu nhập có tăng, nhưng tốc độ tăng của tiền lương vẫn không theo kịp đà tăng của giá nhà [4].

Trong bối cảnh đó, đề xuất của Bộ Xây dựng về cơ chế thí điểm phát triển nhà ở thương mại giá phù hợp có thể xem là một phản ứng chính sách hợp lý. Dự thảo cho phép địa phương chủ động xác định nhu cầu, bố trí quỹ đất và chấp thuận chủ trương đầu tư đồng thời giao chủ đầu tư mà không phải đấu giá hay đấu thầu. Dự án cũng được áp dụng ưu đãi lãi suất, thời hạn vay dài hơn so với dự án thương mại thông thường. Giá bán được xác định theo nguyên tắc chi phí cộng lợi nhuận định mức tối đa 15%; người mua chỉ được sở hữu một căn và không được chuyển nhượng trong ít nhất 5 năm.

Đây là một nỗ lực đáng ghi nhận. Tuy nhiên, để đánh giá liệu chính sách này có thực sự kéo nhà ở về vùng chi trả phù hợp hay không, cần một hệ thước đo định lượng rõ ràng. Trong số đó, chỉ số HPR có thể đóng vai trò then chốt.

2. CƠ SỞ KHOA HỌC

2.1. Khái niệm HPR

Trên thế giới, thước đo phổ biến để đánh giá sức chịu đựng của thị trường nhà ở là Price to Income Ratio (PIR), tức tỷ lệ giữa giá nhà và thu nhập. Tổ chức hợp tác và phát triển kinh tế OECD sử dụng chỉ số này để đánh giá khả năng chi trả của người mua nhà; World Bank cũng áp dụng trong Global Housing Watch nhằm theo dõi mức định giá và mức độ căng của thị trường.

Tại Việt Nam, một số nghiên cứu gần đây đề xuất mở rộng cách tiếp cận bằng bộ chỉ số kết hợp giữa HPR, PIR và PTI. PIR phản ánh số năm thu nhập cần để mua một căn hộ chuẩn; HPR theo m^2 cho biết số tháng thu nhập cần để mua 1 m^2; còn PTI thể hiện tỷ lệ chi trả nhà ở hàng tháng so với thu nhập. Cách tiếp cận này giúp đánh giá đồng thời khoảng cách giữa giá nhà và khả năng tích lũy, cũng như áp lực dòng tiền trả nợ hàng tháng [5].

Có thể tóm lược hệ chỉ số này qua ba công thức cơ bản.

1. HPR hoặc PIR ở dạng cơ bản

HPR = Giá nhà chuẩn / Thu nhập hộ gia đình hằng năm

Trong đó giá nhà chuẩn được xác định bằng

Giá nhà chuẩn = Giá bình quân 1 m^2 × Diện tích căn chuẩn

2. HPR theo m^2

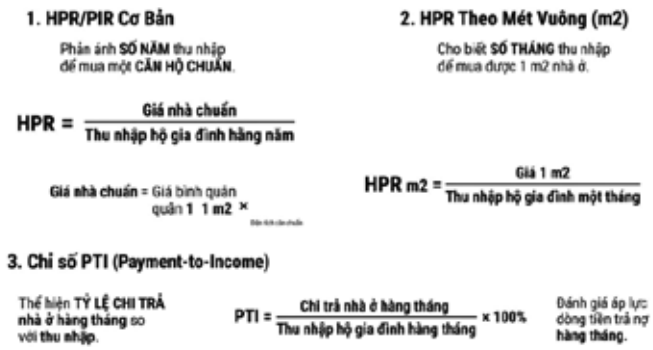
HPR m^2 = Giá 1 m^2 / Thu nhập hộ gia đình một tháng

Chỉ số này cho biết cần bao nhiêu tháng thu nhập để mua được 1 m^2 nhà ở.

3. PTI

PTI = Chi trả nhà ở hàng tháng / Thu nhập hộ gia đình hàng tháng × 100%

PTI khoảng 30% thường được xem là ngưỡng an toàn tương đối. UN Habitat cũng cho rằng nhà ở không còn được coi là hợp túi tiền nếu giá mua vượt quá 3 lần thu nhập hộ gia đình hằng năm hoặc nếu tiền thuê vượt quá 30% thu nhập hàng tháng [6].



Hình 1. Sơ đồ tổng quan chỉ số HPR&PTI

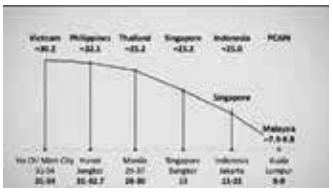
Điều cần lưu ý là HPR không phải một chỉ số tĩnh. Chỉ số này phụ thuộc vào nhiều biến số như giá nhà, diện tích căn chuẩn, số người có thu nhập trong hộ, thu nhập ròng, lãi suất vay và tỷ lệ vốn tự có. Cùng một căn hộ nhưng với hộ gia đình có hai người đi làm, HPR sẽ thấp hơn đáng kể so với hộ chỉ có một nguồn thu. Tương tự, khi lãi suất tăng hoặc thời hạn vay rút ngắn, PTI có thể xấu đi nhanh chóng dù HPR danh nghĩa chưa thay đổi nhiều. Vì vậy, HPR cần được sử dụng cùng PTI thay vì tách rời.

Ở góc độ chính sách, HPR biến câu chuyện giá nhà vốn mang tính cảm tính thành chỉ số có thể đo lường và so sánh giữa các đô thị, các phân khúc và theo thời gian, đồng thời nó giúp xác định đúng nhóm mục tiêu của chính sách nhà ở. HPR cũng cho phép đặt ra mục tiêu điều hành cụ thể, chẳng hạn giảm HPR hoặc PIR khoảng 10 đến 20% trong 3 đến 5 năm, hoặc giữ PTI của hộ trung vị dưới 30%. Đây cũng là hướng tiếp cận được nhiều nghiên cứu gần đây đề xuất.

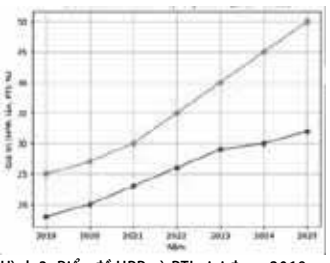
2.2. Chỉ số HPR tại Việt Nam và ý nghĩa của các con số

HPR tại Hà Nội đã chạm 31,1 lần, tăng mạnh so với 27,7 lần của năm 2025; tại TP.HCM là 32,2 lần; còn bình quân cả nước khoảng 27 lần. Dù đây là bộ số liệu đang dùng theo hướng nghiên cứu chính sách, mà không phải một chỉ số quốc gia đã chuẩn hóa chính thức, thông điệp mà nó phát đi là rất rõ, là giá nhà đã vượt rất xa năng lực thu nhập của hộ gia đình đô thị.

Nếu đặt bài toán vào một ví dụ trực giác hơn, khi một hộ gia đình có tổng thu nhập 40 triệu đồng mỗi tháng, tương đương 480 triệu đồng mỗi năm, thì một căn hộ 3 tỷ đồng vẫn cho HPR khoảng 6,25 lần. Con số này đã vượt ngưỡng trung bình chấp nhận được (*acceptable average*) 3 đến 5 lần. Còn nếu lấy đúng mặt bằng giá bình quân sơ cấp ở Hà Nội năm 2025, một căn 75 m^2 vào khoảng 6-7,5 tỷ đồng, thì HPR của cùng hộ ấy lên tới khoảng 13,5-15,6 lần. Nói cách khác, ngay cả nhóm được coi là thu nhập khá trong đô thị cũng đã rất chật vật nếu mua nhà theo giá thị trường hiện hành. Phần chênh giữa HPR 6,25 và HPR 15,6 cũng cho thấy vì sao việc xác định căn chuẩn, khu vực, vị trí và loại sản phẩm là tối quan trọng khi thiết kế chính sách.



Hình 2. Chỉ số HPR của các nước trong khu vực ASEAN năm 2025 [7]



Hình 3. Biểu đồ HPR và PTI giai đoạn 2019-2025 tại Hà Nội [7]

Từ đây có thể thấy dự thảo của Bộ Xây dựng đang hướng tới một tầng dân cư rất cụ thể, đó là những người không đủ điều kiện hoặc

không thuộc đối tượng của nhà ở xã hội, nhưng cũng không thể với tới nhà ở thương mại đang bán ngoài thị trường. Đây là một khoảng trống chính sách hiện hữu. Tuy nhiên, việc chỉ ra đúng khoảng trống mới là điều kiện cần. Điều kiện đủ là phải tạo ra sản phẩm mà nhóm này thực sự có thể mua được trong điều kiện vay an toàn. Nếu không, giá phù hợp sẽ khó khả thi.

Bảng 1. HPR và giá thuê nhà của một số thành phố thuộc Asean năm 2025 [7]

STT	Thành phố	HPR	Giá thuê/thu nhập bình quân khu trung tâm	Giá thuê/thu nhập bình quân ngoài trung tâm
1	Manila, Philippines	35.9	26.8	35.7
2	Cebu, Philippines	33.7	25.0	29.1
3	**Ho Chi Minh City, Vietnam**	**32.2**	**32.8**	**25.8**
4	Phnom Penh, Cambodia	31.4	22.0	18.5
5	**Hanoi, Vietnam**	**31.1**	**42.3**	**34.2**
6	Bangkok, Thailand	28.7	31.7	37.8
7	Pattaya, Thailand	25.7	19.5	22.4
8	Jakarta, Indonesia	22.3	23.6	21.9
9	Singapore, Singapore	22.1	34.3	34.8
10	Chiang Mai, Thailand	13.9	21.2	26.3
11	Kuala Lumpur, Malaysia	9.1	26.7	19.2
12	Penang, Malaysia	8.5	26.7	21.9

2.3. Vì sao giá nhà ở Việt Nam vượt thu nhập nhanh đến vậy?

- Nguyên nhân đầu tiên là lệch pha cung cầu và lệch cấu trúc sản phẩm. Bản thân thị trường không thiếu nhà ở theo nghĩa số lượng tuyệt đối, nhưng lại thiếu trầm trọng căn hộ có giá phù hợp với nhóm thu nhập trung bình. Nguồn cung mới nhiều năm qua nghiêng mạnh về phân khúc trung cao cấp, trong khi phân khúc bình dân dần biến mất ở các đô thị lớn. Khi hàng hóa trong vùng giá 2 đến 3 tỷ đồng gần như biến mất ở nội đô, HPR đương nhiên bị kéo lên, không chỉ vì giá tăng, mà vì rổ sản phẩm trên thị trường đã đổi hẳn cấu trúc.

- Nguyên nhân thứ hai là tâm lý sở hữu nhà ở vẫn lấn át thị trường thuê và thuê mua. Trong nhiều gia đình Việt Nam, nhà ở không chỉ là chỗ ở mà còn là thước đo an toàn tài chính, địa vị và tích lũy liên thế hệ. Vì vậy, cầu mua để ở thật và cầu mua để biến chúng thành tài sản phòng ngừa rủi ro thường đan cài vào nhau. Khi văn hóa thuê nhà chưa trở thành một lựa chọn bình thường của tầng lớp trung lưu, áp lực sở hữu dồn vào thị trường mua bán, làm giá khó hạ về vùng hợp lý. OECD cũng cho thấy tình trạng khó tiếp cận nhà ở hiện không chỉ là câu chuyện của người nghèo, mà ngày càng đè nặng lên người có thu nhập trung bình, người trẻ và hộ gia đình có con nhỏ.

- Nguyên nhân thứ ba là tài chính nhà ở chưa thật sự dài hạn và ổn định. Nếu kỳ hạn vay chưa đủ dài, lãi suất biến động mạnh, tỷ lệ cho vay trên giá trị tài sản và điều kiện thẩm định quá chặt, thì PTI vẫn cao, làm hẹp tệp khách hàng đủ điều kiện vay. Đây là một điểm rất đáng lưu ý. Giá nhà cao chưa chắc đã triệt tiêu giao dịch nếu có tài chính nhà ở đủ dài và đủ mềm; ngược lại, giá đứng yên nhưng lãi suất tăng vẫn có thể làm mất khả năng chi trả.

- Nguyên nhân thứ tư là bất động sản vẫn được xem như một kênh đầu tư gần như mặc định. Khi dòng tiền nhàn rỗi, vốn tín dụng và kỳ vọng tăng giá cùng dồn vào bất động sản, nhà ở rất dễ bị đẩy khỏi chức năng cư trú ban đầu để trở thành tài sản tài chính. Hệ quả là vốn bị chôn vào tài sản chờ tăng giá nhiều hơn là chảy vào sản xuất kinh doanh. Đây chính là điều nguy hiểm nhất của HPR cao kéo dài, khi nó không chỉ làm người mua nhà mệt mỏi, mà còn làm cấu trúc nền kinh tế lệch đi. OECD xem nhà ở là một nút thắt của tăng trưởng bao trùm, vì chi phí nhà ở quá cao có thể làm giảm thanh khoản thị trường lao động, tăng bất bình đẳng và làm suy yếu chất lượng tăng trưởng.

Bảng 2. Tổng hợp các nhóm nguyên nhân khiến HPR tăng tại Việt Nam

Nhóm nguyên nhân	Biểu hiện trên thị trường	Cơ chế tác động đến HPR	Hệ quả kinh tế xã hội
Lệch pha cung cầu và lệch cấu trúc sản phẩm	Nguồn cung mới tập trung vào phân khúc trung cao cấp, căn hộ bình dân tại các đô thị lớn giảm mạnh	Giá trung bình thị trường tăng vì rổ sản phẩm dịch chuyển lên phân khúc cao	Người thu nhập trung bình khó tiếp cận nhà ở; HPR tăng nhanh
Tâm lý sở hữu nhà ở	Nhà ở được coi là tài sản tích lũy, bảo đảm an toàn tài chính và vị thế xã hội	Cầu mua để ở và cầu đầu tư đan xen làm cầu thị trường luôn cao	Áp lực mua nhà lớn, thị trường thuê phát triển chậm
Hệ thống tài chính nhà ở chưa dài hạn	Thời hạn vay chưa dài, lãi suất biến động, điều kiện vay chặt	Khả năng chi trả hàng tháng cao so với thu nhập (PTI cao)	Nhiều hộ gia đình bị loại khỏi thị trường mua nhà
Bất động sản là kênh đầu tư phổ biến	Dòng vốn nhàn rỗi và tín dụng chảy vào bất động sản	Nhà ở bị tài chính hóa, giá tăng vượt nhu cầu cư trú	Tăng bất bình đẳng và giảm hiệu quả phân bổ vốn

2.4. Thí điểm nhà ở thương mại giá phù hợp có giải quyết được bài toán HPR hay không?

Câu trả lời là có thể, nhưng chỉ trong trường hợp chính sách đi đến tận gốc của HPR.

Điểm tích cực đầu tiên của dự thảo là rút gọn quy trình đầu tư và chấp thuận chủ trương. Chi phí thời gian trong phát triển nhà ở ở nước ta rất lớn, và chi phí ấy luôn được vốn hóa vào giá bán cuối cùng. Việc cho phép địa phương chấp thuận chủ trương đầu tư đồng thời giao chủ đầu tư, lại cho phép áp dụng quy trình tương tự cơ chế đặc thù của nhà ở xã hội, về lý thuyết có thể làm giảm đáng kể chi phí giao dịch và chi phí vốn chờ đợi. Nếu chủ trương này đi vào cuộc sống, đây là một tác động trực tiếp vào mẫu số của bài toán giá thành.

Điểm tích cực thứ hai là dự thảo thừa nhận vai trò của ưu đãi tín dụng. Cho vay với lãi suất thấp hơn và thời gian vay dài hơn so với nhà ở thương mại thông thường là rất quan trọng, vì nó tác động trực tiếp vào PTI, tức sức chịu đựng hàng tháng của hộ gia đình. Nhưng cũng chính ở đây xuất hiện một khoảng mờ đáng kể. Dự thảo mới dừng ở nguyên tắc, mà chưa trả lời rõ nhóm ngân hàng nào cho vay, nguồn tái cấp vốn ở đâu, chênh lệch lãi suất là bao nhiêu, biên độ cố định trong bao lâu, tỷ lệ cho vay tối đa là bao nhiêu, và liệu có cơ chế bảo lãnh hay chia sẻ rủi ro cho người mua lần đầu hay không. Không giải được các câu hỏi này thì ưu đãi tín dụng sẽ khó đi vào thực tiễn cuộc sống.

Bảng 3. Chính sách thí điểm nhà ở thương mại giá phù hợp

Khía cạnh phân tích	Nội dung tác động	Tác động đến bài toán HPR (Giá nhà/Thu nhập)
1. Cải cách thủ tục hành chính	Rút gọn quy trình đầu tư, cho phép địa phương chấp thuận chủ trương và giao đất đồng thời.	Giảm giá thành (Mẫu số): Giảm chi phí thời gian và chi phí vốn chờ đợi, vốn là những yếu tố đẩy giá bán cuối cùng lên cao.
2. Chính sách tín dụng	Cho vay lãi suất thấp, thời gian vay dài hơn so với nhà ở thương mại thông thường.	Tăng khả năng chi trả (PTI): Giảm áp lực tài chính hàng tháng cho hộ gia đình, giúp người dân dễ tiếp cận nhà ở hơn.
3. Động lực cho chủ đầu tư	Quy định mức lợi nhuận định mức là 15%.	Thúc đẩy nguồn cung: Tạo ra biên lợi nhuận ổn định để khuyến khích doanh nghiệp tham gia phân khúc giá rẻ thay vì chỉ tập trung nhà ở cao cấp.
4. Cơ chế chống đầu cơ	Người mua chỉ được sở hữu 1 căn và không được bán lại trong vòng 5 năm.	Đảm bảo tính công bằng: Loại bỏ yếu tố đầu cơ, đảm bảo nhà ở đến tay người có nhu cầu ở thực

Điểm thứ ba là lợi nhuận định mức 15% cho chủ đầu tư. So với nhà ở xã hội, đây là một bước nới đáng kể. Tuy nhiên, nếu dự án không có quỹ đất tốt, không có quy mô đủ lớn, không có hạ tầng kết nối và thanh khoản chắc chắn, thì 15% chưa chắc đã đủ hấp dẫn. Chủ đầu tư không chỉ nhìn vào biên lợi nhuận, mà nhìn vào tổng thể rủi ro pháp lý, tiến độ thu tiền, chi phí vốn và khả năng tiêu thụ. Nếu sản phẩm bị neo ở xa trung tâm, giao thông yếu, dịch vụ thấp, thì doanh nghiệp có thể vẫn không mặn mà.

Điểm thứ tư là điều kiện người mua chỉ được mua một căn và không được bán lại trong 5 năm. Về logic chính sách, quy định này hợp lý vì nó chống đầu cơ và bảo vệ nhu cầu ở thực. Singapore cũng áp dụng tư duy tương tự với nhà ở công, gắn trợ cấp với các điều kiện bán lại và thời gian cư trú tối thiểu. HDB quy định thời gian cư trú tối thiểu 5 năm đối với nhiều loại căn hộ, còn với một số loại Plus và Prime thì chặt hơn; đồng thời hệ thống này được hỗ trợ bởi trợ cấp, trần thu nhập và các điều kiện được bán cho thị trường thứ cấp rõ ràng. Điều đó cho thấy hạn chế chuyển nhượng không phải mới, nhưng nó chỉ hiệu quả khi đi kèm cả gói chính sách tài chính, đất đai và trợ cấp minh bạch [8].

3. KINH NGHIỆM QUỐC TẾ VÀ NHỮNG ĐIỀU VIỆT NAM CÓ THỂ HỌC

Singapore là ví dụ dễ gợi mở nhất cho Việt Nam, không phải để sao chép, mà để nhìn thấy logic điều hành. Nhà ở công của Singapore được xem là dễ tiếp cận thông qua trợ cấp phân tầng, điều kiện thu nhập, hạn chế bán lại và đặc biệt là kỷ luật tài chính rất rõ. Cơ quan quản lý tiền tệ Singapore áp trần Mortgage Servicing Ratio ở mức 30% thu nhập hàng tháng đối với một số khoản vay nhà ở, còn HDB duy trì các điều kiện trợ cấp và phân loại căn hộ gắn với vị trí và mức hỗ trợ. Nói cách khác, Singapore không chỉ quan tâm giá căn hộ là bao nhiêu mà còn quan tâm người mua phải trả hàng tháng bao nhiêu và trợ cấp có đang hướng tới đúng người cần nó hay không. Đây chính là điều Việt Nam còn thiếu khi thảo luận về nhà ở giá phù hợp [8].

Vienna của Áo lại cho một bài học khác. Mô hình Vienna không bó hẹp nhà ở được hỗ trợ cho người thu nhập thấp nhất, mà chủ trương cung cấp nhà ở an toàn và hợp túi tiền cho cả nhóm thu nhập thấp lẫn trung bình. Điều này quan trọng vì nó ngăn thị trường nhà ở trợ giúp biến thành một phân khúc biệt lập và bị kỳ thị. Với Việt Nam, đây là gợi ý rất đáng suy nghĩ. Nếu nhà ở thương mại giá phù hợp chỉ được nhìn như một nhánh nhỏ, ít tiện ích, xa trung tâm, chất lượng trung bình, thì nó sẽ không thu hút được cả cung lẫn cầu. Nhưng nếu được quy hoạch như một sản phẩm đô thị hoàn chỉnh cho tầng lớp trung lưu đi làm, có hạ tầng xã hội tốt, thì nó có thể trở thành một công cụ bình ổn thị trường rất mạnh [9].

Kinh nghiệm Hàn Quốc cho thấy thêm một khía cạnh nữa. đó là khi giá nhà tại vùng lõi tăng quá mạnh, chính phủ thực hiện đồng thời hai giải pháp là siết tín dụng tại khu vực nóng sốt, đồng thời tăng mạnh nguồn cung nhà ở vừa túi tiền thông qua quỹ đất công hoặc doanh nghiệp nhà nước phát triển đất. Hàn Quốc đã kết hợp việc siết tỷ lệ cho vay ở những khu vực nóng như Gangnam với việc tăng cung nhà ở hợp túi tiền thông qua đất thuộc các nhà phát triển nhà nước. [10]

4. NHẬN DIỆN HỆ LỤY CỦA HPR QUÁ CAO ĐỐI VỚI NỀN KINH TẾ VÀ XÃ HỘI

Khi HPR duy trì ở mức quá cao trong thời gian dài, hệ quả đầu tiên là rủi ro bong bóng tài sản. Dù rổ chỉ số lạm phát hiện nay không phản ánh đầy đủ giá bất động sản theo cách người dân cảm nhận ngoài đời sống, việc giá nhà tách quá xa khỏi nền tảng thu nhập vẫn là một tín hiệu bất ổn tài chính. HPR cao không đồng nghĩa chắc chắn có bong bóng, nhưng là dấu hiệu cảnh báo sớm rằng cấu trúc giá tài sản đang mất ổn định.

Hệ quả thứ hai là dòng vốn bị phân bổ lệch. Khi nhà ở trở thành nơi neo giữ của cải hơn là nơi cư trú, nguồn lực xã hội sẽ bớt chảy vào sản xuất, đổi mới sáng tạo và hạ tầng xã hội. Về lâu dài, đây là một dạng thuế vô hình đánh lên năng lực cạnh tranh của nền kinh tế. Người trẻ chi quá nhiều cho nhà ở thì ít vốn hơn cho giáo dục, khởi nghiệp và nâng cấp kỹ năng. Doanh nghiệp cũng chịu chi phí lao động gián tiếp cao hơn vì chi phí sống ở đô thị tăng. OECD nhiều lần cảnh báo rằng khủng hoảng khả năng chi trả nhà ở là một nút thắt của tăng trưởng bao trùm.

Hệ quả thứ ba là giãn cách giàu nghèo và tăng chi phí phát triển. Giá đất, giá nhà tăng quá nhanh làm tăng chi phí đền bù giải phóng mặt bằng, từ đó làm chậm hoặc đội vốn các dự án hạ tầng và các dự án phát triển kinh tế xã hội. Một nền kinh tế mà đất đai đắt lên nhanh hơn năng suất lao động thường là nền kinh tế sẽ phải trả giá rất đắt cho phát triển trong tương lai [11].

5. MỘT SỐ KHUYẾN NGHỊ

Từ góc độ HPR, nhà ở thương mại giá phù hợp chỉ thành công nếu được thiết kế như một gói chính sách hoàn chỉnh bao gồm:

- Phải xác lập HPR, PIR và PTI thành bộ chỉ số chính thức để theo dõi định kỳ theo đô thị, theo phường xã và theo phân khúc. Bộ Xây dựng cần xây dựng một dashboard nhà ở quốc gia, công bố định kỳ ít nhất 6 tháng một lần các chỉ số giá m^2, HPR, PTI, tỷ trọng nguồn cung theo vùng giá và thời gian hấp thụ. Mặt khác, cần nhấn mạnh vai trò của minh bạch dữ liệu trong việc hạ kỳ vọng giá và giảm bất đối xứng thông tin.

- Phải gắn chính sách này với quỹ đất mới có chất lượng tiếp cận tốt. Nếu không có đất đủ gần nơi làm việc, ga metro, trục giao thông chính hoặc các cực dịch vụ đô thị, thì khó hình thành nhà ở giá phù hợp mà vẫn đáng sống. Quỹ đất rẻ nhưng ở quá xa chỉ làm hạ được giá danh nghĩa, còn tổng chi phí cư trú thực, gồm đi lại, thời gian và hạ tầng xã hội thiếu hụt, có khi lại tăng lên. Khi đó HPR bề ngoài có thể đẹp hơn, nhưng PTI mở rộng theo nghĩa toàn chi phí sống thì vẫn xấu.

- Tín dụng cho người mua lần đầu phải được thiết kế theo nguyên tắc an toàn tài chính. Có thể cân nhắc tham chiếu kinh nghiệm Singapore, coi 30% thu nhập là ngưỡng PTI an toàn khuyến

nghị. Điều đó có nghĩa là thay vì chỉ công bố lãi suất ưu đãi, cần công bố cả mẫu khoản vay chuẩn, kỳ hạn chuẩn, tỷ lệ vốn tự có tối thiểu, cơ chế bảo vệ người vay khi lãi suất đảo chiều, và thậm chí có thể cho phép cơ chế thuê mua trong giai đoạn đầu.

- Phải dịch chuyển dần tư duy từ sở hữu tuyệt đối sang thuê, thuê mua và sở hữu từng phần. Đây không phải là lời khuyên mang tính hình thức, mà là một điều chỉnh nhận thức về thị trường. Khi mọi người cùng cố chen vào phương án sở hữu ngay từ đầu, HPR của toàn thị trường càng khó hạ. Một hệ thống thuê mua dài hạn, có đánh giá tín nhiệm tài chính cá nhân, có cơ chế tích lũy quyền sở hữu theo thời gian, sẽ giảm đáng kể áp lực đầu vào.

- Cần phân biệt rõ giữa nhà ở thương mại giá phù hợp với nhà ở xã hội. Nhà ở xã hội mang tính an sinh rõ nét hơn và có mục tiêu riêng. Còn nhà ở thương mại giá phù hợp nên được xây dựng như một phân khúc bình ổn thị trường cho nhóm trung lưu đô thị. Nếu trộn lẫn hai logic này, chính sách rất dễ hoặc là quá bao cấp, hoặc là quá thương mại.

- Phải tạo động lực thực sự cho chủ đầu tư. 15% lợi nhuận định mức chưa chắc đã là hấp dẫn nếu thiếu các ưu đãi thực chất về đất, hạ tầng, giải phóng mặt bằng, thời gian thủ tục và khả năng huy động vốn. Thực ra doanh nghiệp không sợ lợi nhuận thấp bằng chi phí cơ hội khi thủ tục hành chính kéo dài.

Bảng 4. Khuyến nghị chính sách phát triển nhà ở thương mại giá phù hợp theo chỉ số HPR

Nhóm giải pháp	Nội dung chính	Cơ chế tác động đến HPR / khả năng chi trả	Tổ chức hoặc công cụ thực hiện
Hệ thống dữ liệu và chỉ số thị trường	Xây dựng bộ chỉ số chính thức gồm HPR, PIR, PTI theo đô thị, xã phường và phân khúc nhà ở; công bố định kỳ	Minh bạch thông tin thị trường, giảm kỳ vọng giá và giảm bất đối xứng thông tin	Bộ Xây dựng chủ trì xây dựng dashboard nhà ở quốc gia
Quy hoạch và quỹ đất phát triển	Phát triển nhà ở giá phù hợp gắn với quỹ đất có khả năng tiếp cận tốt đến việc làm, ga metro, trục giao thông và dịch vụ đô thị	Giảm tổng chi phí cư trú thực tế, không chỉ giảm giá danh nghĩa của căn hộ	Quy hoạch đô thị, quy hoạch giao thông, chính sách đất đai
Tài chính nhà ở và tín dụng	Thiết kế tín dụng cho người mua nhà lần đầu theo nguyên tắc an toàn tài chính; PTI khuyến nghị khoảng 30 % thu nhập	Giảm rủi ro tài chính của hộ gia đình và tăng khả năng tiếp cận nhà ở	Chính sách tín dụng, ngân hàng thương mại, quỹ tài chính nhà ở
Đa dạng hóa hình thức tiếp cận nhà ở	Phát triển mô hình thuê dài hạn, thuê mua và sở hữu từng phần	Giảm áp lực sở hữu ngay từ đầu, từ đó hạ áp lực cầu trên thị trường mua bán	Chính sách thị trường nhà ở và hệ thống tín nhiệm tài chính cá nhân
Phân định chính sách	Phân biệt rõ nhà ở thương mại giá phù hợp với nhà ở xã hội	Tránh trộn lẫn mục tiêu an sinh với mục tiêu ổn định thị trường	Chính sách nhà ở quốc gia
Cơ chế khuyến khích doanh nghiệp	Tạo động lực cho chủ đầu tư thông qua ưu đãi về đất, hạ tầng, thủ tục và khả năng huy động vốn	Giảm chi phí phát triển dự án và giảm rủi ro bất định cho doanh nghiệp	Chính sách đầu tư, thủ tục hành chính và cơ chế tài chính

6. KẾT LUẬN

Từ góc nhìn của chỉ số HPR, có thể nhận thấy thị trường nhà ở Việt Nam đã dịch chuyển đáng kể khỏi vùng khả năng chi trả được xem là lành mạnh. Dù sử dụng bộ số liệu nghiên cứu với HPR trên 30 lần tại Hà Nội và TP.HCM, hay các ước tính thận trọng hơn với PIR và HPR quanh mức 29-30 năm cùng với PTI vượt 30% trong nhiều kịch bản tài chính, xu hướng chung vẫn cho thấy giá nhà ở tại hai đô thị lớn đang gia tăng nhanh hơn tốc độ tăng thu nhập và khả năng tích lũy của nhiều hộ gia đình đô thị.

Trong bối cảnh đó, chủ trương thí điểm phát triển nhà ở thương mại giá phù hợp có ý nghĩa quan trọng trong việc mở rộng khả năng tiếp cận nhà ở cho nhóm thu nhập trung bình tại các đô thị lớn. Tuy nhiên, để chính sách này phát huy hiệu quả bền vững, cần xem xét tiếp cận theo hướng tổng thể, không chỉ tập trung vào việc phát triển một loại hình sản phẩm mới mà còn hướng tới việc hình thành một vùng giá nhà ở phù hợp hơn với cấu trúc thu nhập của thị trường. Trong quá trình đó, các chỉ số như HPR, PIR và PTI có thể được sử dụng như những công cụ tham chiếu quan trọng nhằm hỗ trợ việc theo dõi và đánh giá diễn biến khả năng chi trả nhà ở theo thời gian. Việc từng bước hoàn thiện hệ thống dữ liệu và chỉ số theo dõi thị trường nhà ở sẽ góp phần nâng cao tính minh bạch thông tin và hỗ trợ quá trình hoạch định chính sách phát triển nhà ở theo hướng ổn định và bền vững.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Bộ Xây dựng và Cổng thông tin Chính phủ, Dự thảo Nghị quyết thí điểm phát triển nhà ở thương mại giá phù hợp, 2026.

[2] OECD, Housing Prices và Affordable Housing, Dữ liệu và chuyên đề chính sách.

[3] Hồng Khanh, Giá chung cư Hà Nội trung bình 100 triệu/m^2, đà tăng chậm lại, Tạp chí điện tử Vietnamnet.vn, 2026.

[4] Cục Thống kê- Bộ Tài chính, Báo cáo kinh tế- xã hội năm 2025 và thông cáo lao động việc làm. 2025.

[5] Mai Việt Hùng, Đưa giá nhà về vùng phù hợp: Bộ chỉ số khả năng chi trả và hàm ý chính sách. Tạp chí Kinh tế và Dự báo, 10/2025.

[6] UN Habitat, The Global Housing Affordability Challenge, 2019.

[7] Numbeo. Nền tảng dữ liệu về chi phí sống. https://www.numbeo.com/property-investment/region_rankings.jsp?title=2026&region=035, 2025.

[8] Yixin Luo, A Study on Singapore's HDB System: A Model of Public Housing Policy, Advances in Economics Management and Political Sciences, 147: 144-149; 2025.

[9] Adelola Adewale Akinsulire, Courage Idemudia, Economic and social impact of affordable housing policies: A comparative review. International Journal of Applied Research in Social Sciences 6(7): 1433-1448. 2024.

[10] Cynthia Kim, South Korea to tighten mortgage rules in Seoul, boost housing supply. Reuters, 7/2025.

[11] Các báo cáo thị trường được truyền thông dẫn lại từ Savills, CBRE về giá căn hộ Hà Nội và TP.HCM năm 2025.

■Ngày nhận bài: 09/3/2026 ■Ngày sửa bài: 18/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 30/3/2026

Đánh giá những rủi ro trong liên doanh thực hiện dự án đầu tư xây dựng hạ tầng giao thông đường bộ theo hình thức đối tác công tư (PPP)

Assessing risks in joint ventures implementing road infrastructure investment projects under the public-private partnership (PPP) model

> **THS LÊ KHÁNH CHI, THS LÊ KIM NHUNG***
Trường Đại học Giao thông vận tải
*Email: lknhung.qlda@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Trong bối cảnh phát triển hạ tầng giao thông tại Việt Nam, hình thức đối tác công tư (PPP) được xem là giải pháp hiệu quả nhằm thu hút nguồn lực từ khu vực tư nhân. Một trong những cấu trúc phổ biến trong triển khai PPP là mô hình liên doanh giữa các nhà đầu tư tư nhân. Tuy nhiên, mô hình này cũng tiềm ẩn nhiều rủi ro phức tạp liên quan đến phân chia quyền lợi, trách nhiệm và nghĩa vụ tài chính giữa các bên. Nghiên cứu này nhằm xác định và đánh giá các rủi ro phát sinh trong mô hình liên doanh thực hiện dự án giao thông đường bộ theo hình thức PPP tại Việt Nam. Dựa trên khảo sát 135 đối tượng có kinh nghiệm thực tiễn trong lĩnh vực PPP, nghiên cứu đã phân loại hai nhóm rủi ro chính: (1) Rủi ro phân chia quyền lợi và trách nhiệm giữa các bên liên doanh; (2) Rủi ro tài chính và nghĩa vụ bảo lãnh giữa các đối tác. Kết quả nghiên cứu cho thấy, các rủi ro như "thiếu rõ ràng về vai trò và trách nhiệm", "nghĩa vụ tài chính giữa các bên không rõ ràng"và "thiếu cơ chế bảo lãnh tài chính từ Nhà nước" được đánh giá có mức độ rủi ro cao đến rất cao. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất một số giải pháp giảm thiểu rủi ro, bao gồm tăng cường quy định pháp lý về cấu trúc liên doanh, hoàn thiện cơ chế chia sẻ rủi ro và bảo lãnh tài chính từ phía Nhà nước.

Từ khóa: Rủi ro; liên doanh; giao thông; PPP.

ABSTRACT

In the context of transportation infrastructure development in Vietnam, the public-private partnership (PPP) model is considered an effective solution to mobilize resources from the private sector. One of the common organizational structures in PPP implementation is the joint venture model among private investors. However, this model also entails complex risks related to the allocation of benefits, responsibilities and financial obligations among the parties. This study aims to identify and assess the risks arising in joint venture models for road transport projects implemented under the PPP framework in Vietnam. Based on a survey of 135 respondents with practical experience in the PPP sector, the study classifies risks into two main groups: (1) Risks related to the allocation of benefits and responsibilities among joint venture partners; (2) Financial risks and obligations of guarantees among the parties. The research results show that risks such as "unclear roles and responsibilities", "ambiguous financial obligations among partners" and "lack of government financial guarantee mechanisms" are perceived as high to very high. Accordingly, the study proposes several risk mitigation solutions, including strengthening legal regulations on joint venture structures, improving risk-sharing mechanisms, and enhancing state financial guarantee frameworks.

Keywords: Risk; joint venture; transportation; PPP.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh phát triển kinh tế - xã hội nhanh chóng, nhu cầu đầu tư xây dựng hạ tầng giao thông đường bộ ở Việt Nam ngày càng tăng cao nhằm đáp ứng yêu cầu kết nối, lưu thông hàng hóa và thúc đẩy phát triển vùng. Tuy nhiên, do nguồn lực ngân sách nhà nước hạn chế, việc huy động nguồn vốn xã hội hóa thông qua hình thức đối tác công tư (PPP) đã trở thành một xu hướng tất yếu và được khuyến khích bởi nhiều chính sách pháp luật hiện hành.

Mô hình PPP, đặc biệt là trong lĩnh vực hạ tầng giao thông đường bộ, tạo điều kiện để khu vực tư nhân tham gia đầu tư, khai thác và vận hành các công trình công cộng. Trong đó, liên doanh giữa các doanh nghiệp tư nhân hoặc giữa nhà đầu tư trong và ngoài nước là một hình thức phổ biến để tăng năng lực tài chính, kỹ thuật, quản trị dự án. Tuy nhiên, hình thức liên doanh trong các dự án PPP cũng đồng thời phát sinh nhiều rủi ro tiềm ẩn do đặc thù pháp lý, sự phức tạp của mối quan hệ lợi ích giữa các bên và tính dài hạn của dự án.

Thực tế triển khai các dự án giao thông theo mô hình PPP tại Việt Nam thời gian qua đã ghi nhận nhiều khó khăn, như: Chậm tiến độ, vượt chi phí, tranh chấp giữa các nhà đầu tư liên doanh hoặc mâu thuẫn trong quá trình phân chia lợi nhuận và quản lý rủi ro. Những vấn đề này nếu không được nhận diện và đánh giá đầy đủ sẽ ảnh hưởng nghiêm trọng đến hiệu quả dự án, thậm chí gây đổ vỡ hợp tác và thiệt hại cho cả khu vực công và tư. Chính vì vậy, việc đánh giá các rủi ro trong liên doanh thực hiện dự án đầu tư xây dựng hạ tầng giao thông đường bộ theo hình thức PPP là cần thiết và cấp bách. Kết quả nghiên cứu sẽ góp phần giúp các nhà hoạch định chính sách, nhà đầu tư và các bên liên quan xây dựng cơ chế hợp tác bền vững, nâng cao hiệu quả quản lý và giảm thiểu rủi ro trong quá trình triển khai các dự án PPP trong lĩnh vực giao thông.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Mô hình liên doanh trong thực hiện dự án giao thông đường bộ theo hình thức đối tác công tư

Trong khuôn khổ các dự án đầu tư hạ tầng giao thông đường bộ theo hình thức đối tác công tư (PPP), mô hình liên doanh là một cấu trúc tổ chức phổ biến nhằm tập hợp nguồn lực tài chính, kỹ thuật và quản lý từ nhiều nhà đầu tư tư nhân (Grimsey và Lewis, 2004). Mô hình này thường hình thành trên cơ sở thỏa thuận giữa các doanh nghiệp nhằm thành lập một pháp nhân chung - thường là một công ty dự án để tham gia vào việc ký kết, triển khai và vận hành dự án với phía Nhà nước.

Ở Việt Nam, Luật Đầu tư theo phương thức đối tác công tư năm 2020 (Luật PPP) cho phép nhà đầu tư thành lập công ty dự án để ký kết và thực hiện hợp đồng PPP (Điều 44, Luật PPP 2020). Trong nhiều trường hợp, công ty dự án trong mô hình PPP là pháp nhân độc lập được thành lập bởi liên doanh các nhà đầu tư. Tỷ lệ góp vốn giữa các bên thường là căn cứ để phân chia quyền lợi, nghĩa vụ và rủi ro trong suốt vòng đời dự án (World Bank, 2017).

Mô hình liên doanh trong các dự án PPP giao thông đường bộ thường thể hiện qua việc các nhà đầu tư tư nhân cùng nhau thành lập một pháp nhân độc lập, gọi là công ty dự án, để ký kết hợp đồng với cơ quan nhà nước có thẩm quyền. Công ty liên doanh đóng vai trò trung tâm trong việc huy động vốn, triển khai xây dựng và vận hành công trình sau khi hoàn thành, qua đó giúp tách biệt trách nhiệm pháp lý và tài chính của dự án khỏi hoạt động kinh doanh khác của từng nhà đầu tư (World Bank, 2017). Trong cấu trúc liên doanh này, tỷ lệ góp vốn của các bên thường là căn cứ để phân chia quyền lợi, nghĩa vụ và mức độ chia sẻ rủi ro, đồng thời được quy định cụ thể trong thỏa thuận cổ đông. Việc phân công vai trò giữa các bên trong liên doanh thường dựa trên thế mạnh chuyên môn, chẳng hạn, nhà đầu tư nội địa có thể nắm rõ quy định pháp luật và môi trường chính sách địa phương, trong khi nhà đầu tư nước ngoài đóng góp công nghệ, năng lực kỹ thuật hoặc khả năng tiếp cận nguồn vốn quốc tế (ADB, 2018).

2.2. Rủi ro tài chính trong liên doanh thực hiện dự án giao thông đường bộ theo hình thức đối tác công tư

2.2.1. Rủi ro phân chia quyền lợi và trách nhiệm giữa các bên liên doanh

Nghiên cứu thực tế tại Việt Nam trên dự án BOT giao thông năm 2021 do Trương Thị Mỹ Thanh & Nguyễn Thị Nga (2022) đã xác định rõ nhóm rủi ro lớn là nguy cơ không đạt được doanh thu kỳ vọng (traffic revenue risk) một dạng rủi ro tài chính liên quan mật thiết đến thiết kế tài chính và khả năng khai thác thực tế. Rủi ro phát sinh từ việc phân chia quyền lợi và trách nhiệm giữa các bên liên doanh là một trong những vấn đề phức tạp và thường xuyên được đề cập trong các nghiên cứu gần đây. Zhang và Xu (2012) cho thấy trong dự án PPP tại Trung Quốc, quyền lợi và trách nhiệm được phân chia chủ yếu dựa trên tỷ lệ đầu tư, trong đó bên tư nhân chịu các rủi ro liên quan đến tài chính và nhu cầu vận hành, trong khi Nhà nước gánh các rủi ro pháp lý và chính sách. Trong khi đó, Jin và Doloi (2008), từ góc nhìn lý thuyết chi phí giao dịch chỉ ra rằng mức độ cam kết, năng lực quản trị rủi ro và lịch sử hợp tác giữa các đối tác cũng là yếu tố ảnh hưởng lớn đến cách thức phân bổ quyền lợi và trách nhiệm trong mô hình liên doanh. Từ các nghiên cứu này, có thể thấy rằng việc phân chia rủi ro giữa các bên trong liên doanh không chỉ là vấn đề pháp lý, mà còn gắn liền với yếu tố năng lực, mức độ đóng góp và sự minh bạch trong thiết kế cấu trúc hợp đồng PPP.

2.2.2. Rủi ro tài chính và nghĩa vụ bảo lãnh giữa các đối tác

Theo Zhang (2005), sự thiếu minh bạch trong cơ chế chia sẻ tài chính giữa các bên trong liên doanh có thể dẫn đến xung đột lợi ích và đổ vỡ hợp tác khi xảy ra biến động kinh tế bất lợi. Việc phân bổ nghĩa vụ bảo lãnh vốn và nghĩa vụ thanh toán thường thiếu rõ ràng, đặc biệt trong giai đoạn vận hành, làm gia tăng rủi ro mất khả năng thanh toán (Zhang, 2005). Trong một phân tích tại Trung Quốc, Zou et al. (2008) xác định rủi ro tỷ giá, rủi ro tăng chi phí tài chính và rủi ro doanh thu thấp là ba loại rủi ro tài chính đặc trưng đòi hỏi phải có sự tham gia bảo lãnh của Nhà nước hoặc bên thứ ba.

Đáng chú ý, nghiên cứu của Khazaeni et al. (2012) sử dụng mô hình fuzzy AHP để đánh giá các rủi ro tài chính trong PPP và kết luận rằng rủi ro từ nguồn vốn (funding risk), rủi ro thay đổi chính sách tín dụng, và rủi ro chia sẻ doanh thu là ba yếu tố có tác động lớn nhất đến hiệu quả tài chính của liên doanh. Ngoài ra, theo Cheung et al. (2010), tại Hồng Kông và các nước phát triển, những dự án PPP thành công đều có thiết kế cấu trúc tài chính linh hoạt, với cơ chế bảo lãnh chia sẻ doanh thu hoặc "minimum revenue guarantee" từ phía Nhà nước.

Như vậy, các rủi ro tài chính chính trong mô hình liên doanh PPP bao gồm: (i) Rủi ro không đạt điểm đóng tài chính do bất đồng hoặc thiếu năng lực tài chính của một trong các bên; (ii) rủi ro lãi suất và tỷ giá; (iii) rủi ro thiếu bảo lãnh chia sẻ doanh thu từ phía chính phủ và (iv) rủi ro pháp lý liên quan đến cam kết tài chính không rõ ràng giữa các bên trong liên doanh.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu này sử dụng phương pháp định lượng thông qua điều tra khảo sát bằng bảng hỏi để thu thập dữ liệu sơ cấp từ các chuyên gia, cán bộ quản lý và nhà đầu tư có kinh nghiệm trong lĩnh vực dự án đầu tư hạ tầng giao thông đường bộ theo hình thức đối tác công tư (PPP). Mục tiêu của khảo sát là đánh giá mức độ rủi ro phát sinh trong mô hình liên doanh PPP, đặc biệt tập trung vào các rủi ro liên quan đến phân chia quyền lợi, trách nhiệm và nghĩa vụ tài chính giữa các bên đối tác.

Tổng cộng có 150 bảng hỏi được phát ra đến các đối tượng khảo sát trong thời gian tháng 3, 4 năm 2025 thông google form, bao gồm: Cán bộ quản lý tại các cơ quan nhà nước có liên quan đến dự án PPP, đại diện các doanh nghiệp tư nhân tham gia vào mô hình liên doanh PPP, chuyên gia tư vấn có nghiên cứu trong lĩnh vực này. Sau quá trình thu thập và sàng lọc dữ liệu, có 135 bảng hỏi hợp lệ được sử dụng để phân tích, đạt tỷ lệ hợp lệ là 90%.

Các bảng hỏi được thiết kế dưới dạng thang đo Likert 5 điểm, từ 1 (rất không đồng ý/rất không quan trọng) đến 5 (rất đồng ý/rất quan trọng), nhằm đo lường mức độ đồng thuận của người trả lời về mức độ rủi ro phát sinh trong mô hình liên doanh PPP. Dữ liệu thu thập được xử lý và phân tích bằng phần mềm thống kê SPSS 26.0, sử dụng các phương pháp phân tích mô tả để đánh giá mức độ rủi ro.

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

4.1. Mô tả mẫu khảo sát

Về đặc điểm nhân khẩu học của mẫu khảo sát, trong tổng số 135 bảng hỏi hợp lệ được thu thập, tỷ lệ nam giới chiếm 65,2%, trong khi nữ giới chiếm 34,8%, phản ánh sự tham gia chủ yếu của nam giới trong lĩnh vực đầu tư hạ tầng giao thông theo hình thức PPP. Xét về độ tuổi, phần lớn người được khảo sát nằm trong khoảng từ 35 đến 50 tuổi (chiếm 58,5%), cho thấy mẫu khảo sát tập trung vào những người đang ở độ tuổi có nhiều kinh nghiệm và đang nắm giữ vị trí chuyên môn hoặc quản lý trong các tổ chức. Về kinh nghiệm công tác, có đến 71% người trả lời có từ 10 năm kinh nghiệm trở lên trong lĩnh vực liên quan đến đầu tư công - tư, cho thấy chất lượng chuyên môn của mẫu là tương đối cao và phù hợp với mục tiêu nghiên cứu. Xét theo loại hình tổ chức, có 42,2% người khảo sát đến từ khu vực nhà nước (bao gồm các cơ quan quản lý, ban, ngành), 41,5% làm việc tại các doanh nghiệp tư nhân (nhà đầu tư, nhà thầu, ngân hàng) và 16,3% còn lại thuộc các tổ chức tư vấn, viện nghiên cứu hoặc trường đại học. Các đặc điểm này phản ánh tính đa dạng và đại diện tốt cho các nhóm bên liên quan trực tiếp đến mô hình liên doanh trong các dự án PPP giao thông đường bộ.

4.2. Đánh giá mức độ rủi ro phát sinh trong mô hình liên doanh PPP

4.2.1. Rủi ro phân chia quyền lợi và trách nhiệm giữa các bên liên doanh

Kết quả khảo sát cho thấy, rủi ro "phân chia quyền lợi không tương xứng với mức đóng góp" được đánh giá nghiêm trọng nhất, với tổng cộng 86,67% số người tham gia khảo sát lựa chọn mức độ "Cao" và "Rất cao". Tiếp theo là rủi ro về "không rõ ràng trong trách nhiệm điều hành" (85,93%) và "mâu thuẫn trong quá trình ra quyết định giữa các bên" (82,22%), cho thấy nguy cơ xung đột nội bộ và thiếu minh bạch trong cơ chế phối hợp là hiện hữu. Các rủi ro liên quan đến quyền kiểm soát và khả năng điều chỉnh vai trò khi điều kiện thay đổi cũng nhận được tỷ lệ đánh giá cao lần lượt là 78,52% và 74,07%, phản ánh sự thiếu linh hoạt và minh bạch trong thiết kế cấu trúc liên doanh.

Bảng 1. Mức độ rủi ro phân chia quyền lợi và trách nhiệm giữa các bên liên doanh

Nội dung rủi ro	**Rất thấp (%)**	**Thấp (%)**	**Trung bình (%)**	**Cao (%)**	**Rất cao (%)**	**Nguồn**
Phân chia quyền lợi không tương xứng với mức đóng góp	0,74	1,48	10,37	50,37	36,30	Hwang et al. (2013); Cheung et al. (2009)
Không rõ ràng trong trách nhiệm quản lý và điều hành	0,74	2,22	11,11	48,89	37,04	
Mâu thuẫn trong quá trình ra quyết định giữa các bên	1,48	2,96	13,33	47,41	34,81	
Thiếu minh bạch về quyền kiểm soát và giám sát	0,74	3,70	17,04	45,19	33,33	
Khó điều chỉnh vai trò khi điều kiện thực tế thay đổi	1,48	4,44	20,00	42,22	31,85	

4.2.2. Rủi ro tài chính và nghĩa vụ bảo lãnh giữa các đối tác

Kết quả khảo sát cho thấy, cho thấy các rủi ro tài chính và nghĩa vụ bảo lãnh giữa các đối tác trong liên danh PPP giao thông đường bộ được đánh giá ở mức cao. Tỷ lệ lựa chọn mức "Cao" và "Rất cao" đối với các nội dung rủi ro đều vượt trên 80%, trong đó rủi ro phân bổ nguồn vốn không rõ ràng đạt khoảng 86,7% và rủi ro nghĩa vụ bảo lãnh tài chính không rõ ràng đạt trên 87%. Rủi ro chậm góp vốn hoặc không thực hiện đầy đủ cam kết góp vốn cũng được đánh giá cao, với tỷ lệ "Cao" và "Rất cao" xấp xỉ 83,7%. Các rủi ro liên quan đến thiếu cơ chế chia sẻ rủi ro tài chính và phân chia lợi nhuận chưa minh bạch có tỷ lệ đánh giá cao từ 80 - 84%. Kết quả này cho thấy cấu trúc tài chính là nhóm rủi ro then chốt trong mô hình liên danh PPP, ảnh hưởng trực tiếp đến tính khả thi và bền vững của dự án. Nhìn chung, các dữ liệu cho thấy rằng nếu không được kiểm soát tốt, các rủi ro này có thể ảnh hưởng trực tiếp đến tiến độ, hiệu quả và tính bền vững của mô hình liên doanh trong các dự án PPP.

Bảng 2. Mức độ rủi ro tài chính và nghĩa vụ bảo lãnh giữa các đối tác

Nội dung rủi ro	Rất thấp (%)	Thấp (%)	Trung bình (%)	Cao (%)	Rất cao (%)	Nguồn
Phân bổ nguồn vốn giữa các bên liên danh không rõ ràng	0,74	1,48	11,11	49,63	37,04	Hwang et al. (2013); Cheung et al, (2009); Akunyumu et al. (2025)
Chậm góp vốn hoặc không thực hiện đầy đủ cam kết góp vốn	1,48	2,22	12,59	47,41	36,30	
Nghĩa vụ bảo lãnh tài chính giữa các đối tác không rõ ràng	0,74	1,48	10,37	50,37	37,04	
Thiếu cơ chế chia sẻ rủi ro tài chính giữa các bên liên danh	0,74	2,22	13,33	48,15	35,56	
Phân chia lợi nhuận và nghĩa vụ tài chính chưa minh bạch	1,48	2,96	14,07	46,67	34,81	

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã làm rõ các nhóm rủi ro phát sinh trong mô hình liên doanh thực hiện dự án giao thông đường bộ theo hình thức đối tác công tư (PPP), với trọng tâm là hai nhóm rủi ro chính: (1) Rủi ro liên quan đến phân chia quyền lợi và trách nhiệm giữa các bên trong liên doanh; và (2) rủi ro tài chính và nghĩa vụ bảo lãnh giữa các đối tác.

Kết quả khảo sát cho thấy đa số ý kiến đánh giá các rủi ro này ở mức độ "Cao" và "Rất cao", đặc biệt là các rủi ro liên quan đến sự bất cân xứng trong đóng góp - lợi ích, xung đột trong quá trình vận hành, và thiếu rõ ràng trong cơ chế bảo lãnh tài chính. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất một số giải pháp nhằm giảm thiểu rủi ro như: Hoàn thiện khung pháp lý điều chỉnh mô hình liên doanh PPP, xây dựng cơ chế phân chia rủi ro minh bạch dựa trên mức độ kiểm soát và năng lực của từng bên, tăng cường năng lực đánh giá và giám sát tài chính trong liên doanh, áp dụng các công cụ quản trị rủi ro hiện đại, cũng như nâng cao năng lực thể chế và đào tạo chuyên sâu cho các bên tham gia. Những giải pháp này nếu được triển khai đồng bộ sẽ góp phần nâng cao hiệu quả quản trị rủi ro, gia tăng sự tin cậy giữa các bên trong liên doanh, từ đó thúc đẩy thành công và tính bền vững của các dự án PPP trong lĩnh vực hạ tầng giao thông tại Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] ADB, Public-Private Partnership Monitor: Vietnam, 2018.

[2] Akunyumu, S., Fugar, F. D., & Adinyira, E. Assessing risk allocation preferences of partners in international construction joint venture projects in Ghana. Journal of Financial Management of Property and Construction, 30(1), 111-136, 2025.

[3] Cheung, E., Chan, A. P., & Kajewski, S. Enhancing value for money in public private partnership projects: Findings from a survey conducted in Hong Kong and Australia compared to findings from previous research in the UK. Journal of Financial Management of Property and Construction, 14(1), 7-20, 2009.

[4] Development Resource Center (Asian Development Bank). Guidelines for the economic analysis of projects. Asian Development Bank, 1997.

[5] Grimsey, D., & Lewis, M. K. Public private partnerships: The worldwide revolution in infrastructure provision and project finance. In Public Private Partnerships, Edward Elgar Publishing, 2004.

[6] Hwang, B. G., Zhao, X., & Gay, M. J. S. Public private partnership projects in Singapore: Factors, critical risks and preferred risk allocation from the perspective of contractors. International journal of project management, 31(3), 424-433, 2013.

[7] Khazaeni, G., Khanzadi, M., & Afshar, A. Fuzzy adaptive decision making model for selection balanced risk allocation. International Journal of Project Management, 30(4), 511-522, 2012.

[8] Truong, T. M. T., & Nguyen, N. T. Traffic Revenue Risk Identification and Assessment in Build-Operate-Transfer Transport Projects in Vietnam. In CIGOS 2021, Emerging Technologies and Applications for Green Infrastructure: Proceedings of the 6th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering and Structures. pp. 1563-1572). Singapore: Springer Nature Singapore, 2021.

[9] World Bank. Public-private partnerships: Reference guide version, 2017.

[10] Zhang, X. Critical success factors for public-private partnerships in infrastructure development. Journal of construction engineering and management, 131(1), 3-14, 2005.

[11] Zou, P. X., Wang, S., & Fang, D. A life-cycle risk management framework for PPP infrastructure projects. Journal of financial management of property and construction, 13(2), 123-142, 2008.

■Ngày nhận bài: 24/02/2026 ■Ngày sửa bài: 02/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 12/3/2026

Thực trạng chuyển dịch xanh của các doanh nghiệp vận tải niêm yết ở Việt Nam giai đoạn 2020 - 2024

Green transition dynamics of Vietnam's listed transportation sector: Period 2020 - 2024

> TS PHAN NGUYỄN HOÀI NAM
Trường Đại học Giao thông vận tải
Email: nampnh@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu thực hiện đánh quá trình trình chuyển dịch xanh của các doanh nghiệp (DN) ngành vận tải niêm yết trên hai sàn giao dịch chứng khoán HOSE và HNX tại Việt Nam trong giai đoạn 2020 - 2024. Thông qua việc hệ thống 10 tiêu chí (TC) đánh giá tham khảo dựa trên phương pháp đánh giá chuyển dịch carbon thấp (ACT) của World Benchmarking Alliance (2023), nghiên cứu tiến hành phân tích nội dung chuyên sâu từ các báo cáo thường niên và báo cáo phát triển bền vững của các DN trong mẫu. Kết quả nghiên cứu chỉ ra sự chuyển dịch không đồng đều giữa các nhóm ngành. Bằng việc chấm điểm thực chứng khi có hoạt động chuyển dịch xanh trên thang từ 1 đến 4; ghi nhận điểm 0 nếu hoàn toàn không có hoạt động nào, bài viết không chỉ cung cấp một bức tranh toàn cảnh về mức độ chuyển dịch xanh của các DN vận tải niêm yết mà còn làm tiền đề khoa học cho các nghiên cứu thực chứng và các đề xuất chính sách liên quan trong tương lai.

Từ khóa: Chuyển dịch xanh; doanh nghiệp vận tải; kinh tế xanh.

ABSTRACT

This study evaluates the green transition process of transportation enterprises listed on the HOSE and HNX stock exchanges in Vietnam during the 2020 - 2024 period. By systematizing 10 evaluation criteria adapted from the World Benchmarking Alliance's (2023) Assessing Low-Carbon Transition (ACT) methodology, the research conducts an in-depth content analysis of annual reports and sustainability reports from the sample firms. The findings indicate an uneven transition progress across different sub-sectors. By applying an empirical scoring system ranging from 1 to 4 for active green initiatives-while assigning a score of 0 for a total absence of activities-this paper not only provides a comprehensive overview of the green transition level among listed transport firms but also establishes a scientific foundation for future empirical research and relevant policy recommendations.

Keywords: Green transition; transportation enterprises; green economy.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong kỷ nguyên kinh tế carbon thấp, ngành vận tải, với vai trò là mạch máu của nền kinh tế là một trong những tác nhân chính gây ra phát thải khí nhà kính toàn cầu. Đối với các DN vận tải niêm yết tại Việt Nam, việc chuyển dịch xanh đã không còn là một lựa chọn mang tính hình thức mà trở thành yêu cầu sống còn để duy trì năng lực cạnh tranh và đáp ứng các tiêu chuẩn quản trị ESG khắt khe. Tuy nhiên, hành trình từ những cam kết trong văn bản đến hành động thực thi xanh hóa thực tế đang đối mặt với nhiều rào cản. Nghiên cứu này được thực hiện nhằm xác định vị thế của các DN vận tải trên bản đồ chuyển dịch xanh giai đoạn 2020 - 2024 thông qua việc vận dụng các thang đo quốc tế uy tín, đặc biệt là phương pháp đánh giá chuyển dịch carbon thấp (ACT) của World Benchmarking Alliance (2023) [1].

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

Các nghiên cứu quốc tế của Skupień (2024) [2] và World Benchmarking Alliance (2023) [1] đã chỉ ra rằng chuyển dịch xanh không phải là một bước nhảy vọt mà là một lộ trình trưởng thành có phân tầng. Bằng cách sử dụng các mô hình đánh giá carbon thấp (ACT) và chỉ số chuyển dịch công bằng (JTI), giới học thuật đã xác lập được khung chuẩn mực để lượng hóa nỗ lực của DN từ giai đoạn nhận

diện khái niệm đến khi làm chủ công nghệ. Đặc biệt, OECD (2023) [3] nhấn mạnh tầm quan trọng của việc xanh hóa hạ tầng và vận tải như một trụ cột cốt lõi để đạt được các mục tiêu khí hậu toàn cầu.

Tại Việt Nam, hành lang pháp lý đã được kiện toàn nhằm tạo động lực cho các DN niêm yết thực thi hướng tới Net Zero. Các văn bản trọng tâm như Chiến lược tăng trưởng xanh quốc gia (Quyết định số 1658/QĐ-TTg) [4] và Kế hoạch giảm nhẹ phát thải khí nhà kính ngành GTVT đến năm 2030 (Quyết định số 1191/QĐ-BGTVT) [5] đã tạo ra nền tảng quan trọng. Sự quyết tâm của Chính phủ còn được thể hiện qua một loạt các văn bản chiến lược như Chiến lược quốc gia về biến đổi khí hậu đến năm 2050 (Quyết định số 896/QĐ-TTg) [6] và Kế hoạch hành động giảm phát thải khí mê-tan (Quyết định số 942/QĐ-TTg) [7] hay Chương trình hành động về chuyển đổi năng lượng xanh (Quyết định số 876/QĐ-TTg) [8].

Mặc dù các nghiên cứu của Nguyễn và Phạm (2020) [9] hay Vo & Nguyen (2023) [10] đã phân tích về logistics xanh và vai trò của vốn trí tuệ, nhưng đa số vẫn chưa kết hợp đồng bộ giữa hành động thực thi và hiệu quả quản trị.

Chính vì vậy, nghiên cứu được thực hiện dựa trên việc vận dụng một khung đo lường tích hợp gồm 10 TC bao quát toàn diện từ Mục tiêu chiến lược (TC1) đến Chuyển đổi nhân sự (TC10) dựa trên các thang đo uy tín; đặc biệt là phương pháp đánh giá chuyển dịch carbon thấp (ACT) của World Benchmarking Alliance (2023) [1].

3. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

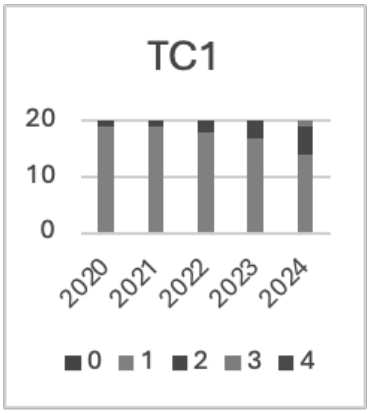
- Quy trình chọn mẫu và thu thập dữ liệu: Nghiên cứu được thực hiện trên 20 DN vận tải cốt lõi (được phân loại ngành kinh doanh là vận tải) niêm yết trên sàn HOSE và HNX (tra cứu trên vietstock.vn) giai đoạn 2020 - 2024, sau khi đã loại bỏ các DN liên quan như các DN kho bãi, logistics cũng như các DN đăng ký ngành kinh doanh là hỗ trợ vận tải để đảm bảo tính đồng nhất về đặc thù sở hữu nhiều phương tiện vận tải. Dữ liệu được lấy từ Báo cáo thường niên, Báo cáo Phát triển bền vững (ESG) và Báo cáo tác động môi trường nhằm đảm bảo tính khách quan

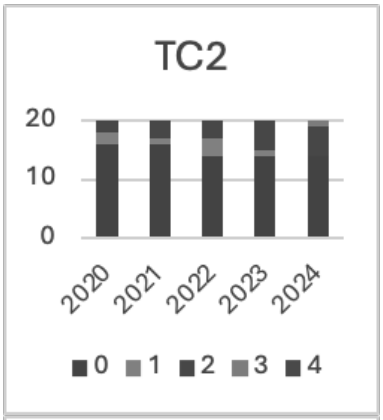
- Khung TC đánh giá tích hợp: Hệ thống đánh giá gồm 10 TC được cấu trúc theo lộ trình logic từ tư duy đến hành động, có điều chỉnh và bổ sung so với thang ACT của WBA như tách riêng TC 9 về công nghệ và đổi mới để phù hợp với bối cảnh công nghệ trong ngành vận tải phát triển mạnh cũng như hướng tới tới phát triển bền vững về con người thông qua chuyển dịch đối với nhân sự. Quá trình bắt đầu bằng việc xác lập mục tiêu (TC1), đầu tư vào tài sản hữu hình (TC2) và vô hình (TC3) để tạo ra sản phẩm/dịch vụ xanh (TC4). Hệ thống này được vận hành bởi bộ khung quản trị (TC5), lan tỏa qua chuỗi cung ứng (TC6), khách hàng (TC7) và chính sách (TC8). Động lực cốt lõi nằm ở cng nghệ và đổi mới (TC9) và được hoàn thiện bằng yếu tố nhân văn thông qua chuyển đổi nhân sự (TC10).

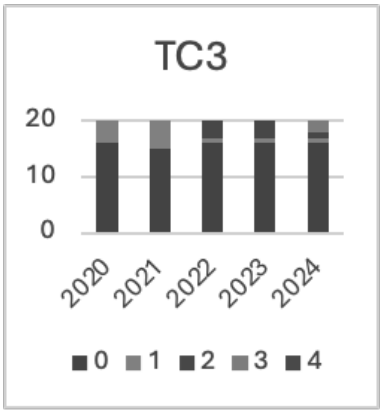
- Phương pháp định mức và chấm điểm: Nghiên cứu áp dụng thang với mức 1 ghi nhận sự nhận diện định tính; mức 2 đánh dấu việc lập kế hoạch và phê duyệt chiến lược, mức 3 đánh dấu khi DN có số liệu định lượng và bằng chứng thực thi cụ thể. Mức 4 là chuẩn mực cao nhất, đòi hỏi cơ chế giám sát độc lập và báo cáo theo tiêu chuẩn định kỳ. Nếu hoàn toàn không có hoạt động chuyển dịch xanh thì DN đạt 0 điểm.

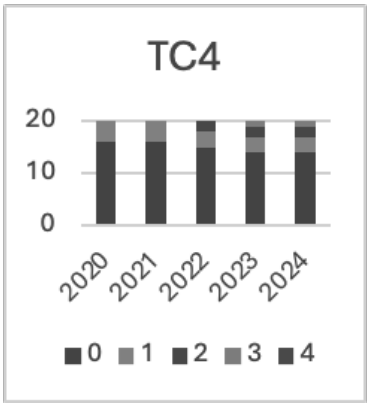
4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

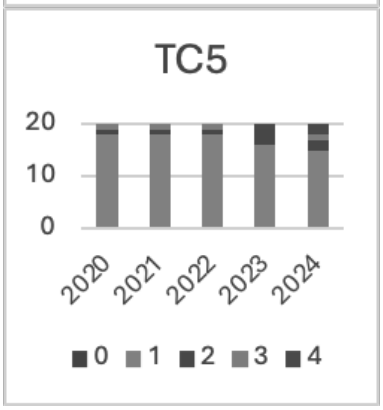
Kết quả số lượng DN ở các mức điểm theo từng TC thể hiện trong các đồ thị sau:

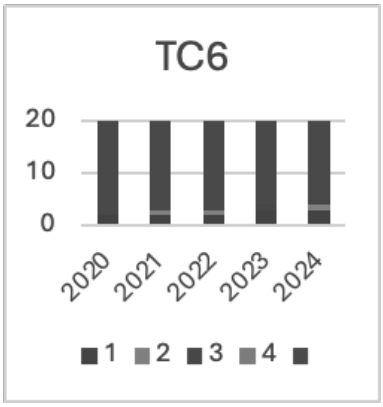


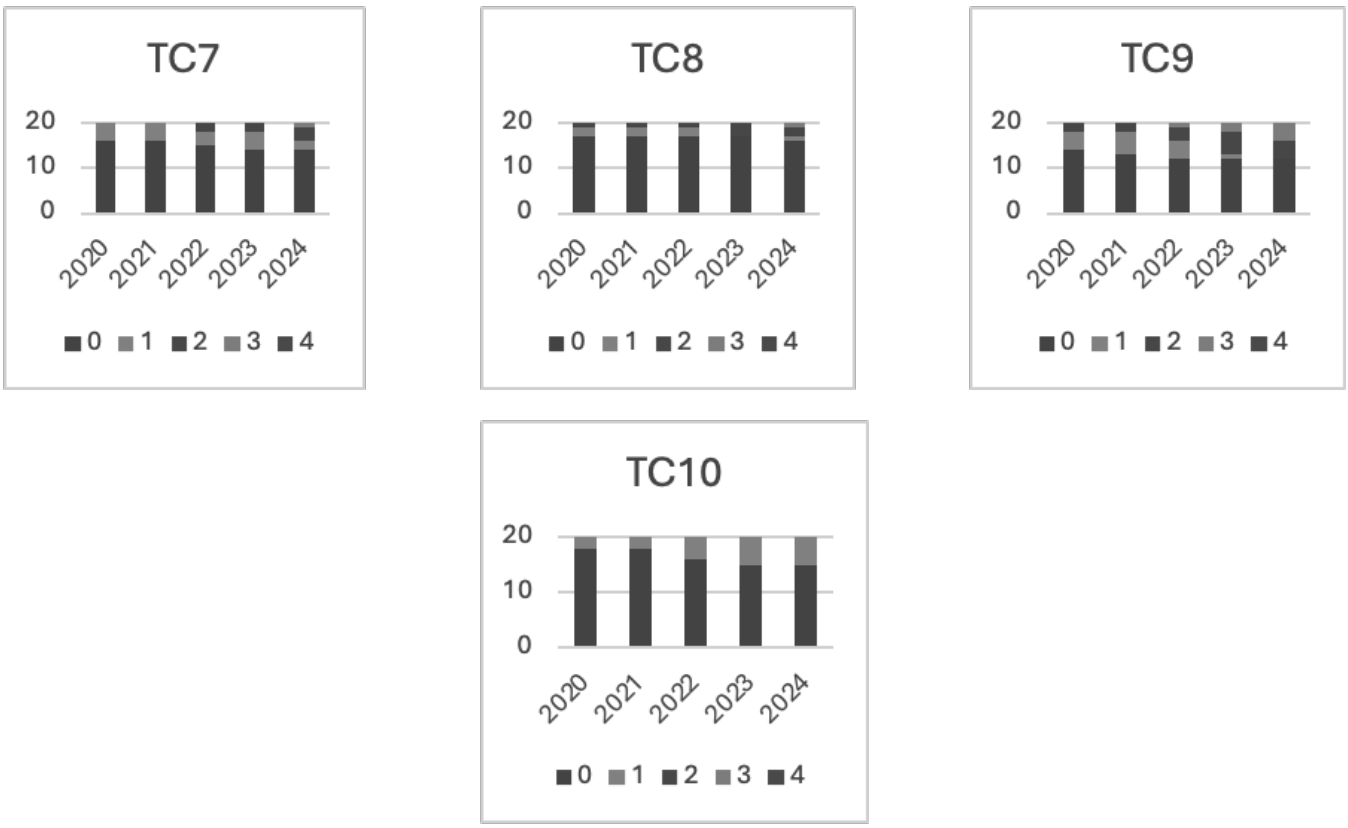












Hình 1. Đồ thị 1: Các DN đạt các mức điểm theo các TC

(Nguồn: Các tác giả tổng hợp)

Đối với TC 1 về tuyên bố về mục tiêu chuyển dịch xanh. Trong giai đoạn 2020 - 2021, có tới 19 DN duy trì ở mức điểm 1, phản ánh các cam kết mới dừng lại ở tuyên bố chung mang tính định tính. Đến năm 2024, số lượng ở mức điểm 1 giảm xuống còn 14 DN, nhường chỗ cho nhóm đạt mức điểm 2 và 3. Nhóm tiên phong đã có bước tiến lớn, điển hình như Tổng công ty Hàng không Việt Nam (HVN) tiết kiệm 22.000 tấn nhiên liệu thực tế, CTCP Hàng không Vietjet (VJC) xác lập sứ mệnh Net Zero 2050 và Tổng công ty Cổ phần Vận tải dầu khí (PVT) đã thực hiện định lượng hóa dữ liệu tiêu thụ nhiên liệu chi tiết cho từng loại dầu (FO, DO, LO) và xác lập hệ thống đo lường phát thải theo chuẩn mực GRI/SASB. Các DN khác như CTCP Vận tải Sản phẩm khí Quốc tế (GSP) phân lớp lộ trình theo TCVN & IMO, trong khi CTCP Vận tải biển Việt Nam (VOS) tuân thủ chỉ số cường độ Carbon CII.

Đối với TC 2, đầu tư tài sản hữu hình, trong giai đoạn 2020 - 2021, đại đa số DN (16 DN) hoàn toàn ở mức điểm 0. Dù đã có sự cải thiện, nhưng đến năm 2024, vẫn còn tới 14 DN chưa có bất kì hoạt động đầu tư hữu hình xanh rõ rệt (mức 0). Năm 2024, VJC đầu tư 1,1 tỷ USD cho thiết bị Avionics & động cơ phụ APU Honeywell, HVN thuê mua tàu bay thế hệ mới A321neo và lắp Sharklet tối ưu khí động học. CTCP Ánh Dương Việt Nam (VNS) thay thế đội xe cũ bằng xe Hybrid, còn VOS và PVT lắp đặt hệ thống xử lý nước dằn BWTS, bộ giới hạn công suất EPL và dùng sơn vỏ tàu giảm ma sát.

Đối với TC 3, đầu tư tài sản vô hình, việc đầu tư vào nghiên cứu phát triển vẫn còn rất hạn hẹp khi phần lớn mẫu (15 - 16 DN) ở mức điểm 0 qua các năm. Một số điển hình đạt được mức 2 và 3 như VJC với hệ thống AMOS & SFCO2 quản trị nhiên liệu theo thời gian thực, HVN trở thành đối tác chiến lược của Neste về nhiên liệu SAF. Trong khi đó, PVT và GSP sở hữu chứng chỉ ISO 14001 & 29001. VNS thì đầu tư mạnh mẽ vào Vinasun App và hệ thống GPS.

Đối với TC 4 về cung cấp Sản phẩm và Dịch vụ xanh, 14 - 16 DN duy trì mức điểm 0 trong suốt giai đoạn. HVN và VJC là một trong những DN đã tiên phong đạt được 2 - 3 điểm nhờ thương mại hóa các chuyến bay sử dụng nhiên liệu SAF và thu hồi 12 triệu suất ăn/dụng cụ mỗi năm. VNS thì tích hợp xe hybrid cùng nhiên liệu CNG vào dịch vụ taxi. GSP mặc dù không trực tiếp cung cấp dịch vụ xanh nhưng đã đóng góp vào phần vào hỗ trợ việc đưa khí sạch LNG/LPG vào nền kinh tế.

Đối với TC 5 về hệ thống Quản trị ESG, hầu hết các DN trong mẫu nghiên cứu đều đạt tối thiểu 1 điểm mỗi năm. Tuy nhiên, kết quả này phần lớn nhờ vào quy định bắt buộc về đánh giá tác động môi trường và các cam kết bảo vệ môi trường hiện hành. Giai đoạn này chỉ ghi nhận sự bứt phá của một nhóm nhỏ DN tiêu biểu, điển hình như HVN đã thiết lập mô hình 3 lớp với Phó Tổng Giám đốc trực tiếp phụ trách ESG, hay VJC thành lập Ủy ban Quản lý sự thay đổi và đưa báo cáo bền vững lên cấp Hội đồng quản trị (HĐQT) chỉ đạo trực tiếp (Mức 4). Ở khối vận tải biển, GSP đã ban hành chỉ dẫn nội bộ và tuyên bố cam kết về quy tắc ứng xử trong hợp tác với nhà cung cấp. Đặc biệt, PVT thể hiện sự chuyên nghiệp vượt trội khi thiết lập Ủy ban ESG trực thuộc HĐQT, ban hành Bộ Quy tắc ứng xử (Code of Conduct), tích hợp quản trị rủi ro biến đổi khí hậu.

Đối với TC 6 về chuỗi cung ứng, đây vẫn bài toán khó khi đại đa số (15-18 DN) ở mức điểm 0 trong suốt giai đoạn. Tuy nhiên, nhóm dẫn dắt bắt đầu hình thành với HVN thể hiện vai trò dẫn đầu khi thay thế 62,8 triệu túi nilon từ nhà cung cấp và VJC tự chủ nguồn nhiên liệu SAF qua liên doanh Novus Aviation. Ngành vận tải biển ghi nhận VOS áp dụng phần mềm quản trị chuỗi mua sắm thông minh, còn GSP và PVT rất quan tâm tới việc thiết hợp đồng dịch vụ đảm bảo chất lượng và TC ESG.

Đối với TC 7, tương tác khách hàng, thể hiện rõ nhất qua các

chiến dịch truyền thông và xây dựng hình ảnh thì 16 - 18 DN luôn đạt 0 điểm. HVN và VJC đã thực hiện các dự án như "Góp lá vá rừng" huy động 60.000 lượt khách quyên góp và chương trình quyên góp dặm thưởng 13,76 triệu dặm; thực hiện "Zero Waste Vietnam Airlines" như thay thế ống hút tre/inox, tấm nilon phủ thùng hàng mỏng hơn. Đặc biệt HVN đã ký kết thỏa thuận hợp tác tham gia dự án đo lường phát thải khí CO_2 (CO_2 Connect) do Hiệp hội Vận tải hàng không Quốc tế (IATA) phát triển và trở thành hãng hàng không đầu tiên của Việt Nam tham gia dự án này. Theo thỏa thuận, họ sẽ cung cấp dữ liệu để IATA sử dụng cho việc tính toán số liệu về khí phát thải trung bình trên mỗi hành khách. VNS thì gắn kết người dùng qua "Ngày hội đi bộ xanh" và đẩy mạnh thanh toán trên App để giảm thiểu rác thải giấy.

Đối với TC 8, tham gia chính sách. Hoạt động vận động, tham gia và đóng góp chính sách xanh chủ yếu tập trung ở nhóm DN dẫn đầu khi 16 - 17 DN còn lại ở mức điểm 0. Từ năm 2023, sự bứt phá của nhóm đạt mức điểm 2 và 3 phản ánh vai trò chủ động hơn của các DN này, HVN và VJC trở thành đối tác chiến lược của Chính phủ trong lộ trình Net Zero và phản biện cơ chế CORSIA. Về phía các DN vận tải biển, PVT và GSP tập trung vào việc tuân thủ và vận hành thử nghiệm theo các quy định mới của IMO (như chỉ số CII, EEXI), đồng thời tích cực tham gia các diễn đàn chuyên ngành để đóng góp ý kiến.

Đối với TC 9, công nghệ và đổi mới, đây là TC ghi nhận ít 0 điểm toàn bộ hơn các TC khác (12 - 14 DN). Đây là minh chứng cho việc công nghệ là công cụ then chốt của lộ trình xanh. Thuật toán tối ưu hóa đường bay và quản lý nhiên liệu đã đạt đến mức hiệu quả vận hành rất cao của HVN đã giúp tiết kiệm 69.520 tấn CO_2, HVN cũng thực hiện thành công chuyến bay sử dụng SAF với tỷ lệ 38% và tiết kiệm 2,3 triệu tấn nhiên liệu nhờ số hóa (PressReader). CTCP Vận tải Xăng dầu Đường thủy Petrolimex (PJT) thì tự chế tạo các hệ hâm sấy tận dụng điện năng máy đèn để cắt giảm dầu FO đốt nồi hơi đã minh chứng cho năng lực đổi mới kỹ thuật tự thân nhằm giảm phát thải trực tiếp (Scope 1). Tại CTCP Vận tải Xăng dầu VIPCO (VIP), Công ty đã lắp đặt thiết bị đạo lưu chân vịt cho tàu Petrolimex 18, một giải pháp cơ khí thủy động học giúp tăng hiệu suất đẩy và trực tiếp tiết kiệm từ 3 - 5% nhiên liệu tiêu thụ, trong khi VNS tối ưu lộ trình trên Vinasun App để giảm thiểu quãng đường chạy rỗng.

Đối với TC 10, chuyển đổi nhân sự đối với người lao động trong quá trình chuyển dịch xanh. Khía cạnh con người ghi nhận tốc độ chuyển dịch chậm nhất (15 - 18 DN luôn đạt 0 điểm) và chưa có DN nào vượt qua ngưỡng điểm 1 trong suốt 5 năm. Số lượng DN bắt đầu quan tâm (mức điểm 1) đã tăng từ 2 lên 5 DN vào năm 2024. Những nỗ lực sơ khởi bao gồm việc HVN và VJC đào tạo kỹ năng vận hành cho phi công với nguyên liệu mới. Với đội ngũ thuyền viên, PVT triển khai hệ thống đào tạo đặc thù theo các tiêu chuẩn quốc tế như STCW, ISM, ISPS, MLC 2006. Nội dung đào tạo bám sát vận hành khai thác tàu dầu, hóa chất, vetting, an toàn vận hành, cứu sinh cứu hỏa, xử lý khí độc, vệ sinh hầm hàng, ứng phó tràn dầu, vận chuyển hàng nguy hiểm. VNS cũng chú trọng chính sách đãi ngộ bền vững để đảm bảo không nhân viên nào bị bỏ lại phía sau khi chuyển đổi sang các dòng xe công nghệ mới.

5. KẾT LUẬN

Kết quả đánh giá thực chứng 20 DN vận tải niêm yết giai đoạn 2020 - 2024 khẳng định tiến trình chuyển dịch xanh tại Việt Nam đang diễn biến theo xu hướng phân hóa mạnh mẽ giữa các nhóm ngành. Động lực chính thúc đẩy tiến trình chuyển dịch xanh của các DN hiện nay phần lớn vẫn đến từ áp lực tuân thủ các rào cản kỹ thuật và tiêu chuẩn quốc tế khi thâm nhập thị trường toàn cầu. Trong khi đó, tại thị trường nội địa, các chế tài thực thi chưa đủ mạnh mẽ để tạo ra sức ép chuyển đổi đồng bộ. Nhìn chung, để hiện thực hóa lộ trình Net Zero 2050, cần thiết lập một cơ chế tài chính xanh linh hoạt, kết hợp cùng vai trò định hướng của các DN dẫn dắt nhằm lan tỏa các tiêu chuẩn bền vững ra toàn bộ hệ sinh thái chuỗi cung ứng.

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-014.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] World Benchmarking Alliance. Transport Benchmark - Assessing Low-Carbon Transition (ACT) Methodology, 2023. Internet: https://archive.worldbenchmarkingalliance.org/publication/transport/methodology/ (Accessed: 2026).

[2] E Skupień. Maturity models in the assessment of transport systems: A literature review. WUT Journal of Transportation Engineering, vol. 142, pp. 5-20, 2024.

[3] OECD. Greening infrastructure and transport. Paris: OECD Publishing, 2023. Internet: https://www.oecd.org/en/topics/greening-infrastructure-and-transport.html (Accessed: 2026).

[4] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 1658/QĐ-TTg phê duyệt Chiến lược Tăng trưởng xanh quốc gia giai đoạn 2021 - 2030, tầm nhìn 2050, 2021.

[5] Bộ Giao thông vận tải. Quyết định số 1191/QĐ-BGTVT về Kế hoạch giảm nhẹ phát thải khí nhà kính ngành GTVT đến năm 2030, 2024.

[6] Bộ Tài nguyên và Môi trường. Quyết định số 896/QĐ-TTg về phê duyệt Chiến lược quốc gia về biến đổi khí hậu giai đoạn đến năm 2050, 2022.

[7] Bộ Tài nguyên và Môi trường. Quyết định số 942/QĐ-TTg về việc phê duyệt Kế hoạch hành động giảm phát thải khí mê-tan đến năm 2030, 2022.

[8] Thủ tướng Chính phủ. Quyết định số 876/QĐ-TTg phê duyệt Chương trình hành động về chuyển đổi năng lượng xanh, giảm phát thải khí các-bon và khí mê-tan của ngành Giao thông vận tải, 2022.

[9] P. A. Nguyen and V. T. Pham. Toward the Green Logistics by Developing Sustainable Transportation: A Case Study from Vietnam, GIS Business, vol. 15, no. 2, 2020.

[10] H. V. Vo and N. P. Nguyen. Greening the Vietnamese supply chain: The influence of green logistics knowledge and intellectual capital, Heliyon, vol. 9, no. 5, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e15953.

■Ngày nhận bài: 02/3/2026 ■Ngày sửa bài: 12/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 24/3/2026

Hoàn thiện pháp luật về quản lý rủi ro thiên tai và nước biển dâng đối với hệ thống cảng biển Việt Nam

Improving the legal framework for risk management of natural disasters and sea level rise in Vietnamese seaports

> TS LƯƠNG THỊ KIM DUNG, THS VŨ THỊ THANH LAN, THS NGUYỄN VIẾT HÀ
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
Email: dungltk.hh@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo tập trung nhận diện các "khoảng trống" pháp lý trong việc quản lý rủi ro thiên tai và nước biển dâng đối với hệ thống cảng biển Việt Nam. Thông qua việc phân tích thực trạng giao thoa giữa Bộ luật Hàng hải (BLHH), Luật Phòng, chống thiên tai (PCTT) và các quy định về quy hoạch - xây dựng, nghiên cứu chỉ ra sự thiếu đồng bộ giữa dữ liệu dự báo biến đổi khí hậu (BĐKH) với các tiêu chuẩn kỹ thuật có tính bắt buộc, từ đó đề xuất các giải pháp nhằm chuyển dịch mô hình quản trị rủi ro từ "phản ứng" ngắn hạn sang "thích ứng chủ động" dài hạn, góp phần hoàn thiện hành lang pháp lý và nâng cao năng lực chống chịu cho hệ thống cảng biển quốc gia.

Từ khóa: Thiên tai; nước biển dâng; pháp luật; cảng biển.

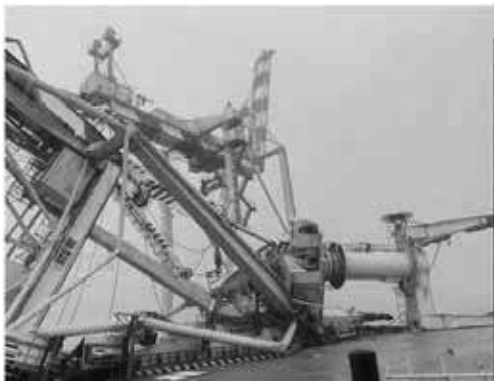
ABSTRACT

This paper identifies the legal "gaps" in the management of natural disaster risks and sea-level rise for Vietnam's seaport system. By analyzing the intersection of the Vietnam Maritime Code, the Law on Natural Disaster Prevention and Control and regulations on Planning and Construction, the research highlights a lack of synchronization between climate change projection data and mandatory technical standards. On this basis, the study proposes solutions to shift the risk management paradigm from short-term "reactive" measures to long-term "proactive adaptation", contributing to the refinement of the legal framework and enhancing the resilience of the national seaport system.

Keywords: Natural disasters; sea level rise; law; seaport.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Rủi ro thiên tai và nước biển dâng đang đặt ra những thách thức hiện hữu và nghiêm trọng đối với hệ thống hạ tầng cảng biển tại Việt Nam. Sự gia tăng về tần suất cũng như cường độ của các hình thái thời tiết cực đoan như bão, lũ lụt và triều cường đã gây ra những tổn thất trực tiếp lên các cấu trúc cốt lõi của cảng. Nước biển dâng làm suy giảm đáng kể tĩnh không an toàn của cầu cảng, trực tiếp dẫn đến nguy cơ ngập lụt cục bộ tại các bãi chứa container và đẩy nhanh quá trình xói mòn, hư hại nền móng cầu tàu cùng hệ thống công trình bảo vệ bờ. Đặc biệt, tải trọng động từ sóng lớn trong các cơn bão gây áp lực cực hạn lên hệ thống cần cẩu bờ, tiềm ẩn rủi ro đổ gãy hoặc sai lệch kết cấu của các thiết bị xếp dỡ trọng yếu.



Hình 1. Bão số 3 Yagi (2024) gây thiệt hại tại Cảng Mipec và các cảng ở Hải Phòng

Hiện tượng bồi lắng trầm tích diễn ra nhanh chóng sau lũ lụt làm thu hẹp độ sâu thiết kế của luồng hàng hải, buộc tàu phải giảm tải hoặc chuyển hướng, gây đứt gãy cục bộ chuỗi cung ứng logistics. Song song đó, các hệ thống an ninh cảng biển như mạng lưới camera giám sát, hàng rào điện tử và các thiết bị cảm biến dễ bị tê liệt do ngập nước, vô tình tạo ra các "điểm mù" an ninh mà các đối tượng tội phạm có thể lợi dụng trong giai đoạn hậu thiên tai. Ngoài ra, tình trạng ngập lụt có thể làm hư hại các container chứa hàng nguy hiểm, dẫn đến nguy cơ rò rỉ hóa chất và gây ra thảm họa kép đối với hệ sinh thái biển.

Hình 2. Tàu Evergreen gặp nạn khi đang neo đậu chờ cập cảng Callao (Peru) năm 2025

Mặc dù pháp luật Việt Nam đã có các quy định về quản lý rủi ro thiên tai và BĐKH đối với cảng biển nhưng mới chỉ tập trung vào việc ứng phó ngắn hạn và bộc lộ nhiều bất cập về mặt dự báo, thích ứng dài hạn đối với hệ thống cảng biển.

2. PHÁP LUẬT VIỆT NAM VỀ QUẢN LÝ RỦI RO THIÊN TAI/ BĐKH ĐỐI VỚI CẢNG BIỂN VÀ NHỮNG KHOẢNG TRỐNG PHÁP LÝ

Hiện pháp luật Việt Nam chưa có một văn bản độc lập quy định toàn diện về quản lý rủi ro thiên tai/BĐKH riêng cho cảng biển. Thay vào đó, nó được điều chỉnh bởi sự giao thoa của nhiều luật chuyên ngành. Cơ sở pháp lý cho quản lý rủi ro cảng biển chủ yếu được thiết lập từ ba trụ cột chính: BLHH Việt Nam, Luật PCTT và các đạo luật về quy hoạch, xây dựng và bảo vệ môi trường (lồng ghép yếu tố BĐKH).

2.1. BLHH Việt Nam (năm 2015)

Đây là văn bản pháp lý đóng vai trò nền tảng điều chỉnh toàn bộ hoạt động hàng hải, bao gồm việc xây dựng, khai thác và quản lý hệ thống cảng biển. Tuy nhiên, khi phân tích dưới góc độ quản lý rủi ro thiên tai và nước biển dâng, Bộ luật lại bộc lộ những hạn chế mang tính cấu trúc do tập trung chủ yếu vào an toàn vận hành tức thời thay vì tính chống chịu dài hạn của hạ tầng. Khoảng trống pháp lý xuất hiện rõ rệt ở việc BLHH chưa thiết lập được các yêu cầu kỹ thuật bắt buộc nhằm lồng ghép kịch bản nước biển dâng vào khâu thiết kế và xây dựng cơ bản của cảng biển, cụ thể:

Thứ nhất, thiếu các yêu cầu về thiết kế cao độ cảng: BLHH không trực tiếp quy định hay viện dẫn đến các tiêu chuẩn về cao độ bến cảng tối thiểu phải được điều chỉnh dựa trên dự báo nước biển dâng trong vòng 50 đến 100 năm (theo kịch bản BĐKH của Bộ Nông nghiệp và Môi trường). Việc này vô tình chuyển gánh nặng quy định sang các văn bản dưới luật mà đôi khi các văn bản này lại chậm cập nhật hoặc mang tính khuyến nghị.

Thứ hai, chưa có quy định về kết cấu và công nghệ chống chịu: Bộ luật thiếu các điều khoản yêu cầu chủ đầu tư cảng phải xem xét các giải pháp kỹ thuật có khả năng thích ứng linh hoạt (ví dụ: Thiết kế nền móng sâu hơn, vật liệu chống chịu xâm thực mặn tốt hơn hoặc khả năng nâng cấp cao độ bến trong tương lai) như một điều kiện tiên quyết để được cấp phép đầu tư.

Thứ ba, thiếu quy định về thẩm định rủi ro BĐKH: Bộ luật chưa thiết lập cơ chế pháp lý bắt buộc yêu cầu mọi dự án xây dựng cảng biển hoặc mở rộng quy mô đều phải đính kèm một Báo cáo đánh giá rủi ro và tính dễ bị tổn thương đối với BĐKH và nước biển dâng như một thành phần không thể thiếu của hồ sơ thiết kế cơ sở.

Thứ tư, thiếu các quy định về quản lý luồng hàng hải và sa bồi sau thiên tai. Bão, lũ và các trận mưa lớn cực đoan gây ra hiện tượng sa bồi nghiêm trọng và đột ngột tại các khu vực luồng lạch cửa sông và cảng. Điều này làm giảm độ sâu luồng, gây cản trở và thậm chí cấm tàu có mớn nước lớn ra vào, ảnh hưởng trực tiếp đến tính liên tục vận hành của cảng. Tại Điều 81 BLHH có xác định trách nhiệm quản lý và bảo trì luồng hàng hải. Theo đó, Bộ Xây dựng chịu trách nhiệm bảo trì, quản lý luồng công cộng, chủ đầu tư cảng biển quản lý luồng chuyên dùng. Tuy nhiên, các quy định này chỉ mang tính định danh trách nhiệm chung về "bảo trì, quản lý" mà thiếu quy định chi tiết về quy trình ứng phó khẩn cấp đối với hiện tượng sa bồi đột ngột do thiên tai. Sự thiếu vắng này cùng với sự giao thoa trách nhiệm khi sa bồi xảy ra ngoài luồng chuyên dùng đã tạo ra một khoảng trống pháp lý trong việc đảm bảo tính liên tục vận hành của cảng. Vấn đề phức tạp nhất nằm ở cơ chế tài chính nạo vét khẩn cấp. Mặc dù Nghị định 58/2017/NĐ-CP quy định chi tiết về chi phí bảo trì luồng hàng hải, nhưng quy trình này thường dựa trên kế hoạch định kỳ và ngân sách được duyệt trước. Việc kích hoạt nguồn vốn ngoài kế hoạch sau thiên tai, theo quy định của Luật Ngân sách Nhà nước (2015) và Luật Đầu tư công (2019), đòi hỏi phải thực hiện các thủ tục hành chính khẩn cấp như phê duyệt chủ trương đầu tư và giải

ngân. Chính quy trình này dù đã được rút gọn vẫn không thể nhanh bằng tốc độ phục hồi chuỗi cung ứng hàng hải, dẫn đến sự chậm trễ hành chính và tài chính kéo dài khoảng thời gian cảng bị cô lập do thiếu độ sâu luồng.

Thứ năm, thiếu các quy định pháp lý về tái thiết bền vững, ưu tiên hoặc bắt buộc sử dụng các giải pháp dựa vào thiên nhiên trong tái thiết và ổn định luồng lạch. Hiện BLHH (2015) (Điều 80) chỉ tập trung vào kiểm soát ô nhiễm, mà thiếu các quy định yêu cầu hoặc khuyến khích việc thiết kế hạ tầng thân thiện môi trường như sử dụng các giải pháp dựa vào thiên nhiên để đạt được mục tiêu kép: Ổn định luồng lạch và bảo vệ hệ sinh thái. Ngoài ra, Luật Bảo vệ môi trường (2020) (Điều 91) chỉ dừng lại ở quy định nguyên tắc chung về thích ứng với BĐKH mà chưa có nghị định/thông tư chuyên ngành quy định tiêu chí kỹ thuật và ưu đãi pháp lý/tài chính cho việc sử dụng NBS (ví dụ: Phục hồi rừng ngập mặn để giảm sa bồi, kè mềm thay vì kè cứng) trong các dự án bảo trì cảng [1].

Như vậy, BLHH 2015 chủ yếu tập trung vào việc quản lý vận hành và an toàn ngắn hạn của cảng biển mà chưa hình thành được một "tầm nhìn pháp lý dài hạn" để bảo đảm tính bền vững vật lý của hạ tầng cảng trước xu thế nước biển dâng và rủi ro thiên tai đang diễn ra. Điều này làm giảm hiệu lực pháp lý của các nỗ lực thích ứng và dễ dẫn đến tình trạng các công trình cảng biển mới được xây dựng vẫn có nguy cơ trở nên lỗi thời về mặt kỹ thuật thích ứng chỉ trong vài thập kỷ.

2.2. Luật PCTT (năm 2013, sửa đổi năm 2020)

Luật PCTT là văn bản cung cấp khuôn khổ quản trị rủi ro toàn diện cho Việt Nam, từ phòng ngừa, ứng phó đến khắc phục hậu quả thiên tai. Tuy nhiên, chính tính phổ quát này lại trở thành hạn chế pháp lý khi áp dụng vào môi trường đặc thù cho các cấu trúc hạ tầng phức tạp và có giá trị kinh tế cao như hệ thống cảng biển.

Thứ nhất, chưa có quy định cụ thể về phân loại rủi ro thiên tai. Luật PCTT quy định các cấp độ rủi ro thiên tai và thẩm quyền ban bố tình huống khẩn cấp. Tuy nhiên, các tiêu chí đánh giá mức độ rủi ro đối với cảng biển (ví dụ: thiệt hại về hàng hóa container, đình trệ chuỗi cung ứng, hư hỏng thiết bị nâng hạ) không được định lượng cụ thể.

Thứ hai, Thiếu quy trình ứng phó đặc thù: Các quy định về ứng phó trong Luật PCTT mang tính chỉ đạo chung (như di dời người, tài sản). Đối với cảng biển, cần có các quy trình kỹ thuật bắt buộc như: (1) Quy trình neo buộc an toàn và di dời tàu thuyền có tải trọng lớn khỏi luồng và khu vực bến bãi; (2) Quy trình cố định và bảo vệ các container rỗng và có hàng hóa trong điều kiện gió bão cấp cao (tránh nguy cơ lật đổ và hư hỏng lan truyền); (3) Quy trình bảo vệ các thiết bị nhạy cảm như cần trục (crane), hệ thống điều hành tự động trong cảng.

Thứ ba, thiếu các quy định về cơ chế trách nhiệm Luật PCTT thiết lập cơ chế trách nhiệm theo mô hình Ban Chỉ huy PCTT và Tìm kiếm cứu nạn (TKCN) từ Trung ương đến địa phương. Mặc dù mô hình này hiệu quả trong việc huy động lực lượng, nhưng lại có khoảng trống pháp lý trong việc xác định vai trò cụ thể của Cảng vụ Hàng hải và doanh nghiệp khai thác cảng trong chu trình quản lý rủi ro PCTT. Cụ thể: (1) Trách nhiệm chuẩn bị: Luật PCTT quy định về lập kế hoạch PCTT. Tuy nhiên, các văn bản dưới luật hiện hành chưa yêu cầu chi tiết về việc lập Kế hoạch ứng phó thiên tai cảng biển bao gồm cả các kịch bản nước biển dâng dài hạn và phải được thẩm định kỹ thuật bởi cơ quan chuyên môn (như Bộ Xây dựng) trước khi triển khai; (2) Trách nhiệm tài chính (khắc phục): Luật PCTT quy định về nguồn vốn hỗ trợ khắc phục nhưng chưa có quy định rõ ràng về trách nhiệm tài chính và cơ chế bảo hiểm rủi ro thiên tai bắt buộc để chia sẻ gánh nặng phục hồi giữa Nhà nước, doanh nghiệp và các công ty bảo hiểm.

Thứ tư, chưa thiết lập được Quỹ dự phòng ứng phó thảm họa hàng hải (theo kinh nghiệm quốc tế) để đảm bảo nguồn vốn phục hồi nhanh chóng cho hạ tầng dùng chung (luồng lạch, đê chắn sóng) [2].

Như vậy, Luật PCTT đặt ra khung về quản lý, nhưng các quy định chi tiết về quy trình kỹ thuật, tài chính và trách nhiệm cụ thể của các chủ thể trong môi trường cảng biển vẫn cần được lấp đầy bằng các văn bản pháp luật dưới luật mang tính chuyên biệt hóa cao.

2.3. Luật Xây dựng, Luật Quy hoạch - sự thiếu đồng bộ với kịch bản biến đổi khí hậu

Thách thức lớn nhất trong việc hoàn thiện pháp luật về quản lý rủi ro thiên tai và nước biển dâng đối với cảng biển nằm ở tính đứt gãy trong chuỗi chuyển hóa từ dữ liệu khoa học sang quy định kỹ thuật mang tính cưỡng chế. Luật Quy hoạch và Luật Xây dựng, mặc dù là công cụ pháp lý chủ chốt định hình hạ tầng lại đang gặp khó khăn trong việc lồng ghép hiệu quả các kịch bản BĐKH vào tiêu chuẩn thiết kế cảng biển.

Thứ nhất, Bộ Nông nghiệp và Môi trường chịu trách nhiệm ban hành kịch bản BĐKH và nước biển dâng, đây là cơ sở khoa học quan trọng, cung cấp các dự báo định lượng về mực nước biển dâng, cường độ bão và nhiệt độ. Mặc dù Luật Quy hoạch có yêu cầu lồng ghép yếu tố BĐKH, nhưng quy định này chỉ mang tính nguyên tắc, thiếu các tiêu chí định lượng và quy định pháp lý bắt buộc về việc loại trừ hoặc hạn chế phát triển các khu vực cảng biển được xác định là có rủi ro ngập lụt cao nhất theo kịch bản BĐKH.

Thứ hai, nước biển dâng và ngập lụt có thể ảnh hưởng nghiêm trọng đến các công trình kết nối phía sau cảng (đường giao thông, kho bãi, đường sắt). Luật Quy hoạch chưa có cơ chế đồng bộ yêu cầu quy hoạch phát triển cảng phải đi kèm với việc nâng cấp bắt buộc hạ tầng giao thông kết nối theo tiêu chuẩn chống chịu nước biển dâng tương đương [3].

Thứ ba, Luật Xây dựng quy định hoạt động xây dựng phải tuân thủ Quy chuẩn Kỹ thuật Quốc gia (QCVN), nhưng việc áp dụng Tiêu chuẩn Việt Nam (TCVN) - nơi chứa các thông số tính toán cốt san nền cảng lại theo nguyên tắc tự nguyện. Nhiều TCVN và QCVN về công trình hàng hải và cảng biển hiện hành có thể đã được ban hành trước khi các kịch bản BĐKH mới nhất do Bộ Nông nghiệp và Môi trường công bố. Do đó, nếu sử dụng các thông số thống kê khí tượng thủy văn trong các kịch bản BĐKH để tính toán tải trọng gió bão và mực nước thiết kế sẽ dẫn đến việc các công trình cảng biển được thiết kế theo tiêu chuẩn cũ có nguy cơ dễ bị tổn thương cao khi đối diện với các sự kiện khí hậu cực đoan được dự báo trong tương lai. Thêm vào đó, việc thiếu một quy chuẩn kỹ thuật bắt buộc rõ ràng và yêu cầu các cơ quan thẩm định dự án cảng biển (thường là Bộ Xây dựng) phải trực tiếp sử dụng các số liệu về cao độ nước biển dâng trong kịch bản BĐKH làm căn cứ pháp lý để xác định cao độ thiết kế tối thiểu của mặt bến cảng, kè bảo vệ và hệ thống giao thông kết nối trong cảng đã tạo ra sự tùy nghi trong quá trình thiết kế, khiến cho việc áp dụng các giải pháp chống chịu trở nên không đồng đều giữa các dự án cảng biển khác nhau trên cả nước. Việc ứng dụng các giải pháp công nghệ cao (hệ thống cảnh báo sớm, kết cấu linh hoạt, vật liệu chống xói mòn) còn hạn chế do chi phí ban đầu cao, thiếu quy định hỗ trợ [4]. Như vậy có thể thấy, Luật

Quy hoạch, Luật Xây dựng Việt Nam và các văn bản liên quan còn bộc lộ nhiều hạn chế trong việc quy định chi tiết, yêu cầu kỹ thuật, tiêu chuẩn thiết kế và quản lý dự án cảng biển thích ứng BĐKH, nước biển dâng, thiếu cơ chế tài chính khuyến khích công nghệ xanh, quy hoạch chưa lường hết các kịch bản tương lai và thiếu sự phối hợp liên ngành để tích hợp giải pháp BĐKH toàn diện vào quy hoạch phát triển cảng biển, dẫn đến nguy cơ cơ sở hạ tầng dễ bị tổn thương, chi phí khắc phục cao và không bền vững trong dài hạn.

3. ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP HOÀN THIỆN PHÁP LUẬT VỀ QUẢN LÝ RỦI RO THIÊN TAI VÀ NƯỚC BIỂN DÂNG ĐỐI VỚI CẢNG BIỂN VIỆT NAM

Để khắc phục các hạn chế mang tính hệ thống như đã phân tích, việc hoàn thiện pháp luật cần được thực hiện theo hướng chuyển dịch từ quản trị rủi ro "phản ứng" sang "thích ứng chủ động" với các nhóm giải pháp trọng tâm sau:

3.1. Hoàn thiện BLHH theo hướng "Luật hóa" các tiêu chuẩn thích ứng dài hạn

Cần sửa đổi, bổ sung BLHH 2015 nhằm thiết lập nền tảng pháp lý cho tính bền vững của hạ tầng theo hướng:

Thứ nhất, thiết lập quy chuẩn cao độ mặt bến bắt buộc: Bổ sung quy định yêu cầu các dự án cảng biển mới hoặc nâng cấp phải tuân thủ cao độ thiết kế dựa trên kịch bản BĐKH và nước biển dâng mới nhất. Cần quy định rõ việc lấy số liệu từ kịch bản BĐKH của Bộ Nông nghiệp và Môi trường làm căn cứ pháp lý bắt buộc trong thẩm định dự án.

Thứ hai, xây dựng và ban hành cơ chế nạo vét luồng khẩn cấp hậu thiên tai: Bổ sung quy định về "Tình trạng khẩn cấp hàng hải do sa bồi"; cho phép kích hoạt cơ chế chỉ định thầu rút gọn và giải ngân nguồn vốn dự phòng ngay lập tức để nạo vét luồng công cộng sau bão/lũ, nhằm đảm bảo tính liên tục của chuỗi cung ứng mà không phải chờ đợi quy trình đầu tư công thông thường.

Thứ ba, ban hành quy định lồng ghép Báo cáo đánh giá rủi ro BĐKH: Quy định báo cáo này là một thành phần bắt buộc trong hồ sơ xin cấp phép đầu tư cảng biển, tương tự như Báo cáo đánh giá tác động môi trường (ĐTM).

3.2. Chuyên biệt hóa các quy định của Luật PCTT đối với đặc thù cảng biển

Để làm được điều này, trước hết Chính phủ cần ban hành Nghị định hướng dẫn chi tiết về PCTT riêng cho lĩnh vực hàng hải nhằm cụ thể hóa Luật PCTT. Nghị định này cần có các nội dung như:

- Xây dựng "Quy trình vận hành chuẩn" trong điều kiện thiên tai, quy định chi tiết trách nhiệm của cảng vụ và doanh nghiệp trong việc sơ tán tàu, cố định container và bảo vệ hệ thống thiết bị nâng hạ (cần trục) theo từng cấp độ rủi ro định lượng;
- Thiết lập cơ chế Bảo hiểm rủi ro thiên tai bắt buộc các doanh nghiệp khai thác cảng phải tham gia bảo hiểm cho tài sản và trách nhiệm dân sự đối với các thiệt hại do thiên tai gây ra. Đây là công cụ tài chính quan trọng để giảm áp lực lên ngân sách nhà nước trong việc khắc phục hậu quả;
- Quy định thành lập Quỹ dự phòng ứng phó thảm họa hàng hải: Quỹ này được hình thành từ một phần phí trọng tải hoặc phí hàng hải, chuyên dùng để sửa chữa nhanh các hạ tầng dùng chung (đê chắn sóng, luồng hàng hải) bị hư hỏng đột ngột do thiên tai.

3.3. Đồng bộ hóa quy chuẩn xây dựng và quy hoạch cảng biển với dữ liệu BĐKH

Xóa bỏ sự "đứt gãy" giữa dữ liệu khoa học và thực thi kỹ thuật thông qua các quy định:

Thứ nhất, quy định chuyển đổi TCVN sang QCVN đối với hạ tầng cảng nhằm biến các tiêu chuẩn về vật liệu chống xâm thực mặn, công nghệ móng cọc thích ứng và cao độ bến từ "tự nguyện áp dụng" thành "quy chuẩn kỹ thuật quốc gia" mang tính cưỡng chế thực hiện đối với mọi dự án cảng biển.

Thứ hai, quy hoạch tích hợp hạ tầng kết nối bằng việc bổ sung quy định trong Luật Quy hoạch về "Quy hoạch vùng đệm cảng biển". Theo đó, việc phê duyệt cảng biển phải đi kèm với cam kết nâng cấp cao độ đồng bộ cho hệ thống đường bộ và đường sắt hậu cần cảng, tránh tình trạng "cảng nổi, đường chìm" khi nước biển dâng.

** Thúc đẩy giải pháp dựa vào thiên nhiên và công nghệ xanh thông qua ưu đãi pháp lý:*

Cần xây dựng và ban hành các quy định để tạo động lực kinh tế cho các doanh nghiệp tiên phong trong thích ứng BĐKH như: Xây dựng danh mục "cảng biển thích ứng xanh", trong đó có quy định các tiêu chí kỹ thuật về việc sử dụng rừng ngập mặn làm đê chắn sóng tự nhiên, sử dụng kè mềm và công nghệ vật liệu tự phục hồi.

Bên cạnh đó, cần ban hành các quy định về ưu đãi tài chính và ưu tiên đầu tư theo hướng ban hành quy định về miễn, giảm tiền thuê đất vùng nước hoặc ưu tiên gia hạn giấy phép khai thác cảng đối với các doanh nghiệp áp dụng giải pháp dựa vào thiên nhiên và đầu tư hệ thống giám sát an ninh cảng biển có khả năng chống chịu ngập lụt cao.

4. KẾT LUẬN

Hệ thống cảng biển đóng vai trò là "huyết mạch" trong nền kinh tế Việt Nam, nhưng cũng là đối tượng chịu tác động trực tiếp và khốc liệt nhất từ BĐKH và nước biển dâng. Qua quá trình phân tích, có thể khẳng định rằng thách thức lớn nhất hiện nay không chỉ nằm ở các điều kiện thiên tai cực đoan mà còn ở tính lạc hậu và thiếu đồng bộ của hành lang pháp lý. Việc quản lý rủi ro hiện tại vẫn đang dừng lại ở tư duy "phản ứng nhanh" với các sự cố ngắn hạn thay vì "thích ứng chủ động" với các kịch bản dài hạn. Do đó, việc hoàn thiện pháp luật không chỉ dừng lại ở việc bổ sung các điều khoản rời rạc, mà cần một cách tiếp cận mang tính hệ thống, kết nối chặt chẽ giữa quản lý hành chính, quản lý kỹ thuật và dữ liệu khoa học. Chỉ khi có một hành lang pháp lý đồng bộ và mang tính bắt buộc, hệ thống cảng biển Việt Nam mới có thể trụ vững và phát triển bền vững trước kịch bản nước biển dâng trong tương lai.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT25-26.10.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Quốc hội. Bộ luật Hàng hải Việt Nam. Luật số 95/2015/QH13, Hà Nội, 2015.
[2] Luật PCTT. Luật số 33/2013/QH13 (sửa đổi, bổ sung năm 2020). Hà Nội, 2013.
[3] Luật Quy hoạch. Luật số 21/2017/QH14. Hà Nội, 2017.
[4] Luật Xây dựng. Luật số 50/2014/QH13 (sửa đổi, bổ sung năm 2020). Hà Nội, 2014.

■Ngày nhận bài: 03/3/2026 ■Ngày sửa bài: 13/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 24/3/2026

Tác động của thương mại đến phát thải CO_2 đội tàu biển Việt Nam: Phân tích bằng mô hình hiệu chỉnh sai số vector (VECM) và kiểm định ổn định cấu trúc

Trade effects on maritime CO_2 emissions in Vietnam: A VECM approach with structural stability Tests

> TS NGUYỄN THỊ THÚY HỒNG
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
Email: hongntt.ktcb@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo phân tích tác động của thương mại đến phát thải CO_2 của đội tàu vận tải biển Việt Nam thông qua mô hình hiệu chỉnh sai số vector (VECM) kết hợp với các kiểm định ổn định cấu trúc. Nghiên cứu sử dụng dữ liệu tháng giai đoạn 2019 - 2024 với các biến gồm xuất khẩu, nhập khẩu, tổng mức bán lẻ và phát thải CO_2. Kết quả cho thấy tồn tại quan hệ đồng liên kết dài hạn giữa thương mại, cầu nội địa và phát thải CO_2 trong vận tải biển, trong khi phản ứng của phát thải trong ngắn hạn tương đối chậm. Kiểm định chẩn đoán cho thấy mô hình có độ ổn định và độ tin cậy phù hợp. Kết quả nghiên cứu gợi ý cần gắn phát triển vận tải biển và thương mại với các chính sách giảm phát thải và chuyển đổi xanh trong ngành Hàng hải.

Từ khóa: Thương mại; phát thải CO_2 đội tàu biển; VECM.

ABSTRACT

This paper examines the impact of trade on CO_2 emissions from Vietnam's maritime transport fleet using a Vector Error Correction Model (VECM) combined with structural stability tests. Monthly data for the period 2019 - 2024 are employed, including exports, imports, retail sales and maritime CO_2 emissions. The empirical results reveal the existence of a long-run cointegration relationship between trade, domestic demand and CO_2 emissions, while short-run responses of emissions are relatively slow due to the adjustment characteristics of the shipping sector. Diagnostic tests confirm the stability and reliability of the estimated model. The findings suggest that maritime transport development and trade expansion should be integrated with emission reduction policies and green transition strategies in the shipping sector.

Keywords: Trade; maritime fleet's CO_2 emissions; VECM.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Phát thải khí nhà kính, đặc biệt là CO_2 đã trở thành một trong những thách thức môi trường lớn nhất của thế kỷ XXI. Theo các báo cáo gần đây, vận tải biển chiếm một tỷ trọng đáng kể trong phát thải toàn cầu, với gần một nửa lượng CO_2 phát sinh từ các hoạt động vận tải quốc tế (OECD, 2023) [1]. Điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết nghiên cứu mối tương quan giữa phát thải CO_2 và các yếu tố kinh tế - thương mại, đặc biệt ở các nền kinh tế đang phát triển nơi vận tải biển đóng vai trò trung tâm trong hoạt động xuất nhập khẩu như Việt Nam.

Nhiều nghiên cứu trước đây đã xem xét mối quan hệ giữa phát thải CO_2 và các biến số kinh tế như tăng trưởng kinh tế, độ mở thương mại, tiêu thụ năng lượng và vốn con người [2, 3]. Các công trình này cho thấy phát thải carbon thường gia tăng cùng với quá trình mở rộng hoạt động kinh tế và thương mại quốc tế, đặc biệt tại các nền kinh tế đang phát triển [3, 4]. Khi đi sâu vào lĩnh vực vận tải biển, các nghiên cứu có thể được phân thành ba hướng tiếp cận chính. Nhóm nghiên cứu thứ nhất tập trung vào việc đo lường và phân bổ phát thải carbon liên quan đến hoạt động thương mại quốc tế. Theo đó, Cristea và cộng sự đã xây dựng bộ dữ liệu thương mại theo phương thức vận tải và chỉ ra rằng khi tính đến vận tải quốc tế, phát thải gắn với thương mại tăng đáng kể, thậm chí làm thay đổi thứ hạng cường độ carbon của thương mại giữa các quốc gia [5]. Theo hướng phân bổ trách nhiệm phát thải, Cadarso và Li cùng các cộng sự đã sử dụng mô hình đầu vào - đầu ra đa vùng để phân rã cấu trúc phát thải vận tải biển theo tiêu dùng cuối cùng.

Các nghiên cứu này cho thấy sự mở rộng thương mại và chuỗi giá trị toàn cầu có thể làm dịch chuyển trách nhiệm phát thải giữa các nước theo cách tiếp cận tiêu dùng - sản xuất, thay vì chỉ dựa trên quốc gia phát thải trực tiếp [6, 7]. Nhóm nghiên cứu thứ hai xem xét tác động của chi phí vận tải biển và các công cụ định giá carbon đối với thương mại quốc tế. Các công bố của Halim và Rojon cùng cộng sự với các bằng chứng thực nghiệm đã chỉ ra chi phí carbon có thể làm gia tăng chi phí vận tải biển, nhưng tác động đến giá nhập khẩu trung bình thường không lớn [8, 9]. Tuy nhiên, tác động phân phối có thể đáng kể đối với các quốc gia nhỏ hoặc đang phát triển do độ co giãn thương mại theo chi phí vận tải cao hơn [10]. Hai nhóm tác giả Mundaca và Sheng cũng lượng hóa các kịch bản thuế carbon đối với nhiên liệu vận tải quốc tế và nhận thấy tác động khác nhau giữa các nhóm hàng hóa và khu vực [11, 12]. Trong khi đó, Ferrari và cộng sự chỉ ra rằng những cú sốc lớn về cước vận tải biển có thể làm suy giảm mức độ toàn cầu hóa thương mại [11]. Ở cấp độ doanh nghiệp, Cariou và cộng sự cho rằng mức thuế carbon hoặc phí phát thải thấp có thể không đủ để tạo động lực thay đổi hành vi vận hành tàu [13]. Nhóm nghiên cứu thứ ba khai thác dữ liệu hành trình tàu từ hệ thống nhận dạng tự động (AIS), cho thấy dữ liệu AIS có thể được sử dụng để xây dựng các chỉ số thương mại theo thời gian thực, liên kết trực tiếp giữa hoạt động khai thác tàu, dòng thương mại và phát thải [14]. Bên cạnh các nghiên cứu ở quy mô toàn cầu, một số công trình cũng xem xét mối quan hệ giữa thương mại, vận tải biển và phát thải trong bối cảnh tăng trưởng xanh. Lee (2016) cho thấy tự do hóa thương mại tại khu vực châu Á có thể làm gia tăng phát thải CO_2 hàng hải [15]. Tương tự, Bekteshi và cộng sự (2024) phân tích vai trò của mức độ kết nối vận tải biển trong nhóm các nước RCEP và nhận thấy việc gia tăng kết nối vận tải có thể thúc đẩy tăng trưởng kinh tế và phát triển tài chính, nhưng cũng tiềm ẩn rủi ro suy giảm chất lượng môi trường [16].

Tại Việt Nam, các nghiên cứu hiện có chủ yếu tập trung vào mối quan hệ giữa phát thải CO_2 với tăng trưởng kinh tế, tiêu thụ năng lượng [17], đầu tư trực tiếp nước ngoài hoặc năng lượng tái tạo [18]. Phần lớn các nghiên cứu đo lường phát thải ở cấp độ quốc gia mà chưa xem xét phát thải theo ngành, đặc biệt là lĩnh vực vận tải biển. Do đó, vẫn còn thiếu các nghiên cứu định lượng về vai trò của thương mại và hoạt động vận tải biển đối với phát thải carbon.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Cơ sở lý thuyết

Về mặt lý thuyết, tác động của thương mại đến phát thải CO_2 thường được giải thích thông qua 3 hiệu ứng chính gồm hiệu ứng qui mô (scale effect), hiệu ứng cơ cấu (composition effect) và hiệu ứng công nghệ (technique effect) [19]. Theo đó, sự mở rộng của thương mại làm gia tăng khối lượng hàng hóa vận chuyển, kéo theo nhu cầu vận tải biển lớn hơn và do đó làm tăng lượng phát thải CO_2 từ hoạt động khai thác đội tàu. Đồng thời, sự thay đổi trong cơ cấu sản xuất và thương mại của nền kinh tế có thể dẫn đến việc tăng hoặc giảm cường độ phát thải tùy thuộc vào loại hàng hóa được trao đổi. Cuối cùng, hiệu ứng công nghệ cho rằng quá trình hội nhập thương mại có thể thúc đẩy chuyển giao công nghệ và cải thiện hiệu quả năng lượng trong vận tải, từ đó góp phần giảm phát thải trong dài hạn.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Các hoạt động thương mại làm gia tăng khối lượng vận chuyển hàng hóa bằng đường biển, từ đó dẫn đến gia tăng phát thải khí nhà kính trong lĩnh vực vận tải [15, 16]. Tuy nhiên, mối quan hệ này có thể diễn ra với độ trễ nhất định do đặc điểm điều chỉnh chậm của hoạt động vận tải biển. Vì vậy, nghiên cứu sử dụng mô hình hiệu chỉnh sai số vector (VECM) nhằm phân tích đồng thời mối quan hệ dài hạn giữa thương mại và phát thải CO_2 cũng như cơ chế điều chỉnh của hệ thống trong ngắn hạn. Theo lý thuyết kinh tế lượng, khi các biến là tích hợp bậc một và tồn tại quan hệ đồng liên kết (cointegration), mô hình VECM là công cụ phù hợp để đồng thời phân tích động học ngắn hạn và cơ chế điều chỉnh về trạng thái cân bằng dài hạn của hệ thống, cho phép tách biệt tác động ngắn hạn của các biến thông qua các sai phân bậc nhất, đồng thời phản ánh quá trình điều chỉnh thông qua thành phần hiệu chỉnh sai số. Nhờ đó, giải thích cách hệ thống quay trở lại trạng thái cân bằng khi xảy ra sai lệch.

Trên cơ sở lý thuyết và các nghiên cứu thực nghiệm trước đây về mối quan hệ giữa hoạt động kinh tế và phát thải khí nhà kính, nghiên cứu xây dựng mô hình phân tích mối quan hệ giữa kim ngạch xuất khẩu (Exp), kim ngạch nhập khẩu (Imp), tổng mức bán lẻ hàng hóa và doanh thu dịch vụ tiêu dùng (Trs) và phát thải CO_2 của đội tàu vận tải biển (CO_2). Các biến được sử dụng dưới dạng logarit tự nhiên nhằm giảm phương sai và cho phép diễn giải các hệ số dưới dạng độ co giãn. Dạng tổng quát của mối quan hệ dài hạn được biểu diễn như sau:

$$\ln(CO_2)_t = \beta o + \beta 1 \ln(Exp)_t + \beta 2 \ln(Imp)_t + \beta 3 \ln(Trs)_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

Trong đó: εt là sai số ngẫu nhiên.

Nếu các biến trong mô hình là tích hợp cùng bậc và tồn tại quan hệ đồng liên kết, mô hình VECM có thể được sử dụng để phân tích động học của hệ thống. Dạng mô hình VECM trong nghiên cứu này được được biểu diễn như sau:

$$\Delta Y_t = \alpha(\beta' Y_t - 1) + \sum_{(i=1)}^{(k-1)} \Gamma_i \Delta Y_{t-1} + \delta D_t + U_t \quad (2)$$

Trong đó:

Y_t là vector bao gồm các biến nội sinh;

$\beta' Y_t$ là vector đồng liên kết phản ánh quan hệ cân bằng dài hạn giữa các biến;

α là ma trận hệ số hiệu chỉnh sai số thể hiện tốc độ điều chỉnh của hệ thống khi xảy ra sai lệch khỏi trạng thái cân bằng;

Γi là các ma trận hệ số phản ánh tác động ngắn hạn của các biến;

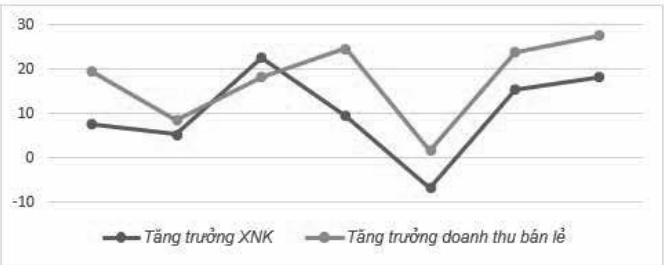
Dt là biến ngoại sinh (biến giả COVID-19);

Ut là vector sai số ngẫu nhiên.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đánh giá khái quát hoạt động thương mại và thực trạng phát thải đội tàu biển Việt Nam

Mở cửa kinh tế góp phần thay đổi hoàn toàn các hoạt động thương mại của Việt Nam, bao gồm cả thương mại nội địa và xuất nhập khẩu. Tăng trưởng doanh thu bán lẻ và kim ngạch xuất nhập khẩu liên tục ở mức cao, bất chấp giai đoạn đại dịch Covid-19 với các lo ngại về đứt gãy chuỗi cung ứng.



Hình 1. Tăng trưởng xuất nhập khẩu và doanh thu bán lẻ giai đoạn 2019 - 2025

Nguồn: Tổng cục Thống kê.

Ở góc độ vận tải, đội tàu biển Việt Nam mặc dù chỉ đang đảm nhận tỷ lệ hạn chế lượng hàng hóa xuất nhập khẩu bằng đường

biển do cạnh tranh với các hãng tàu nước ngoài nhưng vẫn là phương thức vận tải hàng hóa nội địa chủ yếu. Trong giai đoạn vừa qua, việc thực hiện tái cơ cấu đội tàu còn khá chậm chạp vì nhiều nguyên nhân. Do đó, chất lượng đội tàu ít được cải thiện. Với nhu cầu vận chuyển phục vụ phát triển kinh tế ngày càng cao, đội tàu cũ vẫn đều đặn tăng lượng phát thải CO_2 mỗi năm và chưa có dấu hiệu giảm bớt đặt ra thách thức đối với các cam kết Net Zero của Việt Nam với quốc tế.

Bảng 1. Một số đặc điểm đội tàu biển Việt Nam và lượng phát thải khí nhà kính giai đoạn 2019 - 2025

Năm	Tổng trọng tải (Nghìn DWT)	Tuổi tàu bình quân	Mức phát thải CO_2 (Tấn)
2019	8.520	16	5.464.654
2020	9.193	17	4.989.325
2021	10.350	17	4.887.933
2022	12.343	18	5.909.912
2023	12.393	19	5.660.381
2024	13.228	20	6.125.749
2025	11.666	21	6.279.022

Nguồn: OECD và UNCTAD.

3.2. Kết quả nghiên cứu

3.2.1. Kiểm định đồng liên kết và xác lập mô hình VECM

Tác giả sử dụng bộ dữ liệu thứ cấp theo tháng từ các nguồn của UNCTAD (Exp, Imp, CO_2) và của Tổng cục Thống kê (Trs) trong giai đoạn 2019 - 2024. Kiểm định tính dừng của các biến đưa vào mô hình cho kết quả các biến không dừng. Vì vậy, tác giả thực hiện kiểm định dừng trên sai phân bậc 1 của tất cả các biến cho thấy các biến dừng ở mức ý nghĩa 5%, đủ điều kiện để đưa vào ước lượng và kiểm định ở các bước tiếp theo.

Bảng 2. Kiểm định nghiệm đơn vị ADF

Biến số	ADF	P - value	ADF (sai phân bậc 1)	P - value	Kết luận
Exp	0,9177	0,7821	-3,2907	0,0153	Chuỗi dừng
Imp	1,5293	0,5190	-9,1073	0,000	Chuỗi dừng
Trs	-1,0927	0,7180	-7,2107	0,000	Chuỗi dừng
CO2	-0,7201	0,8415	-10,667	0,000	Chuỗi dừng

Nguồn: Tính toán của tác giả.

Bảng 3. Kiểm định đồng liên kết Johansen

Giả thuyết	Trace statistic	Critical value (5%)
r = 0	**52,76**	47,85
r <=1	17,11	29,79
r <=2	4,89	15,49
r <=3	2,23	3,84

Nguồn: Tính toán của tác giả.

Kiểm định đồng liên kết Johansen tìm kiếm sự tồn tại của quan hệ cân bằng dài hạn giữa các biến cho thấy tồn tại một vecto đồng liên kết giữa các biến trong mô hình, qua đó khẳng định việc sử dụng mô hình VECM là phù hợp. Kết quả này cũng đồng thời hàm ý rằng mặc dù các chuỗi là không dừng ở dạng mức, song giữa thương mại, cầu nội địa và phát thải CO_2 tồn tại một mối liên hệ ổn định trong dài hạn. Đây là cơ sở quan trọng để phân tích đồng thời động học ngắn hạn và cơ chế điều chỉnh về cân bằng dài hạn của hệ thống.

3.2.2. Kết quả ước lượng quan hệ dài hạn

Vector đồng liên kết ước lượng cho thấy phát thải CO_2 của đội tàu biển có liên hệ chặt chẽ với các biến thương mại và tiêu dùng nội địa trong dài hạn. Khi chuẩn hóa theo biến xuất khẩu, phương trình đồng liên kết cho thấy nhập khẩu và tổng mức bán lẻ có quan hệ cùng chiều với xuất khẩu trong trạng thái cân bằng dài hạn, trong khi phát thải CO_2 hàm ý một kênh điều chỉnh ngược chiều đối với cân bằng thương mại.

Bảng 4. Kết quả ước lượng vector đồng liên kết

Biến số	Exp	Imp	Trs	CO_2
Hệ số dài hạn	1,000	-0,862	-0,685	0,476

Nguồn: Tính toán của tác giả.

Về mặt kinh tế, kết quả này cho thấy khi quy mô thương mại và cầu tiêu dùng nội địa gia tăng, áp lực phát thải từ vận tải biển cũng gia tăng theo. Tuy nhiên, phát thải không đơn thuần là biến ngoại sinh mà tham gia vào quan hệ cân bằng dài hạn của toàn hệ thống.

3.2.3. Cơ chế điều chỉnh sai số và động học ngắn hạn

Các hệ số hiệu chỉnh sai số phản ánh tốc độ điều chỉnh của từng biến khi hệ thống lệch khỏi trạng thái cân bằng dài hạn. Kết quả cho thấy biến xuất khẩu và tổng mức bán lẻ có xu hướng điều chỉnh rõ hơn, trong khi phát thải CO_2 cũng tham gia vào cơ chế hiệu chỉnh nhưng với tốc độ thấp hơn.

Bảng 5. Hệ số hiệu chỉnh sai số trong mô hình VECM

Biến số	Hệ số ECT (α)	P - value	Nhận xét
Exp	-1,0072	0,0011	Điều chỉnh về cân bằng dài hạn
Imp	-0,4397	0,0851	Mức điều chỉnh hạn chế
Trs	0,3553	0,0000	Tham gia điều chỉnh đáng kể
CO_2	-0,1505	0,0311	Có điều chỉnh về cân bằng, nhưng chậm hơn

Nguồn: Tính toán của tác giả.

Điều này cho thấy, khi hệ thống thương mại - tiêu dùng - phát thải bị sai lệch khỏi trạng thái cân bằng dài hạn, phát thải CO_2 của đội tàu biển có xu hướng điều chỉnh trở lại, tuy mức độ điều chỉnh không mạnh bằng các biến kinh tế. Kết quả phù hợp với đặc trưng của ngành vận tải biển là điều chỉnh theo chu kỳ khai thác tàu, tuyến vận tải và nhu cầu vận chuyển hàng hóa.

Xét ở khía cạnh ngắn hạn, các hệ số sai phân bậc nhất của các biến thương mại và tiêu dùng chưa cho thấy tác động thật sự mạnh đến CO_2 trong từng kỳ quan sát. Điều này cho thấy phát thải CO_2 không phản ứng tức thời trước các biến động ngắn hạn của thương mại, mà chủ yếu chịu ảnh hưởng thông qua cơ chế điều chỉnh tích lũy trong dài hạn.

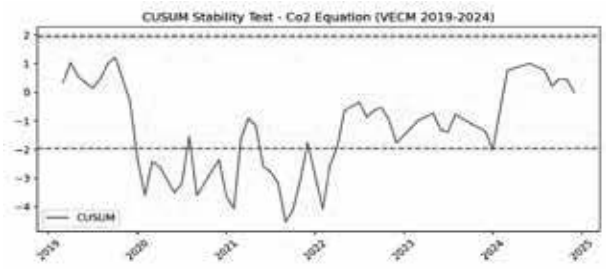
3.2.4. Tác động của cú sốc Covid-19

Biến giả Covid có tác động nhất định đến động học ngắn hạn của các biến kinh tế, đặc biệt là tiêu dùng và thương mại, song không làm thay đổi bản chất về quan hệ đồng liên kết dài hạn giữa các biến. Như vậy, hệ thống thương mại - phát thải trong vận tải biển Việt Nam có khả năng duy trì cấu trúc dài hạn ngay cả khi chịu tác động của các cú sốc bên ngoài.

3.3. Kiểm định mô hình

Để bảo đảm độ tin cậy của mô hình, nghiên cứu thực hiện thêm các kiểm định chẩn đoán quan trọng.

Thứ nhất, kiểm định CUSUM cho thấy phần dư của phương trình CO_2 không có dấu hiệu mất ổn định cấu trúc trong giai đoạn nghiên cứu. Điều này hàm ý rằng các tham số ước lượng của mô hình tương đối ổn định theo thời gian.



Hình 2. Đồ thị kiểm định ổn định cấu trúc

Nguồn: Tính toán của tác giả

Thứ hai, kiểm định tự tương quan cho thấy phần lớn các phương trình trong hệ là phù hợp, mặc dù một số phương trình vẫn còn dấu hiệu tự tương quan nhẹ. Tuy nhiên, khi đưa biến giả Covid-19 vào mô hình, mức độ tự tương quan đã được cải thiện đáng kể, cho thấy việc bổ sung yếu tố cú sốc ngoại sinh là cần thiết.

Thứ ba, kiểm định phân phối chuẩn cho thấy phần dư của một số phương trình, đặc biệt là phương trình tiêu dùng, chưa tuân theo phân phối chuẩn hoàn toàn. Đây là hiện tượng thường gặp trong dữ liệu kinh tế vĩ mô tháng, nhất là trong bối cảnh có cú sốc lớn như đại dịch. Tuy nhiên, phần dư của phương trình CO_2 nhìn chung không cho thấy sai lệch nghiêm trọng, nên kết quả ước lượng vẫn có thể chấp nhận được cho mục tiêu phân tích thực nghiệm.

Thứ tư, nghiên cứu thực hiện kiểm định độ vững bằng cách thay đổi độ trễ của mô hình. Kết quả cho thấy dấu của các hệ số hiệu chỉnh sai số, đặc biệt đối với biến CO_2, không thay đổi. Điều này khẳng định rằng kết luận chính của nghiên cứu về quan hệ dài hạn và cơ chế điều chỉnh của phát thải CO_2 là tương đối bền vững.

3.4. Thảo luận kết quả

Tổng hợp các kết quả thực nghiệm cho thấy phát thải CO_2 của đội tàu biển Việt Nam có mối liên hệ đáng kể với hoạt động thương mại và cầu tiêu dùng nội địa trong dài hạn. Kết quả này hàm ý rằng tăng trưởng thương mại không chỉ kéo theo gia tăng nhu cầu vận tải biển mà còn làm tăng áp lực phát thải từ đội tàu. Tuy nhiên, mối quan hệ này không biểu hiện quá rõ trong ngắn hạn, cho thấy phát thải vận tải biển có độ trễ điều chỉnh lớn hơn so với biến động thương mại và tiêu dùng. Việc đưa biến giả Covid-19 vào mô hình góp phần nâng cao khả năng giải thích của mô hình và phản ánh đúng hơn bối cảnh thực tế. Đồng thời, các kiểm định chẩn đoán cho thấy mô hình VECM được xây dựng có độ phù hợp tương đối tốt, đủ cơ sở để sử dụng trong phân tích và thảo luận chính sách.

4. HÀM Ý CHÍNH SÁCH VÀ KẾT LUẬN

Từ các kết quả nghiên cứu nêu trên, có thể rút ra một số hàm ý chính sách chủ yếu như sau:

Một là, chính sách phát triển vận tải biển cần gắn với lộ trình giảm phát thải CO_2. Khi thương mại và cầu nội địa gia tăng, nhu cầu vận tải biển tăng lên là tất yếu. Do đó, việc đầu tư đổi mới đội tàu theo hướng tiết kiệm nhiên liệu, ứng dụng công nghệ khai thác hiệu quả và từng bước chuyển đổi sang nhiên liệu sạch là cần thiết.

Hai là, chính sách thương mại và logistics cần được tích hợp với mục tiêu môi trường, qua đó giảm chi phí logistics và hạn chế phát thải.

Ba là, trước các cú sốc bên ngoài như đại dịch hoặc đứt gãy chuỗi cung ứng, cần tăng cường năng lực chống chịu của toàn hệ thống.

Cuối cùng, về mặt quản lý nhà nước, cần từng bước xây dựng cơ sở dữ liệu phát thải riêng cho đội tàu biển Việt Nam theo tần suất cao hơn, đồng bộ hơn với các chỉ tiêu thương mại. Đây là điều kiện quan trọng để nâng cao chất lượng nghiên cứu định lượng và hỗ trợ hoạch định chính sách giảm phát thải trong ngành Hàng hải.

Mặc dù bài báo đã đạt được một số kết quả quan trọng về mối quan hệ giữa phát triển thương mại với mức độ phát thải khí nhà kính của đội tàu biển Việt Nam nhưng vẫn tồn tại một số hạn chế bao gồm: (1) Qui mô dữ liệu chưa đủ lớn để đảm bảo có kết quả định lượng tối ưu; (2) Mô hình còn một số vấn đề về cấu trúc đang ở mức độ dùng để giải thích hiện tượng mà chưa thể dùng trong dự báo hoặc phân tích mối quan hệ đa chiều.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT25-26.126.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Clarke, D., & Kim, Y. CO_2 Emissions from Global Shipping: A New Experimental Database. OECD Statistics Working Papers No. 2023/04, OECD Publishing, Paris, 2023.

[2] Grossman, G. M., & Krueger, A. B. Economic growth and the environment. Quarterly Journal of Economics, 110(2), 353-377, 1995.

[3] Shahbaz, M., Lean, H. H., & Shabbir, M. S. Environmental Kuznets curve hypothesis in Pakistan: Cointegration and Granger causality. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(5), 2947-2953, 2012.

[4] Bekhet, H. A., & Othman, N. S. Impact of urbanization growth on Malaysia CO_2 emissions. Ecological Indicators, 73, 782-786, 2017.

[5] Cristea, A., Hummels, D., Puzzello, L., & Avetisyan, M. Trade and the greenhouse gas emissions from international freight transport. Journal of Environmental Economics and Management, 65(1), 153-173, 2013.

[6] Cadarso, M. Á., Gómez, N., López, L. A., & Tobarra, M. Á. CO_2 emissions of international freight transport and offshoring: Measurement and allocation. Ecological Economics, 69(8), 1682-1694, 2010.

[7] Li, R., Dong, L., & Zhang, Y. Emissions in maritime transport: A decomposition analysis from the perspective of production-based and consumption-based emissions. Energy Policy, 166, 113018, 2022.

[8] Halim, R. A., Smith, T., & Englert, D. Understanding the economic impacts of greenhouse gas mitigation policies on maritime transport. Energy Policy, 113, 102-114, 2018.

[9] Rojon, I., Lazarou, N., Rehmatulla, N., & Smith, T. The impacts of carbon pricing on maritime transport costs and their implications for developing economies. Marine Policy, 132, 104653, 2021.

[10] Mundaca, L., Strand, J., & Young, M. The impact of international shipping emissions on climate policy. Energy Policy, 38(11), 7343-7353, 2010.

[11] Sheng, Y., Shi, X., & Zhang, D. Carbon pricing and its impact on international maritime transport. Transportation Research Part D, 61, 337-350, 2018.

[12] Ferrari, C., Tei, A., & Merk, O. The impact of maritime transport costs on international trade and globalization. Transport Policy, 42, 1-9, 2015.

[13] Cariou, P., Cheaitou, A., & Wolff, F. C. The effectiveness of market-based measures for reducing shipping emissions. Transport Policy, 67, 1-10, 2018.

[14] Jalkanen, J.-P., Johansson, L., & Kukkonen, J. A comprehensive inventory of ship traffic exhaust emissions in the Baltic Sea using AIS data. Atmospheric Chemistry and Physics, 16, 71-84, 2016.

[15] Lee, J. W. Trade liberalization and environmental sustainability in Asia: The role of maritime transport emissions. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 52, 1-11, 2016.

[16] Bekteshi, E., Hysa, E., Topxhiu, R., & Panait, M. Shipping connectivity, financial development and environmental quality: Evidence from RCEP countries. Journal of Risk and Financial Management, 17(12), 559, 2024.

[17] Nguyen, T. T., Pham, T. M., & Nguyen, H. T. Economic growth, energy consumption and CO_2 emissions in Vietnam: Evidence from ARDL model. Environmental Science and Pollution Research, 27, 12974-12986, 2020.

[18] Tang, C. F., & Tan, B. W. The impact of energy consumption, income and foreign direct investment on carbon dioxide emissions in Vietnam. Energy Policy, 79, 447-454, 2015.

[19] Grossman, G. M., & Krueger, A. B. Economic Growth and the Environment. The Quarterly Journal of Economics, 110(2), 353-377, 1995.

■Ngày nhận bài: 06/3/2026 ■Ngày sửa bài: 16/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 23/3/2026

Đánh giá mức độ sẵn sàng triển khai các tiêu chuẩn Môi trường, Xã hội và Quản trị (ESG) tại các doanh nghiệp vận tải biển Việt Nam

Assessing the Readiness for Implementing Environmental, Social and Governance (ESG) Standards in Vietnamese shipping enterprises

> **THS NGUYỄN MINH PHƯƠNG*, THS NGUYỄN THỊ HƯỜNG**
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email: phuongnm.vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu mức độ sẵn sàng triển khai các tiêu chuẩn Môi trường, Xã hội và Quản trị (ESG) tại các doanh nghiệp vận tải biển Việt Nam trong bối cảnh thắt chặt quy định về phát thải và chuyển đổi xanh. Nghiên cứu tiến hành xây dựng khung lý thuyết về mức độ sẵn sàng ESG và khảo sát thực nghiệm tại các doanh nghiệp vận tải biển Việt Nam. Qua đó, nghiên cứu đánh giá sự phân hóa năng lực ESG giữa nhóm doanh nghiệp nhà nước (DNNN), các doanh nghiệp tư nhân.

Từ khóa: Mức độ sẵn sàng ESG; doanh nghiệp nhà nước; doanh nghiệp tư nhân; vận tải biển.

ABSTRACT

This article examines the readiness to implement Environmental, Social, and Governance (ESG) standards among Vietnamese maritime shipping enterprises amidst tightening emission regulations and the green transition. This research establishes an ESG framework and surveys Vietnam's maritime transport sector to assess the differentiation in ESG performance across state-owned, private shipping companies.

Keywords: ESG readiness; state-owned shipping companies; private shipping companies.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các tiêu chí Môi trường, Xã hội và Quản trị (ESG) là một hệ thống các chiến lược và thực hành nhằm giảm thiểu tác động tiêu cực đến môi trường và xã hội, đồng thời củng cố cấu trúc quản trị nội bộ [1]. Theo chiến lược của Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO), ngành vận tải biển đang đứng trước áp lực phải cắt giảm phát thải khí nhà kính hướng tới mục tiêu Net Zero vào năm 2050. Các tiêu chuẩn này đang thúc đẩy các hãng tàu toàn cầu không ngừng cải tiến công nghệ, áp dụng nhiên liệu xanh và minh bạch hóa cơ cấu quản trị để đáp ứng kỳ vọng ngày càng cao của các bên liên quan [2].

Trong làn sóng chuyển dịch đó, vận tải biển Việt Nam không nằm ngoài quy luật khi phải đối mặt với áp lực kép, bao gồm vừa phải tuân thủ các quy chuẩn khắt khe về an toàn kỹ thuật, môi trường và lao động theo các công ước quốc tế, vừa phải hiện thực hóa lộ trình Net Zero vào năm 2050 như Chính phủ đã cam kết tại Hội nghị Thượng đỉnh về Biến đổi Khí hậu của Liên hợp quốc lần thứ 26, diễn ra tại Glasgow (Vương quốc Anh) vào tháng 11/2021 (COP26) về việc đạt phát thải ròng bằng "0".

Hiện tại, đội tàu biển Việt Nam đứng thứ 28 trên thế giới về trọng tải tàu (DWT) [3], tập trung chủ yếu vào tàu hàng rời, tàu chở dầu và tàu container. Theo thống kê của Cục Hàng hải Việt Nam, đến tháng 12/2022, đội tàu thương mại Việt Nam có 1.477 chiếc với tổng trọng tải khoảng 11,6 triệu DWT và tổng dung tích khoảng 7 triệu GT. Các doanh nghiệp vận tải biển Việt Nam sở hữu đội tàu được đánh giá có tuổi tàu trung bình và cao, đang đối mặt với sự áp lực trẻ hóa đội tàu và công nghệ để đáp ứng các tiêu chuẩn khắt khe như chỉ số hiệu quả năng lượng (EEXI) và chỉ số cường độ carbon (CII) [4].

Do đó, việc tích hợp các nguyên tắc ESG vào hoạt động vận tải biển đang dần chuyển dịch từ một lựa chọn mang tính đạo đức sang yêu cầu chiến lược bắt buộc để các doanh nghiệp đáp ứng được các quy định nghiêm ngặt từ Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO), đồng thời tăng khả năng cạnh tranh trên thị trường vận tải biển quốc tế.

Xuất phát từ thực tế đó, bài báo tập trung đánh giá tình hình sẵn sàng thực hiện ESG tại các doanh nghiệp vận tải biển tại Việt Nam, đại diện cho nhóm DNNN và tư nhân. Bài báo sẽ phát triển

khung chỉ tiêu đánh giá khả năng sẵn sàng thực hiện ESG dựa trên các khung lý thuyết sẵn có, khảo sát, phân tích và đánh giá các chỉ tiêu, từ đó nghiên cứu sẽ làm sáng tỏ mức độ trưởng thành, các rào cản thực tế để các doanh nghiệp vận tải biển Việt Nam áp dụng lộ trình ESG một cách phù hợp và hiệu quả hơn trong tương lai.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

2.1. Trụ cột trong bộ tiêu chuẩn ESG

Về mặt lý thuyết, ESG được hiểu là sự hợp nhất của ba trụ cột chính: Môi trường (Environmental), Xã hội (Social) và Quản trị (Governance).

Môi trường (E) tập trung phân tích hiệu quả và việc thực hiện các thực hành nhằm bảo tồn môi trường và tiêu dùng tài nguyên có ý thức. Trụ cột này bao gồm các vấn đề về ô nhiễm (phát thải carbon, hóa chất độc hại), sử dụng tài nguyên thiên nhiên (nước, đất, rừng), bảo tồn đa dạng sinh học và nỗ lực giảm thiểu dấu chân môi trường như xây dựng công trình xanh, các giải pháp sử dụng hiệu quả năng lượng [6]

Xã hội (S): Tiêu chí này đánh giá mối quan hệ của công ty với các bên liên quan như nhân viên, khách hàng, cộng đồng và các đối tác. Các khía cạnh cụ thể bao gồm sức khỏe, an toàn lao động, tiêu chuẩn phúc lợi, an ninh dữ liệu người dùng và cam kết xóa bỏ bất bình đẳng, phân biệt đối xử [6].

Quản trị (G): Tiêu chí quản trị đề cập đến các khía cạnh quản trị nội bộ tốt, tuân thủ quy trình và pháp luật hiện hành.Trụ cột này xem xét trách nhiệm quản lý kinh doanh thông qua các yêu cầu về đạo đức, chính sách chống tham nhũng, minh bạch thuế, đa dạng và tính độc lập của hội đồng quản trị, cũng như quan hệ công bằng với các cổ đông thiểu số và các bên liên quan [6].

Khi một tổ chức có thể điều phối hài hòa cả ba trụ cột này, họ sẽ có khả năng đảm bảo tính liên tục của doanh nghiệp và mang lại lợi nhuận tài chính bền vững nhờ quản trị chiến lược hiệu quả.

2.2. Bộ tiêu chí ESG trong vận tải biển

Theo báo cáo của Phòng Vận tải biển Quốc tế (ICS), điểm cốt lõi trong lý thuyết ESG của ngành vận tải biển là sự giao thoa giữa việc tuân thủ quy định và việc báo cáo tự nguyện [7].

Trụ cột E tập trung vào việc giảm thiểu tác động tiêu cực đến hệ sinh thái biển và khí quyển. Trọng tâm là việc thực hiện chiến lược giảm phát thải khí nhà kính (GHG) của IMO, các chỉ số hiệu quả năng lượng (EEDI, EEXI, CII). Bên cạnh đó, các công ước phòng ngừa ô nhiễm từ tàu MARPOL, công ước quản lý nước dằn BWM và công ước tái chế tàu Hong Kong đóng vai trò là các tiêu chuẩn đo lường mức độ thực hiện tiêu chí "E" [7].

Trụ cột S xoay quanh yếu tố con người, đặc biệt là thuyền viên và lực lượng lao động trong chuỗi cung ứng. Tiêu chí này nhấn mạnh vào quyền lợi lao động, sức khỏe và an toàn hàng hải. Các tiêu chuẩn cốt lõi để đánh giá trụ cột này bao gồm Công ước Lao động hàng hải MLC 2006, công ước về tiêu chuẩn đào tạo, chứng nhận và trực ca cho thuyền viên STCW 1978 sửa đổi 2010, và công ước về an toàn sinh mạng trên biển SOLAS 1974 [7].

Trụ cột G trong vận tải biển đề cập đến đạo đức kinh doanh, sự minh bạch trong báo cáo và tuân thủ các quy tắc quốc tế. Điều này bao gồm các chính sách chống tham nhũng, hối lộ, tuân thủ các lệnh trừng phạt quốc tế, và tính công bằng trong nghĩa vụ thuế. Một hệ thống quản trị mạnh mẽ là nền tảng để đảm bảo các cam kết về Môi trường và Xã hội được thực hiện một cách trung thực và nhất quán [7].

Lý thuyết này cũng chỉ ra rằng, thách thức lớn nhất của ngành vận tải biển hiện nay là sự thiếu hụt các chỉ số ESG chuẩn hóa dành riêng cho đặc thù hàng hải.

2.3. Các mô hình về mức độ sẵn sàng thực hiện ESG

** Lý thuyết về mô hình sẵn sàng:*

Mô hình trưởng thành là một công cụ cho phép đo lường trạng thái hiện tại của một tổ chức, đồng thời tạo điều kiện cho quá trình cải tiến liên tục để thích ứng với các tiêu chuẩn thực hành tốt nhất trong một phạm vi cụ thể.

Từ những năm 1950, tác giả Haire đã đề xuất rằng các tổ chức trưởng thành theo các giai đoạn dựa trên một mô hình đồng nhất. Sau đó, Ma trận Trưởng thành quản lý chất lượng (QMMG) của tác giả Crosby (1979) đã đặt nền móng cho các mô hình đánh giá hiện đại, tập trung vào các yếu tố như sự hiểu biết của lãnh đạo và thái độ làm việc cộng tác [8].

Đáng chú ý, mô hình trưởng thành do tác giả Philip B. Crosby đề xuất vào năm 1979 được xem là tiền thân của các mô hình trưởng thành hiện đại. Ma trận Trưởng thành Quản lý Chất lượng (QMMG) là một ma trận tổ chức được Crosby thiết lập và công bố lần đầu trong cuốn sách *"Quality is Free"*. Đây là một trong những mô hình đầu tiên dùng để đánh giá mức độ trưởng thành về chất lượng, bao gồm 5 giai đoạn (Chưa chắc chắn; Thức tỉnh; Làm rõ; Khôn ngoan và Tin cậy) cùng 6 hạng mục đo lường (Nhận thức và thái độ của ban lãnh đạo; Trạng thái chất lượng của công ty; Giải quyết vấn đề; Chi phí chất lượng tính theo tỷ lệ phần trăm doanh thu) [8].

Trong bối cảnh quản trị hiện đại, các mô hình này đóng vai trò như một hình thức đối sánh, tự đánh giá và quản lý sự thay đổi.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu này được thực hiện thông qua quy trình hai giai đoạn kết hợp giữa phân tích lý thuyết và khảo sát thực chứng nhằm xây dựng khung đánh giá mức độ sẵn sàng ESG đặc thù cho ngành vận tải biển.

Trong giai đoạn đầu, một bộ khung tiêu chí sơ bộ được thiết lập dựa trên sự tổng hợp từ hướng dẫn của phòng vận tải biển quốc tế ICS. Để kiểm chứng tính phù hợp của các tiêu chí này trong bối cảnh thực tiễn tại Việt Nam, nghiên cứu tiến hành khảo sát tham vấn ý kiến các chuyên gia và nhà quản lý doanh nghiệp hàng hải. Dữ liệu thu thập được xử lý bằng phương pháp thống kê mô tả. Đồng thời, dựa trên các phản hồi mở từ khảo sát, nghiên cứu thực hiện bổ sung các nhân tố đặc thù mới nhằm hoàn thiện mô hình đánh giá cuối cùng.

Trong giai đoạn tiếp theo, khung tiêu chí sau khi đã được hiệu chỉnh sẽ được sử dụng làm thang đo để đánh giá mức độ sẵn sàng ESG của các doanh nghiệp theo thang điểm từ 1 đến 5. Để mang lại cái nhìn trực quan và toàn diện về năng lực bền vững, nghiên cứu sử dụng biểu đồ radar để biểu diễn kết quả. Việc áp dụng bản đồ Radar không chỉ giúp nhận diện các thế mạnh vượt trội mà còn làm rõ những khoảng trống trong từng trụ cột E, S và G của mỗi doanh nghiệp.

Để đánh giá mức độ sẵn sàng ESG, nghiên cứu đã tiến hành khảo sát thực tế tại các doanh nghiệp sở hữu và khai thác đội tàu hàng khô, hàng lỏng và tàu container hoạt động trên cả tuyến nội địa và viễn dương. Đối tượng khảo sát tập trung vào các nhân sự chủ chốt trực tiếp thực hiện hoạt động kinh doanh khai thác của doanh nghiệp, bao gồm các Trưởng phòng Khai thác và đội ngũ chuyên viên khai thác - những người nắm rõ nhất về thực trạng tuân thủ kỹ thuật và vận hành tàu.

Mẫu nghiên cứu được phân tầng dựa trên hai đặc điểm chính. Về phạm vi hoạt động: Nhóm viễn dương bao gồm Công ty Vận tải biển VIMC, Công ty Cổ phần Vận tải biển Việt Nam VOSCO, Công ty TNHH Vận tải biển Tân Bình... Ngoài ra còn các doanh nghiệp hoạt động tuyến nội địa chủ yếu là khai thác vận tải container như Công ty TNHH Vận tải container Hải An, Công ty Cổ phần Vận tải biển Tân

Cảng… Về loại hình sở hữu: Sự phân chia giữa khối Nhà nước (9 doanh nghiệp) và tư nhân (6 doanh nghiệp) cho phép nghiên cứu so sánh mức độ sẵn sàng ESG giữa nhóm chịu sự điều tiết của các chỉ thị chuyển đổi xanh từ Chính phủ và nhóm chịu áp lực cạnh tranh trên thị trường trong nước và quốc tế. Tổng số phiếu hợp lệ thu về từ các cá nhân trực tiếp khai thác là 45 phiếu (trung bình 3 phiếu/ doanh nghiệp).

Bảng 1. Thống kê mô tả đặc điểm mẫu khảo sát (n=15 doanh nghiệp, 45 phiếu cá nhân)

Phân nhóm mẫu	**Cấp quản lý (Trưởng phòng)**	**Cấp thực thi (Nhân viên)**	**Tổng số phiếu**
Nhà nước - Viễn dương	6	12	18
Nhà nước - Nội địa	3	6	9
Tư nhân - Viễn dương	3	6	9
Tư nhân - Nội địa	3	6	9
Tổng cộng	**15**	**30**	**45**

4. KHUNG LÝ THUYẾT VỀ MỨC ĐỘ SẴN SÀNG ESG

Theo tài liệu của ICS, việc thực thi ESG thực chất là quá trình ánh xạ của việc thực thi các công ước quốc tế hiện có như Công ước quốc tế như MARPOL, SOLAS và MLC vào các trụ cột bền vững để đáp ứng kỳ vọng của các bên liên quan bao gồm các tổ chức. Ngoài ra, các nguyên tắc ESG trong lĩnh vực hàng hải cần được định lượng qua các chỉ số thực tế được IMO khuyến cáo sử dụng như mức độ phát thải, đầu tư xanh và tính minh bạch trong quản trị để tạo ra lợi thế cạnh tranh [9]. Từ đó, nghiên cứu tổng hợp khung lý thuyết sẵn sàng gồm các tiêu chí sau và được đo lường theo 5 cấp độ từ 1 đến 5.

Bảng 2. Các tiêu chí đo lường mức độ sẵn sàng ESG trong vận tải biển

I	**E - Môi trường**	
1	Giảm phát thải khí nhà kính (GHG) (E1)	Có biện pháp tăng cường hiệu quả vận hành tàu để giảm carbon, sử dụng nhiên liệu có hàm lượng S thấp
2	Bảo vệ hệ sinh thái biển (E2)	Tuân thủ Công ước MARPOL (Phụ lục I-VI) và Công ước Quản lý nước dằn (BWM)
3	Hiệu quả năng lượng (E3)	Tăng hiệu suất sử dụng năng lượng
4	Số hóa chứng từ và Nhật ký điện tử (E4)	Chuyển đổi số trong công tác quản lý tàu
II	S - Xã hội	
1	Cơ hội việc làm công bằng (S1)	Đảm bảo môi trường làm việc bình đẳng, không phân biệt đối xử
2	Tiêu chuẩn lao động (S2)	Tuân thủ các quy định về lao động theo Công ước STCW, MLC, SOLAS
3	Sức khỏe và An toàn (S3)	Cung cấp đào tạo đầy đủ, hỗ trợ sức khỏe và an toàn cho nhân sự theo các công ước STCW, MLC
III	G - Quản trị	
1	Tuân thủ theo các quy định của pháp luật (G1)	Tuân thủ theo các chính sách pháp luật, thuế, bảo hiểm của Nhà nước
2	Phát hành báo cáo liên quan đến ESG (G2)	Báo cáo tài chính chính xác và minh bạch cho các bên liên quan, có báo cáo liên quan đến ESG hoặc phát triển bền vững

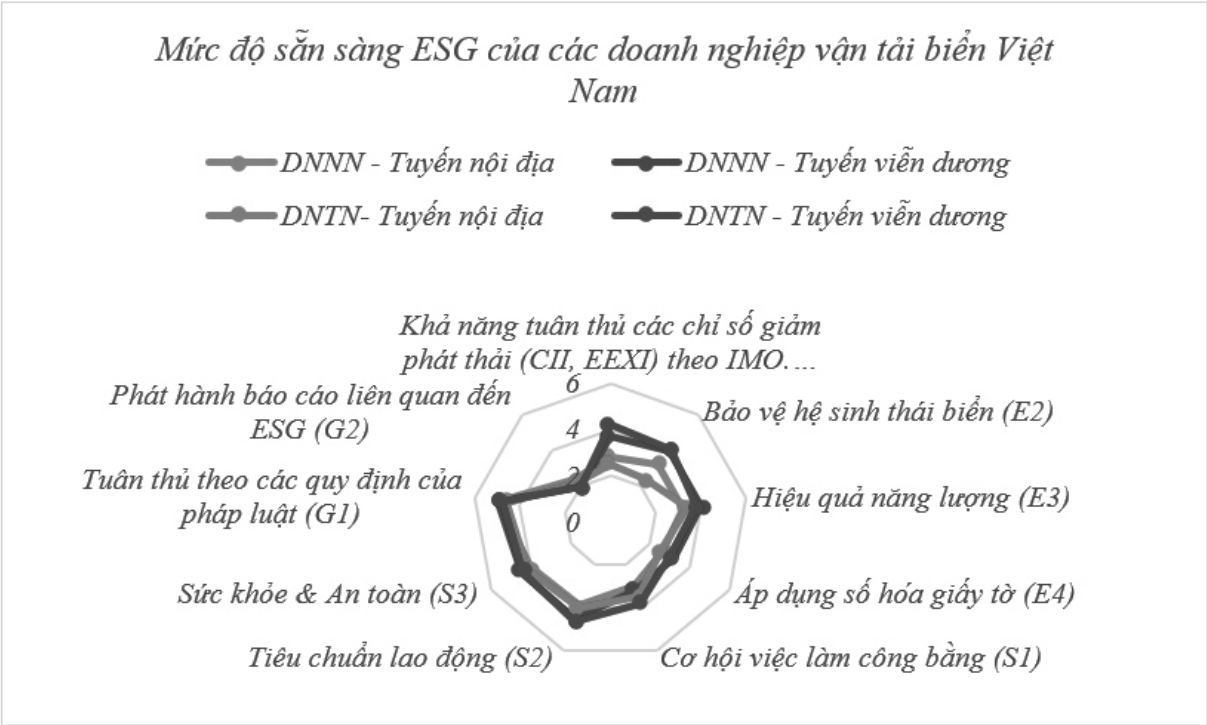
5. ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

Bảng 3. Kết quả khảo sát về mức độ sẵn sàng thực thi ESG tại các doanh nghiệp vận tải biển Việt Nam

STT	**Trụ cột và Tiêu chí đề xuất**	**Mức độ sẵn sàng**	**DNNN**				**Doanh nghiệp tư nhân**			
			Đội tàu nội địa		**Đội tàu hoạt động viễn dương**		**Đội tàu nội địa**		**Đội tàu hoạt động viễn dương**	
			Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
I	TRỤ CỘT MÔI TRƯỜNG (E)		-	-	-	-	-	-	-	-
1	Khả năng tuân thủ các chỉ số giảm phát thải (CII, EEXI) theo IMO (E1)	1 2 3 4 5	2,8	0,7	3,7	0,9	2,5	0,8	3,7	1,1
2	Bảo vệ hệ sinh thái biển (E2)	1 2 3 4 5	3,2	0,9	4	0,7	2,4	1,3	4,1	0,6
3	Hiệu quả năng lượng (E3)	1 2 3 4 5	3,2	0,8	4	0,9	3,4	0,8	3,8	0,6
4	Áp dụng số hóa giấy tờ (E4)	1 2 3 4 5	2,6	0,9	3,2	0,7	2,5	1,4	3	0,8
II	TRỤ CỘT XÃ HỘI (S)		-	-	-	-	-	-	-	-
4	Cơ hội việc làm công bằng (S1)	1 2 3 4 5	3	0,9	3,2	0,8	3,5	0,3	3,8	0,4
5	Tiêu chuẩn lao động (S2)	1 2 3 4 5	3,9	0,3	4,5	0,3	4	0,5	4,6	0,3

6	Sức khỏe & An toàn (S3)	1 2 3 4 5	4	0,4	4,5	0,3	4,2	0,5	4,4	0,2
III	TRỤ CỘT QUẢN TRỊ (G)		-	-	-	-	-	-	-	-
7	Tuân thủ theo các quy định của pháp luật (G1)	1 2 3 4 5	5	0	5	0	4,6	0,3	4,8	0,2
8	Phát hành báo cáo liên quan đến ESG (G2)	1 2 3 4 5	2,4	1	2	0,8	2,2	1,4	2	1,5

Về khả năng tuân thủ các chỉ số giảm phát thải E1, điểm Mean cho thấy sự sẵn sàng tương đối cao của nhóm doanh nghiệp tư nhân chạy tuyến viễn dương (mean = 3.9), tuy nhiên độ lệch chuẩn cũng cao, do yêu cầu khi khai thác tàu trên 1 số tuyến như châu Âu thì khắt khe hơn so với 1 số tuyến châu Á, Đông Nam Á. Ngược lại, nhóm tàu nội địa có điểm trung bình thấp hơn đáng kể với tiêu chí này, cho thấy một khoảng trống về động lực khi các quy định về xanh hóa trong nước vẫn còn đang trong quá trình hoàn thiện và chưa đưa vào thực thi bắt buộc. Cụ thể, Quyết định số 876/QĐ-TTg là văn bản quan trọng nhất về "Chuyển đổi năng lượng xanh". Theo đó, đến năm 2050, 100% tàu biển hoạt động nội địa mới phải chuyển đổi sang sử dụng năng lượng xanh.



Hình 1. Mức độ sẵn sàng ESG của các doanh nghiệp vận tải biển Việt Nam

(Nguồn: Tác giả tự tổng hợp)

Điểm trung bình của chỉ tiêu E3 khảo sát đạt mức cao đồng đều trên tất cả các nhóm đối tượng nghiên cứu. Điều này phản ánh một thực tế khách quan là nhiên liệu luôn chiếm tỷ trọng lớn trong chi phí vận hành. Do đó, việc tối ưu hóa tiêu thụ năng lượng không chỉ là một tiêu chí ESG mà còn là yếu tố sống còn đối với năng lực cạnh tranh của doanh nghiệp. Nghiên cứu ghi nhận nhóm doanh nghiệp tư nhân có xu hướng quyết liệt hơn trong việc áp dụng các biện pháp tiết kiệm năng lượng. Với cơ cấu quản trị linh hoạt và áp lực trực tiếp về lợi nhuận, các đơn vị này chủ động đầu tư vào công nghệ sơn vỏ tàu giảm ma sát, lắp đặt các thiết bị tối ưu hóa dòng chảy và ứng dụng phần mềm quản lý hành trình để cắt giảm tiêu hao nhiên liệu. Sự sẵn sàng này không chỉ giúp tối ưu hóa giá thành dịch vụ mà còn tạo nền tảng vững chắc cho việc chuyển đổi xanh. Nhóm chỉ số về Bảo vệ hệ sinh thái biển (E2) ghi nhận mức độ sẵn sàng cao, đặc biệt là ở nhóm tàu viễn dương.

Các doanh nghiệp đạt điểm Mean ấn tượng trong việc tuân thủ các quy định về ngăn ngừa ô nhiễm do dầu, nước thải và rác thải. Việc quản lý nhật ký rác thải và các thiết bị phân ly dầu nước được thực hiện bắt buộc để đáp ứng các yêu cầu kiểm tra của cơ quan kiểm tra nhà nước tại cảng biển (PSC) của các cảng quốc tế. Hơn thế nữa, nhóm tàu hoạt động viễn dương phải tuân thủ Công ước về quản lý nước dằn tàu BWM 2004, bắt buộc lắp đặt hệ thống xử lý nước dằn để ngăn chặn các loài sinh vật ngoại lai xâm hại. Trong khi đó, nhóm tàu hoạt động nội địa hiện nay chủ yếu tuân thủ theo các quy định về vùng xả thải an toàn trong vùng nước cảng biển theo quy định của Cục Hàng hải và Đường thủy Việt Nam và Bộ Xây dựng, với áp lực về trang thiết bị kỹ thuật thường thấp hơn một bậc so với đội tàu viễn dương. Ngoài ra, mức độ sẵn sàng bảo vệ hệ sinh thái biển cao hơn tại nhóm DNNN và các tập đoàn tư nhân lớn có mô hình kinh doanh tích hợp cảng biển (điển hình như

Gemadept hay các thành viên thuộc VIMC). Chính vì vậy, sự đồng thuận ở nhóm doanh nghiệp tư nhân trong tiêu chí này không cao (SD = 1,3). Về tiêu chí E4, nhóm chủ tàu khai thác tuyến viễn dương có mức độ đồng thuận cao và mức sẵn sàng trung bình. Việc số hóa chủ yếu tập trung vào các chứng chỉ và hồ sơ làm thủ tục ra vào cảng đã trở thành tiêu chuẩn bắt buộc để tương thích với hệ thống cảng số quốc tế và quy định của công ước tạo điều kiện thuận lợi cho giao thông hàng hải FAL 1965 của Tổ chức Hàng hải quốc tế (IMO). Ở nhóm tàu nội địa, quá trình số hóa diễn ra rời rạc và thiếu đồng bộ hơn. Điểm sáng tập trung ở nhóm doanh nghiệp tư nhân lớn (như Gemadept, Hải An) nhờ chủ động đầu tư hệ thống quản trị dữ liệu tập trung để nâng cao năng lực cạnh tranh. Ngược lại, các doanh nghiệp nhỏ vẫn duy trì phương thức quản lý hồ sơ giấy truyền thống, dẫn đến độ trễ trong việc cập nhật dữ liệu ESG.

Tiêu chí về tiêu chuẩn lao động S2 có mức điểm sẵn sàng tương đối cao tại các doanh nghiệp khai thác tuyến viễn dương. Việc tuân thủ Công ước Lao động Hàng hải (MLC 2006), Công ước về Tiêu chuẩn huấn luyện, cấp chứng chỉ và trực ca của thuyền viên STCW 78 là yêu cầu bắt buộc khi các doanh nghiệp muốn khai thác tàu trên tuyến quốc tế. Các doanh nghiệp phải đảm bảo các điều kiện về hợp đồng lao động, chế độ tiền lương và đặc biệt là sự công bằng trong cơ hội việc làm. Mức điểm sẵn sàng của các doanh nghiệp khai thác tuyến nội địa thấp hơn (3.0 - 4.0) phản ánh việc thực thi chủ yếu dựa trên các quy định của pháp luật Việt Nam

Đối với trụ cột về quản trị, tất cả các doanh nghiệp đều đồng thuận tuyệt đối về tính thống nhất trong tuân thủ pháp luật (G1). Việc tuân thủ nghiêm túc các quy định của pháp luật Việt Nam và quốc tế không chỉ là nghĩa vụ mà còn là điều kiện tiên quyết để duy trì hoạt động kinh doanh bền vững. Sự gia tăng điểm số ở các tiêu chí tuân thủ pháp luật đạt mức 4.6 - 5.0 không chỉ đến từ ý thức tự nguyện mà còn là kết quả trực tiếp của việc thắt chặt quản lý nhà nước thông qua hệ thống rà soát và chế tài nghiêm khắc hơn. Việc thực hành báo cáo ESG (G2) hiện nay mới chỉ được thực hiện bởi các DNNN và doanh nghiệp tư nhân lớn, trong đó chủ yếu là các doanh nghiệp kinh doanh cả dịch vụ vận tải biển và khai thác cảng biển. Đây là nhóm doanh nghiệp có đủ tiềm lực tài chính, được niêm yết trên thị trường và chịu áp lực minh bạch hóa thông tin từ thị trường vốn. Ngược lại, các doanh nghiệp nhỏ, các doanh nghiệp không cổ phần hóa vẫn đang đứng ngoài xu hướng này do hạn chế về nguồn lực và đặc biệt chưa thấy được lợi ích trực tiếp từ việc công bố báo cáo bền vững.

Quan sát biểu đồ Radar tổng hợp các tiêu chí E, S và G, chúng ta có thể thấy rõ những vùng phủ khác biệt giữa các nhóm đối tượng nghiên cứu, phản ánh mức độ sẵn sàng triển khai ESG trong thực tế. Biểu đồ radar của nhóm DNNN và tư nhân khai thác tuyến viễn dương có diện tích bao phủ rộng nhất. Điều này khẳng định rằng các DNNN và các tập đoàn tư nhân lớn (như Gemadept, Tân Cảng) đang đóng vai trò đầu tàu trong tiến trình xanh hóa ngành vận tải biển. Sự chú trọng đặc biệt này không chỉ đến từ tiềm lực tài chính mà còn từ áp lực thực thi các cam kết Net Zero của Chính phủ và yêu cầu thực thi từ các công ước quốc tế.

Tại các đỉnh của biểu đồ liên quan đến An toàn (S) và Tuân thủ pháp luật (G1), đường biểu diễn của tất cả các nhóm bao gồm cả doanh nghiệp nhỏ có xu hướng hội tụ sát nhau. Điều này cho thấy sự tuân thủ theo các tiêu chuẩn mang tính cưỡng bách từ quốc tế và những quy định của quản lý nhà nước.

Điểm khác biệt rõ rệt nhất nằm ở các đỉnh của tiêu chí Số hóa giấy tờ tàu (E4), Báo cáo ESG (G2) và Năng lượng sạch (E1). Trong khi nhóm viễn dương và doanh nghiệp lớn tạo ra các "góc nhọn" vươn xa nhờ sự chủ động đầu tư thì nhóm nội địa nhỏ lẻ lại tạo thành những "vùng lõm" trên biểu đồ. Điều này phản ánh thực trạng các doanh nghiệp nhỏ vẫn đang chỉ ở mức độ tuân thủ tối thiểu.

6. KẾT LUẬN

Bài báo này đã nghiên cứu thực trạng triển khai ESG trong ngành vận tải biển Việt Nam thông qua phân tích so sánh giữa các nhóm DNNN và tư nhân khai thác tuyến viễn dương và tuyến nội địa. Dựa trên kết quả khảo sát từ các doanh nghiệp đầu ngành với bộ chỉ số gồm các tiêu chí cụ thể về Môi trường, Xã hội và Quản trị, nghiên cứu đã đánh giá mức độ sẵn sàng thực thi theo một khung cấu trúc. Việc thực thi ESG trong ngành vận tải biển Việt Nam chịu ảnh hưởng sâu sắc bởi loại hình quản trị, năng lực tổ chức và áp lực từ các bên liên quan.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT25-26.129.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Li, L., Saat, M. M., Khatib, S. F. A., Chu, P., Sulimany, H. G. H. Navigating the impact: A comprehensive analysis of ESG disclosure consequences through systematic review. Business Strategy & Development, 7(2), 2024, https://doi.org/10.1002/bsd2.382.

[2] International Maritime Organization. Fourth IMO GHG Study 2023. International Maritime Organization Report. https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/2023-imo-strategy-on-reduction-of-ghg-emissions-from-ships.aspx (Accessed: 02/2026).

[3] United Nations Conference on Trade and Development. Review of maritime transport 2023. UNCTAD Report. https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023 (Accessed: 02/2026).

[4] Nguyễn Thị Cẩm Huyền. Thực trạng năng lực cạnh tranh của đội tàu biển Việt Nam. Internet: https://kinhtevadubao.vn/thuc-trang-nang-luc-canh-tranh-cua-doi-tau-bien-viet-nam-30164.html (truy cập tháng 3/2026).

[5] Radzi, S. H. M., Hamid, N. A., Ismail, R. F. An overview of environmental, social and governance (ESG) and company performance. European Proceedings of Social and Behavioural Sciences, pp. 1111-1122, 2023. Internet: https://doi.org/10.15405/epsbs.2023.11.90.

[6] Arpit Raj. Evaluating Shipping Companies: The Critical Role of ESG Metrics. Internet: https://imare.in/wp-content/uploads/2025/02/49-Evaluating-Shipping-Companies-The-Critical-Role-of-ESG-Metrics_Arpit-Raj.pdf (Accessed: 02/2026).

[7] International Chamber of Shipping (ICS). ESG in Shipping: ICS Webpages Update. Internet: https://hksoa.org/wp-content/uploads/2024/01/SPC2402-Annex-A-ESG-ICS-Webpages-Update.pdf, (Accessed 03/2026).

[8] Koroleva, E., Baggieri, M., & Nalwanga, S. Level of maturity of ESG governance practices: implications on organizational performance. Internet: https://www.researchgate.net/publication/389205066_Level_of_maturity_of_ESG_governance_practices_implications_on_organizational_performance, (Accessed 03/2026).

[9] Derkach, V., & Paužuolienė, J. ESG Performance in the Maritime Sector: Analysing the Case of European Ports. Regional Formation and Development Studies, no. 1(43), pp. 83-95, 2025, doi: 10.15181/rfds.v43i1.3285.

■Ngày nhận bài: 06/3/2026 ■Ngày sửa bài: 10/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 28/3/2026

Cơ sở pháp lý thực hiện đầu tư xây dựng hệ thống trường học theo chương trình mục tiêu quốc gia và thực tiễn triển khai

Legal basis for investment in and construction of the school system under the national target program and the current status of program execution

> TS NGUYỄN VĂN TRUNG[1], THS NGUYỄN THÁI SƠN[2,*]
[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

Từ cơ sở nền tảng là Nghị quyết số 29-NQ/TW ngày 04/11/2013 Hội nghị lần thứ tám Ban Chấp hành Trung ương 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; Đảng và Nhà nước đã có tầm nhìn chiến lược về quy hoạch đầu tư xây dựng hệ thống trường học. Quy hoạch đầu tư xây dựng hệ thống trường học không chỉ là việc xây dựng những công trình trường học cụ thể mà là sự gắn kết với các chiến lược, mục tiêu phát triển nhân lực chất lượng cao cho đất nước trong kỷ nguyên mới. Trải qua một thời gian, hệ thống các nghị quyết của Đảng, Chính phủ và Quốc hội, gồm: 29-NQ/TW, 71-NQ/TW, 369/NQ-CP, 1061/TTr-CP và 249/2025/QH15, đã tạo nên một chuỗi liên kết hoàn chỉnh, kết nối từ tư duy chiến lược đến kế hoạch hành động và nguồn lực thực thi.

Bài viết sử dụng các phương pháp nghiên cứu như: sưu tầm và thống kê số liệu thực tế; tổng hợp; phân tích tài liệu và số liệu thứ cấp; phân tích và đánh giá cơ sở thực tiễn. Trên cơ sở đó, nghiên cứu làm rõ lộ trình từ chiến lược "đổi mới căn bản, toàn diện giáo dục và đào tạo" đến chương trình mục tiêu quốc gia về "hiện đại hóa, nâng cao chất lượng giáo dục và đào tạo giai đoạn 2026 - 2035", qua đó xác lập cơ sở pháp lý cho việc đầu tư xây dựng hệ thống trường học. Đồng thời, đánh giá thực tiễn triển khai chương trình và đề xuất một số định hướng nhằm nâng cao hiệu quả thực hiện chương trình mục tiêu quốc gia.

Từ khóa: Chiến lược phát triển giáo dục; chương trình mục tiêu quốc gia về giáo dục và đào tạo; quy hoạch đầu tư xây dựng, hệ thống trường học; 29-NQ/TW; 71-NQ/TW; 369/NQ-CP; 1061/TTr-CP; 249/2025/QH15.

ABSTRACT

Based on Resolution No. 29-NQ/TW dated November 4, 2013 by the Eighth Plenum of the 11th Central Committee on the fundamental and comprehensive reform of education and training to meet the requirements of industrialization and modernization in the context of a socialist-oriented market economy and international integration, the Party and the State have developed a strategic vision for planning investment in the construction of the school system. Planning for investment in the school system is not merely a matter of building individual school facilities; rather, it is closely tied to broader strategies and goals for developing a high-quality workforce for the country in the new era. Over time, the system of resolutions and policy documents issued by the Party, the Government, and the National Assembly, including: 29-NQ/TW, 71-NQ/TW, 369/NQ-CP, 1061/TTr-CP, and 249/2025/QH15, has created a coherent chain linking strategic thinking, action planning, and implementation resources.

The paper uses research methods such as document collection, the compilation of actual statistical data, the synthesis and analysis of documents and secondary data, and the analysis and evaluation of practical foundations to clarify the path from the strategy of "fundamental and comprehensive reform of education and training" to the National Target Program on the "modernization and improvement of the quality of education and training for the 2026 - 2035 period," which serves as the legal basis for investment in and construction of the school system under this program. At the same time, the paper assesses the actual execution of the program and proposes several directions for its effective implementation.

Keywords: Education development strategy; national target program on education and training; planning for investment in construction; school system; 29-NQ/TW; 71-NQ/TW; 369/NQ-CP; 1061/TTr-CP; 249/2025/QH15.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong tiến trình phát triển của dân tộc, giáo dục và đào tạo luôn được xác định là quốc sách hàng đầu, là động lực then chốt để đưa đất nước bước vào "Kỷ nguyên vươn mình". Để cụ thể hóa tầm nhìn này, một hệ thống các nghị quyết mang tính bản lề đã được ban hành, tạo nên hành lang pháp lý và nguồn lực tài chính chưa từng có để đầu tư xây dựng, hiện đại hóa hệ thống trường học phổ thông trên toàn quốc.

Theo tinh thần của 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, nghị quyết đã đề ra 7 quan điểm chỉ đạo. Trong đó, có quan điểm nhấn mạnh: "... ưu tiên đầu tư phát triển giáo dục và đào tạo đối với các vùng đặc biệt khó khăn, vùng dân tộc thiểu số, biên giới, hải đảo, vùng sâu, vùng xa và các đối tượng chính sách...". Trong lộ trình thực hiện nghị quyết này, ngày 22/8/2025, Bộ Chính trị đã ban hành Nghị quyết số 71-NQ/TW về đột phá giáo dục và đào tạo. So với Nghị quyết số 29-NQ/TW, Nghị quyết số 71-NQ/TW chuyển trọng tâm từ "đổi mới căn bản, toàn diện" sang "đột phá chiến lược". Nghị quyết đề ra 6 quan điểm chỉ đạo; xác định mục tiêu đến năm 2030, 2035 và tầm nhìn đến năm 2050; đồng thời đưa ra 8 nhiệm vụ, giải pháp cụ thể. Trong đó, nhóm giải pháp về phát triển đội ngũ nhà giáo và cơ sở vật chất trường lớp nhấn mạnh việc tập trung nguồn lực để xây dựng, kiên cố hóa và hiện đại hóa trường học; bảo đảm đủ cơ sở vật chất, trang thiết bị đạt chuẩn, không gian vui chơi và môi trường rèn luyện thể chất, cũng như nhà công vụ cho giáo viên. Đồng thời, hoàn thành xây dựng mạng lưới trường phổ thông nội trú tại vùng đồng bào dân tộc thiểu số, vùng khó khăn và biên giới trước năm 2030; mở rộng hệ thống đào tạo dự bị đại học cho học sinh người dân tộc thiểu số, miền núi; và bảo đảm mỗi tỉnh, thành phố có ít nhất một cơ sở giáo dục chuyên biệt đến cấp trung học phổ thông.

Nhằm cụ thể hóa các nội dung của Nghị quyết số 71-NQ/TW của Bộ Chính trị về đột phá giáo dục và đào tạo, ngày 10/12/2025, Quốc hội đã ban hành Nghị quyết số 249/2025/QH15 phê duyệt chủ trương đầu tư Chương trình mục tiêu quốc gia "Hiện đại hóa, nâng cao chất lượng giáo dục và đào tạo giai đoạn 2026 - 2035". Chương trình này tiếp tục là một chính sách có tác động xã hội sâu rộng, đề ra 4 mục tiêu cụ thể cho hai giai đoạn. Trong đó, một mục tiêu tiêu biểu được xác định như sau:

Đến năm 2030, "xây dựng mạng lưới trường mầm non, trường phổ thông công lập, phấn đấu cơ bản đáp ứng nhu cầu học tập của học sinh; từng bước bảo đảm cơ sở vật chất và thiết bị dạy học tối thiểu thực hiện chương trình giáo dục mầm non và giáo dục phổ thông…; phấn đấu kiên cố hóa 100% phòng học, bảo đảm đủ phòng công vụ cho giáo viên tại các địa bàn khó khăn; 30% cơ sở giáo dục mầm non, cơ sở giáo dục phổ thông có thiết bị để triển khai dạy và học một số môn bằng tiếng Anh…".

Đến năm 2035, "đối với giáo dục mầm non, giáo dục phổ thông: 100% cơ sở giáo dục mầm non, cơ sở giáo dục phổ thông đạt chuẩn về cơ sở vật chất và thiết bị dạy học tối thiểu; các cơ sở giáo dục mầm non, cơ sở giáo dục phổ thông có thiết bị dạy học để triển khai thực hiện dạy và học một số môn bằng tiếng Anh...".

Chương trình mục tiêu quốc gia về giáo dục là công cụ tạo đột phá trong bối cảnh hiện nay. Để hiện thực hóa các chiến lược nêu trên, Quốc hội đã phê duyệt nguồn vốn dự kiến hơn 580.000 tỷ đồng nhằm thực hiện các mục tiêu sau:

Chương trình mục tiêu quốc gia này là công cụ tạo đột phá trong giai đoạn phát triển hiện nay của đất nước, khi triển khai và quản lý tốt sẽ đem lại lợi ích to lớn về kinh tế - xã hội, trong đó có việc hiện đại hóa cơ sở vật chất, hạ tầng giáo dục quốc gia, tạo điều kiện học tập cho vùng sâu, vùng xa, vùng khó khăn và vùng dân tộc miền núi. Những mục tiêu đạt được khi triển khai và thực hiện chương trình mục tiêu quốc gia này như sau:

Thứ nhất, đảm bảo công bằng xã hội trong tiếp cận giáo dục: các xã vùng sâu, vùng xa, vùng khó khăn và vùng dân tộc miền núi có điều kiện kinh tế - xã hội khó khăn, dân cư phân tán, giao thông hạn chế nên Nhà nước cần phân bổ hệ thống trường học với nguồn lực hợp lý để đảm bảo mọi học sinh đều có cơ hội học tập.

Thứ hai, góp phần ổn định dân cư và phát triển kinh tế - xã hội: giáo dục là nền tảng phát triển lâu dài để nâng cao dân trí, đào tạo nguồn nhân lực tại chỗ, giảm nghèo bền vững, hạn chế di cư tự do nên quản lý nhà nước giúp gắn quy hoạch giáo dục với quy hoạch phát triển kinh tế - xã hội vùng sâu, vùng xa, vùng khó khăn và vùng dân tộc miền núi.

Thứ ba, đảm bảo an ninh quốc phòng: các xã vùng sâu, vùng xa, vùng khó khăn và vùng dân tộc miền núi có vị trí chiến lược; trường học không chỉ là nơi giáo dục mà còn góp phần giữ dân, giữ đất; tăng cường ý thức công dân, chủ quyền lãnh thổ nên quy hoạch và quản lý tốt hệ thống trường nội trú giúp ổn định xã hội và củng cố "thế trận lòng dân" ở khu vực miền núi.

Thứ tư, đảm bảo chất lượng giáo dục: thực hiện chương trình mục tiêu quốc gia này nghĩa là hiện đại hóa trường lớp là một trong những yếu tố quan trọng đảm bảo và nâng cao chất lượng giáo dục.

2. QUÁ TRÌNH HÌNH THÀNH TỪ CHIẾN LƯỢC ĐẾN CHƯƠNG TRÌNH MỤC TIÊU QUỐC GIA

2.1. Từ Nghị quyết số 29-NQ/TW đến Nghị quyết số 71-NQ/TW

Một chặng đường dài mà nền móng của công cuộc đổi mới giáo dục hiện nay bắt nguồn từ Nghị quyết số 29-NQ/TW ngày 04/11/2013 về đổi mới căn bản, toàn diện giáo dục và đào tạo. Tuy nhiên, để đáp ứng yêu cầu bứt phá trong bối cảnh Cách mạng công nghiệp lần thứ tư, ngày 22/8/2025, Bộ Chính trị đã ban hành Nghị quyết số 71-NQ/TW về đột phá phát triển giáo dục và đào tạo, là sự tiếp nối và đột phá tư duy.

Nghị quyết số 71-NQ/TW xác định rõ quan điểm: "Đột phá phát triển giáo dục và đào tạo phải bắt đầu từ đổi mới tư duy, nhận thức và thể chế". Một trong những điểm mới nhất là cam kết về nguồn lực tài chính: Chi ngân sách nhà nước cho giáo dục phải đạt tối thiểu 20% tổng chi ngân sách nhà nước, trong đó chú trọng đến phân bổ chi đầu tư. Đây là tiền đề quan trọng để giải quyết bài toán thiếu hụt trường lớp, cơ sở vật chất lạc hậu vốn là rào cản bấy lâu nay.

2.2. Nghị quyết số 369/NQ-CP, tờ trình số 1061/TTr-CP và Nghị quyết số 249/2025/QH15

Hiện thực hóa nguồn lực thông qua "siêu chương trình" mục tiêu quốc gia, quyết tâm của Đảng đã nhanh chóng được Chính phủ và Quốc hội cụ thể hóa. Ngày 14/11/2025, Chính phủ ban hành Nghị quyết số 369/NQ-CP thông qua Báo cáo đề xuất chủ trương đầu tư Chương trình mục tiêu quốc gia "Hiện đại hóa, nâng cao chất lượng giáo dục và đào tạo giai đoạn 202 - 2035", đồng thời trình chủ trương đầu tư chương trình này tại Tờ trình số 1061/TTr-CP.

Chỉ gần một tháng sau, ngày 10/12/2025, Quốc hội đã chính thức ban hành Nghị quyết số 249/2025/QH15 phê duyệt chương trình mục tiêu quốc gia về giáo dục và đào tạo; nội dung thành phần của Chương trình tập trung vào 5 dự án thành phần, bao gồm: (1)-Đảm bảo cơ sở vật chất mầm non và phổ thông; (2)-Hiện đại hóa giáo dục nghề nghiệp;(3)-Tăng cường hạ tầng đại học trọng điểm; (4)-Phát triển đội ngũ nhà giáo và người học trong bối cảnh chuyển đổi số; (5)-Công tác giám sát, đánh giá.

Nghị quyết số 249/2025/QH15 đã phê duyệt chủ trương đầu tư với tổng kinh phí dự kiến lên đến 580.133 tỷ đồng cho cả giai đoạn 10 năm. Kinh phí này được phân bổ như sau:

Kinh phí thực hiện Chương trình giai đoạn 2026 - 2030 có tổng nguồn vốn là 174.673 tỷ đồng, trong đó:

- Vốn ngân sách trung ương: 100.000 tỷ đồng (chiếm 57,25%), bao gồm:
+ Vốn đầu tư công: 85.000 tỷ đồng;
+ Kinh phí thường xuyên: 15.000 tỷ đồng.
- Vốn ngân sách địa phương: 45.101 tỷ đồng (chiếm 25,82%), bao gồm:
+ Vốn đầu tư công: 41.143 tỷ đồng;
+ Kinh phí thường xuyên: 3.958 tỷ đồng.
- Vốn đối ứng của các trường đại học và cao đẳng: khoảng 20.429 tỷ đồng (chiếm 11,7%).
- Nguồn vốn khác: khoảng 9.143 tỷ đồng (chiếm 5,23%).

Trong quá trình điều hành, Chính phủ bảo đảm ngân sách trung ương tối thiểu quy định như trên, tiếp tục cân đối ngân sách trung ương, bố trí thêm nguồn lực từ tăng thu, tiết kiệm chi hàng năm và các nguồn vốn khác để ưu tiên bổ sung vốn cho Chương trình, bảo đảm đủ nguồn vốn thực hiện các mục tiêu, nhiệm vụ trọng tâm, cấp bách của ngành giáo dục và đào tạo; có giải pháp huy động hợp lý mọi nguồn vốn hợp pháp để thực hiện;

Giai đoạn 2031 - 2035: Căn cứ kết quả thực hiện của Chương trình giai đoạn 2026 - 2030, Chính phủ trình Quốc hội quyết định nguồn lực thực hiện Chương trình giai đoạn 2031 - 2035.

Nghị quyết 249/2025/QH15 xác định nguyên tắc phân bổ vốn phải ưu tiên cho các địa bàn khó khăn, vùng đồng bào dân tộc thiểu số, miền núi, biên giới và hải đảo. Điều này thể hiện tính nhân văn và cam kết bảo đảm công bằng trong tiếp cận giáo dục giữa các vùng miền.

2.3. Mục tiêu cụ thể cho hệ thống trường học phổ thông đến năm 2030

Đầu tư xây dựng hệ thống trường học phổ thông theo các nghị quyết này không chỉ dừng lại ở việc "xây thêm phòng học" mà hướng tới sự chuẩn hóa và hiện đại hóa toàn diện.

- **Về quy mô và mạng lưới trường lớp:**

+ Phấn đấu kiên cố hóa 100% phòng học trên phạm vi cả nước.

+ Bảo đảm đủ nhà công vụ cho giáo viên tại các địa bàn khó khăn, giúp thầy cô yên tâm công tác.

+ Xây dựng mạng lưới trường mầm non và phổ thông công lập cơ bản đáp ứng nhu cầu học tập của mọi đối tượng học sinh.

+ Hoàn thành phổ cập giáo dục mầm non cho trẻ từ 3 đến 5 tuổi và hoàn thành giáo dục bắt buộc hết trung học cơ sở.

- **Về tiêu chuẩn hiện đại hóa:**

+ Ít nhất 30% cơ sở giáo dục mầm non và phổ thông có đủ thiết bị để dạy và học một số môn bằng tiếng Anh.

+ Từng bước đưa tiếng Anh trở thành ngôn ngữ thứ hai trong trường học.

+ Tập trung đầu tư các phòng học thực hành, không gian trải nghiệm STEM/STEAM và hạ tầng công nghệ số.

3. THỰC TIỄN TRIỂN KHAI

Tính đến đầu năm 2026, Chương trình mục tiêu quốc gia hiện đại hóa, nâng cao chất lượng giáo dục và đào tạo giai đoạn 2026 - 2035 đã chính thức được phê duyệt và đang bước vào những bước triển khai đầu tiên trên phạm vi cả nước. Dưới đây là tổng hợp tình hình triển khai chương trình dựa trên các nguồn tài liệu:

- Phê duyệt chủ trương: Quốc hội đã ban hành Nghị quyết số 249/2025/QH15 ngày 11/12/2025 phê duyệt chủ trương đầu tư Chương trình.

- Chỉ đạo của Bộ Giáo dục và Đào tạo (GD&ĐT): Ngày 21/01/2026, Bộ GD&ĐT đã ban hành Công văn số 345/BGDĐT-GDNNGDTX, đề nghị các đơn vị, địa phương cập nhật kết quả thực hiện giai đoạn 2021 - 2025, đồng thời khẩn trương xây dựng kế hoạch nhiệm vụ cho giai đoạn 2026 - 2035 và cho năm 2026.

- Một số địa phương đã triển khai xây dựng kế hoạch thực hiện: các tỉnh, thành phố đang tích cực cụ thể hóa chương trình. Ví dụ, tỉnh Tuyên Quang đã ban hành Đề án phát triển GDĐT đến năm 2030 (Quyết định số 381/QĐ-UBND ngày 25/02/2026), trong đó xác định lộ trình năm 2026 tập trung tổ chức quán triệt đề án, xây dựng trung tâm điều hành thông minh và bồi dưỡng năng lực số cho 100% giáo viên, học sinh.

- Mục tiêu cụ thể đến năm 2030: phấn đấu kiên cố hóa 100% phòng học và bảo đảm đủ nhà công vụ cho giáo viên tại các vùng khó khăn.

- Còn một số ý kiến của Ủy ban Thường vụ Quốc hội như sau:

+ Tránh chồng chéo: cần rà soát kỹ để không trùng lặp với các chương trình mục tiêu quốc gia khác (như chương trình nông thôn mới hay chương trình giảm nghèo bền vững) đang triển khai.

+ Tính khả thi của nguồn vốn: cần làm rõ căn cứ xác định tỷ lệ vốn đối ứng của địa phương và các cơ sở giáo dục, nhằm tránh gây khó khăn cho những tỉnh chưa tự chủ được ngân sách.

- Hiện nay, các cơ quan chức năng đang nỗ lực hoàn thiện các văn bản hướng dẫn thực hiện để chương trình có thể triển khai hiệu quả ngay sau khi được thông qua.

4. MỘT SỐ ĐỀ XUẤT ĐỊNH HƯỚNG

a) Hoàn thiện, xây dựng hệ thống văn bản pháp luận: Hoàn thiện, bổ sung, xây dựng mới các văn bản pháp luật phù hợp với tình hình thực tiễn.

b) Môi trường đầu tư: Nhà nước cần tạo một môi trường đầu tư tốt để tăng tính cạnh tranh, công bằng, minh bạch cho các đối tượng tham gia hoạt động đầu tư xây dựng hệ thống trường học bằng các chính sách, chế tài phù hợp.

c) Nhà nước hỗ trợ những chính sách đặc thù: Để huy động tối đa nguồn lực cho việc xây dựng trường học, Nghị quyết 71-NQ/TW và Nghị quyết 249/2025/QH15 đã đề ra các cơ chế đặc thù:

- **Về đất đai:** Ưu tiên dành quỹ đất sạch cho giáo dục; cho phép chuyển đổi linh hoạt mục đích sử dụng đất sang đất giáo dục. Đặc biệt, không thu tiền sử dụng đất, giảm tiền thuê đất đối với các cơ sở giáo dục trong nước.

- **Về thuế:** Không áp dụng thuế thu nhập doanh nghiệp đối với các cơ sở giáo dục công lập và tư thục hoạt động không vì lợi nhuận.

- **Sử dụng nguồn cơ sở vật chất sau sáp nhập:** Ưu tiên dành các trụ sở cơ quan nhà nước dôi dư sau sắp xếp để làm cơ sở giáo dục.

- **Hợp tác công tư:** Khuyến khích mạnh mẽ các doanh nghiệp đầu tư phát triển giáo dục thông qua các hình thức hợp tác công tư (PPP) và ưu đãi vốn tín dụng.

d) Nâng cao vai trò của chính quyền địa phương hai cấp: Việc triển khai các nghị quyết này đòi hỏi sự vào cuộc của cả hệ thống chính trị. Tại các tỉnh, thành phố, cần ban hành Chương trình hành cho địa phương mình một cách chi tiết để cụ thể hóa các mục tiêu của Nghị quyết 71-NQ/TW, coi giáo dục là chương trình trọng điểm, đột phá của thành phố.

5. KẾT LUẬN

Hệ thống các nghị quyết của Đảng, Chính phủ, Quốc hội gồm 29-NQ/TW, 71-NQ/TW, 369/NQ-CP, 1061/TTr-CP và 249/2025/QH15 đã tạo nên một chuỗi mắt xích hoàn chỉnh từ tư duy chiến lược đến kế hoạch hành động và nguồn lực thực thi. Việc đầu tư hơn 580.000 tỷ đồng vào hệ thống giáo dục giai đoạn 2026-2035 chính là một khoản đầu tư cho tương lai dân tộc. Với một mạng lưới trường học phổ thông được kiên cố hóa, hiện đại hóa và phủ rộng khắp, giáo dục Việt Nam chắc chắn sẽ tạo ra những bước chuyển mình mạnh mẽ, đáp ứng kỳ vọng về một thế hệ tương lai tài năng, góp phần đưa đất nước tiến xa trên con đường phát triển bền vững.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nghị quyết số 29-NQ/TW ngày 04/11/2013 Hội nghị lần thứ tám Ban chấp hành Trung ương 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 (Văn bản của Đảng).

[2] Nghị quyết 71-NQ/TW ngày 22/8/2025 của Bộ Chính trị về đột phá phát triển giáo dục và đào tạo.

[3] Nghị quyết 369/NQ-CP ngày 14/11/2025 về thông qua báo cáo đề xuất chủ trương đầu tư chương trình mục tiêu quốc gia hiện đại hóa, nâng cao chất lượng giáo dục và đào tạo giai đoạn 2026 - 2035.

[4] Tờ trình số 1061/TTr-CP ngày 14/11/2025 của Chính phủ đề xuất chủ trương đầu tư Chương trình mục tiêu quốc gia hiện đại hóa, nâng cao chất lượng giáo dục và đào.

[5] Nghị quyết 249/2025/QH15 ngày 10/12/2025 phê duyệt chủ trương đầu tư Chương trình mục tiêu quốc gia hiện đại hóa, nâng cao chất lượng giáo dục và đào tạo giai đoạn 2026 - 2035.

[6] https://quochoi.vn/gioithieu/gioithieuveqh/Pages/hoat-dong-qh.aspx?ItemID=97142 (truy cập tháng 4/2026).

[7] https://baochinhphu.vn/dau-tu-cho-giao-duc-2026-2035-lam-ro-muc-tieu-phan-bo-va-chat-luong-dao-tao-102251202184219718.htm (truy cập tháng 3/2026).

[8] https://giaoduc.net.vn/chuong-trinh-hanh-dong-cua-bo-gddt-thuc-hien-nghi-quyet-71-ve-dot-pha-phat-trien-giao-duc-dao-tao-post255293.gd (truy cập tháng 4/2026).

[9] https://www.sggp.org.vn/hon-580000-ty-dong-thuc-hien-chuong-trinh-muc-tieu-quoc-gia-ve-gd-dt-giai-doan-2026-2035-post827885.html (truy cập tháng 4/2026).

■Ngày nhận bài: 02/3/2026 ■Ngày sửa bài: 07/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 18/3/2026

Tối ưu hóa chi phí mạng lưới phân phối có thu hồi sản phẩm đã qua sử dụng dưới ràng buộc phát thải carbon: Trường hợp doanh nghiệp thương mại phân phối phụ tùng

Cost optimization of a distribution network with used-product returns under carbon emission constraints: A case study of a spare-parts trading company

> CN TRẦN NGUYỄN NHƯ PHƯƠNG, PGS.TS HỒ THỊ THU HÒA*, KS NGUYỄN THANH DANH
Trường Đại học Quốc tế - Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh
*Email: htthoa@hcmiu.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này kế thừa mô hình tối ưu hóa chi phí mạng lưới phân phối bằng Quy hoạch tuyến tính nguyên hỗn hợp (MILP) do cùng nhóm tác giả phát triển và triển khai ứng dụng cho doanh nghiệp thương mại có chính sách thu hồi sản phẩm dưới ràng buộc phát thải carbon. Mô hình sử dụng dữ liệu thực tế của doanh nghiệp trong chu kỳ một năm, bao gồm vị trí và công suất các cơ sở, lộ trình vận chuyển, nhu cầu, chính sách thu hồi, tồn kho và các cấu phần chi phí. Bài toán được giải bằng Python kết hợp thư viện CPLEX, đồng thời được kiểm chứng bằng thuật toán di truyền (Genetic Algorithm). Kết quả cho thấy vận tải là hoạt động chi phối, chiếm tỷ trọng lớn nhất cả về chi phí và phát thải carbon trong mạng lưới phân phối. Phân tích độ nhạy chỉ ra nhu cầu và tỷ lệ thu hồi là hai tham số có tác động thuận chiều đáng kể, qua đó quyết định đáng kể đến phương án tối ưu. Nghiên cứu đề xuất công cụ hỗ trợ ra quyết định nhằm tối ưu hóa chi phí đồng thời kiểm soát phát thải, góp phần nâng cao hiệu quả kinh tế và đáp ứng định hướng phát triển bền vững trong thiết kế mạng lưới phân phối.

Từ khóa: Chuỗi cung ứng bền vững; mạng lưới phân phối; phát thải carbon; tối ưu hóa chi phí.

ABSTRACT

This study extends a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model for distribution network cost optimization previously developed by the same authors and applies it to a trading enterprise with used-product return policies under carbon-emission constraints. The model is parameterized using empirical one-year operational data, including facility locations and capacities, transport routes, demand, return policies, inventory parameters and cost components. The problem is solved in Python with the CPLEX library and validated using a Genetic Algorithm. Results indicate that transportation is the dominant contributor to both total cost and carbon emissions. Sensitivity analysis shows that demand and return rates exert substantial positive effects, thereby strongly influencing the optimal solution. The study provides a decision-support tool to minimize cost while controlling carbon emissions, contributing to the alignment of economic efficiency and sustainability objectives in distribution network design.

Keywords: Sustainable supply chain; distribution network; carbon emissions; cost optimization.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tại Việt Nam, doanh nghiệp thương mại được xem là một trong những động lực tăng trưởng quan trọng, đồng thời đảm nhiệm vai trò kết nối giữa khu vực sản xuất và tiêu dùng [1]. Trong chuỗi cung ứng, nhóm doanh nghiệp này vận hành mạng lưới phân phối thuộc phân khúc hạ nguồn, bao quát các hoạt động đưa thành

phẩm đến khách hàng cuối, thực hiện trực tiếp từ nhà sản xuất hoặc thông qua các cấp trung gian. Do đó, đây là khu vực tập trung vận hành và phối hợp chặt chẽ 4 nhóm hoạt động cốt lõi gồm: Vận tải, quản trị tồn kho, vận hành kho bãi và xử lý hàng hóa [2, 3]. Trong bối cảnh chuyển dịch theo hướng phát triển bền vững, các hoạt động trên đều có liên quan đến phát thải khí nhà kính. Theo báo cáo của Cục Biến đổi khí hậu, riêng lĩnh vực vận tải đóng góp khoảng 15 - 20% tổng lượng phát thải khí nhà kính toàn quốc của Việt Nam trong năm 2025 [4]. Bên cạnh đó, tiêu thụ năng lượng tại cơ sở và xử lý chất thải phát sinh trong vận hành cũng tạo ra phát thải theo khung hướng dẫn của Nghị định thư Khí nhà kính (Green House Gas Protocol) [5].

Đối với mặt hàng phụ tùng, thu hồi sản phẩm đã qua sử dụng nhằm phục vụ tái sản xuất được xem là giải pháp giúp tiết kiệm nguyên vật liệu, giảm chi phí sản xuất và cắt giảm lượng chất thải, qua đó góp phần giảm dấu chân carbon của sản phẩm. Tuy nhiên, triển khai logistics ngược đặt ra yêu cầu đối với doanh nghiệp thương mại trong vai trò nhà phân phối phải tổ chức hệ thống thu gom, lưu trữ và vận chuyển sản phẩm cũ từ người sử dụng về các điểm xử lý hoặc nhà máy. Điều này làm gia tăng chi phí liên quan đến tồn kho, vận tải và quản trị vận hành, đồng thời phát sinh thêm phát thải carbon trong quá trình thu gom và vận chuyển. Vì vậy, thiết kế mạng lưới phân phối tích hợp cả dòng chảy xuôi và dòng chảy ngược cần được xem xét như một bài toán tối ưu tổng thể, trong đó mục tiêu chi phí được đặt dưới các ràng buộc kiểm soát phát thải carbon nhằm đảm bảo cân bằng giữa hiệu quả kinh tế và mục tiêu bền vững.

Khung mô hình tối ưu hóa sử dụng trong nghiên cứu này được kế thừa từ công trình trước của nhóm tác giả, trong đó cấu trúc mô hình (biến quyết định, hàm mục tiêu và hệ ràng buộc) đã được xây dựng và trình bày chi tiết [6]. Trên cơ sở đó, nghiên cứu hiện tại mở rộng theo hướng ứng dụng thực nghiệm bằng cách tích hợp dữ liệu vận hành thực tế của doanh nghiệp và hiệu chỉnh các tham số đầu vào nhằm phản ánh đúng bối cảnh triển khai. Mục tiêu nghiên cứu là xác định phương án vận hành mạng lưới phân phối tối ưu thông qua quyết định lượng vận chuyển và mức tồn kho tại các điểm nút, đồng thời bảo đảm tuân thủ ràng buộc phát thải carbon, qua đó hỗ trợ doanh nghiệp cân bằng giữa hiệu quả chi phí và mục tiêu phát triển bền vững của toàn chuỗi cung ứng.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Các nghiên cứu gần đây cho thấy mô hình tối ưu hóa tích hợp mục tiêu bền vững ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong thiết kế và vận hành chuỗi cung ứng, đặc biệt đối với chuỗi cung ứng khép kín có tích hợp logistics ngược nhằm nâng cao hiệu quả tài nguyên và giảm tác động môi trường [7-10]. Một số hướng tiếp cận tiêu biểu gồm mô hình đa mục tiêu theo ba trụ cột kinh tế - môi trường - xã hội [11], mô hình toán học mờ trong thiết kế mạng lưới phân phối đa sản phẩm [12] và mô hình tối ưu chuỗi cung ứng khép kín đa kênh có xét bất định nhu cầu và biến động giá carbon [13].

Nghiên cứu này sử dụng mô hình Quy hoạch tuyến tính nguyên hỗn hợp (MILP) đã được nhóm tác giả công bố trước đây [6] và triển khai theo hướng ứng dụng thực nghiệm thông qua tích hợp dữ liệu vận hành thực tế, đồng thời hiệu chỉnh các tham số phù hợp với bối cảnh doanh nghiệp kinh doanh phụ tùng.

Dữ liệu được thu thập từ mạng lưới phân phối của hai sản phẩm phụ tùng năm 2024 (có khả năng thay thế một phần nhu cầu; sản xuất tại hai nhà máy nên cấu trúc phân phối khác nhau), bao gồm: Nhu cầu (DE), khoảng cách vận chuyển (DI), tồn kho đầu kỳ (IL^0), tỷ lệ tiêu hủy (DR), tỷ lệ thu hồi tối thiểu (RR), tồn kho an toàn (SSR), công suất tồn kho tại trung tâm phân phối và kho (IC_{DC}, IC_w), chi phí vận chuyển - lưu kho - đóng gói - tiêu hủy (T, I, P, D), hệ số phát thải tương ứng (ET, EI, EP, ED), hạn ngạch carbon (CAP) và đơn giá carbon (EC).

Quy trình nghiên cứu gồm 4 bước: (1) Đưa dữ liệu vào mô hình MILP tối thiểu hóa tổng chi phí dưới ràng buộc phát thải; (2) giải mô hình bằng Python kết hợp thư viện CPLEX để xác định lượng vận chuyển tối ưu (Q) và tồn kho cuối kỳ (IL); (3) giải cùng bài toán bằng thuật toán di truyền (GA) nhằm đối chiếu, kiểm chứng nghiệm; (4) phân tích độ nhạy theo các tham số trọng yếu (nhu cầu, tỷ lệ thu hồi, tồn kho an toàn). Kết quả nhằm đề xuất phương án vận hành mạng lưới có chi phí tối ưu, đồng thời bảo đảm tuân thủ giới hạn phát thải carbon.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

Trong mạng lưới phân phối của doanh nghiệp, phụ tùng được thu mua theo điều kiện Ex-works (Incoterms 2020), vận chuyển từ nhà máy sản xuất đến cảng xuất khẩu bằng xe tải, sau đó đóng container hàng lẻ để vận tải đường biển. Tại Việt Nam, hàng hóa tiếp tục được vận chuyển từ cảng Cát Lái đến trung tâm phân phối tại Bình Dương và sau đó đến các kho khu vực bằng đường bộ. Hoạt động giao hàng và thu hồi phụ tùng đã qua sử dụng từ khách hàng được thực hiện bởi đội xe bán tải nội bộ có tải trọng 850 kg.

Sản phẩm được lưu trữ và phân phối theo các quy cách đóng gói như thùng carton, kiện gỗ, pallet và container khô. Đối với các lô hàng do nhà sản xuất giao theo kiện lớn, doanh nghiệp thực hiện đóng gói lại thành đơn vị riêng lẻ tại trung tâm phân phối trước khi giao đến kho hoặc khách hàng. Phụ tùng thu hồi có thể được lưu kho và xuất trả trong cùng kỳ hoặc các kỳ tiếp theo tùy kế hoạch vận hành. Các tham số đầu vào của mô hình được trình bày tại Bảng 1 và Bảng 2.

Bảng 1. Tham số đầu vào

Tham số	Sản phẩm mới A	Sản phẩm mới E	Sản phẩm trả về AA	Sản phẩm trả về EE
Trọng lượng (KG)	23,42	22,97	19,91	19,52
Thể tích (CBM)	2,31	2,08	2,31	2,08
Nhà sản xuất	m_1	m_2	m_1	m_2
Tỷ lệ hoàn trả	75%			
Tỷ lệ hủy hàng	0,0042	0,0058		
Mức tồn kho an toàn	15%			
Yêu cầu đóng gói	Không	Có	Có	Có
Tồn kho đầu kỳ tại trung tâm phân phối (cái)	115	27	133	45
Tồn kho đầu kỳ tại kho 1 (cái)	42	19	17	21
Tồn kho đầu kỳ tại kho 2 (cái)	56	35	28	37
Nhu cầu sản phẩm mới (cái)	2.835	872		
Công suất của trung tâm phân phối (CBM)	6.000		4.500	

Tham số	Sản phẩm mới A	Sản phẩm mới E	Sản phẩm trả về AA	Sản phẩm trả về EE
Công suất của kho 1 (CBM)	2.000		1.200	
Công suất của kho 2 (CBM)	2.000		1.200	
Giới hạn carbon (kg. CO2-eq/cái)	0,54			
Mức phí phát thải carbon ($/kg. CO2-eq)	0,15			

Bảng 2. Khoảng cách giữa các cơ sở trong mạng lưới

Điểm đi	Ký hiệu	Điểm đến	Ký hiệu	Khoảng cách (km)
Nhà máy sản xuất	m_1	Trung tâm phân phối	DC	4.891
	m_2		DC	5.181
Trung tâm phân phối	DC	Kho	w_1	930
	DC		w_2	1.719
Kho	w_1	Khách hàng	c_1	120
	w_2		c_2	140
Trung tâm phân phối	DC		c_3	105

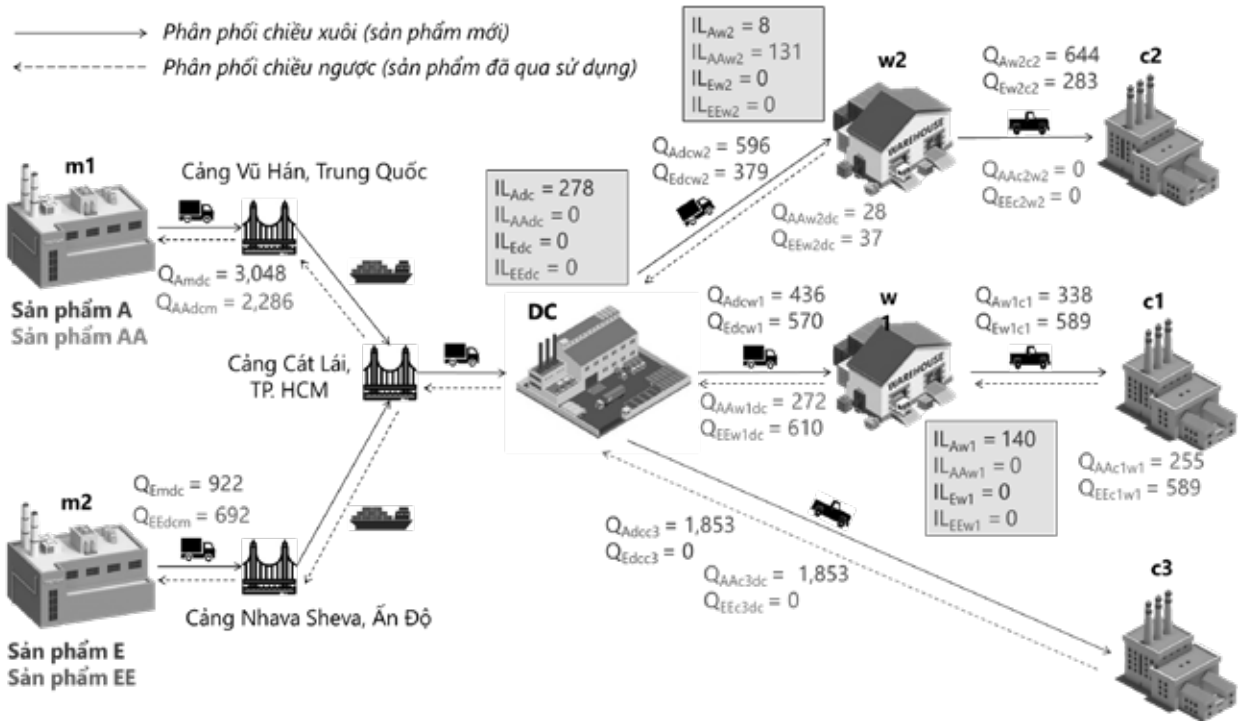
Mô hình MILP được giải bằng Python kết hợp thư viện CPLEX cho tổng chi phí vận hành tối ưu đạt 1.266.763,31 USD. Cơ cấu chi phí cho thấy vận tải là thành phần chiếm tỷ trọng lớn nhất (86,73%), trong đó vận tải xuôi chiếm 51,26% và vận tải ngược chiếm 35,48%. Chi phí lưu kho đứng thứ hai với 9,41%, trong khi các hoạt động đóng gói và tiêu hủy chiếm tỷ trọng không đáng kể. Tổng lượng phát thải carbon của phương án tối ưu đạt 1.688,43 kg.CO_2-eq, trong đó vận tải tiếp tục là nguồn phát thải chủ yếu (96,97%). Ngược lại, phát thải từ lưu kho, đóng gói lại và tiêu hủy cộng gộp chiếm dưới 4%, cho thấy tác động môi trường tập trung chủ yếu ở hoạt động vận chuyển. Kết quả chi tiết được tổng hợp tại Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả tối ưu của mô hình

Hoạt động	Chi phí (USD)	Tỷ trọng chi phí	Phát thải carbon (kg.CO2-eq)	Tỷ trọng phát thải
Vận tải xuôi	649.334,63	51,26%	977,90	57,92%
Lưu kho	119.253,57	9,41%	659,36	39,05%
Đóng gói	46.544,20	3,67%	26,70	1,58%
Vận tải ngược	449.386,30	35,48%	13,72	0,81%
Tiêu hủy hàng	1.991,35	0,16%	10,75	0,64%
Phát thải carbon	253,26	0,02%		
Tổng chi phí	1.266.763,31	100,00%	1.688,43	100,00%

Mạng lưới phân phối đề xuất (Hình 1) cho thấy tồn kho phụ tùng thu hồi được đưa về mức 0 tại các điểm nút nhằm tối thiểu hóa chi phí lưu kho. Về phân bổ vận chuyển, mô hình ưu tiên phân phối theo lợi thế chi phí khu vực: Phụ tùng A tập trung cung ứng cho miền Nam (c3), trong khi phụ tùng E được phân phối cho miền Trung (c1) và miền Bắc (c2). Kết quả này phản ánh sự cần thiết của việc phối hợp giữa chiến lược bán hàng và tối ưu hóa phân phối để nâng cao hiệu quả chi phí toàn mạng lưới.

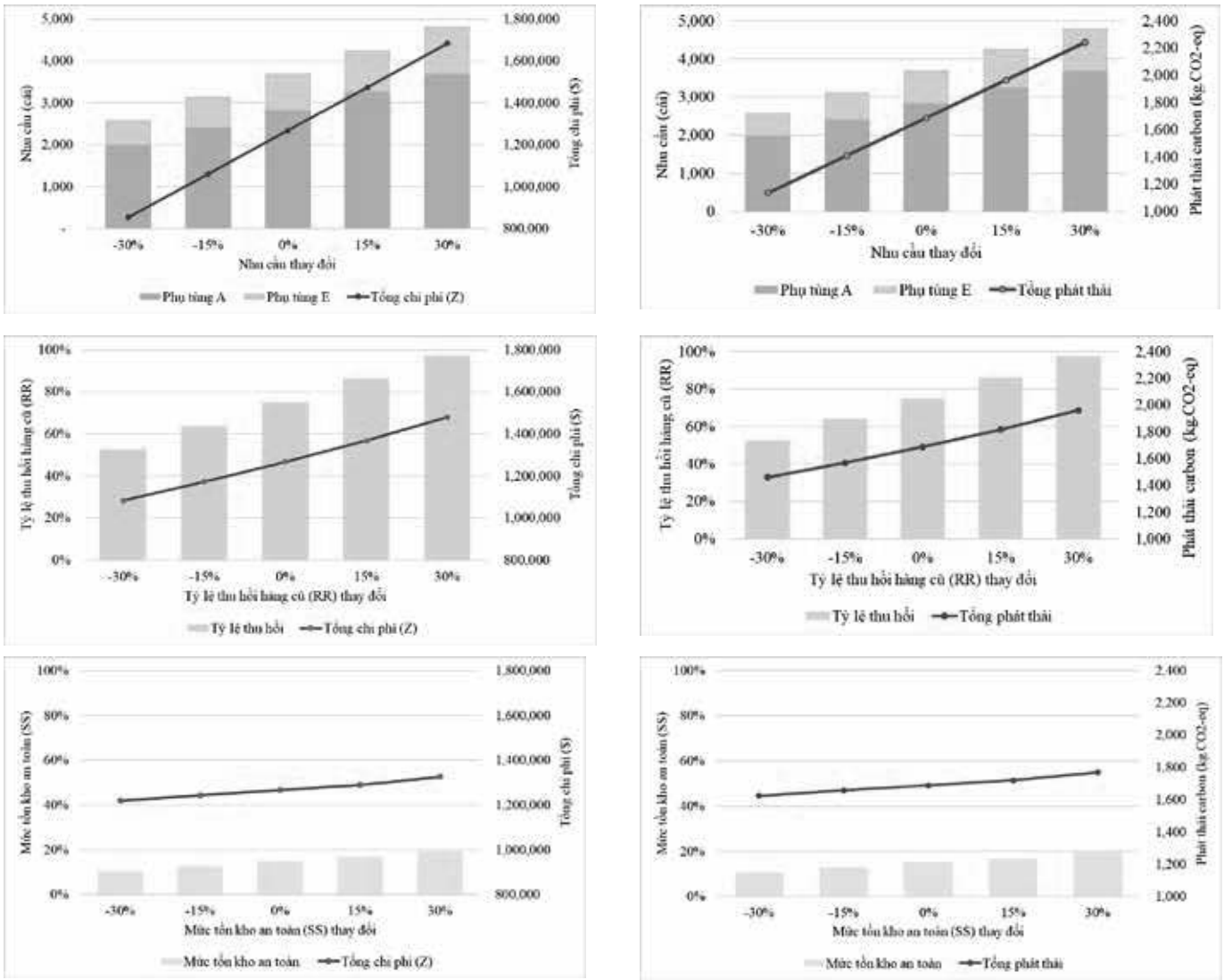
Đối với logistics ngược, hàng thu hồi được ưu tiên thu gom tại các khu vực có chi phí vận chuyển thấp hơn, chủ yếu từ miền Nam (c3) và miền Trung (c1), qua đó hạn chế chi phí và phát thải từ vận tải ngược.



Hình 1. Mạng lưới phân phối tối ưu được đề xuất

Để đánh giá độ tin cậy của nghiệm tối ưu, bài toán được giải lại bằng Thuật toán di truyền (Genetic Algorithm - GA). Thuật toán được lập trình trên Python với các tham số chính: Quy mô quần thể 120 - 180, chọn lọc đấu loại 4 - 8, tỷ lệ đột biến 0,05 - 0,25, độ lệch chuẩn đột biến 40, số thế hệ tối đa 1.500 và ngưỡng dừng 50 thế hệ không cải thiện. Kết quả tốt nhất của GA đạt tổng chi phí 1.282.623,97 USD và phát thải 1.745,20 kg CO_2-eq sau 65 giây tính toán. So với nghiệm MILP, chi phí và phát thải cao hơn lần lượt 1,24% và 3,25%, đồng thời thời gian giải dài hơn đáng kể. Điều này khẳng định độ tin cậy của nghiệm MILP và cho thấy phương pháp này phù hợp hơn với bài toán quy hoạch mạng lưới quy mô tương tự.

Phân tích độ nhạy được thực hiện đối với ba tham số trọng yếu gồm: Nhu cầu, tỷ lệ thu hồi tối thiểu (RR) và mức tồn kho an toàn (SSR). Mỗi tham số được điều chỉnh theo năm kịch bản: Giảm 30%, giảm 15%, mức cơ sở, tăng 15% và tăng 30% (các tham số còn lại giữ nguyên). Kết quả tại Hình 2 cho thấy sự gia tăng của các tham số đều làm tăng tổng chi phí và phát thải carbon. Trong đó, nhu cầu có mức tác động mạnh nhất do kéo theo gia tăng sản lượng vận chuyển và tồn kho. Tỷ lệ thu hồi ảnh hưởng đáng kể đến chi phí và phát thải logistics ngược. Ngược lại, tồn kho an toàn có mức tác động thấp nhất, hàm ý các quyết định tồn kho ít nhạy hơn so với quản trị nhu cầu và chính sách thu hồi.



Hình 2. Tổng hợp kết quả phân tích độ nhạy

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã ứng dụng mô hình Quy hoạch tuyến tính nguyên hỗn hợp (MILP) để xác định phương án vận hành tối ưu cho mạng lưới phân phối phụ tùng trong bối cảnh có ràng buộc phát thải carbon. Kết quả cho thấy vận tải là thành phần chi phối cả về chi phí và phát thải. Do đó, các giải pháp ưu tiên gồm: Lựa chọn phương tiện và nhà vận chuyển có mức phát thải thấp, tăng hệ số chất tải (tăng số lượng sản phẩm/chuyến) và giảm số chuyến vận chuyển. Để thực hiện hiệu quả, doanh nghiệp cần xây dựng chiến lược phân bổ sản phẩm theo khu vực nhằm tạo đủ quy mô vận chuyển, từ đó có thể điều chỉnh phương án tuyến/điểm trung chuyển (ví dụ: lựa chọn cảng đích gần khu vực mục tiêu hơn và chuyển hàng trực tiếp đến kho khu vực), đồng thời nâng cao quản trị nhu cầu theo từng nhóm sản phẩm. Khi dự báo nhu cầu tin cậy hơn, doanh nghiệp có cơ sở để giảm mức tồn kho an toàn và thời gian lưu kho, qua đó giảm chi phí liên quan.

Phân tích độ nhạy chỉ ra rằng khi nhu cầu, tỷ lệ thu hồi và mức tồn kho an toàn gia tăng, tổng chi phí và phát thải carbon đều tăng theo

chiều thuận; trong đó nhu cầu là yếu tố tác động mạnh nhất. Vì tỷ lệ thu hồi chi phối trực tiếp quy mô logistics ngược, doanh nghiệp cần thương lượng với nhà sản xuất để thiết lập mức thu hồi hợp lý, đồng thời gắn với cơ chế khuyến khích phù hợp (hoàn phí cao hơn hoặc giá bán thấp hơn) nhằm thúc đẩy thu hồi sản phẩm đã qua sử dụng.

Về ý nghĩa thực tiễn, kết quả nghiên cứu cho thấy tối ưu hóa mạng lưới phân phối có thể mang lại đồng thời ba nhóm lợi ích. Trước hết, ở góc độ kinh tế, phương án tối ưu giúp giảm tổng chi phí vận hành, qua đó tạo dư địa để doanh nghiệp giảm giá thành hoặc gia tăng lợi nhuận nhằm tái đầu tư. Ở góc độ xã hội, kết quả gợi mở nhu cầu nâng cấp hệ thống quản trị vận tải tích hợp với quản lý kho bãi để theo dõi tồn kho theo thời gian thực và lập kế hoạch hiệu quả hơn, từ đó nâng cao năng lực nhân sự và giảm các tác vụ thủ công. Ở góc độ môi trường, việc cải thiện thiết kế và vận hành mạng lưới phân phối góp phần cắt giảm phát thải carbon, thu hẹp dấu chân carbon và giảm tiêu thụ năng lượng, tài nguyên. Trong bối cảnh Việt Nam đang xây dựng cơ chế trao đổi hạn ngạch phát thải (cap-and-trade), mô hình trong nghiên cứu có thể được sử dụng như một công cụ mô phỏng nhằm lượng hóa mối quan hệ giữa phát thải, chi phí và mục tiêu bền vững. Theo đó, hạn ngạch carbon được xem như ngưỡng ràng buộc và chi phí phát thải phản ánh chi phí mua phần hạn ngạch vượt mức.

Về đóng góp học thuật, nghiên cứu cung cấp một khuôn khổ tối ưu hóa MILP cho mạng lưới phân phối khép kín có xét đồng thời vận tải hai chiều, tồn kho, đóng gói, tiêu hủy và phát thải carbon. Tuy nhiên, nghiên cứu hiện mới tập trung vào phân khúc phân phối và logistics ngược, chưa tích hợp các quyết định thượng nguồn như thu mua và sản xuất, nên phạm vi phản ánh chưa bao quát toàn bộ chuỗi cung ứng. Trong các nghiên cứu tiếp theo, mô hình có thể được mở rộng theo hướng thích ứng với các nhóm hàng có yêu cầu đặc thù về bảo quản và vận chuyển; tích hợp các phương pháp tối ưu hóa dưới bất định (ngẫu nhiên) để xử lý biến động nhu cầu và chi phí carbon; xem xét các cơ chế kiểm soát carbon khác nhau, đồng thời bổ sung mục tiêu tối đa hóa lợi nhuận nhằm nâng cao tính linh hoạt và khả năng ứng dụng trong thực tiễn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Cục Thống kê. Báo cáo tình hình kinh tế - xã hội quý IV và năm 2025, 2026.

[2] M. Watson and S. Lewis. Supply Chain Network Design: Applying Optimization and Analytics to the Global Supply Chain, 2nd ed. San Francisco, CA, USA: Berrett-Koehler Publishers, 2023.

[3] H. Voordijk. Physical distribution costs in construction supply chains: A systems approach. International Journal of Logistics Systems and Management, vol. 7, no. 4, pp. 456-471, 2010.

[4] Cục Biến đổi khí hậu. Văn bản hợp nhất 10/VBHN-BTNMT năm 2025 hợp nhất Nghị định quy định giảm nhẹ phát thải khí nhà kính và bảo vệ tầng ô-dôn. Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2025.

[5] World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development. A Corporate Accounting and Reporting Standard, Revised ed., 2004.

[6] T. N. N. Phương, H. T. T. Hòa, N. T. Danh. Nghiên cứu mô hình tối ưu chi phí mạng lưới phân phối trong chuỗi cung ứng bền vững với ràng buộc phát thải carbon. Tạp chí Xây dựng, no. 03, 2026, ISSN: 2734-9888.

[7] E. Mardan, K. Govindan, H. Mina and S. M. Gholami-Zanjani. An accelerated benders decomposition algorithm for a bi-objective green closed loop supply chain network design problem. Journal of Cleaner Production, vol. 235, 2019.

[8] Z. Mohtashami, A. Aghsami, and F. Jolai. A green closed loop supply chain design using queuing system for reducing environmental impact and energy consumption. Journal of Cleaner Production, vol. 242, Art. no. 118452, 2020.

[9] X. Fang, L. Nie, and H. Mu. Research progress on logistics network optimization under low carbon constraints, in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 615, no. 1, Art. no. 012060, 2020.

[10] Z. Zhang, K. Matsubae and K. Nakajima. Impact of remanufacturing on the reduction of metal losses through the life cycles of vehicle engines. Resources, Conservation and Recycling, vol. 170, Art. no. 105614, 2021.

[11] S. M. Jaigirdar, S. Das, A. R. Chowdhury, S. Ahmed and R. K. Chakrabortty. Multi-objective multi-echelon distribution planning for perishable goods supply chain: A case study. International Journal of Systems Science: Operations & Logistics, pp. 1-19, 2022.

[12] A. Boskabadi, M. Mirmozaffari, R. Yazdani and A. Farahani. Design of a distribution network in a multi-product, multi-period green supply chain system under demand uncertainty. Sustainable Operations and Computers, vol. 3, pp. 226-237, 2022.

[13] Y. Gao, S. Lu, H. Cheng and X. Liu. Data-driven robust optimization of dual-channel closed-loop supply chain network design considering uncertain demand and carbon cap-and-trade policy. Computers and Industrial Engineering, vol. 187, Art. no. 109811, 2024.

■Ngày nhận bài: 02/3/2025 ■Ngày sửa bài: 12/3/2025 ■Ngày chấp nhận đăng: 24/3/2025

Phân tích tác động của hoạt động điều hành 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 execution 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 nghiên cứu tác động của hoạt động điều hành thực hiện kế hoạch vốn đến tiến độ giải ngân vốn đầu tư công trong các dự án xây dựng công trình giao thông đường bộ tại Việt Nam. Trên cơ sở mô hình lý thuyết và các nghiên cứu trước đây, nghiên cứu sử dụng 5 chỉ tiêu (DR1-DR5) phản ánh chất lượng điều hành kế hoạch vốn làm biến độc lập trong mô hình hồi quy. Dữ liệu sơ cấp được thu thập từ 136 mẫu khảo sát đại diện cho các ban quản lý dự án (QLDA), cơ quan quản lý vốn đầu tư, cơ quan kế hoạch, cơ quan tài chính và Kiểm toán Nhà nước. Kết quả phân tích cho thấy mô hình giải thích được 18,6% sự khác biệt trong tiến độ giải ngân vốn (Adjusted R^2 = 0,186). Trong đó, hai chỉ tiêu DR3 (tự chịu trách nhiệm và trách nhiệm giải trình) và DR4 (động lực làm việc) có tác động trực tiếp, tích cực và có ý nghĩa thống kê, đồng thời DR3 đóng vai trò trung gian giữa DR2 và DR5, còn DR5 ảnh hưởng gián tiếp đến DR4. Nghiên cứu nhấn mạnh vai trò then chốt của trách nhiệm giải trình, tạo động lực và trao quyền hợp lý nhằm nâng cao hiệu quả giải ngân vốn đầu tư công.
Từ khóa: Điều hành kế hoạch vốn; giải ngân vốn đầu tư công; giao thông đường bộ; trách nhiệm giải trình; động lực làm việc.

ABSTRACT

This study investigates the impact of capital plan execution and management activities on the disbursement progress of public investment in road transport infrastructure projects in Vietnam. Based on a theoretical framework and previous research, five indicators (DR1-DR5) describing the quality of capital plan execution were used as independent variables in a linear regression model. Primary data were collected from 136 valid survey responses, including staff from project management units, managing authorities, planning agencies, financial agencies and the State Audit Office. The regression results show that the model explains 18.6% of the variation in disbursement progress (Adjusted R^2 = 0.186). Two indicators DR3 (accountability and responsibility) and DR4 (work motivation) have a positive and statistically significant direct effect on disbursement progress. Furthermore, DR3 mediates the relationship between DR2 (directing and coordinating tasks) and DR5 (decision-making autonomy), while DR5 indirectly influences DR4. These findings highlight the importance of establishing clear accountability mechanisms, creating effective work motivation, and granting appropriate decision-making authority to improve the efficiency of public investment disbursement in Vietnam's transport infrastructure sector.
Keywords: Capital plan execution; public investment disbursement; road transport infrastructure; accountability; work motivation.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Giải ngân vốn đầu tư công là một trong những nhiệm vụ quan trọng trong quản lý tài chính công, quyết định hiệu quả sử dụng ngân sách nhà nước và tiến độ thực hiện các dự án hạ tầng. Tuy nhiên, thực tế tại Việt Nam cho thấy tiến độ giải ngân vốn đầu tư công, đặc biệt trong lĩnh vực giao thông đường bộ thường chưa đạt kế hoạch, gây ảnh hưởng đến tiến độ hoàn thành dự án, làm tăng chi phí và giảm hiệu quả đầu tư.

Nhiều nghiên cứu trước đây tập trung vào khâu lập kế hoạch vốn hoặc phân bổ vốn, song ít nghiên cứu chuyên sâu về giai đoạn điều hành thực hiện kế hoạch vốn, vốn là khâu trung gian trực tiếp ảnh hưởng đến việc giải ngân nhanh hay chậm. Giai đoạn điều hành bao gồm hoạt động ban hành giải pháp tổ chức thực hiện, chỉ đạo điều hành, phân quyền, tạo động lực và thiết lập cơ chế trách nhiệm giải trình cho các cá nhân, đơn vị liên quan.

Nghiên cứu này nhằm kiểm định ảnh hưởng của 5 yếu tố điều hành (DR1-DR5) đến tiến độ giải ngân vốn đầu tư công trong các dự án giao thông đường bộ. Bằng việc sử dụng dữ liệu sơ cấp thu thập từ 136 cán bộ thuộc các ban QLDA, cơ quan chủ quản, cơ quan kế hoạch, tài chính và giám sát, nghiên cứu áp dụng phương pháp hồi quy tuyến tính để xác định các yếu tố có ảnh hưởng đáng kể và vai trò trung gian giữa các biến.

Kết quả nghiên cứu giúp làm rõ vai trò của trách nhiệm giải trình, động lực làm việc và quyền tự quyết trong giai đoạn điều hành, từ đó đưa ra hàm ý chính sách nhằm hoàn thiện quy trình điều hành kế hoạch vốn, nâng cao hiệu quả giải ngân, góp phần thúc đẩy tiến độ thực hiện các dự án hạ tầng giao thông trọng điểm.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Các chỉ tiêu mô tả hoạt động điều hành thực hiện kế hoạch vốn đầu tư công trong các dự án xây dựng công trình giao thông đường bộ tại Việt Nam được kế thừa và điều chỉnh từ mô hình nghiên cứu của Đỗ Văn Thuận và Nguyễn Lương Hải [1]. Bộ chỉ tiêu bao gồm 5 thành phần chính (trình bày tại Bảng 1), phản ánh toàn diện các khía cạnh của công tác điều hành, bao gồm: (i) Chất lượng và tính khả thi của các giải pháp điều hành kế hoạch vốn (DR1); (ii) hiệu quả chỉ đạo và điều phối công việc (DR2); (iii) mức độ tự chịu trách nhiệm và cơ chế giải trình trong quá trình thực hiện (DR3); (iv) động lực làm việc của các cá nhân, đơn vị tham gia (DR4) và (v) mức độ trao quyền và quyền tự quyết trong phạm vi công việc (DR5).

Các chỉ tiêu này được sử dụng làm biến độc lập trong mô hình nghiên cứu nhằm kiểm định giả thuyết rằng việc điều hành hiệu quả sẽ có tác động tích cực và đáng kể đến tiến độ giải ngân vốn đầu tư công. Cách tiếp cận này cho phép đánh giá không chỉ tác động trực tiếp của từng yếu tố điều hành, mà còn xem xét vai trò trung gian và mối quan hệ tương tác giữa các yếu tố trong việc thúc đẩy tiến độ giải ngân.

Bảng 1. Các chỉ tiêu mô tả hoạt động điều hành thực hiện kế hoạch vốn đầu tư công

STT	Mã CT	Nội dung	Dựa trên nghiên cứu
1	DR1	Mức độ phù hợp chất lượng của các giải pháp tổ chức điều hành kế hoạch đầu tư công thuộc nguồn vốn do cấp mình quản lý.	[TG]
2	DR2	Mức độ phù hợp chất lượng của các chỉ đạo, điều hành các phạm vi công việc thuộc trách nhiệm quản lý trong quá trình thực hiện kế hoạch vốn đầu tư công xây dựng công trình giao thông.	[2, 3]
3	DR3	Mức độ đảm bảo tự chịu trách nhiệm và trách nhiệm giải trình đối với phạm vi trách nhiệm công việc trong quá trình thực hiện kế hoạch vốn đầu tư công xây dựng công trình giao thông.	[115], [7]
4	DR4	Mức độ phù hợp của các động lực làm việc được tạo ra để các cá nhân, bộ phận nỗ lực hoàn thành các mục tiêu nhiệm vụ của mình trong quá trình thực hiện kế hoạch vốn đầu tư công xây dựng công trình giao thông.	[4], [5], [6]
5	DR5	Mức độ phù hợp trong thực hiện quyền tự quyết định trong phạm vi quyền hạn của các cá nhân, bộ phận phụ trách công việc cụ thể trong quá trình triển khai kế hoạch vốn đầu tư công xây dựng công trình giao thông.	[7]

Ghi chú: [TG]- tác giả

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả tiến hành khảo sát sơ cấp và thu thập được 136 phiếu hợp lệ. Mẫu khảo sát bao gồm 74 phiếu từ các ban QLDA giao thông đường bộ thuộc cơ quan chủ trì, 29 phiếu từ cơ quan quản lý vốn đầu tư xây dựng, 13 phiếu từ cơ quan kế hoạch, 7 phiếu từ cơ quan tài chính và 13 phiếu từ Kiểm toán Nhà nước. Toàn bộ bộ dữ liệu được sử dụng để thực hiện phân tích hồi quy, nhằm kiểm định các giả thuyết đặt ra trong mô hình nghiên cứu.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ BÀN LUẬN

Kết quả phân tích hồi quy (Hình 1, Bảng 2) cho thấy mô hình nghiên cứu giải thích được 18,6% sự khác biệt trong tiến độ giải ngân vốn đầu tư công (Adjusted R^2 = 0,186), mức giải thích này có ý nghĩa thống kê, chứng tỏ các yếu tố điều hành thực hiện kế hoạch vốn đóng vai trò nhất định trong việc quyết định tiến độ giải ngân.

** Các yếu tố có ảnh hưởng trực tiếp:*

Trong số 5 chỉ tiêu được kiểm định, hai chỉ tiêu DR3 và DR4 có tác động trực tiếp, tích cực và có ý nghĩa thống kê đến tiến độ giải ngân:

- DR3 - Tự chịu trách nhiệm và trách nhiệm giải trình: Đây là yếu tố có hệ số tác động mạnh nhất trong mô hình. Khi các cá nhân, đơn vị tham gia thực hiện kế hoạch vốn được yêu cầu tự chịu trách nhiệm rõ ràng về kết quả công việc và có cơ chế giải trình minh bạch, tiến độ giải ngân được cải thiện đáng kể. Điều này phản ánh vai trò quan trọng của trách nhiệm cá nhân và trách nhiệm tổ chức trong việc thúc đẩy tính chủ động và giảm thiểu sự trì hoãn.

- DR4 - Động lực làm việc: Việc tạo ra môi trường làm việc khuyến khích sự nỗ lực hoàn thành nhiệm vụ cũng góp phần thúc đẩy tiến độ giải ngân. Khi các cá nhân, bộ phận được khuyến khích và có động lực rõ ràng (thông qua khen thưởng, đánh giá kết quả, cơ chế khuyến khích), khả năng hoàn thành các thủ tục giải ngân nhanh và đúng hạn tăng lên đáng kể.

** Vai trò trung gian của các yếu tố điều hành:*

Kết quả mô hình cũng chỉ ra các mối quan hệ gián tiếp quan trọng:

- DR3 đóng vai trò trung gian giữa DR2 (chỉ đạo, điều hành công việc) và DR5 (thực hiện quyền tự quyết). Điều này cho thấy hiệu quả của chỉ đạo điều hành và quyền tự quyết chỉ phát huy tác động lên tiến độ giải ngân khi được gắn với cơ chế trách nhiệm rõ ràng và minh bạch.

- DR5 tác động tích cực đến DR4, hàm ý rằng việc tăng quyền tự quyết cho các cá nhân, bộ phận sẽ nâng cao động lực làm việc và gián tiếp thúc đẩy tiến độ giải ngân.

- DR1 (chất lượng giải pháp điều hành kế hoạch) có ảnh hưởng gián tiếp đến tiến độ thông qua DR5 và DR2. Điều này cho thấy các giải pháp điều hành tốt là điều kiện cần, nhưng chỉ thật sự cải thiện giải ngân khi được triển khai cùng với quyền hạn rõ ràng và chỉ đạo nhất quán.

Kết quả nghiên cứu nhấn mạnh rằng yếu tố con người và cơ chế trách nhiệm đóng vai trò trung tâm trong giai đoạn điều hành thực hiện kế hoạch vốn. Việc tăng cường trách nhiệm giải trình (DR3) và tạo động lực làm việc (DR4) giúp giảm tình trạng trì hoãn, cải thiện sự phối hợp giữa các bên, từ đó rút ngắn thời gian xử lý hồ sơ giải ngân.

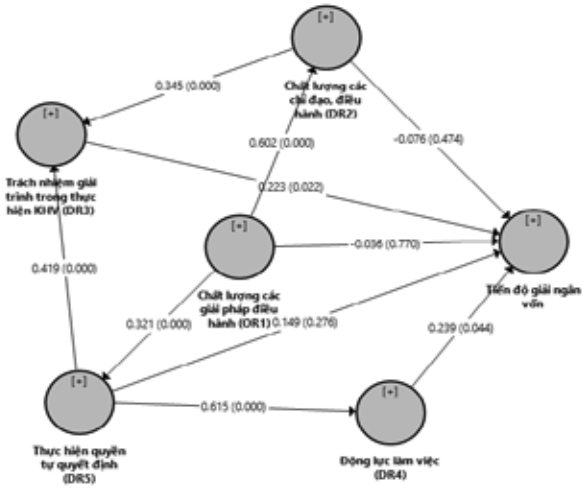
Bên cạnh đó, các kết quả cũng gợi ý rằng quyền tự quyết (DR5) và chất lượng giải pháp điều hành (DR1) có tác động gián tiếp, nghĩa là cần được kết hợp với cơ chế kiểm soát và giám sát phù hợp để tránh tình trạng buông lỏng quản lý hoặc ra quyết định tùy tiện. Điều này phù hợp với các nghiên cứu trước về QLDA và hành vi tổ chức, nhấn mạnh tầm quan trọng của việc cân bằng giữa trao quyền và trách nhiệm giải trình để tối ưu hiệu quả quản lý vốn [3, 5].

Nhìn chung, các phát hiện của nghiên cứu góp phần làm rõ vai trò của điều hành trong việc cải thiện hiệu quả giải ngân vốn đầu tư công, đặc biệt trong các dự án giao thông đường bộ vốn có nhiều bên liên quan và chịu áp lực về tiến độ. Điều này cũng cho thấy cải thiện chất lượng điều hành không chỉ dừng ở việc ban hành giải pháp, mà cần đi kèm với thiết lập cơ chế động viên và trách nhiệm cụ thể.

Bảng 2. Kết quả phân tích mô hình ảnh hưởng

Biến độc lập	Hệ số hồi quy chuẩn hóa (β)	Giá trị p (Sig.)	Kết luận
DR1 - Chất lượng giải pháp điều hành kế hoạch	-0,036	0,770	Không có tác động trực tiếp (tác động gián tiếp qua DR5 và DR2)
DR2 - Chỉ đạo, điều hành công việc	-0,076	0,474	Không có tác động trực tiếp (tác động gián tiếp qua DR3)
DR3 - Tự chịu trách nhiệm và trách nhiệm giải trình	0,223	0,022 *	Ảnh hưởng trực tiếp, có ý nghĩa thống kê
DR4 - Động lực làm việc	0,239	0,044 *	Ảnh hưởng trực tiếp, có ý nghĩa thống kê
DR5 - Quyền tự quyết trong phạm vi công việc	0,149	0,276	Không có tác động trực tiếp (tác động gián tiếp tới DR4)

Ghi chú: (**) p < 0,01; (*) p < 0,05



Hình 1. Mô hình ảnh hưởng

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã kiểm định mô hình ảnh hưởng của hoạt động điều hành kế hoạch vốn đến tiến độ giải ngân vốn đầu tư công trong các dự án xây dựng công trình giao thông đường bộ tại Việt Nam. Kết quả hồi quy cho thấy mô hình giải thích được 18,6% sự khác biệt trong tiến độ giải ngân vốn (Adjusted R^2 = 0,186), với hai yếu tố DR3 (tự chịu trách nhiệm và trách nhiệm giải trình) và DR4 (động lực làm việc) có tác động trực tiếp, tích cực và có ý nghĩa thống kê. Đồng thời, DR3 đóng vai trò trung gian trong mối quan hệ giữa DR2 (chỉ đạo điều hành công việc) và DR5 (thực hiện quyền tự quyết), trong khi DR5 gián tiếp ảnh hưởng đến DR4, cho thấy việc tăng quyền tự quyết sẽ nâng cao động lực làm việc và từ đó cải thiện tiến độ giải ngân.

**** Hàm ý chính sách:***

Các phát hiện nghiên cứu đưa ra một số gợi ý chính sách nhằm nâng cao hiệu quả điều hành kế hoạch vốn:

- Tăng cường cơ chế trách nhiệm giải trình: Xác định rõ trách nhiệm cá nhân, bộ phận trong từng giai đoạn giải ngân và thiết lập cơ chế báo cáo, đánh giá định kỳ, góp phần hạn chế tình trạng chậm trễ.

- Tạo động lực làm việc và cơ chế khuyến khích: Xây dựng hệ thống đánh giá kết quả thực hiện gắn với chế độ khen thưởng, khuyến khích các cá nhân và đơn vị hoàn thành nhiệm vụ giải ngân đúng hoặc vượt tiến độ.

- Trao quyền tự quyết hợp lý: Phân cấp rõ ràng quyền hạn cho các bộ phận thực hiện nhằm tăng tính chủ động, nhưng cần đi kèm với cơ chế giám sát để tránh lạm quyền hoặc ra quyết định chậm trễ.

- Nâng cao chất lượng giải pháp điều hành: Hoàn thiện quy trình điều hành và hướng dẫn thực hiện kế hoạch vốn theo hướng rõ ràng, nhất quán và có thể đo lường, từ đó tạo điều kiện triển khai đồng bộ ở các cấp.

- Tăng cường chỉ đạo điều hành mang tính phối hợp: Bảo đảm sự liên thông giữa cơ quan chủ quản, cơ quan tài chính, ban QLDA và nhà thầu để hạn chế tình trạng ách tắc ở một khâu làm chậm toàn bộ quá trình giải ngân.

Để nâng cao khả năng giải thích của mô hình và hiểu rõ hơn về tác động của điều hành kế hoạch vốn, các nghiên cứu trong tương lai có thể:

+ Bổ sung các biến đo lường yếu tố năng lực lãnh đạo, cơ chế giám sát độc lập và văn hóa tổ chức, nhằm đánh giá đầy đủ hơn tác động của yếu tố con người đến tiến độ giải ngân;

+ Sử dụng dữ liệu theo chuỗi thời gian (panel data) hoặc phân tích theo từng vùng, từng loại dự án để so sánh mức độ ảnh hưởng của các yếu tố điều hành trong những bối cảnh khác nhau;

+ Thực hiện nghiên cứu định tính sâu hơn (phỏng vấn, nghiên cứu tình huống) để khám phá các rào cản tiềm ẩn liên quan đến động lực làm việc và trách nhiệm giải trình, từ đó đề xuất giải pháp thực tiễn hơn.

Những gợi ý này sẽ hỗ trợ các nhà hoạch định chính sách và cơ quan quản lý trong việc xây dựng các chương trình can thiệp nhằm cải thiện chất lượng điều hành kế hoạch vốn, qua đó nâng cao hiệu quả giải ngân vốn đầu tư công và đẩy nhanh tiến độ các dự án hạ tầng trọng điểm.

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] Charles W.L.Hill and Steven L.McShane. Principles of Management. McGraw-Hill, Irwin, 2006.

[3] L. H. Nguyen. Relationships between Critical Factors Related to Team Behaviors and Client Satisfaction in Construction Project Organizations (in eng). Journal of Construction Engineering and Management. vol. 145, no. 3, p. 04019002, 2019.

[4] M. Carpenter, T. Bauer and B. Erdogan. Management principles. Boston, MA, FlatWorld, 2012.

[5] D. Cleland. Leadership and the project-management body of knowledge (in eng). International journal of project management, vol. 13, no. 2, pp. 83-88, 1995.

[6] Gransberg and Ellicott. Life cycle project management (in eng). American Association of Cost Engineers, Chicago, vol. 28, pp. 288-292, 1997.

[7] C. P. Hales. What do managers do? A critical review of the evidence (in eng. Managerial Work, pp. 263-290, 2019.

■Ngày nhận bài: 04/3/2026 ■Ngày sửa bài: 17/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 27/3/2026

Luật mềm và bảo vệ môi trường biển do tác động của tàu thuyền: Một số vấn đề lý luận và thực tiễn ở biển Đông

Soft law and marine environmental protection from the impacts of shipping: Theoretical and practical issues in the Vietnamese east sea

> TS NGUYỄN VĂN TRƯỞNG*, CN PHẠM THỊ THIÊN MINH, THS TRẦN LÊ THU TRANG
Trường Đại học Hàng hải Việt Nam
*Email: nguyenvantruong@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Hoạt động của tàu thuyền ở biển Đông luôn tiềm ẩn nhiều nguy cơ gây ô nhiễm môi trường. Bên cạnh các công ước quốc tế có tính ràng buộc như MARPOL 73/78, UNCLOS 1982..., luật mềm - bao gồm các tuyên bố, nghị quyết, bộ quy tắc và hướng dẫn ngày càng có vai trò trong việc định hình chính sách quốc gia và thực tiễn hàng hải. Ở cấp độ khu vực, hợp tác trong khuôn khổ ASEAN và các sáng kiến của Tổ chức Hàng hải Quốc tế (IMO) đã thúc đẩy việc áp dụng luật mềm nhằm ứng phó với các thách thức về môi trường. Tuy nhiên, hiệu quả của luật mềm còn hạn chế do tính không ràng buộc, thực thi không đồng đều và cơ chế giám sát yếu. Bài báo phân tích các công cụ luật mềm ở cấp độ quốc tế, khu vực và một số quốc gia được lựa chọn, từ đó đánh giá vai trò của luật mềm trong bảo vệ môi trường biển biển Đông trước tác động của tàu thuyền, đồng thời đề xuất khuyến nghị nhằm tăng cường thực thi và phối hợp giữa các quốc gia Đông Nam Á, đặc biệt là Việt Nam.

Từ khóa: Luật mềm; bảo vệ môi trường; biển Đông; hoạt động của tàu thuyền.

ABSTRACT

Shipping activities in the Vietnamese East Sea pose persistent risks of marine environmental pollution. Alongside binding international conventions such as the MARPOL 73/78, UNCLOS 1982..., soft law-including declarations, resolutions, codes of practice and guidelines - are playing an increasingly important role in shaping national policies and maritime practices. At the regional level, ASEAN cooperation and initiatives by the International Maritime Organization (IMO) have encouraged the use of soft law to address environmental challenges. However, the effectiveness of these instruments remains constrained by their non-binding nature, uneven implementation among states and relatively weak monitoring mechanisms. This article examines soft law instruments at the international and regional levels, as well as in selected countries. It then assesses their role in protecting the marine environment of the Vietnamese East Sea from shipping-related impacts and proposes recommendations to strengthen implementation and enhance coordination among Southeast Asian states, with particular attention to Viet Nam.

Keywords: Soft law; environmental protection; Vietnamese East Sea; ships operations.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Bảo vệ môi trường biển trước các mối đe dọa từ hoạt động hàng hải chủ yếu dựa trên các công cụ "luật cứng" như UNCLOS 1982, MARPOL 73/78, BWM 2004, Công ước London 1972 hay Công ước Hong Kong 2009. Các công ước này thiết lập nghĩa vụ pháp lý ràng buộc về ngăn ngừa, giảm thiểu và kiểm soát ô nhiễm biển từ tàu thuyền và các nguồn liên quan. Tuy nhiên, dù có giá trị pháp lý cao và phạm vi điều chỉnh rộng, các công cụ này bộc lộ những hạn chế đáng kể. Thứ nhất, quy trình sửa đổi chậm và phức tạp làm giảm

khả năng thích ứng trước biến đổi nhanh của môi trường và công nghệ [1, 2]. Thứ hai, hiệu quả thực thi phụ thuộc lớn vào năng lực và ý chí của quốc gia treo cờ và quốc gia có cảng theo cơ chế được thiết lập tại UNCLOS 1982 (Điều 94, 217, 218) [3, 4]. Các nghiên cứu về kiểm tra nhà nước cảng biển cũng cho thấy hiệu quả kiểm tra phụ thuộc đáng kể vào khu vực và năng lực thực thi [5]. Thứ ba, các công ước hiện hành khó theo kịp những thách thức mới như tàu mặt nước tự vận hành [6], nhiên liệu thay thế hay mở rộng khu vực kiểm soát khí thải tàu biển [7, 8].

Trước những hạn chế về tính cứng nhắc và khoảng trống thực thi của luật cứng, luật mềm ngày càng giữ vai trò quan trọng trong lĩnh vực hàng hải quốc tế. Thông qua các hướng dẫn, khuyến nghị và hướng dẫn thi hành, luật mềm vẫn có thể định hình hành vi quốc gia và bổ trợ cho các công ước quốc tế. Nhờ đó, luật mềm góp phần tăng tính linh hoạt, thúc đẩy hợp tác và hỗ trợ tích cực bảo vệ môi trường biển, đặc biệt trong bối cảnh Biển Đông. Bài báo tập trung phân tích đánh giá luật mềm ở các cấp độ khác nhau - cấp độ quốc tế, khu vực và quốc gia về bảo vệ môi trường biển khu vực biển Đông, từ đó đưa ra những đánh giá về vai trò quan trọng của luật mềm và một số gợi mở cho việc tăng cường thực thi có hiệu quả luật mềm ở Việt Nam.

2. LUẬT MỀM QUỐC TẾ VÀ KHU VỰC VỀ BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG BIỂN DO TÁC ĐỘNG CỦA TÀU THUYỀN

2.1. Luật mềm do Tổ chức Hàng hải Quốc tế ban hành

Các nghị quyết của Đại hội đồng IMO là một dạng luật mềm quan trọng, xác lập định hướng chính sách và định hình chiến lược của tổ chức trong lĩnh vực an toàn hàng hải và bảo vệ môi trường biển [9]. Các nghị quyết này vẫn có sức nặng chuẩn tắc khi đưa ra nguyên tắc chung và phê chuẩn các hướng dẫn được khuyến nghị áp dụng bởi các quốc gia thành viên.

Trong khuôn khổ MARPOL 73/78, đối với các sự cố ô nhiễm do dầu và hóa chất, Phụ lục I yêu cầu tàu phải có Kế hoạch ứng phó sự cố ô nhiễm dầu trên tàu (SOPEP) nhằm hướng dẫn thuyền trưởng và sĩ quan xử lý các tình huống tràn dầu, đồng thời quy định nghĩa vụ báo cáo kịp thời tới các cơ quan ven biển và cảng [10]. Quy định 17 Phụ lục II yêu cầu tàu cần có kế hoạch ứng phó khẩn cấp đối với chất lỏng độc hại dạng rời và trong thực tiễn các kế hoạch này có thể được tích hợp thành Kế hoạch khẩn cấp ô nhiễm biển trên tàu (SMPEP). Đối với ô nhiễm trong quá trình vận hành, Phụ lục IV và Phụ lục V quy định các tiêu chuẩn xả thải và quản lý rác thải trên tàu. Các nghị quyết MEPC.2(VI), MEPC.159(55) và MEPC.227(64) từng bước siết chặt tiêu chuẩn nước thải, đặc biệt đối với tàu chở khách hoạt động tại khu vực đặc biệt như biển Baltic. Đồng thời, MEPC.295(71) hướng dẫn thực thi Phụ lục V, yêu cầu tàu có kế hoạch quản lý rác thải và sổ nhật ký rác, mở rộng quy định đối với E-waste và HME. Đối với ô nhiễm không khí, Phụ lục VI được tăng cường thông qua việc thiết lập Khu vực kiểm soát phát thải (ECA), áp dụng giới hạn lưu huỳnh toàn cầu 0,50% từ năm 2020 và thúc đẩy các biện pháp giảm phát thải khí nhà kính từ vận tải biển [11].

Đối với nước dằn tàu, MEPC đã thông qua các hướng dẫn quan trọng như G6 và G7 (2017) [12] nhằm hạn chế sự lây lan của loài ngoại lai xâm hại. Bên cạnh đó, hướng dẫn G4 hỗ trợ xây dựng kế hoạch quản lý nước dằn cho từng tàu [13], G8 quy định tiêu chí và thủ tục phê chuẩn kiểu loại đối với hệ thống xử lý nước dằn [14]. Việc thông qua hướng dẫn sử dụng sổ nhật ký điện tử theo BWM (2023) cũng cho thấy nỗ lực thúc đẩy số hóa và tăng tính minh bạch [15].

Bên cạnh đó, Ủy ban An toàn hàng hải (MSC) ban hành các văn bản cập nhật công ước quan trọng như SOLAS 74, STCW 78/95-2010, cũng là luật mềm quan trọng... Việc nâng cao tiêu chuẩn đào tạo thuyền viên góp phần giảm rủi ro sự cố gây ô nhiễm. MSC kết hợp với MPEC xây dựng Bộ luật Vận chuyển và thao tác các chất lỏng độc và nguy hiểm dưới dạng xô trên tàu hỗ trợ ngoài khơi (OSVC Code) là ví dụ cho vai trò phòng ngừa ô nhiễm từ hàng hóa nguy hiểm [16]. Ngoài ra, IMO xây dựng Kế hoạch quản lý hiệu quả năng lượng tàu biển (SEEMP), nhằm hướng dẫn xử lý và lưu trữ an toàn hóa chất dùng trong xử lý nước dằn hay hướng dẫn về hệ thống khử xúc tác chọn lọc (SCR) để kiểm soát phát thải NOx.

2.2. Luật mềm khu vực Đông Nam Á

Các quốc gia khu vực Đông Nam Á đã triển khai nhiều sáng kiến nhằm bảo vệ môi trường biển và ven biển. Tiêu biểu là Tuyên bố Bangkok về chống rác thải biển (2019) [17] và Khung hành động ASEAN về rác thải biển [18], tạo cơ sở cho các quốc gia thành viên xây dựng kế hoạch hành động quốc gia. Trên nền tảng đó, Kế hoạch hành động khu vực ASEAN về chống rác thải biển (ASEAN RAP) giai đoạn 2021 - 2025 được ban hành với 14 hành động trọng tâm, tiếp cận theo chuỗi giá trị rác thải: Giảm phát sinh, tăng cường thu gom - quản lý và thúc đẩy tái sử dụng, tái chế [19]. Bên cạnh đó, Tuyên bố về thập kỷ bảo vệ môi trường biển và ven biển ở biển Đông (2017 - 2027) được ASEAN và Trung Quốc thông qua năm 2017, tái khẳng định các nghĩa vụ theo UNCLOS 1982 và CBD, đồng thời thúc đẩy hợp tác bảo tồn và sử dụng bền vững tài nguyên biển [20]. Những sáng kiến này cho thấy vai trò ngày càng rõ nét của luật mềm trong điều phối hợp tác khu vực về bảo vệ môi trường biển.

Bên cạnh đó, Kế hoạch ứng phó sự cố tràn dầu khu vực ASEAN, được thông qua năm 2018 tại Hội nghị Bộ trưởng Giao thông vận tải ASEAN lần thứ 24 ở Bangkok [21]. Kế hoạch này thiết lập cơ chế hợp tác cho phép các quốc gia thành viên yêu cầu và cung cấp hỗ trợ khi xảy ra sự cố tràn dầu, bảo đảm các bên liên quan phối hợp trên cơ sở hiểu biết chung và quy trình thống nhất. Kế hoạch được xây dựng trên nền tảng Bản ghi nhớ về cơ chế hợp tác ASEAN về chuẩn bị và ứng phó sự cố tràn dầu chung [22], đồng thời tham chiếu quy định OPRC 1990. Kế hoạch này tạo ra chuẩn mực kỳ vọng về hợp tác, nâng cao năng lực và chia sẻ nguồn lực giữa các quốc gia ASEAN trong ứng phó ô nhiễm từ hoạt động vận tải biển.

Bên cạnh đó, ASEAN cũng thông qua dự án Bảo vệ môi trường biển Đông Nam Á (MEPSEAS) [23]. Dự án này do IMO dẫn dắt, phối hợp với các quốc gia ASEAN, nhằm hỗ trợ thực thi hiệu quả các công ước môi trường hàng hải quan trọng như MARPOL 73/78, BWM 2004 và AFS 2001. MEPSEAS đóng vai trò hỗ trợ quan trọng cho khuôn khổ luật mềm khu vực bằng cách nâng cao năng lực thể chế, thúc đẩy phê chuẩn các điều ước quốc tế và cải thiện thực thi ở cấp quốc gia.

3. LUẬT MỀM CỦA VIỆT NAM VÀ CÁC QUỐC GIA VỀ BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG BIỂN DO TÁC ĐỘNG CỦA TÀU THUYỀN

3.1. Luật mềm của Việt Nam

Chiến lược phát triển bền vững kinh tế biển Việt Nam đến năm 2030, tầm nhìn 2045 xác định rõ yêu cầu kiểm soát ô nhiễm từ vận tải biển, cảng biển và các hoạt động dịch vụ hàng hải [24]. Văn kiện này nhấn mạnh phát triển "kinh tế biển xanh", trong đó đội tàu quốc gia cần được hiện đại hóa theo hướng tiết kiệm năng lượng, giảm phát thải và tuân thủ tiêu chuẩn môi trường quốc tế. Đồng thời, Chiến lược bảo vệ môi trường quốc gia đến năm 2030, tầm nhìn 2050 [25] tiếp tục cụ thể hóa định hướng này bằng việc đặt ra mục tiêu kiểm soát nguồn thải từ giao thông vận tải biển, tăng cường năng lực tiếp nhận và xử lý chất thải tại cảng, cũng như phòng ngừa ô nhiễm xuyên biên giới, nâng cao năng lực ứng phó sự cố và thực thi hiệu quả MARPOL 73/78.

Kế hoạch hành động quốc gia về quản lý rác thải nhựa đại dương đến năm 2030 đánh dấu bước chuyển từ định hướng sang triển khai trong bảo vệ ô nhiễm biển [26]. Chính sách này tập trung giảm rác thải từ tàu, hoàn thiện cơ chế tiếp nhận chất thải tại cảng và tăng cường giám sát xả thải, qua đó hỗ trợ thực thi nghĩa vụ theo MARPOL 73/78. Sau khi gia nhập BWM 2004, các kế hoạch triển khai và hướng dẫn kỹ thuật đã được ban hành nhằm kiểm soát nước dằn tàu và hạn chế xâm lấn sinh học [27]. Các yêu cầu của AFS 2001 cũng được lồng ghép vào hoạt động đăng kiểm và kiểm tra nhà nước cảng biển [28, 29]. Đồng thời, quản lý nhận chìm vật chất ở biển theo Công ước London 1972 và các chính sách về tăng trưởng xanh, cảng biển xanh đã góp phần bổ sung yếu tố giảm phát thải và phát triển bền vững [30].

3.2. Luật mềm của Trung Quốc

Trong cuốn sách trắng của Văn phòng Thông tin Quốc vụ viện Trung Quốc công bố nhấn mạnh phối hợp phòng chống ô nhiễm, tăng cường giám sát môi trường và quản lý hệ thống các nguồn gây ô nhiễm từ đất liền và trên biển - đặc biệt chất gây ô nhiễm từ tàu thuyền, cảng biển [31]. Văn bản này vận hành như khuôn khổ chính sách cấp cao, định hướng chính quyền và cơ quan hàng hải điều chỉnh quy hoạch, thực thi phù hợp với ưu tiên sinh thái quốc gia.

Ngoài ra, chính sách kỹ thuật phòng chống ô nhiễm do nước thải tàu biển là một ví dụ điển hình của luật mềm trong bảo vệ môi trường biển [32]. Văn bản này khuyến nghị các phương pháp kỹ thuật kiểm soát ô nhiễm từ nước thải tàu, bao gồm cặn dầu, nước thải sinh hoạt và chất thải lỏng độc hại, qua đó thiết lập chuẩn tham chiếu quan trọng cho hoạt động quản lý. Các hướng dẫn này vẫn có ảnh hưởng thực tiễn đáng kể khi được cơ quan môi trường và quản lý cảng sử dụng làm căn cứ tham chiếu trong kiểm tra, xây dựng cơ sở hạ tầng tiếp nhận, xử lý và đánh giá kế hoạch tuân thủ.

Ngoài ra, Trung Quốc triển khai các chiến dịch hành động đặc biệt để kiểm soát ô nhiễm từ tàu biển. Sách trắng của Văn phòng Thông tin Quốc vụ viện năm 2024 nêu ra các sáng kiến liên ngành tập trung vào quản lý chất thải từ tàu, nâng cấp cơ sở tiếp nhận tại cảng, kiểm tra nhiên liệu hàng hải và thúc đẩy điện bờ [33]. Cách tiếp cận này phản ánh mô hình "quản trị theo chiến dịch", trong đó nguồn lực được tập trung vào mục tiêu cụ thể trong thời gian nhất định, đồng thời thiết lập cơ chế phối hợp và chia sẻ thông tin giữa các cơ quan trong ứng phó ô nhiễm dầu.

4. VAI TRÒ CỦA LUẬT MỀM VỀ BẢO VỆ MÔI TRƯỜNG BIỂN DO TÁC ĐỘNG CỦA TÀU THUYỀN

Trước hết, luật mềm thực hiện chức năng định hướng chiến lược và hình thành các chuẩn mực hành vi trong bảo vệ môi trường. Ở cấp độ toàn cầu, các nghị quyết, hướng dẫn do IMO và các ủy ban chuyên môn ban hành không trực tiếp tạo nghĩa vụ pháp lý bắt buộc nhưng định hình cách hiểu, cách áp dụng các công ước quốc tế như MARPOL 73/78, BWM 2004 hay AFS 2001. Ở cấp quốc gia, các chiến lược và kế hoạch hành động xác lập tầm nhìn phát triển kinh tế biển bền vững, qua đó tạo ra "chuẩn mực kỳ vọng" đối với cơ quan quản lý và chủ tàu.

Tiếp theo đó, luật mềm cụ thể hóa và hỗ trợ thực thi luật cứng. Các nghị quyết và hướng dẫn kỹ thuật của IMO chuyển hóa các quy định khung của công ước quốc tế thành quy trình kỹ thuật chi tiết, như hướng dẫn lập kế hoạch ứng phó tràn dầu, quản lý rác thải hay kiểm soát nước dằn tàu. Nhờ đó, luật mềm giúp thu hẹp khoảng cách giữa quy định pháp lý và thực tiễn vận hành, đồng thời thúc đẩy sự thống nhất trong áp dụng giữa quốc gia treo cờ và quốc gia có cảng.

Thứ ba, luật mềm bảo đảm tính linh hoạt và khả năng thích ứng công nghệ. Trong bối cảnh công nghệ hàng hải, nhiên liệu và yêu cầu giảm phát thải liên tục thay đổi, các nghị quyết và hướng dẫn kỹ thuật có thể được cập nhật nhanh chóng hơn so với công ước quốc tế. Vì vậy, luật mềm thường đóng vai trò như cơ chế "thử nghiệm chính sách", nơi nhiều chuẩn mực kỹ thuật ban đầu được hình thành trước khi trở thành quy định bắt buộc.

Thứ tư, luật mềm có vai trò thúc đẩy hợp tác quốc tế và khu vực. Trong bối cảnh Đông Nam Á, các tuyên bố và kế hoạch hành động của ASEAN thường tham chiếu các chuẩn mực quốc tế như UNCLOS 1982, MARPOL 73/78 hay OPRC 1990, nhưng được thiết kế theo hướng linh hoạt, nhấn mạnh chia sẻ thông tin và hỗ trợ kỹ thuật. Điều này tạo nền tảng hợp tác mà không làm gia tăng ràng buộc pháp lý.

Thứ năm, luật mềm có vai trò tăng cường năng lực và thu hẹp khoảng cách thực thi giữa các quốc gia. Các chương trình hỗ trợ thực hiện công ước do IMO ban hành đã giúp nhiều quốc gia cải thiện hệ thống giám sát, thực thi, kiểm tra và cơ sở tiếp nhận chất thải tại cảng. Ở Việt Nam, các kế hoạch hành động về thực thi trên tàu biển, rác thải nhựa đại dương, quản lý nước dằn tàu hay phát triển cảng biển xanh đã chuyển hóa các cam kết quốc tế thành chương trình hành động cụ thể.

Thứ sáu, luật mềm có vai trò tạo áp lực chính trị và hành chính. Dù không có chế tài trực tiếp, các chuẩn mực và khuyến nghị quốc tế vẫn tạo áp lực thông qua cơ chế uy tín, đánh giá quốc tế và kỳ vọng chính sách, khiến các quốc gia điều chỉnh hành vi nhằm tránh rủi ro về hình ảnh hoặc đánh giá tiêu cực.

Cuối cùng, luật mềm thúc đẩy chuyển đổi mô hình bảo vệ môi trường biển từ cách tiếp cận phản ứng sau sự cố sang quản trị môi trường phòng ngừa và tích hợp. Với tính linh

hoạt và khả năng điều chỉnh dần dần, luật mềm hỗ trợ quá trình chuyển đổi sang quản trị dựa trên hệ sinh thái và giảm phát thải khí nhà kính trong vận tải biển.

Như vậy, luật mềm không chỉ là công cụ mang tính định hướng mà còn giữ vai trò quan trọng bảo vệ môi trường biển. Thông qua chức năng chuẩn mực, hỗ trợ thực thi, điều phối hợp tác và thúc đẩy chuyển đổi bền vững, luật mềm đã trở thành yếu tố không thể thiếu trong bảo vệ môi trường biển trước tác động ngày càng gia tăng của hoạt động vận tải biển.

5. KẾT LUẬN

Từ việc phân tích hệ thống luật mềm ở cấp độ quốc tế, khu vực và quốc gia, có thể thấy luật mềm đóng vai trò quan trọng trong bảo vệ môi trường biển trước tác động của hoạt động tàu thuyền. Các nghị quyết, hướng dẫn của IMO đã góp phần định hình chuẩn mực hành vi, cụ thể hóa nghĩa vụ trong các công ước như MARPOL 73/78, BWM 2004 và AFS 2001, đồng thời tạo nền tảng cho sự phát triển của luật cứng. Ở cấp khu vực, các sáng kiến của ASEAN cho thấy luật mềm là công cụ phù hợp để điều phối hợp tác trong bối cảnh đa dạng về trình độ phát triển và ưu tiên chính sách, thông qua cơ chế đồng thuận, chia sẻ thông tin và hỗ trợ kỹ thuật.

Ở cấp quốc gia, trường hợp Việt Nam và Trung Quốc cho thấy luật mềm đóng vai trò trung gian giữa chiến lược phát triển và thực thi pháp luật chuyên ngành. Các chiến lược, kế hoạch hành động và hướng dẫn kỹ thuật không chỉ định hướng ưu tiên bảo vệ môi trường biển mà còn góp phần nâng cao năng lực quản lý cảng biển, hiện đại hóa đội tàu và tăng cường ứng phó sự cố ô nhiễm, qua đó thu hẹp khoảng cách giữa cam kết quốc tế và thực tiễn nội luật hóa.

Nhìn chung, luật mềm thực hiện nhiều chức năng như định hướng chính sách, hỗ trợ thực thi luật cứng, thúc đẩy hợp tác quốc tế và tăng cường năng lực thể chế. Luật mềm thúc đẩy chuyển dịch từ mô hình phản ứng sau sự cố sang quản trị phòng ngừa và tiếp cận dựa trên hệ sinh thái, phù hợp với yêu cầu phát triển bền vững của ngành Hàng hải trong bối cảnh biến đổi khí hậu và gia tăng vận tải biển toàn cầu. Vì vậy, luật mềm là một thành tố quan trọng của hệ thống pháp lý đa tầng trong bảo vệ môi trường biển.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong Đề tài mã số DT25-26.17.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Y. Tanaka. The International Law of the Sea, 4th ed. Cambridge University Press, 2023. Internet: https://www.cambridge.org/vn/universitypress/subjects/law/public-international-law/international-law-sea-4th-edition?format=PB&isbn=9781009016414 (Accessed: 02/2026).

[2] International Maritime Organization. Resolution MEPC.290(71) - The experience-building phase associated with the BWM Convention (MEPC 71/17/Add.1), 7 July 2017. Internet: https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.290%2871%29.pdf (Accessed: 02/2026).

[3] R. R. Churchill and A. V. Lowe. The law of the sea, 3rd ed. Manchester University Press/Juris Publishing, 1999. Internet: https://files.pca-cpa.org/pcadocs/ua-ru/02.%20UA%20Observations%20on%20Jurisdiction/02.%20Legal%20Authorities/UAL-62.pdf (Accessed: 02/2026).

[4] N. lein. Maritime Security and the Law of the Sea. (Oxford Monographs in International Law). Oxford University Press, 2011. https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199566532.001.0001.

[5] P. Cariou, M. Q. Mejia Jr. and F.-C. Wolff. On the effectiveness of port state control inspections. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 44, no. 3, pp. 491-503, 2008. Internet: https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.11.005.

[6] International Maritime Organization. Autonomous ships: regulatory scoping exercise completed. May 25, 2021. Internet: https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/MASSRSE2021.aspx (Accessed: 02/2026).

[7] H. Ringbom. Global problem regional solution? International law reflections on an EU CO_2 emissions trading scheme for ships. International Journal of Marine and Coastal Law, vol. 26, no. 4, pp. 613-641, 2011. Internet: https://doi.org/10.1163/157180811X598709.

[8] A. Chircop, M. Doelle and R. Gauvin. Shipping and climate change: International law and policy considerations (Special Report). Centre for International Governance Innovation (CIGI), 2018. Internet: https://www.cigionline.org/publications/shipping-and-climate-change-international-law-and-policy-considerations/ (Accessed: 02/2026).

[9] International Maritime Organization. Resolution A.1098(29): High-level action plan of the Organization and priorities for the 2016-2017 biennium (A 29/Res.1098). December 2, 2015. Internet: https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1098%2829%29.pdf (Accessed: 02/2026).

[10] Shipboard Marine Pollution Emergency Plans, 2025. Internet: https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/shipboard-marine-pollution-emergency-plans.aspx (Accessed: 02/2026).

[11] International Maritime Organization. International Maritime Organization moves ahead with oceans and climate change agenda. July 11, 2017. Internet: https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/17-MEPC-71.aspx (Accessed: 02/2026).

[12] International Maritime Organization, Compilation of relevant guidelines and guidance documents - Biofouling (April 2024), 2024. Internet: https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Biofouling%20pages/Compilation%20of%20relevant%20Guidelines%20and%20guidance%20documents%20-%20April%202024.pdf (Accessed: 02/2026).

[13] S. Gollasch and M. David. Ballast water management convention implementation challenges. Ocean Yearbook Online, 2018. Internet: https://www.academia.edu/download/109365379/22116001-0320101820231221-1-s4uh5f.pdf (Accessed: 02/2026).

[14] Convention sur la Gestion des Eaux de Ballast et Code BWMS et Directives sur la Mise en Œuvre de la Convention BWM, 2019. Internet: https://www.semanticscholar.org/paper/03a7a84ce10de0f33f5ebf6ad551e558d1143562 (Accessed: 02/2026).

[15] International Maritime Organization. Resolution MEPC.372(80): Guidelines for the use of electronic record books under the BWM Convention (MEPC 80/17/Add.1). July 7, 2023. Internet: https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.372%2880%29.pdf (Accessed: 02/2026).

[16] International Maritime Organization. OSV Chemical Code: Code for the Transport and Handling of Hazardous and Noxious Liquid Substances in Bulk on Offshore Support Vessels (2018 Edition), 2018. Internet: https://doi.org/10.62454/KA289E (Accessed: 02/2026).

[17] Association of Southeast Asian Nations (ASEAN). Bangkok Declaration on Combating Marine Debris in the ASEAN Region. June 22, 2019. Internet: https://

asean.org/bangkok-declaration-on-combating-marine-debris-in-asean-region/ (Accessed: 02/2026).

[18] Association of Southeast Asian Nations (ASEAN). ASEAN Framework of Action on Marine Debris. June 22, 2019. Internet: https://asean.org/asean-framework-of-action-on-marine-debris/ (Accessed: 02/2026).

[19] Association of Southeast Asian Nations (ASEAN). ASEAN Regional Action Plan for Combating Marine Debris in the ASEAN Member States (2021-2025). May 3, 2021. Internet: https://asean.org/book/asean-regional-action-plan-for-combating-marine-debris-in-the-asean-member-states-2021-2025-2/ (Accessed: 02/2026).

[20] Association of Southeast Asian Nations & People's Republic of China. 2017-2027 Declaration for a Decade of Coastal and Marine Environmental Protection in the South China Sea. November 13, 2017. Internet: https://asean.org/declaration-for-a-decade-of-coastal-and-marine-environmental-protectional-protection-in-the-south-china-sea-2017-2027/ (Accessed: 02/2026).

[21] International Maritime Organization. ASEAN regional oil spill contingency plan adopted. November 30, 2018. Internet: https://www.imo.org/en/mediacentre/pages/whatsnew-1202.aspx (Accessed: 02/2026).

[22] Association of Southeast Asian Nations. Memorandum of Understanding on ASEAN cooperation mechanism for joint oil spill preparedness and response (PDF), 2014. Internet: https://asean.org/wp-content/uploads/images/pdf/2014_upload/MOU%20on%20ASEAN%20OSRAP.pdf (Accessed: 02/2026).

[23] International Maritime Organization. Marine Environment Protection of the South-East Asian Seas (MEPSEAS), 2017. Internet: https://www.imo.org/en/ourwork/partnershipsprojects/pages/mepseas.aspx (Accessed: 02/2026).

[24] Đảng Cộng sản Việt Nam. Nghị quyết số 36-NQ/TW về Chiến lược phát triển bền vững kinh tế biển Việt Nam đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045, 22/10/2018. Internet: https://tulieuvankien.dangcongsan.vn/he-thong-van-ban/van-ban-cua-dang/nghi-quyet-so-36-nqtw-ngay-3012023-cua-bo-chinh-tri-ve-phat-trien-va-ung-dung-cong-nghe-sinh-hoc-phuc-vu-phat-trien-ben-9223 (Truy cập tháng 02/2026).

[25] Chính phủ nước Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam. Quyết định số 450/QĐ-TTg phê duyệt Chiến lược bảo vệ môi trường quốc gia đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2050, ngày 13/4/2022. Internet: https://vanban.chinhphu.vn/?pageid=27160&docid=205605 (Truy cập tháng 02/2026).

[26] Chính phủ nước Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam. Quyết định số 1746/QĐ-TTg về việc ban hành Kế hoạch hành động quốc gia về quản lý rác thải nhựa đại dương đến năm 2030, ngày 04/12/2019. Internet: https://vanban.chinhphu.vn/default.aspx?pageid=27160&docid=198482 (Truy cập tháng 02/2026).

[27] Chính phủ nước Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam. Quyết định số 515/QĐ-TTg phê duyệt Kế hoạch thực hiện Công ước quốc tế về kiểm soát, quản lý nước dằn và cặn nước dằn của tàu năm 2004, ngày 14/6/2024. Internet: https://vanban.chinhphu.vn/?pageid=27160&docid=210419 (Truy cập tháng 02/2026).

[28] Bộ Giao thông vận tải. Thông tư số 24/2014/TT-BGTVT ban hành Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về hệ thống chống hà tàu biển, Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về các hệ thống ngăn ngừa ô nhiễm biển của tàu, ngày 30/6/2014. Internet: https://congbao.chinhphu.vn/van-ban/thong-tu-so-24-2014-tt-bgtvt-11788.htm (truy cập tháng 02/2026).

[29] Cục Đăng kiểm Việt Nam. Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về các hệ thống ngăn ngừa ô nhiễm biển của tàu, 2014. Internet: https://congbao.chinhphu.vn/van-ban/thong-tu-so-14-2024-tt-bgtvt-42034/50444.htm (Truy cập tháng 02/2026).

[30] Chính phủ nước Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam. Quyết định số 1658/QĐ-TTg Phê duyệt Chiến lược quốc gia về tăng trưởng xanh giai đoạn 2021 - 2030, tầm nhìn 2050, ngày 01/10/2021. Internet: https://vanban.chinhphu.vn/?pageid=27160&docid=204226 (Truy cập tháng 02/2026).

[31] Chính phủ Trung Hoa Nhân dân Cộng hòa Nhân dân Trung Hoa. Bảo vệ môi trường sinh thái biển ở Trung Quốc (White Paper on China's Marine Ecological Environment Protection), tháng 7/2024. Internet: https://www.gov.cn/zhengce/202407/content_6962503.htm (Accessed: 02/2026).

[32] Bộ Sinh thái và Môi trường nước Cộng hòa Nhân dân Trung Hoa. Thông báo về việc ban hành "Chính sách kỹ thuật phòng ngừa và kiểm soát ô nhiễm nước do tàu gây ra", ngày 12/01/2018. Internet: https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201801/t20180116_429800.htm (Accessed: 02/2026).

[33] Văn phòng Thông tin Quốc vụ viện Cộng hòa Nhân dân Trung Hoa. Báo cáo trắng về bảo vệ môi trường sinh thái biển ở Trung Quốc (Marine Eco-Environmental Protection in China), ngày 11/7/2024. Internet: http://english.scio.gov.cn/whitepapers/2024-07/11/content_117302527_4.htm (Accessed: 02/2026).

■Ngày nhận bài: 25/02/2026 ■Ngày sửa bài: 07/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 18/3/2026

Factors influencing attitudes toward and intention to adopt electric motorcycles in Hanoi, Vietnam: The roles of perceived social trend and social media exposure

Các yếu tố ảnh hưởng đến thái độ và ý định chấp nhận xe máy điện tại Hà Nội, Việt Nam: Vai trò của cảm nhận về xu hướng xã hội và mức độ tiếp xúc với truyền thông xã hội

> **PhD DO DUY DINH**
Hanoi University of Civil Engineering
Email: dinhdd@huce.edu.vn

ABSTRACT

This study investigates the factors shaping attitudes toward and intention to adopt electric motorcycles in Hanoi, Vietnam, with particular attention to the roles of perceived social trend and social media exposure. A cross-sectional survey was conducted with 534 gasoline-motorcycle users in inner Hanoi and the data were analyzed using PLS-SEM. The results show that perceived advantages of electric motorcycles positively affect attitude, whereas usage barriers negatively affect it. Safety barriers, however, do not have a significant effect. Social media exposure significantly strengthens perceived social trend but does not directly influence attitude or intention. In contrast, perceived social trend positively affects both attitude and intention, while attitude also exerts a strong positive effect on intention to adopt electric motorcycles. These findings suggest that adoption is shaped not only by evaluations of benefits and barriers but also by consumers' perception that electric motorcycles are becoming increasingly visible, widespread and socially normalized.

Keywords: Electric motorcycles; social media exposure; perceived social trend.

TÓM TẮT

Nghiên cứu này khảo sát các yếu tố tác động đến thái độ và ý định chấp nhận xe máy điện tại Hà Nội, Việt Nam, trong đó đặc biệt chú ý đến vai trò của yếu tố cảm nhận về xu hướng xã hội và yếu tố mức độ tiếp xúc với truyền thông xã hội. Một khảo sát dạng cắt ngang đã được thực hiện với sự tham gia của 534 người sử dụng xe máy chạy xăng tại khu vực nội thành Hà Nội và dữ liệu thu thập được phân tích thông qua mô hình PLS-SEM. Kết quả cho thấy cảm nhận về các lợi thế của xe máy điện có tác động tích cực đến thái độ, trong khi cảm nhận về các rào cản trong quá trình sử dụng có tác động tiêu cực đến thái độ. Tuy nhiên, cảm nhận về các rào cản về an toàn không có ảnh hưởng có ý nghĩa thống kê đến thái độ. Ngoài ra, mức độ tiếp xúc với truyền thông xã hội làm gia tăng đáng kể cảm nhận về xu hướng xã hội, nhưng yếu tố này không trực tiếp ảnh hưởng đến thái độ hoặc ý định chấp nhận xe máy điện. Ngược lại, cảm nhận về xu hướng xã hội có tác động tích cực đến cả thái độ và ý định, trong khi thái độ cũng có ảnh hưởng tích cực đáng kể đến ý định chấp nhận xe máy điện. Những phát hiện này cho thấy việc chấp nhận xe máy điện không chỉ được định hình bởi sự đánh giá về các lợi ích và rào cản, mà còn bởi nhận thức của người tiêu dùng rằng xe máy điện đang ngày càng trở nên hiện diện rõ nét hơn, phổ biến hơn và trở nên bình thường hóa trong xã hội.

Từ khóa: Xe máy điện; mức độ tiếp xúc với truyền thông xã hội; cảm nhận về xu hướng xã hội.

1. INTRODUCTION

Vietnam is one of the most motorcycle-dependent countries in the world and the dominance of gasoline-powered two-wheelers remains a major challenge for cleaner and more sustainable urban mobility. In this context, electric motorcycles (EMs) are increasingly regarded as a practical low-emission alternative, particularly in cities where motorcycles remain the dominant mode of transport. This issue is especially relevant in Vietnam, where the electrification of two-wheelers is progressing but large-scale adoption is still incomplete [1].

Because the transition to EMs depends heavily on consumer acceptance, identifying the factors that shape attitudes and adoption intention has become an important research issue. Previous studies in Vietnam and other developing markets have shown that EM adoption is influenced by perceived benefits and barriers, such as usefulness, cost savings, environmental value, charging inconvenience, performance limitations, safety concerns and perceived risk [2, 3, 4, 5]. Recent studies have also highlighted the roles of image, social influence and psychosocial factors in explaining EM-related attitudes and intentions [6, 7].

Although this literature has advanced understanding of EM adoption, it has focused mainly on product-related advantages and barriers, together with broad psychological factors such as attitude, norms, image, and risk. Less attention has been paid to the wider social and communication environment in which EMs become increasingly visible, discussed and normalized. This omission is important because adoption of a new mobility technology is shaped not only by functional evaluations, but also by whether consumers perceive it as becoming socially widespread and increasingly legitimate. Prior research has suggested that collective cues, social influence and communication environments can affect electric mobility acceptance [6, 7, 8]. However, the roles of perceived social trend and social media exposure remain underexplored in the EM context.

To address this gap, this study proposes a model in which advantages of EMs, usage barriers, safety barriers, perceived social trend toward EM adoption and social media exposure on EMs shape consumers' attitudes toward EMs, which in turn influence their intention to adopt EMs (Figure 1). In addition, social media exposure is expected to strengthen perceived social trend, while both social media exposure and perceived social trend may also have direct effects on adoption intention. By incorporating these socio-communication factors alongside benefit - and barrier-based perceptions, the study offers a more socially grounded explanation of EM adoption in a motorcycle-dominated developing market.

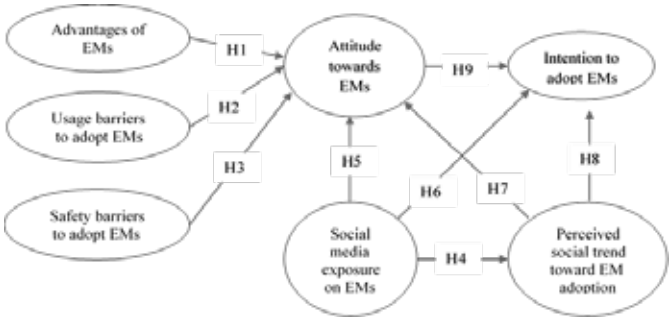


Figure 1. Proposed research model

2. HYPOTHESIS DEVELOPMENT

Consumers' attitudes toward EMs are likely to be shaped by both product-related evaluations and broader socio-communication cues. When consumers perceive stronger economic, functional and environmental advantages, they are more likely to hold favorable attitudes toward EMs. In contrast, perceived usage barriers and safety barriers are expected to weaken such attitudes. Prior studies on electric mobility adoption have consistently shown that perceived benefits, inconvenience and risk are important drivers of consumer responses [2, 3, 4, 5]. Therefore, the following hypotheses are proposed:

H1. Advantages of EMs positively influence attitude toward EMs.

H2. Usage barriers to EMs negatively influence attitude toward EMs.

H3. Safety barriers to EMs negatively influence attitude toward EMs.

Beyond these product-related evaluations, attitudes and intentions toward EMs may also be shaped by the surrounding social and communication environment. When consumers perceive that EM adoption is becoming increasingly visible and socially widespread, they may evaluate EMs more positively and become more willing to adopt them. Likewise, frequent exposure to EM-related communication may increase the salience of EMs, strengthen perceptions that EMs are becoming a broader social trend, and encourage adoption intention. Prior research has also highlighted the importance of social influence, image and communication-related cues in electric mobility acceptance [6, 7, 8]. Accordingly, the following hypotheses are proposed:

H4. Social media exposure on EMs positively influences perceived social trend toward EM adoption.

H5. Social media exposure on EMs positively influences attitude toward EMs.

H6. Social media exposure on EMs positively influences intention to adopt EMs.

H7. Perceived social trend toward EM adoption positively influences attitude toward EMs.

H8. Perceived social trend toward EM adoption positively influences intention to adopt EMs.

Finally, attitude is widely recognized as a key predictor of behavioral intention. Consumers who evaluate EMs more positively are more likely to express willingness to adopt them [2, 3]. Therefore:

H9. Attitude toward EMs positively influences intention to adopt EMs.

3. METHODS

3.1. Measures

A structured questionnaire was used to collect data on the study constructs and respondents' socio-demographic characteristics. The measurement items were adapted from relevant previous studies and adjusted to suit the context of electric motorcycle adoption in Hanoi, Vietnam, with some additional items newly developed for this study. To ensure face validity and improve the overall quality of the instrument, a pilot study with 20 participants was conducted to evaluate item clarity, comprehensibility, ease of response, practicality and questionnaire length. All constructs were measured using five-point Likert scales ranging from 1 ("strongly disagree") to 5 ("strongly agree"). The complete set of questionnaire items and their sources of adaptation are presented in the Appendix.

3.2. Survey administration

This cross-sectional survey was conducted among gasoline-motorcycle users in inner Hanoi, Vietnam, between late November 2025 and January 2026. Participants were recruited using convenience sampling. Eligibility criteria required respondents to (i) currently reside in the inner urban areas of Hanoi (excluding

those from suburban or rural communes) and use a gasoline-powered motorcycle as their primary mode of transport and (ii) have at least six months of motorcycle riding experience. Data collection was carried out by trained research assistants who approached potential participants in public locations such as parks, cafés, university campuses, residential buildings and workplaces. Research assistants introduced the study objectives, assessed eligibility and invited qualified individuals to participate. After obtaining verbal informed consent, participants completed the questionnaire either independently or, where preferred, with assistance from research assistants through an interview-based format. Completed questionnaires were collected immediately on site or retrieved at a later agreed time. All questionnaires were checked for completeness, and respondents were encouraged to seek clarification if any items were unclear.

3.3. Sample

A total of 534 valid responses were obtained. The sample was relatively balanced by gender, with 50.4% male and 49.6% female respondents. Most participants were aged between 25 and 54 years (69.5%), held at least a bachelor's degree (67.4%), and were mainly private or public-sector full-time employees (59.2%). In terms of monthly disposable income, the largest group reported 10 to less than 20 million VND (42.7%), and most respondents lived between Ring Road 1 and Ring Road 2 (39.3%) or inside Ring Road 1 (30.3%). Full demographic details are presented in Figure 2.

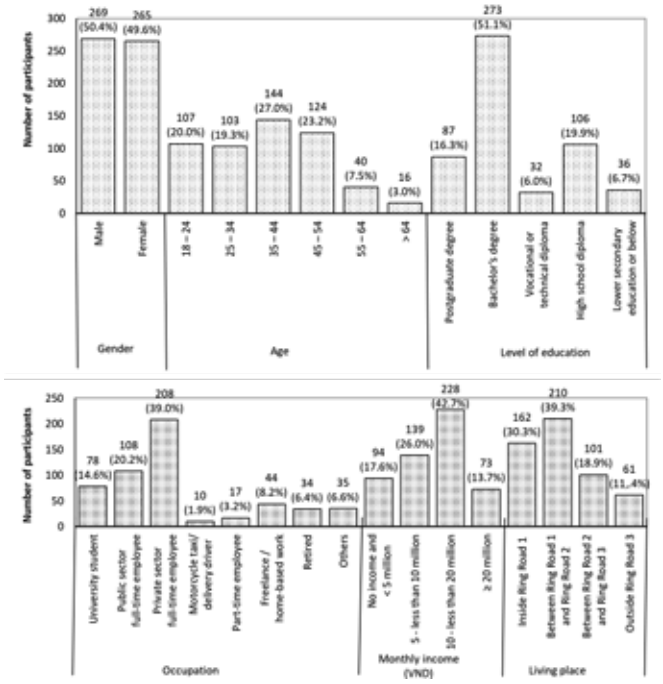


Figure 2. Participant characteristics

3.4. Statistical analysis

This study used SmartPLS 3 to evaluate the proposed research model through the Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) method.

4. RESULTS

4.1. Assessment of measurement model

Following [9], the reflective measurement model was assessed in terms of indicator reliability, internal consistency reliability, convergent validity and discriminant validity. All indicator loadings exceeded 0.70, ranging from 0.741 to 0.964. Cronbach's alpha and composite reliability values also surpassed the recommended threshold of 0.70, ranging from 0.844 to 0.953 and from 0.905 to 0.970, respectively, confirming satisfactory construct reliability. In addition, all AVE values were above 0.50, ranging from 0.652 to 0.915, supporting convergent validity. Discriminant validity was established based on both the Fornell-Larcker criterion and HTMT. Specifically, the square root of the AVE for each construct exceeded its correlations with other constructs, while all HTMT values were below 0.85, ranging from 0.139 to 0.691, with the upper bounds of the bias-corrected 95% confidence intervals also remaining below 0.85. Overall, the measurement model demonstrated satisfactory reliability and validity.

4.2. Structural model evaluation

As shown in Table 1, the structural model showed acceptable fit, with SRMR = 0.051 and NFI = 0.857. It also demonstrated moderate explanatory power, accounting for 49.0% of the variance in intention to adopt electric motorcycles and 47.5% of the variance in attitude toward electric motorcycles. In addition, the Q^2 values for intention (0.417) and attitude (0.426) were both above zero, indicating satisfactory predictive relevance.

The hypothesis testing results indicated that advantages of EMs positively influenced attitude, whereas usage barriers negatively influenced attitude, supporting H1 and H2. In contrast, safety barriers did not significantly affect attitude, so H3 was not supported. Social media exposure positively influenced perceived social trend, supporting H4, but did not have significant direct effects on attitude or intention, leading to the rejection of H5 and H6. Meanwhile, perceived social trend positively influenced both attitude and intention, supporting H7 and H8. Finally, attitude toward EMs positively influenced intention to adopt EMs, supporting H9. Detailed path coefficients and significance levels are reported in Table 2.

The indirect effect results further suggest that social media exposure influenced intention mainly through perceived social trend, while perceived social trend affected intention both directly and indirectly via attitude. The detailed indirect, direct and total effects are shown in Table 3.

Table 1. Evaluation of predictive capacity and model fit indexes

Dependent variables	R2	Blindfolding Q2
Intention to adopt electric motorcycles (ATA)	0.490	0.417
Attitude toward electric motorcycles (ATP)	0.475	0.426
Model fit indices: SRMR = 0.051; d_ULS = 1.127; d_G = 0.54; NFI = 0.857		

Table 2. Testing the hypotheses in the structural model

Path	Path coefficients	SD	p value	Hypothesis	Decision
ADV -> ATP	0.409	0.041	< 0.001	H1	Supported
USB ->ATP	-0.113	0.039	0.004	H2	Supported
SAF -> ATP	-0.017	0.034	0.625	H3	Not supported
SME -> PTE	0.38	0.050	< 0.001	H4	Supported
SME ->ATP	0.025	0.037	0.495	H5	Not supported
SME -> ATA	0.061	0.037	0.096	H6	Not supported
PTE -> ATP	0.305	0.047	< 0.001	H7	Supported
PTE -> ATA	0.296	0.051	< 0.001	H8	Supported
ATP -> ATA	0.462	0.044	< 0.001	H9	Supported

Table 3. Direct, indirect and total effects

Paths	Direct effects	Indirect effects	Total effects
ADV -> ATP	0.409***		0.409***
ADV -> ATA		0.189***	0.189***
USB -> ATP	-0.113**		-0.113**
USB -> ATA		-0.052*	-0.052*
SAF -> ATP	-0.017^{ns}		-0.017^{ns}
SAF -> ATA		-0.008^{ns}	-0.008^{ns}
SME -> PTE	0.380***		0.380***
SME -> ATP	0.025^{ns}	0.116***	0.141***
SME -> ATA	0.061^{ns}	0.178***	0.239***
PTE -> ATP	0.305***		0.305***
PTE -> ATA	0.296***	0.141***	0.437***
ATP -> ATA	0.462***		0.462***

* p < .05; ** p < .01; *** p < .001; ns non-significant.

5. DISCUSSION

This study examined how product-related perceptions and socio-communication cues shape consumers' attitudes toward and intention to adopt electric motorcycles (EMs) in Vietnam. The findings show that advantages of EMs positively influence attitude, whereas usage barriers negatively influence attitude. By contrast, safety barriers do not significantly affect attitude. The results also indicate that social media exposure significantly increases perceived social trend toward EM adoption, but does not directly influence either attitude or intention. Meanwhile, perceived social trend positively affects both attitude and intention, and attitude remains a strong predictor of intention to adopt EMs. Overall, the model suggests that EM adoption is shaped not only by benefit–barrier evaluations but also by how strongly consumers perceive EMs as an emerging and socially visible trend.

The positive effect of advantages of EMs and the negative effect of usage barriers are consistent with earlier studies showing that perceived benefits and practical constraints are key determinants of EM and EV adoption [2, 3, 4, 5, 6, 7]. In contrast, the non-significant effect of safety barriers differs from some previous studies emphasizing perceived risk and safety concerns [3, 4, 6], suggesting that, in this model, consumers' attitudes are shaped more strongly by perceived advantages, daily usability and broader social momentum than by specific safety concerns.

A key contribution of this study lies in the role of perceived social trend toward EM adoption, which significantly influences both attitude and intention. This finding suggests that consumers respond not only to personal evaluations or interpersonal influence, but also to a broader perception that EM adoption is becoming widespread, normal and future-oriented, thereby extending earlier work on social influence, subjective norm and image in electric mobility research [3, 6, 7, 8]. In addition, social media exposure significantly affects perceived social trend, but not attitude or intention directly, indicating that communication exposure works mainly indirectly by reinforcing the perception that EMs are becoming socially widespread.

From a practical perspective, the findings suggest that policymakers and EM marketers should highlight the concrete benefits of EMs, such as cost savings, low maintenance, environmental friendliness, and suitability for urban lifestyles. At the same time, efforts are needed to reduce usage barriers by improving charging convenience, charging infrastructure and battery-related support. Since perceived social trend strongly affects both attitude and intention, communication strategies should also make EM adoption more visible and socially normalized by showcasing actual users, highlighting market growth, and presenting EMs as part of an ongoing societal transition. Finally, because social media exposure works mainly by reinforcing social trend perceptions, communication should focus less on simple promotional repetition and more on building a broader sense that EM adoption is becoming the new normal.

This study has several limitations. Its cross-sectional design limits causal interpretation, and the focus on intention rather than actual adoption behavior may not fully reflect real-world EM use. In addition, the use of convenience sampling may limit the representativeness of the sample and the generalizability of the findings. The results are also context-specific to Vietnam, and other relevant factors, such as policy incentives, charging infrastructure, and environmental values, could be examined in future research.

6. CONCLUSIONS

This study shows that attitudes toward electric motorcycles in Vietnam are strengthened by perceived advantages and perceived social trend, but weakened by usage barriers. Social media exposure does not directly affect attitude or intention, but indirectly influences adoption by reinforcing the perception that electric motorcycles are becoming more socially visible and widespread. In addition, both perceived social trend and attitude positively influence intention to adopt electric motorcycles. Overall, the findings suggest that electric motorcycle adoption is shaped not only by practical evaluations of benefits and barriers, but also by consumers' perception of a broader social transition.

REFERENCES

[1] International Energy Agency. Global EV Outlook 2025: Trends in other light-duty electric vehicles, 2025.

[2] Asadi, S., Nilashi, M., Samad, S., Abdullah, R., Mahmoud, M., Alkinani, M. H., & Yadegaridehkordi, E. Factors impacting consumers' intention toward adoption of electric vehicles in Malaysia. Journal of Cleaner Production, 282, 124474, 2021.

[3] Nguyen-Phuoc, D. Q., Truong, T. M., Nguyen, M. H., Pham, H.-G., Li, Z.-C., & Oviedo-Trespalacios, O. What factors influence the intention to use electric motorcycles in motorcycle-dominated countries? An empirical study in Vietnam. Transport Policy, 146, 193-204, 2024.

[4] Nguyen-Phuoc, D. Q., Su, D. N., Truong, A., Li, Z.-C., & Oviedo-Trespalacios, O. How do perceptions of risk influence the adoption of electric motorcycles? A theory-based investigation considering the multidimensional nature of risk. Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour, 109, 689-710, 2025.

[5] Truong, N., Trencher, G., Yarime, M., Barrett, B., & Matsubae, K. Barriers to the adoption of electric cars and electric motorcycles in Vietnam. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 131, 104204, 2024.

[6] Hidayat, H. R., Irawan, M. Z., Rizki, M., & Aurarisa, I. Exploring the determinants of electric motorcycle adoption and changes in travel behavior: Insights from Indonesia, Travel Behaviour and Society, 42, 101121, 2026.

[7] Nguyen-Phuoc, D. Q., Truong, T. M., Nguyen, N. N. A., Luu, T. T., & Su, D. N. Intention to adopt electric motorcycles in developing markets: Examining the role of image, motivators and barriers through the behavioral reasoning theory framework. Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour, 109, 840-859, 2025.

[8] Barth, M., Jugert, P., & Fritsche, I. Still underdetected: Social norms and collective efficacy predict the acceptance of electric vehicles in Germany. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 37, 64-77, 2016.

[9] Hair, J. F., Jr., & Alamer, A. Partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) in second language and education research: Guidelines using an applied example. Research Methods in Applied Linguistics, 1(3), 100027, 2022.

[10] Ng, P. M. L., Chan, J. K. Y., Lit, K. K., Cheung, C. T. Y., Lau, M. M., Wan, C., & Choy, E. T. K. The impact of social media exposure and online peer networks on green purchase behavior. Computers in Human Behavior, 165, 108517, 2025.

[11] Lee, C. K., Song, H. J., Bendle, L. J., Kim, M. J., & Han, H. The impact of non-pharmaceutical interventions for 2009 H1N1 influenza on travel intentions: A model of goal-directed behavior. Tourism Management, 33(1), 89-99, 2012.

Appendix: Measurement items and sources

Construct	Measurement items and codes		Source of adaptation
Advantages of electric motorcycles (ADV)	ADV_1	Using an electric motorcycle helps save costs compared with a gasoline motorcycle.	[6]
	ADV_2	The maintenance and repair costs of an electric motorcycle are lower than those of a gasoline motorcycle.	[6, 7]
	ADV_3	Using an electric motorcycle helps reduce air pollution and noise in urban areas.	[6]
	ADV_4	Electric motorcycles are easy to operate and provide a comfortable riding experience.	[3, 6]
	ADV_5	Compared with gasoline motorcycles, riding an electric motorcycle is safer (i.e., involves a lower risk of traffic accidents).	[3]
	ADV_6	Electric motorcycles are environmentally friendly and reflect a civilized urban lifestyle.	[6]
Usage barriers to electric motorcycles (USB)	USB_1	I believe that electric motorcycles are not suitable for long-distance trips or for continuous travel throughout the day.	[6, 7]
	USB_2	I find having to recharge the battery frequently inconvenient and time-consuming.	[6, 7]
	USB_3	I am concerned that it may be difficult to find convenient charging points near my home or workplace.	[7]
	USB_4	I think that battery charging takes too long compared with refueling.	Newly developed
	USB_5	I believe that the speed and performance of electric motorcycles do not yet meet many people's mobility needs.	Newly developed
	USB_6	I find it inconvenient to maintain or replace the battery of an electric motorcycle.	Newly developed
Safety barriers to electric motorcycles (SAF)	SAF_1	I am concerned that electric motorcycle batteries may catch fire or explode during charging.	[7]
	SAF_2	I feel unsafe if I have to charge an electric motorcycle at home or in an apartment building's shared basement/ parking area.	Newly developed
	SAF_3	I worry that public charging stations may pose fire or electrical short-circuit risks.	Newly developed
	SAF_4	I doubt the quality and fire-safety of electric motorcycle batteries currently available on the market.	Newly developed
	SAF_5	Given Hanoi's infrastructure conditions, increasing the number of electric motorcycles may raise the risk of fires or explosions in urban areas.	Newly developed
Perceived social trend toward electric motorcycle adoption (PTE)	PTE_1	I have noticed that more and more people are switching to using electric motorcycles.	Newly developed
	PTE_2	I believe that using electric motorcycles is becoming a popular trend in society.	Newly developed
	PTE_3	I think that in the near future, electric motorcycles will gradually replace gasoline motorcycles.	Newly developed
Social media exposure on electric motorcycles (SME)	SME_1	I have come across a lot of information and advertisements about electric motorcycles on social media (e.g., Facebook, TikTok, YouTube).	[10]
	SME_2	I have seen a lot of information and advertisements about electric motorcycles through other mass media channels (e.g., TV, online news sites, radio, etc.).	[10]
	SME_3	I have noticed that communication about electric motorcycles is appearing more and more frequently around me.	Newly developed
Attitude toward electric motorcycles (ATP)	ATP_1	I think that using EMs is valuable.	[7, 11]
	ATP_2	I think that using EMs is right.	[7, 11]
	ATP_3	I think that using EMs is necessary.	[7, 11]
Intention to adopt electric motorcycles (ATA)	ATA_1	I will use EMs in the future.	[7, 11]
	ATA_2	I have an intention to use EMs in the future.	[7, 11]
	ATA_3	I am likely to use EMs in the future.	[7, 11]

■Ngày nhận bài: 27/02/2026 ■Ngày sửa bài: 10/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 19/3/2026

Experimental studying the bending behavior of the continuous steel - concrete composite beams with different shear connection degree

Nghiên cứu thực nghiệm ứng xử uốn của dầm liên tục thép - bê tông liên hợp với mức độ liên kết khác nhau

> VAN PHUOC NHAN LE[1,*], MINH TIEN TRAN[2]
[1]Ho Chi Minh City University of Technology, Vietnam National University of Ho Chi Minh City
[2]Department of Planning and Finance, Nha Trang University
[*]Email: lvpnhan@hcmut.edu.vn

ABSTRACT

Continuous steel-concrete composite beams have many advantages compared with simple supported beams, such as reducing deflection, beam size, and increasing beam stiffness. In this study, the experimental program was carried out on two large scale continuous steel-concrete composite beams with different number of shear connectors to investigate the effect of the shear connection degree on their bending behavior. Perfobond shear connectors were used for these composite beams to prevent slip between the concrete slab and steel girder. The tested model was continuous beam with two spans subjected to concentrated loads at the middle each span. The parameters observed were the load capacity, vertical deflection, and the relative slip between the concrete slab and steel girder. The test results show that the shear connection degree effects significantly on the load capacity, vertical deflection, and relative slip between the concrete slab and steel beam.

Keywords: Steel-concrete composite beam; perfobond shear connector; load capacity; vertical deflection; relative slip between concrete slab and steel beam.

TÓM TẮT

Dầm liên hợp thép - bê tông liên tục có nhiều ưu điểm so với dầm đơn đơn giản, như giảm độ võng, kích thước dầm và tăng độ cứng của dầm. Trong nghiên cứu này, chương trình thí nghiệm được thực hiện trên hai dầm liên hợp thép - bê tông có kích thước lớn với số liên kết kháng cắt khác nhau để khảo sát ảnh hưởng của mức độ liên kết kháng cắt đến ứng xử uốn của dầm liên hợp thép - bê tông. Liên kết kháng cắt perfobond được sử dụng để ngăn cản biến dạng trượt giữa bản bê tông và dầm thép. Mô hình thí nghiệm là dầm liên tục hai nhịp chịu tải tập trung tại điểm giữa mỗi dầm. Các đại lượng được khảo sát bao gồm sức chịu tải của dầm, độ võng và biến dạng trượt tương đối giữa bản bê tông và dầm thép. Kết quả thí nghiệm cho thấy mức độ liên kết ảnh hưởng đáng kể đến sức chịu tải, độ võng và biến dạng trượt tương đối giữa bản bê tông và dầm thép.

Từ khóa: Dầm liên hợp thép-bê tông; liên kết kháng dắt dạng perfobond; khả năng chịu lực; độ võng; độ trượt tương đối giữa bản bê tông và dầm thép.

1. INTRODUCTION

Continuous beams are commonly used in practice due to their efficiency in structural behavior. Continuous beams typically have a smaller cross-section than simple beams. Redistributing moments in continuous beams increases load-bearing capacity and optimizes design.

Many the steel-concrete composite beams under negative bending has been studied in the world. Gaetano Manfredi et al. studied the ductility of composite beams under negative bending: an equivalence index for reinforcing steel classification [1]. This study theoretically analyzed and validated with experimental tests the influence of the properties of reinforcing steel on the rotational capacity of composite beams under negative moment. Jianguo Nie established a mechanics model to observe the stiffness of composite beams subjected negative moment by considering slips at the steel beam– concrete slab interface, and concrete–reinforcement interface [2]. Jingfeng Wang studied the bending and rotational capacities of the semi-continuous composite beams [3]. Two full-scale composite beams were tested to measure bending and rotational capacities under monotonic loadings. Since, author evaluated the effect of semi-rigid connections on the performance of composite beams with various loadings was compared with predictions and codes. Natalino Gattesco studied the influence the shape of the steel profile, the ratio between the depths of concrete slab and steel beam, the steel to concrete area ratio, and the reinforcement percentage of the concrete slab on moment

redistribution in continuous steel-concrete composite beams with compact cross section [4]. G. Vasdravellis investigated the behaviour of steel–concrete composite beams subjected to the combined effects of negative bending and axial compression [5]. The results show that the compressive load reduces the moment capacity of steel-concrete composite beam and steel beam is prone to local buckling. Sylvester O. Osuji observed the load capacity, deflection, shear connection, and relative slip between the concrete slab and steel beam of four composite beam specimens were tested under negative bending [6]. The test results show that the arrangement of shear connectors influence strength and deformation characteristics of composite beams. Liu, Xiaoyang added carbon fiber reinforced polymer (CFRP) materials on the top of the concrete slab at hogging-moment region to investigate the effect of CFRP on the load capacity, the relative slip, crack propagation, ductility, and failure mode [7]. Lou, Tiejion studied the effect of steel reinforcement, carbon fiber reinforced polymer (CFRP), and glass fiber reinforced polymer (GFRP) on load capacity, crack width in concrete slab, and moment redistribution of continuous steel-concrete composite beams [8]. Wen Zeng studied experiment and theoretically analyze on the steel-concrete composite beams with high-strength bolted connectors to investigate the failure mechanism in the negative moment region [9].

Previous studies have often used simple single-span beams to study bending behavior in negative moment region by reversing the beam cross-section. This method has limitations in terms of redistributing moments in continuous beams. In this study, two large scale continuous steel-concrete composite beams using perfobond shear connectors were tested to evaluate the effect of the shear connection degree on the bending behavior of composite beams.

2. TEST PROGRAM

2.1. Materials

2.1.1. Concrete

Six specimens with dimensions of 150mm×150mm×150mm were tested to determine the concrete compressive strength. After casting, the concrete standard cube was cured and macerated seven days before testing the compression strength. The compression strength test was conducted at the same time as the test of the steel-concrete composite beams. The test results of the compressive strength are presented in Table 1.

Table 1. Mechanical characteristics of concrete

Specement	Dimensions (mm)	Failure load (kN)	Compressive strength (MPa)
M1	150×150×150	769.5	34.2
M2	150×150×150	866.3	38.5
M3	150×150×150	843.8	37.5
M4	150×150×150	855.0	38.0
M5	150×150×150	823.5	36.6
M6	150×150×150	792.0	35.2
Average value		825.0	36.7

2.1.2. Structural steel, plate steel and reinforcement

The manufacturer provided the technical parameters of steel tubes, as shown in Table 2.

Table 2. Mechanical properties of steel

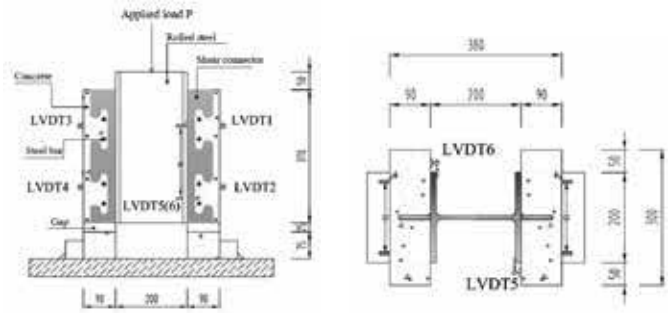
Parameters	Structural steel	Plate steel	Reinforcement
Yield strength (MPa)	284	320	347
Tensile strength (MPa)	389	425	488
Elastic modulus (MPa)	200×10^3	200×10^3	200×10^3

2.2. Push-out test

Push-out test was carried-out to determine the load capacity of perfobond shear connectors. Using this longitudinal shear capacity of perfobond shear connector to evaluate the shear connection degree of the continuous steel-concrete composite beams.

2.2.1. Specimen

The shape and size of the perfobond shear connectors are illustrated in the Fig. 1. The thickness of perfobond shear connetors is 8 mm and it has two steel bars through each connector hole.



a. Elevation side of specimen *b. Cross section of specimen*

Figure 1. Push-out test specimen

2.2.2. Shear connection capacity

The load capacity of the shear connectors is 565.69 kN [10]. Therefore, the longitudinal shear capacity of every shear connector equals: P_{Rd} = 565.69/4 = 141.42 kN.

2.3. Bending test

2.3.1. Specimen

The bending test specimen is a two-span continuous beam, as shown in Fig. 2. The applied load effected on a transfer steel beam which distributed this load on the steel-concrete composite beam at the middle spans. The bending test model and position of LVDT (Linear Variable Differential Transformer) are shown in Fig. 3. In this testing, LVDTs (LVDT-1 to LVDT-6) are placed at middle spans, L/4, and 3L/4 from supports to measure deflections of beams. LVDT-7 is placed at the end of beams to measure the relative slip between the concrete slab and steel girder. Fig. 4 presents the longitudinal section of steel-concrete composite beams with arranging 26 shear connectors in beam B-1 and 16 shear connectors in beam B-2. The cross section of beam is shown in Fig. 5. The concrete slab is 100 mm in thickness and 500 mm in width. The parameters of steel-concrete composite beams are presented in Table 3.

Figure 2. Bending test

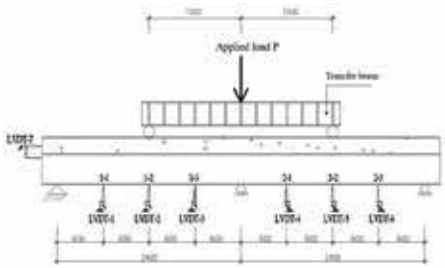
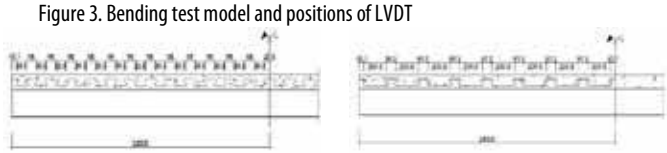


Figure 3. Bending test model and positions of LVDT



Beam B-1 *Beam B-2*

Figure 4. Longitudinal section of steel-concrete composite beam

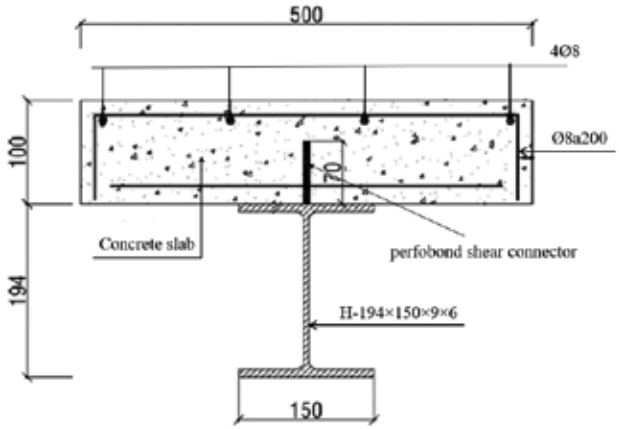


Figure 5. Cross section of steel-concrete composite beam

Table 3. The geometric parameters of steel-concrete composite beams

Beam	Concrete compressive strength (MPa)	Number of shear connectors	Number steel bar through connection hole	Reinforced bar in concrete slab
B-1	36.7	26	2	Ø8a200
B-2	36.7	16	2	Ø8a200

2.3.2. The shear connection degree

a. Determining number of shear connector

Number of the shear connector is determined according to [11]:

$N_f = V_{IN}/P_{Rd}$

Where: $V_{IN} = \min(N_{pla}; N_{cf})$

The plastic axial resistance of the steel girder (class 1):

$N_{pla} = A_a f_y/\gamma_a$

$= 38.09\times28.4/1.0$

$= 1081.78$ kN

The plastic axial resistance of the concrete slab:

$N_{cf} = b_{eff}h_c0.85f_{ck}/\gamma_c$

$= 50\times10\times0.85\times3.67/1.0$

$= 1559.75$ kN

Note (in this case):

$\gamma_a = 1.0$ Partial safety factor of steel

$\gamma_c = 1.0$ Partial safety factor of concrete

So, $V_{IN} = \min(N_{pla}; N_{cf}) = 1081.78$ kN

The number of required shear connectors for half span for full shear connection degree:

$N_f = V_{IN}/P_{Rd} = 1081.78/141.42 = 7.65 \approx 8$ (shear connectors/ for half span). The number of shear connections required on whole beam (two spans) for the beam to achieve full shear resistance equals 4×8 = 32 (shear connectors).

b. The shear connection degree of beams B-1 and B-2

The shear connection degree (η) is the ratio between the number of shear connectors arranged and the number of shear connectors required. Table 4 presents the degree of shear connection of beams.

Table 4. Degree of shear connection of beams

Beam	Number of shear connectors N	Degree of shear connection $\eta = N/N_f$	Classification of shear connection degree
B-1	26	81%	Partial
B-2	16	50%	Partial

This shows that two steel-concrete composite beams have the partial shear connection degree.

4. TEST RESULTS AND DISCUSS

4.1. Test results

Table 5 presents the vertical deflection of beam B-1 and B-2 at positions along beam length corresponding to their failure loads.

Table 5. Deflection of beams B-1 and B-2 at their failure loads

Beam	P_{max} (kN)	Span 1			Span 2		
		1-1	**1-2**	**1-3**	**2-1**	**2-2**	**2-3**
		-1.8 m	-1.2 m	-0.6 m	0.6 m	1.2 m	1.8 m
B-1	569.69	65.21	66.95	61.36	53.46	62.26	59.52
B-2	468.90	53.65	61.23	44.16	49.66	50.60	50.09

Where:

1-1, 1-2, 1-3 are sections at locations 0.6 m, 1.2 m and 1.8 m from left side of the middle support of the beams.

2-1, 2-2, 2-3 are sections at locations 0.6 m, 1.2 m and 1.8 m from right side of the middle support of the beams.

4.2. The load capacity

Fig. 6 plots the curves of load – deflection of two continuous steel-concrete composite beams B-1 and B-2. The failure loads of beams B-1 and B-2 are respectively 569.69 kN and 468.90 kN. That means the failure load of beam B-1 with the shear connection degree of 81% increases 21% in comparison with that of beam B-2 with the shear connection degree of 50%. This proves the shear connection degree significantly effects on the load capacity of the steel-concrete composite beams.

4.3. The deflection

Fig. 7 performs the deflection of two continuous steel-concrete composite beams B-1 and B-2 corresponding to their failure loads. The deflection of beam B-1 is higher than that of beam B-2. However, at the failure load of beam B-2, the deflection of beam B-1 decreases considerably in comparison with that of beam B-2. At this load level, the maximum deflection of beam B-1 is only about 51.4% compared to the maximum deflection of beam B-2, as shown in Table 6 and Fig. 8. This indicates that beams with a higher shear connection degree will result in smaller deflection.

Table 6. Deflection of beams B-1 and B-2 at failure load of beam B-2

Beam	P_{max} (kN)	Span 1			Span 2		
		1-1	**1-2**	**1-3**	**2-1**	**2-2**	**2-3**
		-1.8 m	-1.2 m	-0.6 m	0.6 m	1.2 m	1.8 m
B-1	468.90	25.87	31.50	22.22	18.11	23.26	19.19
B-2	468.90	53.65	61.23	44.16	49.66	50.60	50.09
Decrease	-	48.2%	51.4%	50.3%	34.5%	46.0%	38.3%

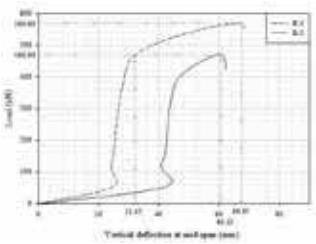


Figure 6. Load - deflection curves at mid-span of beams B-1 and B-2

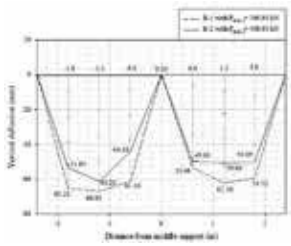


Figure 7. Deflection at positions along beam length at failure loads of beam B-1 (P_{max-1} = 569.69 kN) and beam B-2 (P_{max-2} = 468.90 kN)

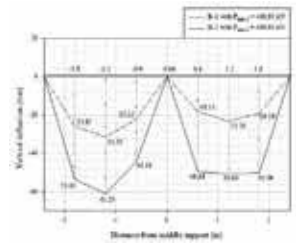


Figure 8. Deflection at positions along beam length of beams B-1 and B-2 at failure load of beam B-2 (P_{max-2} = 468.90 kN)

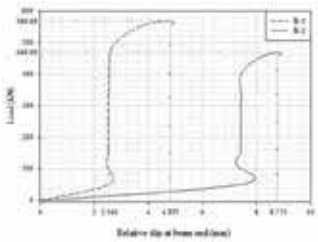


Figure 9. The relative slip between the concrete slab and the steel girder at the end of beams B-1 and B-2

4.4. The relative slip between the concrete slab and steel girder

The shear connectors prevent the relative slip between the concrete slab and steel girder. Therefore, the greater the continuous degree, the lower the relative slip. The same applies to this case. For their failure loads, the relative slip between the concrete slab and the steel girder of beam B-1 is very small compared with that of beam B-2, even though the failure load of beam B-1 is greater than the failure load of beam B-2, as shown in Fig. 9. At the failure load of beam B-2, the relative slip between the concrete slab and the steel girder of beam B-1 just equals 29.1% in comparison with that of beam B-2.

5. CONCLUSIONS

Experimental studying the effect of shear connection degree on the bending behavior of two continuous steel-concrete composite beams, the test results show that the degree of shear bond significantly affects the load-bearing capacity of the beam, deflection, and the relative slip between the concrete slab and the steel girder:

- Beam B-1 with an 81% shear connection degree has a 21% higher load-bearing capacity compared to beam B-2 with a 50% shear connection degree.

- At the failure load of beam B-2, the deflection of beam B-1 is only 51.4% compared to the deflection of beam B-2.

- At the failure load of beam B-2, the relative slip between the concrete slab and the steel girder of beam B-1 equals 29.1% in comparison with that of beam B-2.

Acknowledgment

We acknowledge Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), Vietnam National University Ho Chi Minh City (VNU-HCM) for supporting this study.

REFERENCES

[1] Giovanni Fabbrocino, Gaetano Manfredi, Edoardo Cosenza. Ductility of composite beams under negative bending: an equivalence index for reinforcing steel classification. Journal of Constructional Steel Research, 57, pp. 185-202, 2001.

[2] Jianguo Nie, Jiansheng Fan, and C. S. Cai. Stiffness and Deflection of Steel-Concrete Composite Beams under Negative Bending. Journal of Structural Engineering, Vol. 130, No.11, pp. 1842-1851, 2004.

[3] Wang Jingfeng; Li Guoqiang. Bending and rotational behavior of semi-continuous composite beams. Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China, Vol. 2, No.2, pp. 116-122, 2008.

[4] Natalino Gattesco, Lorenzo Macorini, and Massimo Fragiacomo. Moment Redistribution in Continuous Steel-Concrete Composite Beams with Compact Cross Section. Journal of Structural Engineering, Vol. 136, No.2, pp. 193-202, 2010.

[5] G. Vasdravellis, B. Uy, E.L. Tan, B. Kirkland. Behaviour and design of composite beams subjected to negative bending and compression. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 79, pp. 34–47, 2012.

[6] Sylvester O. Osuji, Oziegbe I. Oria-Usifo. Experimental Study of Steel-Concrete Composite Beams Subjected to Negative Bending by Point Loading at Mid-Span Considering Load - Deformation Characteristics. International Journal of Civil and Structural Engineering Research, Vol. 5, Issue 2, pp. 28-38, 2017.

[7] Liu Xiaoyang, Tang Lei; Jing Yucai, Xiang Junning, Tian Xiaoyang, Liu Wenzhuo, Huang Yue, Zhang Guangqiao, Zhao Wei, Yang Guotao. Behaviour of continuous steel-concrete composite beams strengthened with CFRP sheets at hogging-moment region. Composite Structures, Vol. 291, pp. 115695-115695, 2022.

[8] Lou Tiejiong, Wu Sishun, Chen Bo. Effect of reinforcement on the response of continuous steel-concrete composite beams. Case Studies in Construction Materials, Vol. 16, pp. 1-15, 2022.

[9] Wen Zeng; Liang Fan; Fengmin Chen; Shifeng Zhu. Theoretical, experimental, and numerical simulation studies on interface slip in steel-concrete composite continuous beams with high-strength bolted connectors. Structures, Vol. 71, pp. 108-126, 2025.

[10] Le Van Phuoc Nhan. Experimental studying the effect of transverse reinforcement passing through perfobond holes on the structural behavior of perfobond shear connection. Journal of Materials and Construction, Vol. 14, No. 01, pp. 12-17, (2024).

[11] Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Management Centre: rue de Stassart, 36 B-1050 Brussels.

■Ngày nhận bài: 23/02/2026 ■Ngày sửa bài: 06/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 18/3/2026

Application of materials with special properties to reinforce structures in emergencies

Áp dụng một số vật liệu có tính chất đặc biệt để gia cường công trình trong tình trạng khẩn cấp

> PHD NGUYEN HUU THE
Le Quy Don Technical University, Ministry of National Defence
Email: thepp@mta.edu.vn

ABSTRACT

This paper presents the results of experiments on the mechanical properties of Polyurea paints and FRP materials, determining the displacement of brick walls under the impact of blast waves in an air environment, both with and without reinforcement of special materials, at different distances. The data obtained, combined with analysis and evaluation, will help propose solutions for converting the function of some civil structures to serve national defence and security purposes in high-tech warfare and non-contact warfare.

Keywords: Blast wave; air; displacement.

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả thí nghiệm tính chất cơ lý của vật liệu sơn Polyurea, vật liệu FRP, xác định chuyển vị của tường gạch khi chịu tác động của sóng nổ trong môi trường không khí khi không gia cường, được gia cường bằng vật liệu đặc biệt cho các khoảng cách khác nhau. Từ số liệu thu nhận được, kết hợp với việc phân tích, đánh giá sẽ giúp đưa ra các giải pháp trong việc chuyển đổi công năng sử dụng của một số công trình dân sự chuyển sang phục vụ nhiệm vụ quốc phòng, an ninh trong chiến tranh công nghệ cao, chiến tranh không tiếp xúc.

Từ khóa: Sóng nổ; không khí; chuyển vị.

1. PRESENT THE ISSUE

With the complex, constantly changing regional and global political security situation, authorities, when developing operational and defence plans in the region, are keen to convert the functions of some civil structures to serve national defence and security purposes. Therefore, strengthening the structure of buildings to enhance their capacity to serve combat missions and logistical and technical support areas has high practical value and feasibility.

2. FORMULATE THE PROBLEM AND THE CONTENT OF THE EXPERIMENT

2.1. Formulate the problem

Currently, the process of developing plans to transition localities from peacetime to a state of emergency for national defence requires designated areas for warehouses or logistical and technical support facilities to serve wartime operations. Therefore, research on planning and converting the functions of civil construction into buildings serving national defence and security purposes has practical value, and the use of special materials in reinforcing those structures has scientific and practical significance and feasibility, saving costs and time in putting the construction into use [1], [2], [3].

2.2. Experiment content

Using a blast test site at a military area to conduct blast experiments, thereby determining the effectiveness of applying special materials in reinforcing brick wall structures under the impact of air blast waves.

Using air blast wave pressure sensors to determine the blast wave pressure value impacting the brick wall, and the displacement value of the brick wall.

Using displacement sensors to determine the displacement value of the brick wall under the impact of air blast waves.

The sensors are connected to signal cables and measuring equipment, and a computer with a pre-installed specialized application.

Figure 1. Testing the mechanical properties of materials

Figure 2. Field experiments

2.3. Calibration work

- At the blasting site, the author implemented a model with four brick walls using mortar grade 75#, with the measurement of RxH (1.5 m x 1.5 m). Surrounding the walls are reinforced concrete structures using concrete grade 250#, measuring 15 cm x 15 cm (h x b), [4], [5].

- The components were cleaned before experimenting, and the measuring equipment, the continuity of the detonator, and the signal wires from the Tenso to the measuring device were checked.

Explosives were placed with quantities ranging from 200g to 800g, and the distance varied from 0 to 750 cm.

2.4. Experiment sequence

Step 1: Prepare the brick wall surface, including cleaning and leveling, before applying the reinforcing material (Polyurea paint and FRP membrane).

Step 2: The reinforcing material layer consists of (Polyurea paint and FRP membrane) with varying thicknesses from 2 mm to 5 mm.

Step 3: Prepare an amount of TNT explosive weighing between 200g and 400g.

Step 4: Prepare the racks to hang the explosives, and the electrical wiring system for the detonation operation.

Step 5: Prepare the displacement sensor; the measuring equipment system is connected to the sensor.

2.5. Polyurea Paint Material Testing

a. Preparation of Polyurea paint samples and equipment for testing

Figure 3. Polyurea paint material tensile test sample

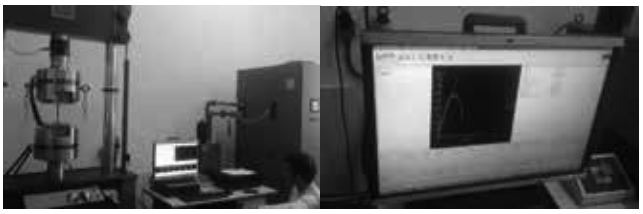


Figure 4. Tensile testing equipment in the Experimental Laboratory

b. Measurement results for Polyurea Paint Samples No. 01, 02, 03, 04, 05

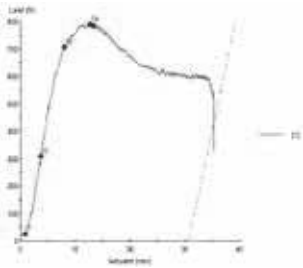


Figure 5. Graph of the relationship between force and elongation (Sample 1)

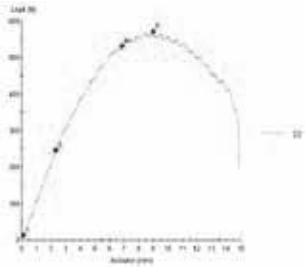


Figure 6. Graph of the relationship between force and elongation (Sample 2)

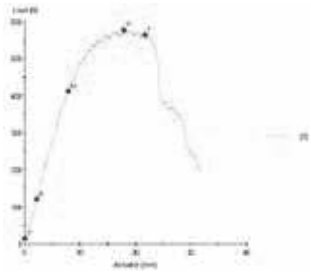


Figure 7. Graph of the relationship between force and elongation (Sample 3)

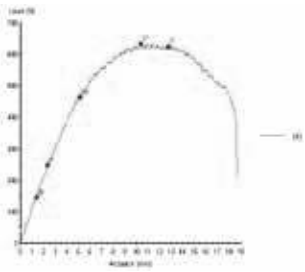


Figure 8. Graph of the relationship between force and elongation (Sample 4)

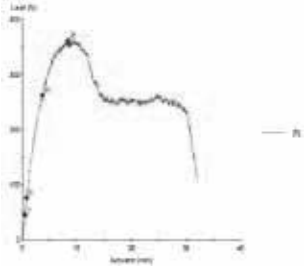


Figure 9. Graph of the relationship between force and elongation (Sample 5)

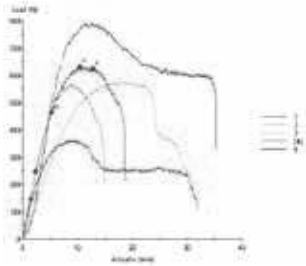


Figure 10. Graph of the relationship between force and elongation (Sample No. 1 ,2 ,3, 4, 5)

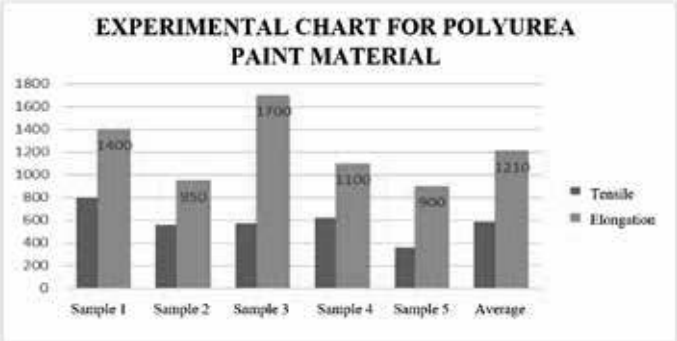


Figure 11. Experimental chart for Polyurea Paint material

Table 1. Summary of sample tensile testing results for Polyurea paint material

No.	Sample size for Polyurea paint			Tensile force (N)	Elongation (µm)	Ratio (%) between elongation/tensile force
	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Sample 1	120	25	4	800	14000	1750
Sample 2	118	33	6	560	9500	1696.4
Sample 3	112	29	6	570	17000	2982.4
Sample 4	116	24	7	620	11000	1774.2
Sample 5	117	26	9	360	9000	2500
Aveage	**116,6**	**27.4**	**6.4**	**582**	**12100**	**2079.03**

2.6. FRP Fiber Material Testing

a. Preparation of FRP fiber samples and equipment testing.

Figure 12. FRP Fiber Material Sample Experiment

Figure 13. Tensile testing equipment in the Experimental Laboratory

b. Measurement results for FRP fiber material samples No. 06, 07, 08, 09, 10, 11

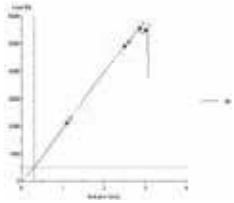


Figure 14. Graph of the relationship between force and elongation (Sample 6)

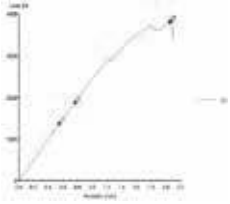


Figure 15. Graph of the relationship between force and elongation (Sample 7)

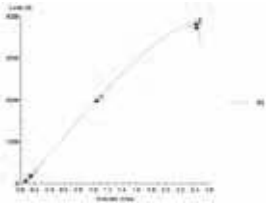


Figure 16. Graph of the relationship between force and elongation (Sample 8)

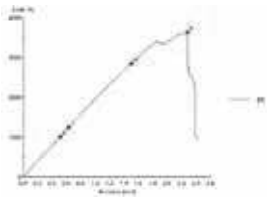


Figure 17. Graph of the relationship between force and elongation (Sample 9)

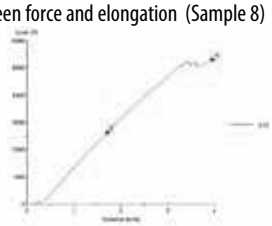


Figure 18. Graph of the relationship between force and elongation (Sample 10)

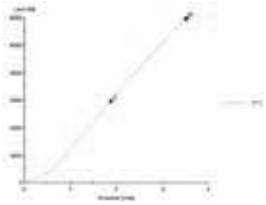


Figure 19. Graph of the relationship between force and elongation (Sample 11)

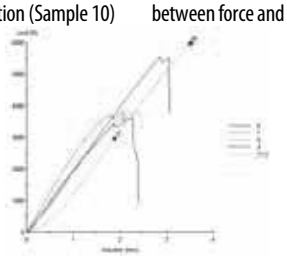


Figure 20. Graph of the relationship between force and elongation of FRP fibers (Samples 6, 7, 8, 9, 11)

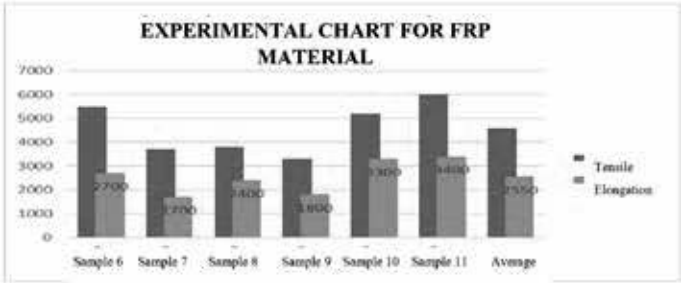


Figure 21. Experimental chart for Polyurea Paint material

General comments: Based on the experimental data in Tables 1 and 2, the author found that Polyurea paint has a higher elongation-to-tensile strength ratio than FRP fibers, approximately 3.6 times greater. This is an important factor that helps experts choose which material to use for reinforcing building structures for each type of construction project, ensuring requirements are met and to achieve economic efficiency.

2.7. Determine the displacement value at the wall's center

2.7.1. Experiment case 1 (For brick walls that have not been reinforced with special materials)

a. First experiment

The input parameters are as follows: Use explosive quantity M = 200 g; The explosives are suspended at a height of H_{TNT} = 750 (mm), distance R_1=500 (mm) calculated from the explosive charge to the front of the wall; displacement sensor placed at height H_{CV} = 750 (mm), distance R_2 = 500 (mm) from the displacement sensor position to the back of the wall [6], [7].

Table 2. Summary of experimental results for FRP fiber materials

No.	FRP Fiber's Sample Size Experiment			Tensile force (N)	Elongation (μm)	Ratio (%) between elongation/tensile force
	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Sample 6	115	26	1	5500	2700	49.09
Sample 7	111	25	1	3700	1700	45.94
Sample 8	116	21,5	1	3800	2400	63.16
Sample 9	114	22,5	1	3300	1800	54.54
Sample 10	110	26,5	1	5200	3300	63.46
Sample 11	114,5	23,5	1	6000	3400	56.67
Aveage	**113.42**	**24.17**	**1**	**4583**	**2550**	**55.64**

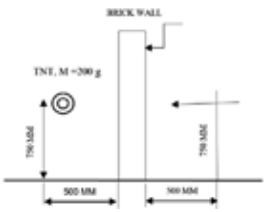


Figure 22. Experiment Diagram

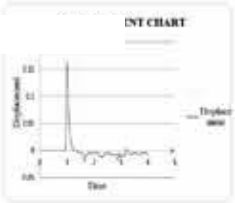


Figure 23. Displacement value chart

b. Second experiment

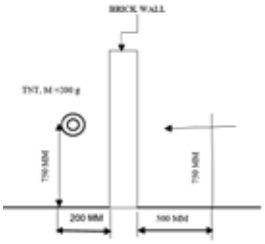


Figure 24. Experiment Diagram

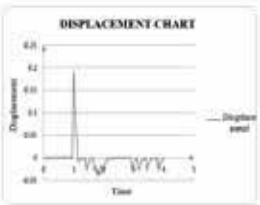


Figure 25. Displacement value chart

The input parameters are as follows: Use explosive quantity M = 200 g; Specific explosive charge suspension position at height H_{TNT} = 750 (mm), distance R_1=200 (mm) from the explosive charge to the front of the wall, displacement sensor placed at height H_{CV} = 750 (mm), distance R_2 = 500 (mm) from the displacement sensor position to the back of the wall.

2.7.2 Experiment case 2 (For brick walls reinforced with new material (FRP)

a. First experiment.

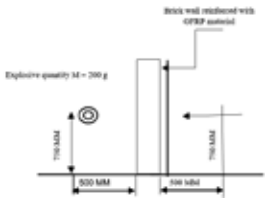


Figure 26. Experiment Diagram

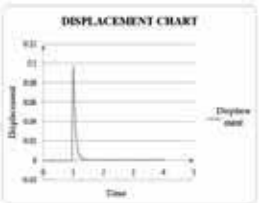


Figure 27. Displacement value chart

The input parameters are as follows: Use **explosive quantity M = 200 g**; Specific explosive charge suspension position at height

H_{TNT} = 750 (mm), distance R=500 (mm) from the explosive charge to the front of the wall. displacement sensor placed at height H_{CV} = 750 (mm), distance R_2 = 500 (mm) from the displacement sensor position to the back of the wall.

b. Second experiment.

The input parameters are as follows: Use explosive quantity M = 200 g; Specific explosive charge suspension position at height H_{TNT} = 750 (mm), distance R_1=200 (mm) from the explosive charge to the front of the wall. displacement sensor placed at height H_{CV} = 750 (mm), distance R_2 = 500 (mm) from the displacement sensor position to the back of the wall.

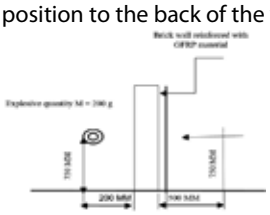


Figure 28. Displacement value chart

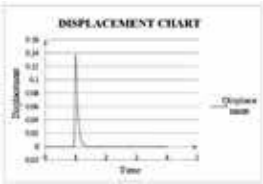


Figure 29. Displacement value chart

2.7.3. Experiment case 3 (For brick walls reinforced with new material (Polyurea)

a. First experiment.

The input parameters are as follows: Use explosive quantity M = 200 g; Specific explosive charge suspension position at height H_{TNT} = 750 (mm), distance R_1 = 500 (mm) from the explosive charge to the front of the wall; displacement sensor placed at height H_{CV} = 750 (mm), distance R_2 = 500 (mm) from the displacement sensor position to the back of the wall.

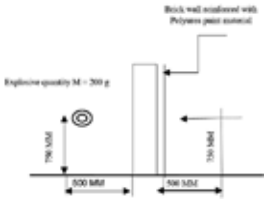


Figure 30. Experiment Diagram

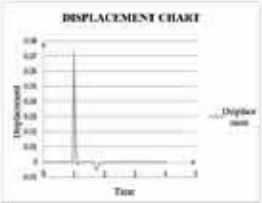


Figure 31. Displacement value chart

b. Second experiment.

The input parameters are as follows: Use explosive quantity M = 200 g; Specific explosive charge suspension position at height H_{TNT} = 750 (mm), distance R_1 = 200 (mm) from the explosive charge to the front of the wall; displacement sensor placed at height H_{CV} = 750 (mm), distance R_2 = 500 (mm) from the displacement sensor position to the back of the wall.

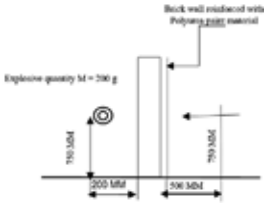


Figure 32. Experiment Diagram

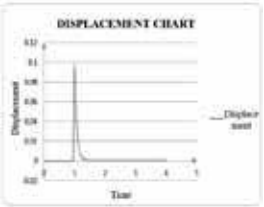


Figure 33. Displacement value chart

2.8. Results summary table

The experimental results are described in Table 3. Based on the data in Table 3, the graph in Figure 14 can be constructed.

Table 3. Displacement value of the wall.

Experiment Case	Experiment content	TNT weight (g)	The distance from the TNT explosive charge to the brick wall (R_1)	Distance from the displacement sensor to the brick wall (R_2)	Displacement value (μm)
CASE 1	Experiment 1 (TN1 KGC)	M = 200 g	R_1 = 500 mm	R_2 = 500 mm	170
	Experiment 2 (TN2 KGC)	M = 200 g	R_1 = 200 mm	R_2 = 500 mm	190
	GTTB KGC	M = 200 g	R_1 = 200 mm	R_2 = 500 mm	180
CASE 2	Experiment 1 (TN1 GFRP)	M = 200 g	R_1 = 500 mm	R_2 = 500 mm	90
	Experiment 2 (TN1 GFRP)	M = 200 g	R_1 = 200 mm	R_2 = 500 mm	140
	GTTB GFRP	M = 200 g	R_1 = 200 mm	R_2 = 500 mm	115
CASE 3	Experiment 1 (TN1 POLYUREA)	M = 200 g	R_1 = 500 mm	R_2 = 500 mm	75
	Experiment 2 (TN1 POLYUREA)	M = 200 g	R_1 = 200 mm	R_2 = 500 mm	95
	GTTB POLYUREA	M = 200 g	R_1 = 200 mm	R_2 = 500 mm	85

Figure 34: Displacement diagram

Comment: Based on experimental data, the author found that when using FRP material to reinforce the structure, the displacement value decreased by 36.11% compared to the unreinforced structure; while when using POLYUREA paint material to reinforce the structure, the displacement value decreased by 52.78% compared to the unreinforced one. Thus, the use of FRP and POLYUREA paint materials to reinforce the structure proved effective in protecting the structure against near-explosive events.

3. CONCLUSION

Using experimental methods to survey, research, and apply new materials such as FRP fibers and Polyurea paint in reinforcing load-bearing structures like brick walls for civil engineering projects to increase the structural resistance, and to repurpose some building components for national defence and security use under special loads such as blast loads and earthquake loads. The application of new materials to enhance structural resistance has significant practical value in the renovation, repair, and reinforcement of dual-use structures, bringing economic and technical benefits and strengthening national defence.

REFERENCES

[1] Jain, R.K.and Lee, L. (Eds.), "Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Infrastructure Applications: Focusing on Innovation, Technology Implementation and Sustainability". Springer, 2023.

[2] Saleeb AF. Constitutive models for soils in landslides. Ph.D. Thesis, Purdue University, 2024.

[3] Marc Broekaert. Polyurea spray coatings-The technology and latest developments. *Huntsman Polyurethanes*, Belgium, 2023.

[4] Shamsher P. Soil Dynamics, Chapter 4. McGraw-Hill: New York, 2024.

[5] Pande GN, Zienkiewicz OC. Soil MechanicsTransient and Cyclic Loads, Chapter 2. Wiley: Chichester, 2024.

[6] Fredlund DG, Rahardjo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils, Chapters 9 and 12. Wiley: Chichester, 2024.

Jain, R. K. and Lee, L. (Eds.) 2012. "Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for

[7] Dudley J Primeaux II, PCS. Industrial Coatings Polyurea Elastomer Technology. *Primeaux Associates LLC*, 2024.

■Ngày nhận bài: 23/02/2026 ■Ngày sửa bài: 02/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 11/3/2026

Comparative analysis of load calculations for ship mooring buoy chains under the design standards of the former Soviet Union and Vietnam

Nghiên cứu so sánh tính toán tải trọng tác dụng lên xích phao neo tàu theo tiêu chuẩn thiết kế của Liên Xô cũ và Việt Nam

> PROF LE THI HUONG GIANG[1], DR TRAN NGOC AN[1], DR LE TUNG ANH[2,*]
[1]Vietnam Maritime University
[2]Vietnam Maritime and Waterway Administration
[*]Email: anh.eng.vmu@gmail.com

ABSTRACT

The design of a ship mooring buoy requires careful consideration of environmental loads acting on floating bodies, including wind, current and wave effects. By combining these loads, the resulting forces on the mooring chain can be determined, enabling the selection of an appropriate chain diameter. In Vietnam, current design tables for ship mooring buoys are primarily based on either Soviet-era or Vietnamese design standards. These two standards have been applied in parallel without clear guidance on their comparison or suitability. This study focuses on evaluating the loads acting on floating bodies to determine mooring chain forces according to both standards and applies the calculations to a representative case. The analytical results provide a comparative assessment and propose practical recommendations for the appropriate use of these standards in ship mooring buoy design.

Keywords: Mooring buoy; environmental loads; mooring chain; former Soviet standards; Vietnamese design standards.

TÓM TẮT

Thiết kế phao neo tàu đòi hỏi phải quan tâm đến tải trọng môi trường tác dụng lên các kết cấu nổi, bao gồm tác động của gió, dòng chảy và sóng. Tổng hợp các tải trọng này, có thể xác định được lực tác dụng lên xích neo, từ đó lựa chọn đường kính xích cho phù hợp. Tại Việt Nam, các bảng tra thiết kế phao neo tàu hiện nay chủ yếu dựa trên các tiêu chuẩn thiết kế của Liên Xô cũ hoặc các tiêu chuẩn thiết kế của Việt Nam. Hai tiêu chuẩn này đang được áp dụng song song nhưng chưa có hướng dẫn rõ ràng về việc so sánh hay lựa chọn sao cho phù hợp. Nghiên cứu này tập trung đánh giá cá tải trọng tác dụng lên kết cấu nổi để xác định lực tác dụng lên xích neo theo cả hai tiêu chuẩn, đồng thời áp dụng tính toán cho một trường hợp cụ thể. Kết quả tính toán cho phép đánh giá, so sánh và đề xuất các khuyến nghị thực tiễn về việc sử dụng các tiêu chuẩn này trong thiết kế phao neo tàu.

Từ khóa: Phao neo tàu; tải trọng môi trường; xích neo; tiêu chuẩn Liên Xô cũ; tiêu chuẩn thiết kế Việt Nam.

1. INTRODUCTION

Mooring buoys are essential components in maritime and port engineering, serving to maintain a ship's position during berthing, anchoring, or temporary mooring operations. The design of such buoys involves not only the stability and strength of the buoy body but also the performance of the mooring system, including chains, anchors and connection devices. Among these, the mooring chain plays a crucial role in transferring environmental loads from the floating bodies to the seabed anchorage. Several studies have presented analyses of mooring buoys and mooring chains, as reported in [1, 2].

In practice, the main environmental actions affecting a mooring buoy system are wind, wave and current loads acting simultaneously on both the buoy and the moored vessel. The combination of these loads governs the resultant forces on the mooring chain, from which the appropriate chain diameter is determined. In Vietnam, existing design tables for ship mooring buoys have been developed mainly according to Soviet-era standards [3] and Vietnamese standards

[4-6]. However, these two standards have been applied in parallel without explicit comparison or guidance for practical selection.

This study aims to analyze and compare the calculation of environmental loads acting on ship mooring buoys following the two mentioned standards. A representative example is presented to illustrate the differences in calculated results. Based on the analysis, comparative discussions and recommendations are proposed for the practical application of these standards in ship mooring buoy design.

2. SHIP AND BUOY LOADS UNDER SOVIET MINISTRY OF DEFENSE GUIDELINES

According to [3], the loads acting on the ship and the buoy are calculated as follows:

** Wind load:*

$$W_x = C_x q\,\Omega_x\,(\mathrm{T})$$
$$W_y = C_y q\,\Omega_y\,(\mathrm{T}) \quad (1)$$

Where: C_x and C_y are the dimensionless aerodynamic coefficients obtained from graphs depending on the wind angle *a* (the angle between the wind direction and the ship's longitudinal axis O*x* in degrees); *q* is the dynamic pressure of the wind; and W_x, W_y are the projected wind areas in the O*x* and O*y* directions, respectively.

The dynamic pressure of the wind is calculated using the following equation:

$$q = \frac{V^2}{16}\times 10^{-3}\left(\mathrm{T/m^2}\right) \quad (2)$$

Where: *V* is the wind velocity, or it can be obtained from tabulated values as provided in [3].

The projected wind areas are calculated as follows:

$$\Omega_x = 2B\left(H_g - Z_g\right)\left(\mathrm{m^2}\right)$$
$$\Omega_y = 1.5L\left(H_g - Z_g\right)\left(\mathrm{m^2}\right) \quad (3)$$

Where: *L*, *B*, H_g and Z_g denote the length, breadth, freeboard and draft of the floating body (ship or buoy), respectively (in meters).

** Current load:*

$$N_x = \left(K_1W_1 + K_2W_2\right)\left(V\cos\alpha\right)^2(\mathrm{T})$$
$$N_y = \left(K_1W_1 + K_2W_2\right)\left(V\sin\alpha\right)^2(\mathrm{T}) \quad (4)$$

Where: *V* is the current velocity (m/s); W_1 is the projected frontal area of the floating body (m²); W_2 is the projected bottom and side area of the floating body (m²); and *a* is the angle between the current direction and the ship's longitudinal axis O*x* (degrees).

The projected areas are calculated as follows:

$$W_1 = BZ_g\left(\mathrm{m^2}\right)$$
$$W_2 = L\left(B + 2Z_g\right)\left(\mathrm{m^2}\right) \quad (5)$$

Where: K_1 and K_2 are empirical coefficients; with K_1 = 0.06 (Ts²/m⁴) and K_2 = 0.0002 (Ts²/m⁴).

** Wave load:*

$$P_x = \gamma h Z_g B K_1 K_3\,(\mathrm{T})$$
$$P_y = \gamma h Z_g L K_1 K_2 K_3\,(\mathrm{T}) \quad (6)$$

Where: *g* is the density of water (T/m³); *h* is the design wave height (m); K_1 is a dimensionless coefficient that depends on the ratio between the draft of the floating body and the design wavelength *l* and is obtained from charts; K_2 is a dimensionless coefficient depending on the incident angle *a* between the wave direction and the longitudinal axis O*x* of the floating body, and is obtained from tables and K_3 is a dimensionless coefficient accounting for the periodic nature of wave action and the flexibility of the mooring system of the floating body, and is also obtained from tables.

3. SHIP AND BUOY LOADS UNDER VIETNAMESE STANDARDS

3.1. Ship loads

According to [4], the loads acting on the ship are calculated as follows:

** Wind load:*

The transverse and longitudinal components of the wind force acting on the ship are determined as follows:

$$W_q = 73.6\times 10^{-5} A_q V_q^2 \xi_q\,(\mathrm{kN})$$
$$W_n = 49.0\times 10^{-5} A_n V_n^2 \xi_n\,(\mathrm{kN}) \quad (7)$$

Where: A_q and A_n are the projected wind areas in the transverse and longitudinal directions of the ship, respectively; V_q and V_n denote the transverse and longitudinal components of the wind velocity (m/s), respectively.

The following relationships are given:

$$A_q = \alpha_q L_{\max}^2\left(\mathrm{m^2}\right)$$
$$A_n = \alpha_n B_{\max}^2\left(\mathrm{m^2}\right) \quad (8)$$

Where: a_q, a_n, x_q, x_n are dimensionless coefficients depending on the type and dimensions of the ship.

** Current load:*

The transverse and longitudinal components of the current force acting on the ship are determined as follows:

$$Q_\omega = 0.59 A_1 v_t^2\,(\mathrm{kN})$$
$$N_\omega = 0.59 A_t v_1^2\,(\mathrm{kN}) \quad (9)$$

Where: A_1 and A_t are the projected underwater areas in the transverse and longitudinal directions of the floating body (m²); and v_1 and v_t are the current velocities in the transverse and longitudinal directions, respectively (m/s).

The projected underwater areas are calculated as follows:

$$A_1 = \alpha_s L Z_g\left(\mathrm{m^2}\right)$$
$$A_t = BZ_g\left(\mathrm{m^2}\right) \quad (10)$$

** Wave load:*

The transverse and longitudinal components of the wave force acting on the ship are determined as follows:

$$Q = \chi\gamma_1\rho g h A_1\,(\mathrm{kN})$$
$$N = \chi\rho g h A_t\,(\mathrm{kN}) \quad (11)$$

Where: *r* is the density of water (T/m³); *g* is the gravitational acceleration (m/s²); *c* is a coefficient that depends on the ratio (d_s/*l'*), where d_s is the ship's draft and *l'* is the mean wavelength, obtained from charts (m²) and g_1 is a coefficient depending on the ratio (a_t/*l'*), where a_t is the maximum beam of the ship, obtained from tables (m).

3.2. Buoy loads

According to [6], the loads acting on the buoy are calculated as follows:

** Wind load:*

The wind force acting on the buoy is determined as:

$$F_w = P_w A_w\,(\mathrm{kg}) \quad (12)$$

where A_w is the projected wind area of the buoy (m²); and P_w is the wind pressure, given by:

$$P_w = 0.0623 C_s C_h v_w^2\left(\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m^2}}\right) \quad (13)$$

Where: v_w is the wind velocity (m/s); and C_s and C_h are the

dimensionless shape and height coefficients, respectively.

** Current load:*

The current force acting on the buoy is determined as:

$$F_c = \left(\frac{1}{2}\right)\rho C_D A_c U_c^2 \left(\text{kN}\right) \quad (14)$$

Where: r is the density of water (T/m³), A_c is the projected underwater area of the buoy (m²); C_D is the dimensionless drag coefficient, determined according to [7]; and U_c is the current velocity (m/s).

** Wave load:*

Reference [6] only recommends the use of appropriate analytical methods, such as strip theory, wave diffraction theory, or the Morison equation. Therefore, to calculate the wave force acting on the buoy, it is necessary to refer to studies employing the Morison equation, such as [5], [8] and [9]. In the following section, the wave force acting on the buoy is determined using the formulations presented in [5] and [9].

The maximum wave load occurs when the wave crest reaches the buoy and is expressed as:

$$F_s = \left(\frac{1}{2}\right)\rho C_D A_s U_s^2 \left(\text{kN}\right) \quad (15)$$

Where: r is the density of water (T/m³); C_D lis the dimensionless drag coefficient; A_s is the projected area of the buoy normal to the wave propagation direction (m²); and U_s is the water particle velocity in the longitudinal direction, determined as follows:

$$U = \frac{\pi h}{T}\frac{\cosh\left[2\pi\left(z+H\right)/L\right]}{\sinh\left(2\pi H/L\right)}\left(\text{m/s}\right) \quad (16)$$

Where: H is the water depth (m); T is the wave period (s); L is the wavelength (m) and z is the vertical coordinate, taken as positive upwards, with $z = 0$ corresponding to the still water level.

4. EXAMPLE

In this section, the parameters of the ship and the mooring buoy are presented together with the meteorological and hydrological conditions. The meteorological and hydrological data are summarized in Table 1, while the specifications of the mooring buoy and the ship are presented in Tables 2 and 3, respectively.

The wind and current are considered to act along the longitudinal direction of the ship, while waves are considered to act along the transverse direction of the ship.

Table 1. Meteorological and hydrological data

Description	Value	Unit
Design wind velocity	20.70	m/s
Current velocity parallel to the ship's side	1.62	m/s
Wave height	0.50	m
Wavelength	10.00	m
Design high water level	+3.75	m
Design low water level	+0.80	m
Bottom elevation	-7.80	m

Table 2. Parameters of the ship mooring buoy

Description	Value	Unit
Height	1.50	m
Draft	1.06	m
Diameter	3.80	m

Table 3. Parameters of the ship

Description	Value	Unit
Length	113.56	m
Breadth	17.02	m
Freeboard	9.10	m
Full-load draft	7.32	m
Light draft	3.20	m

5. RESULTS AND DISCUSSIONS

Based on the data presented in Section 3, this section presents the calculated loads according to the design standards of the former Soviet Union and those of Vietnam. The calculation results obtained from the two standards are then compared with each other.

5.1. According to the Soviet design standard

The calculated wind, current, and wave loads according to the Soviet standard are presented in Tables 4 - 6. The summarized loads are shown in Table 7. Accordingly, the total loads acting on the fully loaded ship with the buoy are Fx = 27.04 T in the x-direction and Fy = 16.85 T in the y-direction; for the ballast ship with the buoy, the loads are Fx = 18.99 T in the x-direction and Fy = 7.50 T in the y-direction.

Table 4. Wind load calculations

Floating body	α (degrees)	C_x	C_y	W_x (m²)	W_y (m²)	W_x (T)	W_y (T)
Fully loaded ship	0	1.30	0.00	60.59	303.21	2.11	0.00
Lightly loaded ship	0	1.30	0.00	200.84	1005.01	6.99	0.00
Mooring buoy	0	1.30	0.00	1.67	1.67	0.06	0.00

Table 5. Current load calculations

Floating body	α (degrees)	V (m/s)	W_1 (m2)	W_2 (m2)	N_x (T)	N_y (T)
Fully loaded ship	0	1.62	124.59	3595.31	21.50	0.00
Lightly loaded ship	0	1.62	54.46	2659.58	9.97	0.00
Mooring buoy	0	1.62	4.03	24.00	0.65	0.00

Table 6. Wave load calculations

Floating body	a (degrees)	Z_g/l	K_1	K_2	K_3	P_x (T)	P_y (T)
Fully loaded ship	90	0.732	0.40	1.00	0.10	2.49	16.63
Lightly loaded ship	90	0.320	0.40	1.00	0.10	1.09	7.27
Mooring buoy	90	0.106	0.76	1.00	0.15	0.23	0.23

Table 7. Summary of loads

Floating body	Wind load		Current load		Wave load	
	W_x (T)	W_y (T)	N_x (T)	N_y (T)	P_x (T)	P_y (T)
Fully loaded ship	2.11	0.00	21.50	0.00	2.49	3.33
Lightly loaded ship	6.99	0.00	9.97	0.00	1.09	1.45
Mooring buoy	0.06	0.00	0.65	0.00	0.23	0.05

5.2. According to the Vietnamese design standard

The calculated wind, current, and wave loads according to the Vietnamese design standard are presented in Tables 8-14. The summarized loads are shown in Table 15. Accordingly, the total

loads acting on the fully loaded ship with the buoy are Fx = 28.26 T in the x-direction and Fy = 38.09 T in the y-direction; for the ballast ship with the buoy, the loads are Fx = 25.33 T in the x-direction and Fy = 27.79 T in the y-direction.

Table 8. Wind load coefficients

Ship type	α_q		α_n		z_q	z_n
	Loaded condition	Ballast condition	Loaded condition	Ballast condition		
Oil tanker	0.057	0.1	0.9	1.2	0.67	1.00

Table 9. Wind load calculations for the ship

Floating body	α (degrees)	V_q (m/s)	V_n (m/s)	A_q (m²)	A_n (m²)	W_q (T)	W_n (T)
Fully loaded ship	0	0.00	20.70	735.06	260.71	0.00	5.58
Lightly loaded ship	0	0.00	20.70	1289.59	347.62	0.00	7.44

Table 10. Current load calculations for the ship

Floating body	α (degrees)	A_1 (m²)	A_t (m²)	Q_w (T)	N_w (T)
Fully loaded ship	0	706.57	124.59	0.00	19.29
Lightly loaded ship	0	308.88	54.46	0.00	8.43

Table 11. Wave load calculations for the ship

Floating body	*a* (degrees)	*ds/λ'*	*X (m2)*	a_t/λ'	Y_1 *(m2)*	*Q (T)*	*N (T)*
Fully loaded ship	90	0.732	0.2	11.356	0.4	28.26	12.46
Lightly loaded ship	90	0.320	0.41	11.356	0.4	25.33	11.16

Table 12. Wind load calculations for the mooring buoy

Floating body	C_s	C_h	V_w (m/s)	P_w (kg/m²)	A_w (m²)	F_w (T)
Mooring buoy	1.00	1.00	20.7	26.69	1.672	0.045

Table 13. Current load calculations for the mooring buoy

Floating body	C_D	A_c (m2)	U_c (m/s)	F_c (T)
Mooring buoy	1.20	4.028	1.62	0.634

Table 14. Wave load calculations for the mooring buoy

Floating body	C_D	A_s (m²)	U_s (m/s)	F_s (T)
Mooring buoy	1.00	4.028	0.62	0.08

Table 15. Summary of loads

Floating body	Wind load		Current load		Wave load	
	W_q (T)	W_n (T)	Q_w (T)	N_w (T)	*Q* (T)	*N* (T)
Fully loaded ship	0.00	5.58	0.00	19.29	28.26	12.46
Lightly loaded ship	0.00	7.44	0.00	8.43	25.33	11.16
Mooring buoy	0.00	0.045	0.00	0.634	0.00	0.08

It is observed that the results obtained according to the Soviet standard and the Vietnamese standard differ significantly, with a relatively large discrepancy, particularly in the wave loads acting on the ship.

6. CONCLUSION

This study has summarized the calculation methods for determining the loads acting on the ship mooring buoy chain according to the former Soviet and Vietnamese design standards. The loads on the mooring chain were evaluated based on the environmental loads acting on the floating bodies (the ship and the buoy), including wind, current, and wave loads. The results indicate that the calculated loads differ between the two standards, with particularly large discrepancies observed in the wave loads acting on the ship. However, since the Soviet standard was originally developed for floating docks rather than for ships and buoys, its application in such cases should be approached with caution. Furthermore, as the loads acting on the buoy are relatively small compared with those acting on the ship, they may be neglected in the mooring chain calculations.

Acknowledgments: This work was supported by the Vietnam Maritime University under Grant DT25-26.89.

REFERENCES

[1] H.O. Berteaux. Buoy engineering. John Wiley & Sons, 1976.

[2] Shengjie Rui, Zefeng Zhou, Zhen Gao, Hans Petter Jostad, Lizhong Wang, Hang Xu, Zhen Gao. A review on mooring lines and anchors of floating marine structures. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 199, p. 114547, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114547.

[3] Ministry of Defense of the USSR. Instruction for the Calculation of External Forces and Mooring Systems of Floating Docks (Vietnamese Translation), 1970.

[4] Ministry of Transport of Vietnam. Loads and Effects (due to Waves and Ship Impact) on Hydraulic Structures (in Vietnamese), 22 TCN 222-95, 1995.

[5] Ministry of Science and Technology of Vietnam. Marine Port Facilities - Design Requirements - Part 2: Loads and Actions (in Vietnamese). TCVN 11820-2:2017, 2017.

[6] Ministry of Transport of Vietnam. National Technical Regulation on Classification and Construction of Mooring Buoys and Signal Buoys (in Vietnamese). QCVN 72:2014/BGTVT, 2014.

[7] British Standards Institution. Maritime works - Part 4: Code of practice for design of fendering and mooring systems. BS 6349-4:2014, 2014.

[8] John R Morison, Joseph W Johnson, Samuel A Schaaf. The force exerted by surface waves on piles. Journal of Petroleum Technology, 2 (05), pp. 149-154, 1950, doi: 10.2118/950149-G.

[9] The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan. Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan, Tokyo: OCDI, 2002.

■Ngày nhận bài: 23/02/2026 ■Ngày sửa bài: 06/3/2026 ■Ngày chấp nhận đăng: 18/3/2026

A study on technical English prepositional phrases based on Lexical Functions to support EMI students

Tìm hiểu cụm giới từ trong tiếng Anh kỹ thuật dựa trên hàm từ vựng nhằm hỗ trợ sinh viên học chuyên môn bằng tiếng Anh

> **PH.D NGUYEN THI HONG TUYEN**
The University of Transport and Communications; Email: nthtuyen@utc.edu.vn

ABSTRACT

Vietnamese technical students have the tendency to study English words as discrete units, which causes difficulties in producing stretches of words both in oral and written forms. The situation becomes more challenging when students study specialized subjects in English. Terminological as well as specialized vocabulary support, therefore, play an essential role in EMI (English as a Medium of Instruction) training. The study investigates the combination of prepositions and nouns in technical English language. It applies the qualitative research method of text analysis looking into technical English prepositional phrases based on Lexical Functions by Mel'čuk. The research results are common preposition-noun collocations and their degrees of popularity in the field of Highway Bridge Design. These collocations may be used to develop technical vocabulary databases to assist students study specialized subjects more effectively.

Keywords: Term; preposition; noun; prepositional phrase; collocation; lexical function; syntagmatic lexical function.

TÓM TẮT

Sinh viên kỹ thuật Việt Nam có xu hướng học từ tiếng Anh như các đơn vị đơn lẻ, điều này gây khó khăn trong việc tạo ra các chuỗi từ trong văn nói và viết. Vấn đề trở nên khó hơn khi sinh viên học các môn chuyên ngành bằng tiếng Anh. Do vậy, hỗ trợ thuật ngữ và từ vựng chuyên ngành đóng vai trò quan trọng trong đào tạo EMI (giảng dạy chuyên ngành bằng tiếng Anh). Nghiên cứu này tìm hiểu sự kết hợp của giới từ và danh từ trong tiếng Anh kỹ thuật, áp dụng phương pháp nghiên cứu định tính - phân tích văn bản, xem xét các cụm giới từ tiếng Anh kỹ thuật dựa trên Hàm từ vựng của Mel'čuk. Kết quả nghiên cứu là các cụm giới từ phổ biến trong lĩnh vực thiết kế cầu đường bộ và mức độ phổ biến của chúng, có thể được sử dụng làm cẩm nang từ vựng để giúp sinh viên học chuyên ngành bằng tiếng Anh hiệu quả hơn.

Từ khóa: Thuật ngữ; giới từ; danh từ; cụm giới từ; kết hợp từ; hàm từ vựng; hàm từ vựng ngữ đoạn

1. INTRODUCTION

In the past couple of decades, thousands of Vietnamese engineers have been trained in Vietnam and abroad via English as a medium of instruction (EMI), which is defined as: "the use of English language to teach academic subjects in countries or jurisdictions where the first language (L1) of the majority of the population is not English" [1]. The Government and Educational Ministry have also issued resolutions and launched foreign language policies to train competent state staff capable of working in the international environment. In resonance with the 2020 Foreign Language Project, Session 7th Resolution of the Communist Party's 12th Central Committee dictates that towards 2030, 40% -50% of strategic officials and 50% - 60% of state staff working in Departments of Ministries and corresponding functional institutions will be able to communicate in the international environment" (Session 7th Resolution of the Communist Party's 12th Central Committee). In response to the requirements of specialized English by the work market and the Government, EMI has become a widespread practice in Vietnam. The goals are to help students learn content and communication skills while improving their English proficiency, promote international exchange, raise the quality of prestige and educational programs, and provide a well-qualified bilingual work force who can compete in the global markets.

Being trained via English, students face with quite a few difficulties, one of which is mastering a large number of terms in various subjects. Besides, many Vietnamese students are used to learning vocabulary as separate units rather than acquiring stretches of words or phrases. This results in English language errors because the combination patterns of English and Vietnamese differ greatly. Various efforts have been taken to develop tools to sport EMI students acquire technical vocabulary. Beaugrande notes that terminology and language support makes "an organizational and pedagogical tool for offering or acquiring competence and fluency in a (subject) field" [2]. However, studies indicate that the pedagogical potentials of terminological activity haven't been exploited because in most cases terminology resources have been considered just as vocabulary lists.

At the University of Transport and Communications (UTC), annually hundreds of students enroll in the High - Quality Training Programs administered by the International Training Department (INED). Student polls have revealed that specialized language, especially terms and specialized vocabulary, represent one of the greatest challenges to EMI students in specialized knowledge acquisition. The INED is going to recruit approximately 800 students in the school year of 2026 - 2027

to promote EMI training at the UTC as decreed by the Government's 222/2025/NĐ-CP resolution on teaching and learning in foreign languages, which has become effective since September 25th, 2025. As respond to the needs for EMI training at the UTC, all departments have carried out High - Quality training programs and English specialized language support is an indispensable part of the campaign.

As regard English language acquisition, it is said that if one is good at English prepositions, he (or she) will be good at English because there are marked differences between English and Vietnamese prepositions, which lie in the various combinations of prepositions and nouns (prepositional phrases). Prepositional phrases also appear abundantly in technical language, so it is worth researching into this particular language feature.

This study is concerned with text analysis to identify preposition - noun (or noun phrase) combinations based on Lexical Functions by Mel'čuk [3] with triangulation with domain experts from meaning perspective. Unlike other studies conducted with the top-down approach by specialist experts based on their own intuition and subjective judgment, this is the bottom-up study investigating prepositional phrases under investigation, which were extracted from the technical textbook of Highway Bridge Design [4], can be used to create electronic technical vocabulary databases for practical purposes.

2. RESEARCH ON LANGUAGE SUPPORT FOR EMI TRAINING

Recently, with the development of EMI programs in many developing countries, researchers have focused attention to terminology and specialized vocabulary investigation for pedagogical purposes. Bilingual and multilingual students need various forms of support to get on well with tertiary education. Antia and Dyers researched the provision of multilingual lecture resources to affirm the biliteracy of university students. The authors state that many language challenges appear when classrooms are becoming increasingly multilingual and multicultural [5]. Madiba has another study related to the use of corpus-based multilingual concept glossaries to acquire fast-track concept literacy among English as Additional Language students. The pedagogic value of term resources is widely acknowledged by scholars in the field of academic literacy [6].

Like the situation at the UTC, it is widely accepted that most of students from poor academic and family backgrounds enter university with limited English proficiency, which makes it difficult for them to learn and understand concepts in different content learning areas. Thus, the development of multilingual vocabulary resources is necessary to provide academic support to these students. The development of these glossaries constitutes an important intervention strategy to optimize concepts learning in different content areas.

In Vietnam, there have been studies into specialized language; for example, Hồng (2015) [7] studies nomenclature characteristics of police terms in Chinese from meaning perspective. The author concludes that denominalization reflects cognitive characteristics of police terms. As regards Agent-Patient relationship of the action, police terms in Chinese can be divided into two kinds: one referring to the Agent that performs the action and the other referring to the Patient that is affected by the action. He also mentions the surface and deep structures of the verbs. *Paradigmatic* term relations rather than *syntagmatic* relations in a series of events are considered of in this study.

In addition, Thiết (2018) researches typical characteristics of Telecommunications terminology in English from *structural* form and meaning perspectives [8]. Structural and semantic models of English Telecommunications terms were discovered by analyzing the terms' structural characteristics, the number of componential elements, grammatical relationships, and word class characteristics. The study discovered nine formations models, six content domains, and the typical adnominalization characteristics of English telecommunication terms. The study contributes to the standardization of the Vietnamese Telecommunications terms.

Despite the ongoing research into terminology management and standardization, there have been few studies into terminology and English language support for EMI students. Disciplinary and language matters seem to stand apart; there is little handshake between English language teachers and specialized experts. Knowledge of specialized subjects is different from linguistic knowledge, but they should be combined in EMI education. Thus, ESP teachers, who may function as mediators, have both linguistic and disciplinary knowledge to conduct specialized language research to support EMI training. In this specific case, technical prepositional phrases were taken into consideration.

3. EMI STUDENTS' NEEDS FOR ENGLISH LANGUAGE SUPPORT FROM PREPOSITIONAL PHRASE PERSPECTIVE

Prepositions is an important part of English grammar, which is challenging to Vietnamese students because English prepositions differ from Vietnamese ones. Word-by-word translation is a habitual practice of technical students, which results in many errors: the students may leave out a necessary preposition or use a wrong one. A survey results of 256 EMI students specialized in Transport Construction Engineering at the UTC revealed that 33% and 45% of the students strongly agreed and agreed respectively, that term bases should include prepositional LFs [9].

For each disciplinary subject, the EMI students are usually provided with traditionally planned terminology term lists as discrete units without much information from content and linguistic perspectives. Monolingual English - English terminological dictionaries are usually too difficult for the students while English - Vietnamese TCE dictionaries cover too many terms from various subjects but lacking terms for individual subjects. There are hardly any term resources with conceptual relations to facilitate content acquisition. Neither are there term resources with lexical relations to facilitate language acquisition such as word collocations.

The results from an investigation of UTC EMI students' opinions indicate that the students expect to acquire both content and linguistic knowledge, but the semasiologically organized terms provided to them are treated as discrete units without term relations and they cannot satisfy their needs for both content and linguistic knowledge. The students passionately welcome the new term products of individual specialized subjects that present both *paradigmatic* and *syntagmatic* LFs. These term resources not only provide them with specialized concepts and an overall picture of the event with its own processes, actions and participants but also with linguistic information, especially collocations such as prepositional collocations. This descriptive language management framework can be applied for other specialized subjects in other technical disciplines [9].

4. INVESTIGATION INTO TECHNICAL PREPOSITIONAL PHRASES

4.1. Lexical Functions

The framework applied for prepositional phrase analysis and description in this study is primarily based on Lexical Functions (LFs) in Meaning Text Theory (MTT) developed by Mel'čuk [3]. The most distinctive aspect of MTT is its inventory of Lexical Functions (LFs), which codify different semantic and syntactic relations. LFs can be used to represent both *paradigmatic* and *syntagmatic* information in specialized texts. Faber & Sancher maintains that the helpfulness of LFs can exist in the fact that "they codify the existences of strong collocators for a particular base, something which is extremely

important in the writing of scientific texts" [10]. Mel'čuk codifies 64 LFs, which are divided into two main categories of Paradigmatic and Syntagmatic. The paradigmatic LFs are mainly concerned with substitution relations while the syntagmatic LFs are used to describe terminological collocations and phrases. Thus, not only hierarchical (Type-of and meronymic Part-of) relations but other non-hierarchical relations, especially collocations, are analyzed and described [3].

Syntagmatic LFs, concerned with collocations, formalize a semantic relation between two lexemes L1 and L2 instantiated in the textual string in a non-predictable way. Such a relation is non-predictable when the co-occurrence of one cannot be derived from the semantic selection restrictions of the other but rather must be learnt as an instantiation of a specific syntagmatic relation. The researcher of the current study resorts to only a specific type of syntagmatic LFs that represents Preposition - Noun (or Noun phrase) relations. The LFs are presented below:

Loc in: meaning position (at a height)

Loc ab: meaning moving away (from a height)

Loc ad: meaning moving towards (to a height)

Instr: meaning of instrumentality (with a pistol)

Propt: meaning because of (due to storm, because of earthquake vibrations.

4.2. Prepositional phrases in traditional English grammar

Definition: A prepositional phrase is a group of words that consists of a preposition, its object, and any modifiers that describe the object. Prepositional phrases work as a single unit in a sentence and provide extra information about location, time, direction, manner, or other relationships.

Structure: A prepositional phrase consists of two main parts as follows:

A preposition A word that indicates the relationship between the object and other elements in the sentence.	An object A noun, pronoun, or noun phrase that receives the action or shows the relationship.
With a ladder": The preposition "with" indicates an instrument, and "a ladder" is the object.	

Function: Prepositional phrases add detail, context, and specificity to sentences by providing information about location, time, manner, or other relationships. Understanding their structure and usage will help learners construct grammatically correct and meaningful sentences in writing and communication.

Placement: Prepositional phrases can appear at the beginning, middle, or end of a sentence, which depends on the intended emphasis and clarity. However, they typically come after the verb or object they modify. Common Prepositions are "in,""on,""at,""with," "to,""from,""about,""for,""through,""among," and many others.

4.3. The source of data

Prepositional Llexical functions were extracted from a reliable textbook, *Highway Bridge Design* (HBD) [4]. Only the English Lexical Functions were investigated. Besides, the Vietnamese equivalents were given for illustration. Table 1 briefly presents the data source including the chapter titles of the textbook, the numbers of pages of each chapter.

Table 1. Information about the source of data

Chapter	Chapter titles	Translation	Number of pages
Chapter 1	Introduction	Giới thiệu	45
Chapter 2	Aesthetics	Thiết kế thẩm mỹ	66
Chapter 3	General design consideration	Tổng quan về thiết kế	47
Chapter 4	Loads	Tải trọng	65
Chapter 5	Influence function and girder-line analysis	Đường ảnh hưởng và phân tích trục dầm	58
Chapter 6	System analysis	Phân tích hệ thống	129

Term extraction software facilitate term extractions; however, the study investigates language units in relation with each other, which can hardly be identified automatically. The researcher's knowledge and critical reasoning play a prominent role; therefore, the extraction, analysis and categorization of prepositional phrases were manually carried out based on the meaning in context and the researcher's linguistic as well as disciplinary knowledge. This bottom-up approach differs from those of other researchers who make use of terminology dictionaries or term lists, in which terms are presented as discrete units. The conceptual, lexical and semantic relations of terms can hardly be grasped out of context, and neither can they be comprehensively obtained via automatic processes.

4.4. Analytical framework

Mel'čuk identifies 5 Lexical Functions relating to prepositional phrases, namely Loc in, Loc ab, Loc ad, Instr, and Propt [3]. However, the results of the pilot study add two more Lexical Function: Loc though and Loc over.

Table 2. Prepositional Lexical Functions in HBD texts

N⁰	Coding N⁰	Name of LF	Meaning	In English	In Vietnamese
1	22	LF Loc in	Meaning in/at a position	At a height At a depth	Tại độ cao Tại độ sâu
2	23	LF Loc ad	Meaning moving towards a position	To the tower Towards the anchorage	Về phía tháp treo Về phía mố neo
3	24	LF Loc ab	Meaning moving away	From a depth	Từ độ sâu
4	25	LF Instr	Meaning by means of the Object (L) (with the meaning of instrumentality)	Via the tendon With a strengthening tendon	Truyền qua thanh Bằng thanh gia cường
5	26	LF Propt	Meaning because of L	Due to traffic impacts Because of earthquake vibrations	Do ảnh hưởng của xe cộ Do rung lắc động đất
6	27	Loc through	Preposition meaning movement through or along L	Through the truss	Truyền qua giàn cầu
7	36	Loc over	Preposition meaning over or above L	Over the water current Above the deck	Trên dòng chảy Trên bản mặt cầu

4.5. Research steps

Step 1: *Identification of prepositional LFs.* In this preliminary phase of extraction, coding has not been done, so once relations were spotted, they were highlighted in colors for extraction.

Step 2: *Extraction of prepositional LFs*. In this step, the prepositional collocations of each Chapter of the textbook that were identified in the first step were listed in a Word table.

Step 3: *Coding and translation of prepositional LFs*. After the BE terms had been extracted and arranged in alphabetical order, they were *coded* based on the seven LRs.

Step 4: *Categorizing*. The terms were transferred to Excel tables for the purpose of grouping. The prepositional LFs with the same coding number were put together. For example**,** Loc in function was coded with number 22. There were three dominant prepositions *at, in, on* combined with nouns to form prepositional phrases.

Step 5: *Triangulation with experts and semantic analysis of the prepositional LFs.*

4.6. Findings and discussions

4.6.1. The number of Lexical Functions

In the following table, the number of each type of prepositional LFs in each chapter of the book is presented and the total number of the seven prepositional LFs of each chapter is shown in the final row. In the last column are the total number of LF of each type in the whole book. Loc in is the most common prepositional collocation in every

chapter with an amazing number of 116 in chapter 6. Ranked second is Loc through with 60 phrases and chapter 6 also has the biggest number of 39. Loc ad meaning "moving towards" has 48 prepositional LFs with 17 units in chapter 6, the biggest number in all chapters. The fourth populous combination is Loc over with 29 examples. Of the seven Prepositional LFs, the first five relations are developed by Mel'čuk [3], while the last two, which were abundant in the textbook, were discovered by the researcher of the current study.

Table 3. Numbers of prepositional collocations

N⁰	Coding	LF	Ch.1	Ch.2	Ch.3	Ch.4	Ch.5	Ch.6	Totals
1	22	LF Loc in	44	39	22	36	28	116	285
2	23	LF Loc ad	12	5	0	14	0	17	48
3	24	LF Loc ab	4	0	0	1	0	3	8
4	25	LF Instr	5	0	0	0	0	3	8
5	26	LF Propt	2	0	3	2	0	12	19
6	27	LF Loc through	4	5	0	2	10	39	60
7	36	LF Loc over	13	8	3	1	1	3	29
Totals			84	57	28	56	39	193	457

4.6.2. Prepositional Lexical Function analysis

4.6.2.1. Loc in (coding number: 22)

Loc in is the most popular Prepositional LFs with more than a half LR of all (285 out of 457 phrases). The main prepositions used in *Loc in* are *at, in, on* with 83, 73, 42 relations, respectively. Loc in with other prepositions has 59 examples.

Table 4. Numbers of LF Loc in

Chapter	N⁰ of LF Loc in	Numbers of specific prepositional collocation	
Chapter 1	44	In	73
Chapter 2	39	At	83
Chapter 3	22	On	42
Chapter 4	36	Below, beneath, Between, Under, Within, above	59
Chapter 5	28		
Chapter 6	116		
	285		

LF Loc in with preposition *at*:

The most typical combination is *At + Noun (or Noun Phrases)*. *At* goes with bridge parts such as *bearing, support*, *at the site, which* is also typical of this text type. The Nouns refer to specific locations: *midspan, point, level, depth, location, height, etc*.

Table 5. LF Loc in with *At*

English	Vietnamese
At midspan	Ở giữa nhịp
At a critical location	Tại điểm xung yếu /nguy hiểm
At a depth of 42m	Ở độ sâu 42m
At a distance	Cách một khoảng / đoạn
At deck level	Ở độ cao bản mặt cầu
At different heights	Tại các độ cao khác nhau
At nodes	Tại điểm nút
At regular intervals	Tại các khoảng cách đều nhau
At the bearings	Tại gối
At the supports	Tại các trụ

LF Loc in with preposition in

Ranked the second is prepositional LFs with *in* (73 relations), which go with the bridge and its parts such as girder, concrete structure, system, beam, etc. Preposition in is combined with materials such as rock and reinforced concrete. It also goes with state, area, plane, direction, zone, etc. The phrase in situ is a typical Loc in relation.

Table 6. LF Loc in with *in*

English	Vietnamese
In exterior girder	Ở dầm biên
In a bridge deck	Trong bản mặt cầu
In a constrained system	Trong hệ thống ngàm
In a continuous beam	Trong dầm liên tục
In a single plane	Trên một mặt phẳng
In situ	Tại chỗ
In the grillage elements	Trong các phần tử lưới
In the post yield region	Ở vùng sau điểm chảy

LF Loc in with preposition *on*

The next typical preposition of LF Loc in is on. It is used with the bridge and bridge parts, which has a surface for something to be placed on or an action to occur on. On is typically used with route, highway, railway, railroad, bridge, etc.

Table 7. LF Loc in with *On*

English	Vietnamese
On open spandrel posts	Trên trụ vòm hở
On the shipping stands	Trên cầu tàu
On top of the piers	Trên trụ cầu
On piles	Trên cọc
On columns or piers	Trên cột hoặc trụ cầu
On deck panels	Trên pa nô bản mặt cầu
On the prismatic beam	Trên dầm lăng trụ

Others prepositions used in *Loc in* include *below, beneath, between, under, within, above* but they are not as popular as *at, in and on.*

4.6.2.2. Loc ad (coding number: 23)

Loc ad means moving towards a location. Although this prepositional LF does not appear abundantly in the textbook, they are used repeatedly, so the collocation was categorized as *typical*. *Loc ad* means moving towards the position of L. It had 48 relations, some of which are presented in Table 8.

Table 8. LF Loc ad (meaning *moving toward a position*)

Preposition	English	Vietnamese
From … to	From the bottom of the deck to the shore	Từ mặt dưới của bản mặt cầu tới bờ sông
In the direction	In the transverse direction	Theo phương ngang
Into	(Forces are transmitted) into the substructure at the fixed bearings or supports.	(Lực được truyền) xuống kết cấu phần dưới qua các gối cố định
To	(Diaphragm loads is transmitted) to abutment bearings.	(Tải trọng lên dầm ngang được truyền) xuống gối mố
Towards	Towards the neutral axis	Tiến đến trục trung hòa

4.6.2.3. Loc ab (coding number: 24)

Loc ab meaning moving away from a location is mostly made of *off* and *away*, sometimes with *from* and *outward*. The typical combinations are presented below:

Table 9. LF Loc ab *(meaning moving away from a position*)

English	Vietnamese	Preposition
Away from the web	Cách sườn dầm	Away
The inside hanger came off the lower pin	Móc trong tuột ra khỏi chốt dưới	Off
The outside hanger slipped off the span	Chốt ngoài tuột ra khỏi nhịp	Off

4.6.2.4. Instr (coding number: 25)

As defined above, *Instr* refers to a Lexical Function denoting a method or an instrument used for design, calculation, or construction. In this case, the common prepositions are *by, via, by means of,* and *with.*

Table 10. LF Instr

English	Vietnamese	Preposition
By a pin assembly without hangers	Bởi cấu trúc chốt không dùng thanh treo	By
With rod iron chains	Với các xích treo bằng thanh sắt	With
With the placement of a steel plate girder	Bằng cách đặt dầm thép tổ hợp	
With restraining actions located at the end of the element	Bởi các hiệu ứng neo tại cuối phần tử	

4.6.2.5. Propt (coding number: 26)

LF *Propt* denotes *because of.* In this certain text type, *due to* is employed frequently with examples in Table 11:

Table 11. LF Propt

English	Vietnamese	Preposition
By corrosion - induced forces	Do lực ăn mòn	By
Through a system of plastic hinges	Do hệ thống bản lề dẻo	Through
(Fracture) due to fatigue	Nứt do mỏi	
Due to cumulative stress effects	Do tác động của ứng suất tích lũy	
Due to deformations	Ứng suất tạo ra bởi biến dạng	
Due to the translation and rotation of the physical joints	Do sự chuyển dịch và quay của các khớp nối	
Due to internal friction of material	Do ma sát trong vật liệu	

4.6.2.6. Loc through (coding number: 27)

Loc through emerged during the term relation extraction of the current study and was added to the group of *Prepositional collocations*. *Loc through* indicates movements and directions of actions inside the bridge. The three typical prepositions used in *Loc through* are *along, in the direction,* and *through*. The bridge is a long structure consisting of *girders, beams, bars,* and *rods, etc,* which are also long. Actions move through and along these parts in a certain direction. Besides the three most typical prepositions, *align with, parallel to, throughout* are also used in *Loc through*, but they are not extremely popular. The examples are presented in Table 12:

Table 12. LF Loc through

English	Vietnamese	Preposition
Along lines of prestress	Dọc theo đường dự ứng lực	
Along the supported edges	Dọc theo đường biên được chống đỡ	
Along the length of the bridge	Dọc theo chiều dài của cầu	
In the transverse directions	Theo chiều ngang	In direction
In orthogonal directions	Theo hướng trực giao	
Parallel to girders	Song song với dầm dọc	Parallel to
Through the top and bottom chords	Dọc theo biên trên và biên dưới	Through
Through the expansion joints	Qua các khe co giãn	
Through the length of the deck	Dọc theo bản mặt cầu	
Throughout the bridge	Trên suốt cây cầu	Throughout
Throughout the members	Qua tất cả các cấu kiện	

4.6.2.7. Loc over (coding number: 36)

Like *Loc through*, *Loc over* is a newly discovered LRs in HBD because bridges are constructed across (over) a river, stream, gorge, valley, highway, etc. This LF is used frequently in HBD Event, which makes Loc over a typical LF in this specific text type.

Table 13. Loc over

English	Vietnamese	Preposition
Across a small stream	Bắc qua suối nhỏ	Across
Railway across Mississippi River	Đường sắt qua sông Mississipi	
Across wide valleys	Qua thung lũng rộng	
Between abutments	Giữa hai mố	Between
Between the floor beams	Giữa các dầm ngang	
Over the rock-strewn stream	qua suối gồ ghề đá	Over
Over a railroad track	Ngang qua đường tầu hỏa	
Over modest waterways	Bắc qua dòng chảy nhỏ	
Over deep ravines	Qua hẻm núi sâu	

5. CONCLUSION

This study looks into technical prepositional phrases based on Lexical Functions with a view to support EMI students in acquiring linguistic and disciplinary knowledge. While most other terminological works see terms a discrete units without relations, this study takes into collocations in specialized language. The typical prepositional phrases in HBD were identified, which help present technical terms as multidimensional term systems in knowledge-based term resources. In addition, while traditional terminological researchers stand apart from linguistic theories and focus on concepts and disciplinary knowledge domain. This study features a strong handshake between linguistic and terminology research applying *lexico-semantic* theories. The findings reflects the close connection between specialized and linguistic elements in EMI training. Overall, the study establishes an alternative framework for specilised language support, which is different from the traditional approach with its own merits. This is the bottom-up, descriptive research approach looking at user needs and the technical language data in the real usage context, which results in knowledge-based terminological products that is rich in both disciplinary and linguistic knowledge.

The tachnical vocabulary database with its affordances will be undeniably beneficial to the academic population including both chalk-face practitioners and students in the English-Vietnamese bilingual academic environment. This also sets the initial steps for research and application of artificial intelligence (AI) in technical language management. And finally, the extracted terms themselves with Vietnamese equivalents and popular Lexical Functions discovered in the study can be used to develop online knowledge-based term resources. With the aid of computer science, in which tags as well as different forms of diagrams and mind maps link one term to others systematically, the multidimensionality of terms relations will be presented in computer environment to enrich information for the convenience of users.

REFERENCES

[1] Hương, N.T., Walkinshaw, I. and Hòa, P. H. EMI Programs in a Vietnamese University: Language, Pedagogy and Policy Issues. [In]: Fenton, B. S., English medium Instruction in Higher Education in Asia-Pacific, Springer International Publishing AG, 37-52, 2017.

[2] Beaugrande, R. New Foundations for a Science of Text and Discourse: Cognition, Communication and the Freedom of Access to Knowledge and Society. Ablex Publishing, Norwood, 1997.

[3] Mel'čuk, I. A. Lexical Functions: A Tool for the Description of Lexical Relations in a Lexicon. [In]: Wanner, L., Lexical Functions in Lexicography and Natural Language Processing, John Benjamins Publishing Company, Amsterdam/Philadelphia, 37-102, 1996.

[4] Richard, M. B., Jay, A. P. Design of Highway bridges: An LRFD Approach, 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2007.

[5] Antia, B. E., Dyers, C. Epistemological access through lecture materials in multiple modes and language varieties. Language Policy, 15, 525-545, 2016.

[6] Madiba, M. Fast-track Concept Learning to English as an Additional language (EDL) Students through Corpus-based multilingual Glossaries, 2010.

[7] Hồng, H. N. N. Nomenclature (denominalisation) characteristics of Police terms in Chinese. VNU Journal of Science: Foreign Studies, vol. 31, no. 3, 28-32, 2015.

[8] Thiết, N. T. Survey of English Telecommunications Terminology and their Transference into Vietnamese. Social Science Institute, 2018.

[9] Tuyến, N. T. H. Transport construction terminology planning based on lexical relations and students' needs. Science Journal of Transportation - Special Issue No. 11, 2021.

[10] Faber, P. and Sanchez, M. T. Codyfying Conceptual Information in Descriptive Terminology Management. Meta: Translators' Journal, 46 (1), 192-204, 2001.

NAM ANH GROUP
Technological Orientation To Make Difference

CÔNG TY TNHH THIẾT BỊ XÂY DỰNG CÔNG NGHỆ NAM ANH

Địa chỉ: Tầng 3 toà nhà hỗn hợp Vườn Đào, lô E, khu D1, Phường Tây Hồ, TP Hà Nội, Việt Nam

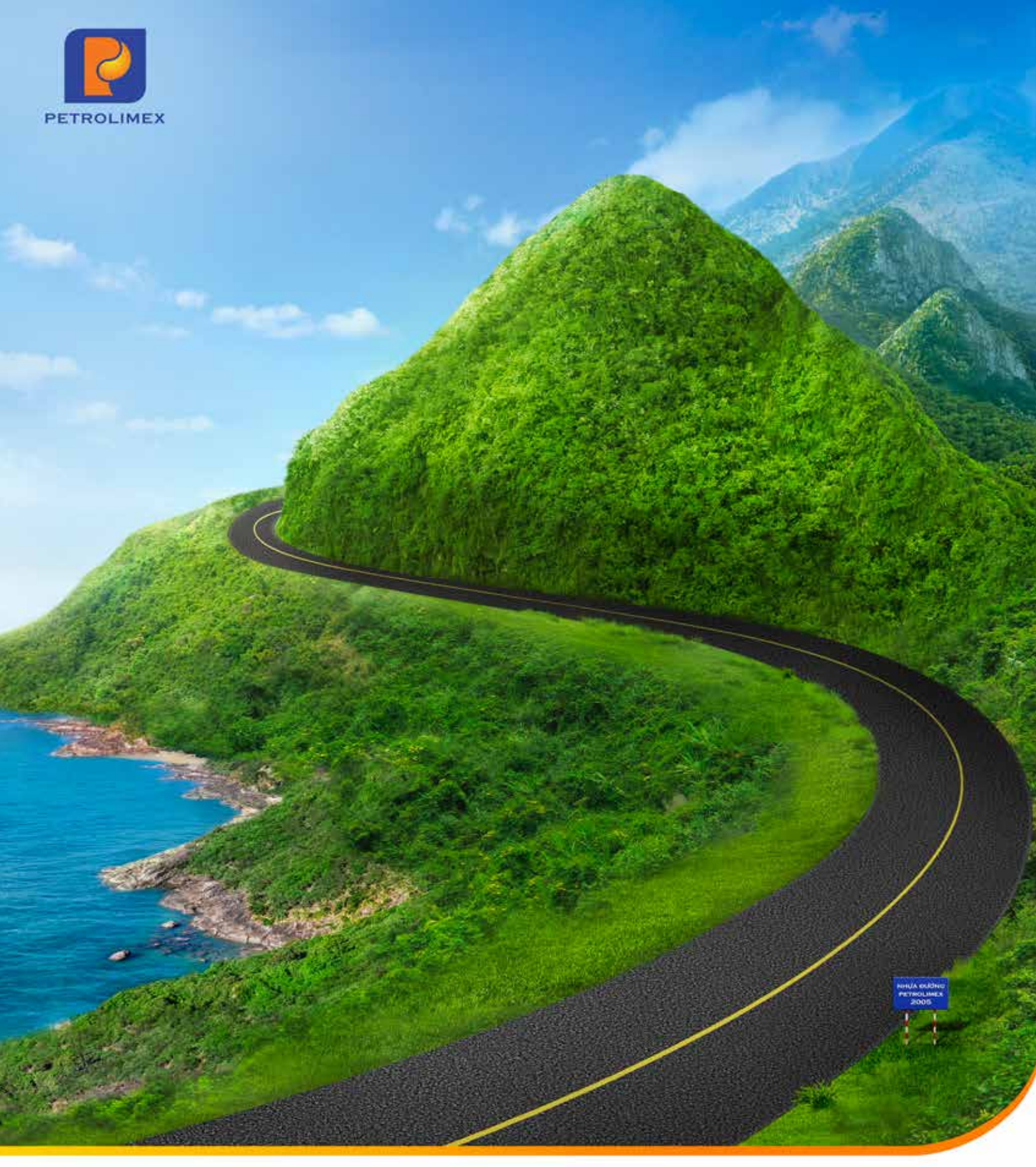
MST: 0102740677 Email: info@namanhgroup.com

Người đại diện: Nguyễn Văn Cương - Tổng Giám đốc

Chi nhánh Văn phòng phía Nam: 132 Trương Văn Bang, Phường Cát Lái, TP. HCM

- Công ty TNHH Thiết bị xây dựng công nghệ Nam Anh (Công ty Nam Anh) đơn vị hàng đầu Việt Nam trong lĩnh vực cung cấp và lắp đặt thiết bị, hệ thống các giải pháp công nghệ đa dạng cho các dự án cầu đường, xây dựng dân dụng, công nghiệp và hạ tầng kỹ thuật.
- Doanh nghiệp hàng đầu trong lĩnh vực cung cấp, thi công các sản phẩm công nghệ cao cho các dự án giao thông, cầu đường sắt như: Dây văng, gối cầu, khe co giãn, tường chống ồn, ray, ghi, khóa chống động đất, chiếu sáng mỹ thuật, hệ thống cáp treo,...
- Là đối tác tin cậy của các nhà thầu xây lắp, chủ đầu dự án có yếu tố công nghệ cao như cầu vòm thép, cầu dây văng, cầu extradose, cầu dây võng...
- Nhà cung cấp vật tư, thiết bị cho các dự án xây dựng dân dụng công nghiệp, hạ tầng kỹ thuật quan trọng khác. Trong đó phải kể đến dự án đường đua F1 tại Hà Nội, Nam Anh là tổng thầu EPC thiết kế, cung cấp, lắp đặt hệ thống khán đài di động và các cầu đi bộ phục vụ cho sự kiện mang tầm cỡ quốc tế này.
- Đảm nhiệm vai trò là đơn vị trực tiếp thi công lắp đặt các sản phẩm, thiết bị tại các dự án giao thông công nghệ cao.
- Đơn vị chuyên nghiệp hàng đầu cung cấp các vật tư, vật liệu, thiết bị, dịch vụ và giải pháp thi công các công trình hạ tầng giao thông đường bộ, đường sắt, đường thủy, xây dựng dân dụng và công nghiệp tại Việt Nam.
- Công ty Nam Anh đã tích cực nghiên cứu, hợp tác và tiếp nhận chuyển giao công nghệ thi công cáp dây văng với mục tiêu mũi nhọn là phát triển trở thành thương hiệu trong nước đầu tiên thi công lắp đặt hoàn chỉnh hạng mục cáp dây văng cho các dự án cầu lớn, phá thế độc quyền, đảm bảo cạnh tranh công bằng về công nghệ và giá thành với công ty nước ngoài trong lĩnh vực này.
- Các công trình ứng dụng hệ thống cáp văng trong nước mà Nam Anh đã tự chủ công nghệ thi công như: Cầu Tình Húc, cầu Cửa Đại, cầu Bách Lẫm, cầu Trà Lý... Công trình cầu Cửa Hội (Nghệ An - Hà Tĩnh) - công trình cầu dài nhất miền Trung

PETROLIMEX



NHỰA ĐƯỜNG PETROLIMEX

Dẫn bước thành công