

DỰ ÁN XÂY DỰNG XANH ỨNG DỤNG TRÍ TUỆ NHÂN TẠO HƯỚNG TỚI XÂY DỰNG BỀN VỮNG TẠI CÁC NƯỚC ĐANG PHÁT TRIỂN

AI-DRIVEN GREEN BUILDING PROJECTS TOWARD SUSTAINABLE CONSTRUCTION IN DEVELOPING COUNTRIES

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

Tóm tắt: Nghiên cứu tập trung vào vai trò của trí tuệ nhân tạo (AI) trong việc nâng cao hiệu quả thực hiện các dự án xây dựng xanh tại các quốc gia đang phát triển, nơi ngành Xây dựng phải đối mặt với yêu cầu cân bằng giữa tăng trưởng cơ sở hạ tầng và phát triển bền vững. Mặc dù xây dựng xanh và AI đều được xem là những giải pháp quan trọng nhằm giảm tác động môi trường và tối ưu hóa hiệu quả dự án, các nghiên cứu về sự tích hợp giữa hai lĩnh vực này vẫn còn hạn chế. Để giải quyết khoảng trống đó, nghiên cứu áp dụng phương pháp hỗn hợp, bao gồm tổng quan tài liệu có hệ thống và khảo sát các chuyên gia xây dựng như nhà quản lý dự án, tư vấn, nhà thầu và học giả. Dữ liệu được phân tích bằng các phương pháp thống kê nhằm xác định các yếu tố ảnh hưởng đến việc ứng dụng AI trong các dự án xây dựng xanh.

Kết quả cho thấy AI đóng góp đáng kể vào việc nâng cao hiệu quả bền vững của các dự án xây dựng xanh thông qua việc cải thiện hiệu quả năng lượng, tối ưu hóa phân bổ nguồn lực, giảm chất thải xây dựng, hỗ trợ bảo trì dự đoán và giám sát dự án theo thời gian thực. Nghiên cứu cũng xác định các động lực chính thúc đẩy việc áp dụng AI, 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. Tuy nhiên, những rào cản như chi phí đầu tư cao, hạ tầng số chưa hoàn thiện, hạn chế về chính sách và thiếu nhân lực có kỹ năng AI vẫn còn tồn tại. Kết luận nghiên cứu khẳng định rằng việc tích hợp AI vào các dự án xây dựng xanh có tiềm năng thúc đẩy quá trình chuyển đổi số và phát triển bền vững của ngành Xây dựng ở các nền kinh tế đang phát triển, đồng thời cung cấp cơ sở tham khảo hữu ích cho các nhà hoạch định chính sách, nhà thực hành và các nhà nghiên cứu.

Từ khóa: Trí tuệ nhân tạo; Xây dựng xanh; Xây dựng bền vững; Chuyển đổi số.

1. GIỚI THIỆU

Trong những thập kỷ gần đây, tốc độ đô thị hóa nhanh chóng và nhu cầu phát triển cơ sở hạ tầng ngày càng gia tăng đã thúc đẩy ngành xây dựng trở thành một trong những động lực quan trọng của tăng trưởng kinh tế ở các quốc gia đang phát triển. Tuy nhiên, cùng với những đóng góp đáng kể cho phát triển kinh tế - xã hội, ngành xây dựng

Abstract: This research examines the role of Artificial Intelligence (AI) in improving the efficiency of green building projects in developing countries, where the construction industry must balance infrastructure growth with sustainable development. Although both green building and AI are widely regarded as crucial for reducing environmental impact and optimizing project efficiency, research on integrating these two fields remains limited. To address this gap, the study employs a research methodology that includes a systematic literature review and surveys of professionals in construction firms, including project managers, consultants, contractors, and academics. Data are analyzed using statistical methods to identify factors that influence the use of AI in green building projects.

The study found that AI significantly enhances the overall efficiency of green building projects by improving quantitative efficiency, optimizing the allocation of supplementary resources, reducing construction emissions, supporting predictive quality maintenance, and enabling real-time project monitoring. The research also identified key drivers of AI applications, including available functionalities, technological capabilities, human resources, stakeholder awareness, and government support. However, barriers such as high investment costs, incomplete digital infrastructure, policy limitations, and a shortage of AI-skilled personnel persist. The study concludes that integrating AI into green building projects has the potential to deliver quantitative transformation and sustainable development for the construction industry in developing economies, while also providing a useful reference for policymakers, practitioners, and researchers.

Keywords: Artificial Intelligence; Green Construction; Sustainable Construction; Digital Transformation.

cũng được xem là một trong những lĩnh vực tiêu thụ nhiều tài nguyên thiên nhiên, năng lượng và phát thải khí nhà kính lớn nhất trên toàn cầu[1]. Các nghiên cứu cho thấy các hoạt động xây dựng và vận hành công trình chiếm tỷ lệ đáng kể trong tổng mức tiêu thụ năng lượng, lượng phát thải carbon và khối lượng chất thải rắn phát sinh hằng năm. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu, suy giảm tài nguyên

và các mục tiêu phát triển bền vững (Sustainable Development Goals - SDGs) ngày càng được quan tâm, việc chuyển đổi sang các mô hình xây dựng bền vững đã trở thành yêu cầu cấp thiết đối với ngành xây dựng ở nhiều quốc gia.

Xây dựng xanh (Green Construction) được xem là một trong những giải pháp hiệu quả nhằm giảm thiểu các tác động tiêu cực của hoạt động xây dựng đối với môi trường, đồng thời nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên và cải thiện chất lượng môi trường sống. Các dự án xây dựng xanh tập trung vào việc tối ưu hóa hiệu quả năng lượng, sử dụng vật liệu thân thiện với môi trường, giảm thiểu phát sinh chất thải, bảo vệ tài nguyên thiên nhiên và nâng cao hiệu quả vận hành công trình trong suốt vòng đời dự án. Nhiều hệ thống đánh giá công trình xanh như LEED, BREEAM, Green Star và LOTUS đã được áp dụng rộng rãi nhằm thúc đẩy việc thực hiện các nguyên tắc phát triển bền vững trong ngành xây dựng[2].

Song song với xu hướng phát triển xây dựng xanh, cuộc Cách mạng Công nghiệp lần thứ tư đang tạo ra những thay đổi sâu sắc trong cách thức quản lý và triển khai các dự án xây dựng. Trong đó, Trí tuệ Nhân tạo (Artificial Intelligence - AI) nổi lên như một trong những công nghệ cốt lõi có khả năng chuyển đổi toàn diện ngành xây dựng. AI cho phép xử lý khối lượng dữ liệu lớn, hỗ trợ ra quyết định dựa trên dữ liệu, tự động hóa các quy trình quản lý và dự báo chính xác các rủi ro trong dự án. Các ứng dụng AI trong xây dựng ngày càng đa dạng, bao gồm tối ưu hóa thiết kế công trình, quản lý tiến độ, dự báo chi phí, giám sát an toàn lao động, quản lý năng lượng, bảo trì dự đoán và quản lý tài nguyên theo thời gian thực[3]. Việc tích hợp AI vào các dự án xây dựng xanh được kỳ vọng sẽ tạo ra những giải pháp hiệu quả hơn nhằm nâng cao hiệu suất bền vững và thúc đẩy quá trình chuyển đổi số trong ngành Xây dựng.

Mặc dù AI và xây dựng xanh đã được nghiên cứu rộng rãi, phần lớn các nghiên cứu tập trung vào từng lĩnh vực riêng lẻ hoặc được thực hiện tại các quốc gia phát triển. Tại các nước đang phát triển, những hạn chế về tài chính, hạ tầng số, nguồn nhân lực công nghệ và chính sách hỗ trợ còn thiếu đồng bộ đã tạo ra nhiều thách thức đối với việc ứng dụng AI trong các dự án xây dựng xanh. Đồng thời, các bằng chứng thực nghiệm về tác động của AI đến hiệu quả bền vững của các dự án này vẫn còn hạn chế, cho thấy khoảng trống nghiên cứu đáng kể. Nhằm khắc phục khoảng trống đó, nghiên cứu tập trung đánh giá vai trò của AI trong các dự án xây dựng xanh tại các quốc gia đang phát triển thông qua ba mục tiêu chính: tổng hợp các ứng dụng AI

từ các nghiên cứu trước đây, xác định các động lực và rào cản ảnh hưởng đến việc áp dụng AI, và đánh giá tác động của AI đối với kết quả bền vững của các dự án xây dựng xanh.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

2.1. Xây dựng xanh và xây dựng bền vững trong ngành Xây dựng

Xây dựng bền vững được hình thành nhằm bảo đảm sự cân bằng giữa hiệu quả kinh tế, bảo vệ môi trường và trách nhiệm xã hội trong suốt vòng đời của công trình. Trong đó, xây dựng xanh là một phương pháp quan trọng giúp hiện thực hóa các mục tiêu phát triển bền vững thông qua việc sử dụng hiệu quả năng lượng, nước và vật liệu, giảm phát thải khí nhà kính, hạn chế chất thải xây dựng và nâng cao chất lượng môi trường[4]. Các hệ thống đánh giá như LEED, BREEAM, Green Star và LOTUS đã được phát triển để đánh giá mức độ bền vững của công trình. Xây dựng xanh giúp giảm tiêu thụ năng lượng, cắt giảm phát thải carbon, nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên và mang lại lợi ích kinh tế dài hạn thông qua việc giảm chi phí vận hành, bảo trì. Tuy nhiên, việc triển khai tại các quốc gia đang phát triển vẫn gặp nhiều trở ngại như chi phí đầu tư ban đầu cao, hạn chế về công nghệ, thiếu nhân lực chuyên môn và nhận thức chưa đầy đủ của các bên liên quan[2]. Vì vậy, trong bối cảnh đô thị hóa nhanh và nhu cầu phát triển hạ tầng ngày càng tăng, việc ứng dụng các giải pháp công nghệ mới được xem là yếu tố quan trọng nhằm nâng cao hiệu quả các dự án xây dựng xanh và thúc đẩy phát triển bền vững.

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

Trí tuệ nhân tạo (AI) là công nghệ mô phỏng các hoạt động trí tuệ của con người như học tập, suy luận và ra quyết định, đồng thời là một trong những nền tảng quan trọng của Cách mạng công nghiệp 4.0. Trong ngành Xây dựng, AI được ứng dụng rộng rãi thông qua các công nghệ như dữ liệu lớn, học máy, học sâu, xử lý ngôn ngữ tự nhiên và thị giác máy tính để hỗ trợ dự báo chi phí, tiến độ, quản lý rủi ro, tối ưu hóa thiết kế, giám sát chất lượng, quản lý an toàn lao động, chuỗi cung ứng, bảo trì dự đoán và tự động hóa quy trình xây dựng [5]. AI giúp nâng cao độ chính xác trong dự báo, giảm sai sót và hỗ trợ ra quyết định hiệu quả hơn trong quản lý dự án. Sự kết hợp giữa AI với các công nghệ số như BIM, IoT, điện toán đám mây và bản sao số đã góp phần hình thành các giải pháp quản lý xây dựng thông minh [3]. Tuy nhiên, việc triển khai AI trong ngành Xây dựng vẫn gặp nhiều trở ngại như chi phí đầu tư cao, thiếu dữ liệu chất

lượng, hạ tầng số chưa hoàn thiện và thiếu nguồn nhân lực có chuyên môn về AI và khoa học dữ liệu.

2.3. Vai trò của AI trong các dự án xây dựng xanh

Việc tích hợp AI vào các dự án xây dựng xanh đang trở thành xu hướng quan trọng nhằm nâng cao hiệu quả phát triển bền vững trong toàn bộ vòng đời của công trình. Trong giai đoạn thiết kế, AI hỗ trợ tối ưu hóa các phương án về hiệu quả năng lượng, thông gió, ánh sáng tự nhiên và giảm phát thải carbon [6]. Trong giai đoạn thi công, AI giúp quản lý hiệu quả vật liệu, thiết bị và tiến độ, đồng thời giảm lãng phí tài nguyên và chất thải xây dựng thông qua các hệ thống giám sát thông minh dựa trên thị giác máy tính. Ở giai đoạn vận hành và bảo trì, AI kết hợp với các cảm biến IoT để tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng, nước và các nguồn tài nguyên khác, đồng thời hỗ trợ bảo trì dự đoán nhằm giảm chi phí và kéo dài tuổi thọ của công trình [2]. Nghiên cứu tổng quan cho thấy AI có thể giúp giảm tiêu thụ năng lượng từ 10-30%, giảm chất thải xây dựng và nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên, qua đó thúc đẩy quá trình chuyển đổi từ mô hình xây dựng truyền thống sang xây dựng thông minh và bền vững.

2.2. Khoảng trống nghiên cứu

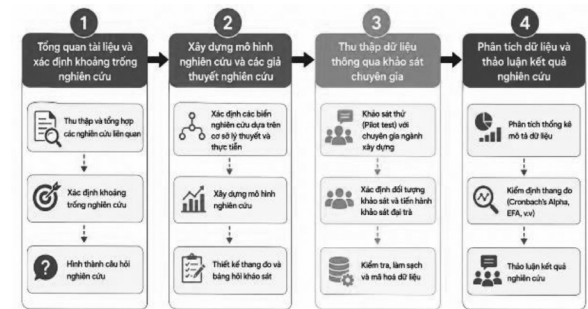
Mặc dù nghiên cứu về AI và xây dựng xanh ngày càng phát triển, phần lớn các công trình hiện nay chỉ tập trung vào từng ứng dụng AI riêng lẻ hoặc được thực hiện tại các quốc gia phát triển. Các nghiên cứu đánh giá tổng thể mối quan hệ giữa AI, xây dựng xanh và hiệu quả xây dựng bền vững trong bối cảnh các nước đang phát triển vẫn còn hạn chế. Bên cạnh đó, nhiều nghiên cứu chủ yếu xem xét khía cạnh kỹ thuật mà chưa phân tích đầy đủ các yếu tố tổ chức, công nghệ và môi trường ảnh hưởng đến việc triển khai AI trong thực tế.

Để khắc phục khoảng trống này, nghiên cứu đề xuất một mô hình đánh giá tác động của 5 yếu tố chính 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 đối với việc áp dụng AI trong các dự án xây dựng xanh. Đồng thời, nghiên cứu xem xét ảnh hưởng của AI đến hiệu quả xây dựng bền vững trên các khía cạnh môi trường, kinh tế và quản lý dự án, qua đó cung cấp cơ sở lý luận và thực tiễn để thúc đẩy ứng dụng AI tại các quốc gia đang phát triển.

3. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

Hình 1 trình bày phương pháp nghiên cứu gồm bốn bước: 1) Tổng quan tài liệu và xác định khoảng trống nghiên cứu; 2) Xây dựng mô hình

nghiên cứu và các giả thiết nghiên cứu, 3) Thu thập dữ liệu thông qua khảo sát chuyên gia; và 4) Phân tích dữ liệu và thảo luận kết quả nghiên cứu. Trên cơ sở tổng hợp tài liệu, bộ tiêu chí khảo sát được xây dựng được tiến hành phỏng vấn 18 chuyên gia có trên 10 năm kinh nghiệm để hoàn thiện bảng hỏi. Sau đó, khảo sát thực tế được tiến hành với 136 bảng hỏi, trong đó có 102 mẫu hợp lệ được sử dụng cho phân tích thống kê.



Hình 1. Phương pháp nghiên cứu

4. NGHIÊN CỨU VÀ PHÂN TÍCH SỐ LIỆU

4.1. Thống kê mô tả:

Nghiên cứu đã thu thập được 102 bảng khảo sát hợp lệ từ các chuyên gia đang tham gia hoặc có kinh nghiệm trong các dự án xây dựng xanh tại Việt Nam. Việc phân tích thống kê mô tả được thực hiện nhằm đánh giá đặc điểm của mẫu nghiên cứu và xác định mức độ đại diện của các đối tượng khảo sát đối với lĩnh vực nghiên cứu. Kết quả thống kê mô tả thể hiện trong Bảng 1.

Kết quả thống kê cho thấy phần lớn người tham gia khảo sát có nhiều kinh nghiệm trong lĩnh vực xây dựng xanh. Cụ thể, nhóm có kinh nghiệm từ **Bảng 1. Thống kê mô tả**

Thông tin mẫu	Số lượng	Tỷ lệ (%)
Kinh nghiệm tham gia các dự án xây dựng xanh	Dưới 5 năm	20.6%
	Từ 5 - dưới 10 năm	32.4%
	Từ 10 năm trở lên	47.1%
Chức danh công việc trong dự án	Nhà quản lý dự án;	17.6%
	Tư vấn xây dựng;	14.7%
	Nhà thầu;	13.7%
	Chủ đầu tư;	22.5%
	Chuyên gia chuyển đổi số;	20.6%
	Giảng viên và nhà nghiên cứu trong lĩnh vực xây dựng.	10.8%
Quy mô dự án	Dưới 100 tỷ	19.6%
	Từ 100 tỷ - dưới 1000 tỷ	40.2%
	Từ 1000 tỷ - dưới 5000 tỷ	34.3%
	Từ 5000 tỷ đồng trở lên	5.9%

Loại hình doanh nghiệp	Doanh nghiệp Nhà nước	15	14.7%
	Công ty cổ phần	24	23.5%
	Công ty trách nhiệm hữu hạn	29	28.4%
	Doanh nghiệp nước ngoài đầu tư tại Việt Nam	34	33.3%
Chức vụ trong tổ chức	Quản lý cấp cao	34	33.3%
	Quản lý cấp trung	42	41.2%
	Nhân viên	26	25.5%

10 năm trở lên chiếm tỷ lệ cao nhất với 48 người (47,1%), tiếp theo là nhóm có kinh nghiệm từ 5 đến dưới 10 năm với 33 người (32,4%). Nhóm có kinh nghiệm dưới 5 năm chỉ chiếm 20,6%, tương ứng với 21 người. Kết quả này cho thấy gần 80% số người tham gia khảo sát có từ 5 năm kinh nghiệm trở lên trong các dự án xây dựng xanh. Điều này phản ánh chất lượng mẫu khảo sát tương đối cao và bảo đảm tính tin cậy của các ý kiến đánh giá liên quan đến việc ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong các dự án xây dựng xanh.

Về chức danh công việc, đối tượng khảo sát được phân bố khá đa dạng giữa các nhóm liên quan trực tiếp đến quá trình triển khai dự án xây dựng xanh. Nhóm chủ đầu tư chiếm tỷ lệ cao nhất với 23 người (22,5%), tiếp theo là nhóm chuyên gia chuyển đổi số với 21 người (20,6%), nhà quản lý dự án với 18 người (17,6%), tư vấn xây dựng với 15 người (14,7%) và nhà thầu với 14 người (13,7%). Nhóm giảng viên và nhà nghiên cứu trong lĩnh vực xây dựng chiếm tỷ lệ thấp nhất với 11 người (10,8%). Sự phân bố tương đối đồng đều giữa các nhóm đối tượng cho thấy nghiên cứu đã thu thập được quan điểm từ nhiều bên liên quan trong hệ sinh thái của dự án xây dựng xanh. Điều này giúp nâng cao tính khách quan và tính toàn diện của kết quả nghiên cứu.

Kết quả khảo sát cho thấy đa số người tham gia đã từng tham gia các dự án có quy mô vốn đầu tư tương đối lớn. Nhóm dự án có quy mô từ 100 tỷ đồng đến dưới 1.000 tỷ đồng chiếm tỷ lệ cao nhất với 41 người (40,2%), tiếp theo là nhóm dự án từ 1.000 tỷ đồng đến dưới 5.000 tỷ đồng với 35 người (34,3%). Nhóm dự án dưới 100 tỷ đồng chiếm 19,6%, trong khi các dự án có quy mô từ 5.000 tỷ đồng trở lên chiếm 5,9%. Kết quả này cho thấy khoảng 74,5% số người được khảo sát có kinh nghiệm tham gia các dự án có giá trị đầu tư trên 100 tỷ đồng. Đây là những dự án có mức độ phức tạp cao và thường đòi hỏi các giải pháp quản lý tiên tiến, bao gồm ứng dụng công nghệ số và trí tuệ nhân tạo nhằm nâng cao hiệu quả quản lý và tính bền vững của dự án xanh.

Xét theo loại hình doanh nghiệp, nhóm doanh

ng nghiệp có vốn đầu tư nước ngoài (FDI) chiếm tỷ lệ cao nhất với 34 người (33,3%), tiếp theo là công ty trách nhiệm hữu hạn với 29 người (28,4%), công ty cổ phần với 24 người (23,5%) và doanh nghiệp nhà nước với 15 người (14,7%). Sự tham gia của các doanh nghiệp FDI với tỷ trọng lớn cho thấy xu hướng tiếp cận và ứng dụng các công nghệ tiên tiến, trong đó có AI và các giải pháp xây dựng xanh, đang được thúc đẩy mạnh mẽ trong các doanh nghiệp có yếu tố nước ngoài. Đồng thời, sự hiện diện của các loại hình doanh nghiệp khác nhau giúp đảm bảo tính đa dạng và khả năng khái quát hóa của kết quả nghiên cứu.

Về vị trí công tác, nhóm quản lý cấp trung chiếm tỷ lệ cao nhất với 42 người (41,2%), tiếp theo là quản lý cấp cao với 34 người (33,3%) và nhân viên chuyên môn với 26 người (25,5%). Như vậy, có tới 74,5% số người tham gia khảo sát đang giữ các vị trí quản lý trong tổ chức. Đây là những đối tượng có vai trò trực tiếp trong việc ra quyết định đầu tư, lựa chọn công nghệ và triển khai các sáng kiến chuyển đổi số trong doanh nghiệp. Do đó, các ý kiến thu thập được có giá trị thực tiễn cao trong việc đánh giá các yếu tố ảnh hưởng đến việc áp dụng AI trong các dự án xây dựng xanh.

4.2. Kiểm định thống kê

Tiến hành phân tích Cronbach's Alpha để kiểm tra độ tin cậy của thang đo, nhằm loại bỏ các biến không phù hợp. Kết quả 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 yếu tố khám phá (EFA) và áp dụng phương pháp trích yếu tố Principal Component với phép quay Varimax. Sau đó, tiến hành kiểm định Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) $> 0,5$ và Bartlett có Sig $< 0,05$, đạt yêu cầu 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 cho thấy cả 5 yếu tố gồm sự sẵn sàng của tổ chức (OR), năng lực công nghệ (TC), nguồn nhân lực số (DHR), nhận thức của các bên liên quan (SA) và sự hỗ trợ của chính phủ (GS) đều có tác động tích cực đến việc áp dụng trí tuệ nhân tạo (AI) trong các dự án xây dựng xanh tại các nước đang phát triển.

5.1. Sự sẵn sàng của tổ chức (Organizational Readiness)

Kết quả nghiên cứu cho thấy sự sẵn sàng của tổ chức là một trong những yếu tố có ảnh hưởng mạnh nhất đến việc áp dụng AI trong các dự án xây dựng

xanh. Các doanh nghiệp xây dựng chỉ có thể triển khai AI thành công khi đã chuẩn bị đầy đủ chiến lược, nguồn lực tài chính, cơ cấu tổ chức và cam kết từ lãnh đạo cấp cao. Trong bối cảnh các nước đang phát triển, nhiều doanh nghiệp xây dựng vẫn vận hành theo mô hình quản lý truyền thống, trong đó việc ứng dụng công nghệ tiên tiến còn hạn chế. Do đó, sự cam kết của lãnh đạo đóng vai trò quyết định trong việc thúc đẩy quá trình chuyển đổi số và đổi mới sáng tạo. Các tổ chức có tầm nhìn dài hạn về phát triển bền vững thường sẵn sàng đầu tư vào các giải pháp AI nhằm tối ưu hóa hiệu quả vận hành, nâng cao năng suất lao động và giảm tác động môi trường của các dự án xanh.

5.2. Năng lực công nghệ (Technological Capability)

Nghiên cứu chỉ ra năng lực công nghệ có ảnh hưởng tích cực và đáng kể đến việc áp dụng AI trong các dự án xây dựng xanh. Kết quả này phản ánh vai trò quan trọng của hạ tầng số và năng lực quản lý dữ liệu trong việc triển khai các giải pháp AI. Các ứng dụng AI trong xây dựng xanh thường yêu cầu khối lượng dữ liệu lớn và liên tục từ nhiều nguồn khác nhau như BIM, IoT, cảm biến công trình, hệ thống quản lý năng lượng và dữ liệu vận hành công trình. Vì vậy, những doanh nghiệp sở hữu nền tảng công nghệ hiện đại và hệ thống dữ liệu được chuẩn hóa sẽ có lợi thế lớn trong việc khai thác hiệu quả các ứng dụng AI. Đối với các nước đang phát triển, hạn chế về hạ tầng công nghệ và mức độ số hóa thấp vẫn là những rào cản phổ biến. Kết quả nghiên cứu cho thấy việc đầu tư vào các công nghệ nền tảng như BIM, Digital Twin, IoT và điện toán đám mây sẽ tạo điều kiện thuận lợi cho việc tích hợp AI trong toàn bộ vòng đời của dự án xây dựng xanh.

5.3. Nguồn nhân lực số (Digital Human Resources)

Nguồn nhân lực số được xác định là yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến việc áp dụng AI trong các dự án xây dựng xanh. Kết quả nghiên cứu cho thấy các doanh nghiệp sở hữu đội ngũ nhân sự có kiến thức và kỹ năng về công nghệ số thường có khả năng triển khai AI hiệu quả hơn. Mặc dù AI có khả năng tự động hóa nhiều hoạt động quản lý và vận hành, con người vẫn giữ vai trò trung tâm trong việc thiết kế, triển khai, giám sát và khai thác các hệ thống AI. Trong thực tế, một trong những thách thức lớn nhất tại các nước đang phát triển là sự thiếu hụt nguồn nhân lực có chuyên môn về AI, khoa học dữ liệu, BIM và chuyển đổi số.

Phát hiện này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc đầu tư vào đào tạo và phát triển nguồn nhân lực chất lượng cao cho ngành Xây dựng. Các trường

đại học, viện nghiên cứu và doanh nghiệp cần tăng cường hợp tác để xây dựng các chương trình đào tạo liên ngành giữa xây dựng, công nghệ thông tin và khoa học dữ liệu nhằm đáp ứng nhu cầu chuyển đổi số trong tương lai. Ngoài ra, việc nâng cao năng lực số cho đội ngũ quản lý dự án và kỹ sư xây dựng cũng là điều kiện cần thiết để khai thác hiệu quả các công nghệ AI phục vụ mục tiêu xây dựng bền vững.

5.4. Nhận thức của các bên liên quan (Stakeholder Awareness)

Nghiên cứu chỉ ra rằng nhận thức của các bên liên quan có tác động tích cực đến việc áp dụng AI trong các dự án xây dựng xanh. Điều này cho thấy mức độ hiểu biết và sự chấp nhận công nghệ của các bên liên quan đóng vai trò quan trọng trong việc thúc đẩy đổi mới công nghệ trong ngành xây dựng. Các bên liên quan trong dự án xây dựng xanh bao gồm chủ đầu tư, tư vấn, nhà thầu, cơ quan quản lý nhà nước và người sử dụng công trình. Khi các bên nhận thức rõ lợi ích của AI đối với hiệu quả dự án và mục tiêu phát triển bền vững, họ có xu hướng ủng hộ và tham gia tích cực hơn vào quá trình triển khai công nghệ.

Ngược lại, nhận thức hạn chế về AI có thể dẫn đến tâm lý e ngại thay đổi, lo ngại về chi phí đầu tư hoặc thiếu tin tưởng vào hiệu quả của công nghệ mới. Đây là một trong những nguyên nhân khiến quá trình chuyển đổi số trong ngành xây dựng ở nhiều quốc gia đang phát triển bị chậm lại. Do đó, các chương trình truyền thông, đào tạo và chia sẻ kinh nghiệm thực tiễn về AI trong xây dựng xanh cần được đẩy mạnh nhằm nâng cao nhận thức và thúc đẩy sự tham gia của các bên liên quan trong quá trình chuyển đổi số.

5.5. Sự hỗ trợ của chính phủ (Government Support)

Nghiên cứu khẳng định rằng sự hỗ trợ của chính phủ là một trong những yếu tố quan trọng thúc đẩy việc ứng dụng AI trong các dự án xây dựng xanh. Điều này phản ánh vai trò của môi trường thể chế trong việc tạo điều kiện thuận lợi cho đổi mới công nghệ và phát triển bền vững. Tại các nước đang phát triển, nhiều doanh nghiệp xây dựng, đặc biệt là các doanh nghiệp vừa và nhỏ, thường gặp khó khăn về nguồn vốn đầu tư và năng lực công nghệ. Trong bối cảnh đó, các chính sách hỗ trợ từ chính phủ có thể giúp giảm bớt rủi ro và chi phí khi triển khai các giải pháp AI.

Các hình thức hỗ trợ có thể bao gồm ưu đãi thuế cho doanh nghiệp đầu tư vào công nghệ xanh, hỗ trợ tài chính cho các dự án chuyển đổi số, xây dựng các tiêu chuẩn kỹ thuật về dữ liệu và AI, cũng như đầu tư phát triển hạ tầng số quốc gia. Bên cạnh đó,

việc hoàn thiện khung pháp lý liên quan đến dữ liệu, quyền riêng tư, an ninh mạng và ứng dụng AI cũng là điều kiện quan trọng để thúc đẩy việc áp dụng công nghệ trong thực tiễn.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đánh giá vai trò của trí tuệ nhân tạo (AI) trong các dự án xây dựng xanh và xác định các yếu tố ảnh hưởng đến việc áp dụng AI nhằm thúc đẩy xây dựng bền vững tại các nước đang phát triển. Kết quả cho thấy AI góp phần nâng cao hiệu quả xây dựng bền vững thông qua việc tối ưu hóa năng lượng, quản lý tài nguyên, giảm chất thải, hỗ trợ bảo trì dự đoán và giám sát dự án theo thời gian thực. Nghiên cứu cũng xác định 5 yếu tố tác động tích cực đến việc áp dụng AI, 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. Trong đó, sự sẵn sàng của tổ chức và năng lực công nghệ là những yếu tố nền tảng quyết định thành công của việc triển khai AI trong các dự án xây dựng xanh.

Nghiên cứu đóng góp về mặt lý thuyết bằng cách mở rộng hiểu biết về mối quan hệ giữa AI, xây dựng xanh và xây dựng bền vững tại các nước đang phát triển, đồng thời xây dựng và kiểm định mô hình các yếu tố tổ chức, công nghệ, con người và thể chế ảnh hưởng đến việc áp dụng AI. Kết quả nghiên cứu bổ sung bằng chứng thực nghiệm cho các lý thuyết về đổi mới công nghệ, chuyển đổi số và phát triển bền vững. Về thực tiễn, nghiên cứu đề xuất các doanh nghiệp xây dựng cần đẩy mạnh chuyển đổi số, đầu tư hạ tầng công nghệ, nâng cao năng lực quản lý dữ liệu và phát triển nguồn nhân lực số. Các cơ quan quản lý cần hoàn thiện chính sách, tiêu chuẩn kỹ thuật và cơ chế hỗ trợ nhằm thúc đẩy ứng dụng AI trong xây dựng xanh. Tuy nhiên, nghiên cứu còn một số hạn chế như phạm vi khảo sát chủ yếu tại Việt Nam và một số nước đang phát triển, tập trung ở cấp độ tổ chức và sử dụng dữ liệu cắt ngang. Trong tương lai, cần mở rộng phạm vi nghiên cứu, phân tích sâu các công nghệ AI cụ thể như học máy, thị giác máy tính, bản sao số và AI tạo sinh, đồng thời nghiên cứu sự kết hợp giữa AI với BIM, IoT và Blockchain nhằm phát triển các mô hình quản lý dự án thông minh và bền vững hơn. □

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Tran, S. V. T., Pham, H. C., Le, Q. T., & Lee, U. K. (2025). Digital technologies for monitoring hazardous area entry in construction sites. *Automation in Construction*, 177, 106357.
- [2] Pham, H. C., Pham, V. H. S., & Than, T. K. (2024). Adoption of green mark criteria toward construction management sustainability. *Buildings*, 14(5), 1242.

- [3] Pham-Hang, A. T., Tran, S. V. T., & Pham, H. C. (2026, April). IoT-Driven Construction Safety Management Approach in Developing Countries. In *International Conference on Computational Intelligence in Engineering Science* (pp. 610-621). Cham: Springer Nature Switzerland.
- [4] Zuo, J., & Zhao, Z. Y. (2014). Green building research-current status and future agenda: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 30, 271-281.
- [5] Pan, Y., & Zhang, L. (2023). Integrating BIM and AI for smart construction management: Current status and future directions. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(2), 1081-1110.
- [6] Xiang, Y., Chen, Y., Xu, J., & Chen, Z. (2022). Research on sustainability evaluation of green building engineering based on artificial intelligence and energy consumption. *Energy Reports*, 8, 11378-11391.