

XÂY DỰNG TINH GỌN DỰA TRÊN TRÍ TUỆ NHÂN TẠO TẠI CÁC NƯỚC ĐANG PHÁT TRIỂN HƯỚNG TỚI PHÁT TRIỂN BỀN VỮNG

AI-DRIVEN LEAN CONSTRUCTION IN DEVELOPING COUNTRIES TOWARD SUSTAINABLE DEVELOPMENT

TS. Phạm Hải Chiến - Khoa Kỹ thuật công trình, Trường Đại học Tôn Đức Thắng, TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam. Corresponding author's email: phamhaichien@tdtu.edu.vn

Tóm tắt: Trong bối cảnh chuyển đổi số và Construction 4.0, việc tích hợp trí tuệ nhân tạo (AI) với Xây dựng tinh gọn (LC) được xem là giải pháp quan trọng nhằm nâng cao hiệu quả quản lý dự án xây dựng ở các nước đang phát triển. Nghiên cứu này nhằm phân tích vai trò của AI trong triển khai Lean Construction, đồng thời xác định các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả ứng dụng AI trong quản lý và thực hiện dự án xây dựng. Nghiên cứu sử dụng phương pháp hỗn hợp (mixed-methods), kết hợp tổng quan tài liệu, phỏng vấn sâu 12 chuyên gia và khảo sát định lượng với 123 bảng trả lời hợp lệ từ các kỹ sư, nhà quản lý dự án, tư vấn và nhà thầu xây dựng. Dữ liệu được phân tích bằng các phương pháp thống kê nhằm đánh giá các nhân tố ảnh hưởng đến việc ứng dụng AI trong LC.

Kết quả cho thấy AI góp phần nâng cao chất lượng lập kế hoạch, tối ưu hóa phân bổ nguồn lực, giảm lãng phí vật tư, hạn chế tái thi công, cải thiện năng suất lao động và tăng cường hiệu quả phối hợp giữa các bên tham gia dự án. Đồng thời, hạ tầng công nghệ, chất lượng dữ liệu, năng lực nguồn nhân lực, cam kết của lãnh đạo, mức độ tích hợp với Mô hình thông tin công trình (BIM) và Kết nối vạn vật (IoT), cùng các chính sách hỗ trợ được xác định là những yếu tố quyết định sự thành công của quá trình triển khai. Nghiên cứu đóng góp bằng chứng thực nghiệm về việc tích hợp AI và LC trong bối cảnh các nước đang phát triển, đồng thời đề xuất các hàm ý quản trị nhằm thúc đẩy chuyển đổi số, nâng cao năng suất và hướng tới phát triển bền vững của ngành Xây dựng.

Từ khóa: Trí tuệ nhân tạo; Xây dựng tinh gọn; Xây dựng bền vững; Công nghiệp xây dựng 4.0.

Abstract: In the context of digital transformation and Construction 4.0, integrating Artificial Intelligence (AI) with Lean Construction is considered a crucial strategy to improve the efficiency of construction project management in developing countries. This study aims to analyze the role of AI in implementing Lean Construction and to identify factors that affect the effectiveness of AI application in construction project management and execution. The study uses a mixed-methods approach, combining literature reviews, in-depth interviews with 12 experts, and a quantitative survey with 123 valid responses from engineers, project managers, consultants, and construction contractors. Data is analyzed using statistical methods to evaluate the factors influencing the application of AI in Lean Construction.

The results show that AI improves planning quality, optimizes resource allocation, reduces material waste, minimizes rework, increases labor productivity, and enhances coordination among project stakeholders. Simultaneously, technological infrastructure, data quality, human resource capacity, leadership commitment, integration with Building Information Modeling (BIM) and the Internet of Things (IoT), and supporting policies are identified as key factors determining the success of the implementation process. The study provides empirical evidence on the integration of AI and Lean Construction in the context of developing countries and proposes governance implications to promote digital transformation, improve productivity, and advance sustainable development in the construction industry.

Keywords: Artificial Intelligence; Lean Construction; Sustainable Construction; Construction 4.0.

1. GIỚI THIỆU

Ngành Xây dựng giữ vai trò quan trọng trong phát triển kinh tế - xã hội, đặc biệt tại các nước đang phát triển, nơi nhu cầu đầu tư vào hạ tầng và các công trình ngày càng gia tăng. Tuy nhiên, ngành vẫn đang đối mặt với nhiều thách thức như năng suất lao động thấp, lãng phí nguồn lực, chậm tiến độ, vượt chi phí và hiệu quả quản lý dự án chưa cao[1]. Những hạn chế này làm giảm năng lực cạnh tranh và cản trở mục tiêu phát triển bền vững trong bối cảnh chuyển đổi số. Xây dựng tinh gọn được

xem là một phương pháp quản lý hiệu quả nhằm tối đa hóa giá trị và giảm lãng phí thông qua việc cải thiện dòng công việc và tối ưu hóa quy trình. Tuy nhiên, việc triển khai xây dựng tinh gọn tại các nước đang phát triển vẫn gặp nhiều rào cản do quy trình quản lý truyền thống, dữ liệu phân tán, khả năng phối hợp giữa các bên còn hạn chế và mức độ ứng dụng công nghệ số chưa đồng đều.

Sự phát triển của cuộc Cách mạng công nghiệp 4.0 đã thúc đẩy ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong ngành Xây dựng. Việc kết hợp AI với xây dựng tinh

gọn được xem là xu hướng tất yếu nhằm thúc đẩy chuyển đổi số trong ngành xây dựng [2]. AI không chỉ hỗ trợ triển khai hiệu quả các nguyên lý Lean thông qua việc tối ưu hóa lập kế hoạch, phát hiện lãng phí, giám sát hiện trường và dự báo rủi ro mà còn góp phần nâng cao năng suất, giảm chi phí, hạn chế tái thi công và cải thiện chất lượng công trình [3]. Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về xây dựng tinh gọn và AI, nhưng phần lớn các nghiên cứu tập trung vào các quốc gia phát triển hoặc chỉ xem xét riêng lẻ từng lĩnh vực. Các nghiên cứu đánh giá toàn diện việc tích hợp AI vào xây dựng tinh gọn trong bối cảnh các nước đang phát triển vẫn còn hạn chế, đặc biệt đối với các yếu tố thúc đẩy, rào cản triển khai và tác động của chúng đến hiệu quả của dự án.

Vì vậy, bài báo nhằm xác định các yếu tố ảnh hưởng đến việc ứng dụng AI trong xây dựng tinh gọn và đánh giá tác động của các yếu tố đó đối với hiệu quả thực hiện dự án xây dựng ở các nước đang phát triển. Nghiên cứu sử dụng phương pháp hỗn hợp, kết hợp tổng quan tài liệu, phỏng vấn chuyên gia và khảo sát định lượng để xây dựng và kiểm định mô hình nghiên cứu. Kết quả kỳ vọng sẽ bổ sung bằng chứng thực nghiệm về tích hợp AI và xây dựng tinh gọn, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho doanh nghiệp và cơ quan quản lý trong việc xây dựng chiến lược chuyển đổi số, phát triển nguồn nhân lực và hoàn thiện chính sách nhằm thúc đẩy xây dựng thông minh và phát triển bền vững.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

2.1. Xây dựng tinh gọn trong ngành Xây dựng

Xây dựng tinh gọn là phương pháp quản lý hiện đại được phát triển từ các nguyên lý của Lean Manufacturing, hướng đến việc tối đa hóa giá trị cho khách hàng thông qua việc loại bỏ lãng phí, tối ưu hóa dòng công việc và nâng cao hiệu quả trong toàn bộ vòng đời của dự án [4]. Các công cụ như LPS, JIT, VSM và Kaizen đã được chứng minh có khả năng nâng cao năng suất, giảm tái thi công, kiểm soát tiến độ và tối ưu hóa sử dụng nguồn lực. Tuy nhiên, việc áp dụng LC tại các nước đang phát triển vẫn còn hạn chế do phương thức quản lý truyền thống, dữ liệu phân tán, năng lực phối hợp giữa các bên liên quan chưa cao và mức độ chuyển đổi số còn hạn chế [5].

2.2. Ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong ngành xây dựng

Trí tuệ nhân tạo (AI) đang trở thành công nghệ cốt lõi của Công nghiệp xây dựng 4.0 nhờ khả năng phân tích dữ liệu, học hỏi từ dữ liệu lịch sử, dự báo và hỗ trợ ra quyết định. Các công nghệ như học máy, học sâu, thị giác máy tính, xử lý ngôn ngữ tự

nhiên và phân tích dữ liệu lớn đã được ứng dụng trong dự báo tiến độ, chi phí, quản lý rủi ro, kiểm soát chất lượng, an toàn lao động và tối ưu hóa việc phân bổ nguồn lực [6]. Việc tích hợp AI với BIM, IoT, điện toán đám mây và bản sao kỹ thuật số (DT) góp phần hình thành các hệ thống quản lý xây dựng thông minh. Tuy nhiên, việc triển khai AI vẫn gặp nhiều rào cản về hạ tầng số, chất lượng dữ liệu, chi phí đầu tư và nguồn nhân lực [7].

2.3. Tích hợp AI với xây dựng tinh gọn

Trong những năm gần đây, xu hướng kết hợp AI với Xây dựng tinh gọn ngày càng thu hút sự quan tâm của giới nghiên cứu và doanh nghiệp xây dựng. Trong khi Xây dựng tinh gọn cung cấp các nguyên lý nhằm loại bỏ lãng phí và tối ưu hóa quy trình, thì AI đóng vai trò hỗ trợ phân tích dữ liệu, dự báo và tự động hóa quá trình ra quyết định [2]. Sự kết hợp này tạo nền tảng cho mô hình quản lý dự án thông minh, giúp nâng cao hiệu quả thực hiện dự án.

Các nghiên cứu cho thấy AI có thể hỗ trợ LPS thông qua dự báo tiến độ và nhận diện nguy cơ chậm trễ; hỗ trợ VSM bằng cách phân tích dữ liệu để xác định các điểm gây lãng phí; đồng thời tối ưu hóa việc phân bổ nhân lực, thiết bị và vật liệu dựa trên các thuật toán học máy [3]. Bên cạnh đó, thị giác máy tính kết hợp với camera giám sát và UAV giúp tự động theo dõi tiến độ, phát hiện lỗi thi công và đánh giá mức độ tuân thủ quy trình Lean ngay tại công trường.

Việc tích hợp AI với BIM và IoT cũng mở rộng khả năng thu thập dữ liệu theo thời gian thực, từ đó hình thành hệ thống quản lý dự án có khả năng dự báo, cảnh báo sớm và hỗ trợ ra quyết định nhanh chóng. Điều này góp phần nâng cao tính linh hoạt, khả năng phối hợp và hiệu quả triển khai các nguyên lý Lean trong môi trường xây dựng hiện đại.

2.2. Khoảng trống nghiên cứu

Mặc dù số lượng nghiên cứu về AI và LC ngày càng gia tăng, phần lớn tập trung vào từng công nghệ riêng lẻ hoặc được thực hiện tại các quốc gia phát triển. Các nghiên cứu đánh giá toàn diện sự tích hợp giữa AI và LC trong bối cảnh các nước đang phát triển còn khá hạn chế, đặc biệt đối với các yếu tố thúc đẩy, rào cản triển khai và tác động của chúng đến hiệu quả của dự án. Bên cạnh các yếu tố kỹ thuật, các khía cạnh về tổ chức, nguồn nhân lực, hạ tầng số và chính sách hỗ trợ vẫn chưa được xem xét đầy đủ.

Từ khoảng trống này, nghiên cứu đề xuất mô hình đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến việc ứng dụng AI trong LC, bao gồm sự sẵn sàng của tổ chức, năng lực công nghệ, nguồn nhân lực số, nhận thức

của các bên liên quan và sự hỗ trợ của chính phủ. Đồng thời, nghiên cứu phân tích tác động của AI đối với hiệu quả triển khai LC thông qua các chỉ tiêu về năng suất, giảm lãng phí, tối ưu hóa nguồn lực và hiệu quả quản lý dự án, qua đó bổ sung cơ sở khoa học và thực tiễn cho quá trình chuyển đổi số ngành xây dựng tại các nước đang phát triển...

3. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu được thực hiện theo phương pháp nghiên cứu hỗn hợp (mixed-methods), kết hợp giữa nghiên cứu định tính và nghiên cứu định lượng nhằm bảo đảm tính toàn diện trong việc khám phá, xây dựng và kiểm định mô hình nghiên cứu (Hình 1). Cụ thể, quy trình nghiên cứu gồm sáu bước: (1) Tổng quan các nghiên cứu trong và ngoài nước để xây dựng cơ sở lý thuyết và xác định khoảng trống nghiên cứu; (2) Xây dựng bảng câu hỏi khảo sát dựa trên các thang đo được kế thừa và điều chỉnh từ các nghiên cứu trước; (3) Phỏng vấn sâu chuyên gia nhằm đánh giá tính phù hợp của mô hình nghiên cứu và hiệu chỉnh bảng câu hỏi; (4) Khảo sát định lượng và thu thập dữ liệu từ các đối tượng tham gia trong ngành xây dựng; (5) Phân tích thống kê dữ liệu nhằm kiểm định độ tin cậy của thang đo và đánh giá mô hình nghiên cứu; (6) Thảo luận kết quả và đề xuất các hàm ý quản trị đối với việc triển khai AI trong Xây dựng tinh gọn tại các nước đang phát triển... Trên cơ sở tổng hợp tài liệu, bộ tiêu chí khảo sát được xây dựng và tiến hành phỏng vấn 12 chuyên gia có trên 15 năm kinh nghiệm để hoàn thiện bảng hỏi. Sau đó, nghiên cứu tiến hành khảo sát đại trà trên các đối tượng ưu tiên là các chuyên gia, kỹ sư và nhà quản lý có kinh nghiệm

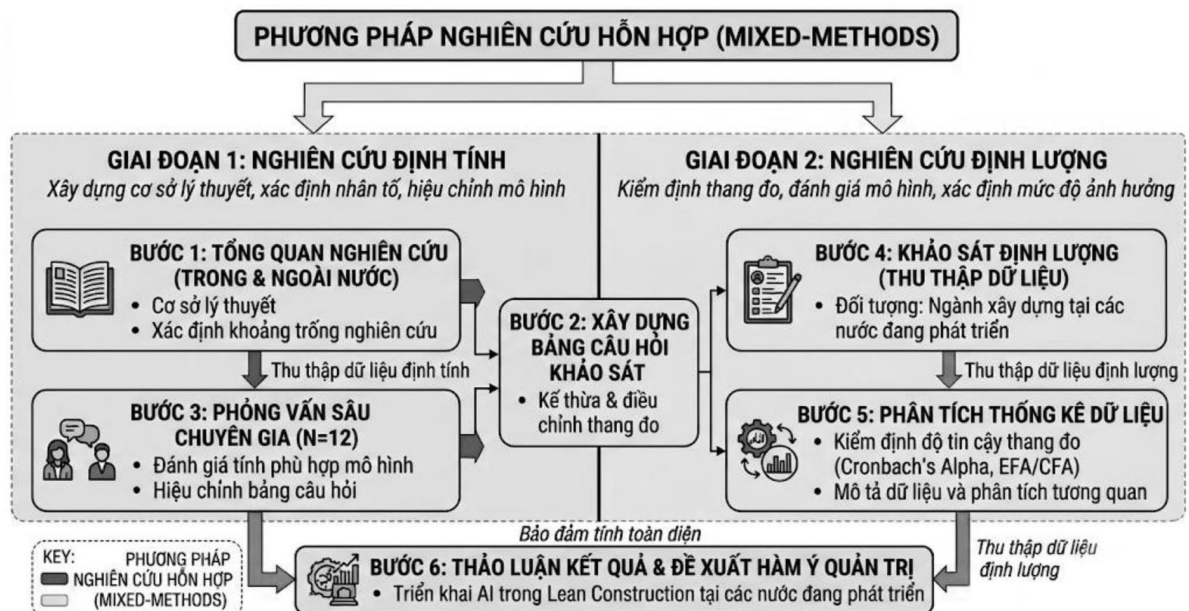
trong lĩnh vực xây dựng, đã hoặc đang tham gia các dự án xây dựng và có hiểu biết về LC, BIM, chuyển đổi số hoặc trí tuệ nhân tạo (AI) trong xây dựng. Đối tượng khảo sát đến từ nhiều loại hình tổ chức, bao gồm nhà thầu xây dựng, doanh nghiệp tư vấn, chủ đầu tư, ban quản lý dự án, cơ quan quản lý nhà nước và các trường đại học, viện nghiên cứu nhằm phản ánh toàn diện thực tiễn của ngành. Mẫu khảo sát cũng được phân bổ theo số năm kinh nghiệm và trình độ học vấn, trong đó phần lớn người tham gia có trên 10 năm kinh nghiệm và có trình độ đại học hoặc sau đại học. Việc lựa chọn mẫu theo các tiêu chí này góp phần nâng cao tính đại diện, độ tin cậy và giá trị khoa học của kết quả nghiên cứu.

4. NGHIÊN CỨU VÀ PHÂN TÍCH SỐ LIỆU

4.1. Thống kê mô tả

Khảo sát đại trà được tiến hành với 142 bảng hỏi, trong đó có 123 mẫu hợp lệ được sử dụng cho phân tích thống kê (Bảng 1). Kết quả khảo sát hợp lệ từ các đối tượng đang trực tiếp tham gia hoặc có chuyên môn trong lĩnh vực xây dựng, bảo đảm tính đa dạng và đại diện cho các bên liên quan trong dự án. Trong đó, kỹ sư thi công chiếm tỷ lệ cao nhất với 31 người (25,2%), phản ánh nhóm đối tượng trực tiếp triển khai các hoạt động xây dựng và có nhiều kinh nghiệm thực tiễn trong quản lý hiện trường. Tiếp theo là nhà quản lý dự án với 28 người (22,8%). Đây là nhóm đóng vai trò quan trọng trong việc điều phối tiến độ, chi phí, chất lượng và nguồn lực, đồng thời có ảnh hưởng lớn đến việc triển khai các giải pháp LC và AI trong dự án.

Nhóm kỹ sư tư vấn thiết kế chiếm 15,4% (19 người), góp phần cung cấp góc nhìn về thiết kế,



Hình 1. Phương pháp nghiên cứu

Bảng 1. Thống kê mô tả

Nhóm đối tượng khảo sát	Vai trò trong dự án	Số lượng mẫu	Tỷ lệ
Nhà quản lý dự án (Project Managers)	Quản lý tiến độ, chi phí, chất lượng và nguồn lực	28	22.8%
Kỹ sư thi công (Site Engineers)	Tổ chức và giám sát thi công	31	25.2%
Kỹ sư tư vấn thiết kế (Design Engineers/Consultants)	Thiết kế, phối hợp BIM, tối ưu giải pháp kỹ thuật	19	15.4%
Kỹ sư giám sát (Supervision Engineers)	Kiểm soát chất lượng và tiến độ	14	11.4%
Nhà thầu phụ xây dựng (Subcontractors)	Trực tiếp thực hiện hoạt động thi công	16	13.0%
Chủ đầu tư/Đại diện chủ đầu tư (Clients/Owners)	Ra quyết định đầu tư và quản lý dự án	8	6.5%
Giảng viên, nhà nghiên cứu	Nghiên cứu Xây dựng tinh gọn, AI và BIM	7	5.7%
Tổng cộng		123	100,0

phối hợp BIM và tối ưu hóa các giải pháp kỹ thuật. Nhà thầu phụ xây dựng và kỹ sư giám sát lần lượt chiếm 13,0% (16 người) và 11,4% (14 người), đại diện cho các đơn vị trực tiếp tổ chức thi công và kiểm soát chất lượng công trình. Trong khi đó, chủ đầu tư/đại diện chủ đầu tư chiếm 6,5% (8 người), phản ánh quan điểm của bên ra quyết định và quản lý đầu tư. Giảng viên và nhà nghiên cứu chiếm 5,7% (7 người), bổ sung góc nhìn học thuật và chuyên môn về xây dựng tinh gọn, BIM và trí tuệ nhân tạo.

Cơ cấu mẫu khảo sát cho thấy sự tham gia đầy đủ của các nhóm chủ thể trong vòng đời dự án xây dựng, từ chủ đầu tư, tư vấn, nhà thầu đến đội ngũ quản lý, kỹ sư hiện trường và giới học thuật. Sự phân bố này giúp bảo đảm tính khách quan, đa chiều của dữ liệu khảo sát, đồng thời nâng cao độ tin cậy của các kết quả phân tích về các yếu tố ảnh hưởng đến việc ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong xây dựng tinh gọn tại các nước đang phát triển.

4.2. Kiểm định thống kê

Nghiên cứu tiến hành phân tích Cronbach's Alpha, thỏa mãn yêu cầu $0,6 \leq \text{Cronbach's Alpha} \leq 0,95$ và có tương quan biến tổng $> 0,3$, cho thấy các nhóm khảo sát phù hợp. Nghiên cứu tiếp tục phân tích các yếu tố khám phá (EFA). Sau đó, tiến hành kiểm định Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) $> 0,5$ và Bartlett có Sig $< 0,05$, đạt yêu cầu về độ tin cậy. Chỉ số KMO $> 0,5$ cho thấy điều kiện đủ để phân tích nhân tố là phù hợp.

5. THẢO LUẬN KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

Kết quả nghiên cứu khẳng định rằng việc tích hợp trí tuệ nhân tạo vào xây dựng tinh gọn có tác động tích cực đến hiệu quả thực hiện dự án xây dựng ở các nước đang phát triển. AI hỗ trợ nâng cao chất lượng lập kế hoạch, tối ưu hóa phân bổ nguồn lực, giảm lãng phí vật tư, hạn chế tái thi công, cải thiện năng suất lao động và tăng cường phối hợp giữa các bên tham gia dự án. Những kết

quả này cho thấy AI là công nghệ hỗ trợ hiệu quả việc triển khai các nguyên lý cốt lõi của xây dựng tinh gọn, đặc biệt trong môi trường dự án có dữ liệu lớn và yêu cầu ra quyết định theo thời gian thực.

Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng năng lực công nghệ và chất lượng dữ liệu là những yếu tố quyết định hiệu quả trong việc triển khai AI. Việc tích hợp và chuẩn hóa dữ liệu từ BIM, IoT và các hệ thống quản lý dự án giúp AI nâng cao khả năng dự báo tiến độ, nhận diện rủi ro và tối ưu hóa nguồn lực. Ngược lại, dữ liệu phân tán và thiếu chuẩn hóa làm giảm hiệu quả của các mô hình AI và hạn chế khả năng hỗ trợ ra quyết định.

Bên cạnh yếu tố công nghệ, năng lực nguồn nhân lực và cam kết của lãnh đạo được xác định là những nhân tố có ảnh hưởng lớn đến quá trình chuyển đổi số. Khi đội ngũ kỹ sư và nhà quản lý được trang bị kiến thức về AI, BIM và xây dựng tinh gọn, khả năng tiếp nhận công nghệ mới sẽ được cải thiện đáng kể. Đồng thời, sự cam kết của lãnh đạo đóng vai trò định hướng chiến lược, phân bổ nguồn lực và thúc đẩy đổi mới trong tổ chức. Những kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đây về các yếu tố thúc đẩy triển khai xây dựng tinh gọn và công nghiệp xây dựng 4.0.

Kết quả nghiên cứu cũng nhấn mạnh vai trò của môi trường thể chế và các chính sách hỗ trợ. Thiếu tiêu chuẩn dữ liệu, hạ tầng số và cơ chế khuyến khích đổi mới vẫn là những rào cản lớn đối với doanh nghiệp, đặc biệt là doanh nghiệp vừa và nhỏ tại các nước đang phát triển. Ngoài ra, nghiên cứu cho thấy AI phát huy hiệu quả cao nhất khi được tích hợp với các công nghệ số như BIM và IoT, tạo thành hệ sinh thái quản lý dự án thông minh, có khả năng giám sát, dự báo và hỗ trợ ra quyết định theo thời gian thực.

Mặc dù mang lại nhiều lợi ích, việc triển khai AI trong xây dựng tinh gọn vẫn gặp những thách thức đáng kể như chi phí đầu tư cao, thiếu dữ liệu chất lượng, hạn chế về nhân lực có kỹ năng số và

tâm lý e ngại thay đổi. Đây là những rào cản cần được giải quyết để mở rộng ứng dụng AI trong ngành Xây dựng.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này phân tích vai trò của trí tuệ nhân tạo trong việc thúc đẩy triển khai Xây dựng tinh gọn tại các nước đang phát triển thông qua phương pháp nghiên cứu hỗn hợp, kết hợp tổng quan tài liệu, phỏng vấn chuyên gia và khảo sát định lượng. Kết quả cho thấy AI có tiềm năng cải thiện đáng kể hiệu quả thực hiện dự án thông qua việc nâng cao chất lượng lập kế hoạch, tối ưu hóa phân bổ nguồn lực, giảm lãng phí, hạn chế tái thi công và tăng cường năng suất lao động. Đồng thời, nghiên cứu xác định các yếu tố quyết định sự thành công của quá trình triển khai, bao gồm hạ tầng công nghệ, chất lượng dữ liệu, năng lực nguồn nhân lực, cam kết của lãnh đạo, mức độ tích hợp với BIM và IoT, cũng như môi trường chính sách hỗ trợ.

Đóng góp của nghiên cứu là xây dựng và kiểm định mô hình tích hợp xem xét đồng thời các yếu tố công nghệ, tổ chức, con người và môi trường thể chế trong quá trình ứng dụng AI vào LC. Kết quả không chỉ bổ sung bằng chứng thực nghiệm cho lĩnh vực Construction 4.0 tại các nước đang phát triển mà còn mở rộng cơ sở lý luận về các nhân tố thúc đẩy chuyển đổi số trong ngành xây dựng. Về phương diện thực tiễn, nghiên cứu khuyến nghị các doanh nghiệp ưu tiên phát triển hạ tầng dữ liệu, chuẩn hóa quy trình quản lý, tăng cường tích hợp AI với BIM và IoT, đồng thời đầu tư đào tạo nguồn nhân lực có năng lực số và tư duy Lean. Song song đó, các cơ quan quản lý cần hoàn thiện tiêu chuẩn dữ liệu, cơ chế chia sẻ thông tin và chính sách hỗ trợ nhằm tạo môi trường thuận lợi cho việc ứng dụng AI trong ngành Xây dựng.

Mặc dù nghiên cứu cung cấp những phát hiện có ý nghĩa, phạm vi khảo sát và quy mô mẫu vẫn còn hạn chế. Các nghiên cứu tiếp theo nên mở rộng khảo sát tại nhiều quốc gia, áp dụng các mô hình phân tích nâng cao như SEM hoặc PLS-SEM, đồng thời đánh giá sự tích hợp AI với các công nghệ mới như Digital Twin, Edge Computing, robot xây dựng và Generative AI nhằm làm rõ hơn vai trò của AI trong phát triển Lean Construction và xây dựng thông minh. □

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Pham, H. C., Pham, V. H. S., & Than, T. K. (2024). Adoption of green mark criteria toward construction management sustainability. *Buildings*, 14(5), 1242.
- [2] Ajitrotutu, R. O., Matthew, B., Garba, P., & Johnson, S. O. (2024). Advancing lean construction through Artificial

Intelligence: Enhancing efficiency and sustainability in project management. *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, 13(02), 496-509.

- [3] Liu, L., & Liu, Y. (2026). AI-assisted decision-making and dynamic trust in lean construction: Synergy mechanisms and insights. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 33(2), 1012-1034.
- [4] Salem, O., Solomon, J., Genaidy, A., & Minkarah, I. J. J. O. M. I. E. (2006). Lean construction: From theory to implementation. *Journal of management in engineering*, 22(4), 168-175.
- [5] Gao, S., & Low, S. P. (2014). *Lean construction management*. Springer, Singapore, doi, 10, 978-981.
- [6] Regona, M., Yigitcanlar, T., Xia, B., & Li, R. Y. M. (2022). Opportunities and adoption challenges of AI in the construction industry: A PRISMA review. *Journal of open innovation: technology, market, and complexity*, 8(1), 45.
- [7] Datta, S. D., Islam, M., Sobuz, M. H. R., Ahmed, S., & Kar, M. (2024). Artificial intelligence and machine learning applications in the project lifecycle of the construction industry: A comprehensive review. *Heliyon*, 10(5).