

ẢNH HƯỞNG CỦA TRÍ TUỆ NHÂN TẠO AI ĐỐI VỚI NGÀNH XÂY DỰNG NÓI CHUNG VÀ NGÀNH THÍ NGHIỆM VÀ KIỂM ĐỊNH XÂY DỰNG

ThS. Nguyễn Chí Tiên - Công ty CP. Tư vấn Công nghệ Xây dựng Sài Gòn (SACOTEC)

Tóm tắt:

Trí tuệ nhân tạo (Artificial Intelligence – AI) đang trở thành một trong những động lực quan trọng thúc đẩy chuyển đổi số của ngành xây dựng trên phạm vi toàn cầu. Nghiên cứu này phân tích một cách hệ thống ảnh hưởng của AI đối với ngành xây dựng nói chung và lĩnh vực thí nghiệm, kiểm định xây dựng nói riêng thông qua tổng hợp các nghiên cứu quốc tế, đánh giá thực trạng ứng dụng và phân tích khả năng thay thế của AI trong các hoạt động kỹ thuật. Kết quả cho thấy AI có tiềm năng lớn trong việc tự động hóa quản lý dữ liệu, hỗ trợ phân tích tin hiệu thí nghiệm, nhận dạng khuyết tật, tối ưu hóa quy trình làm việc và nâng cao hiệu quả quản lý phòng thử nghiệm theo ISO/IEC 17025:2017. Tuy nhiên, đối với các công việc đòi hỏi đánh giá hiện trường, xử lý tình huống phức tạp, suy luận kỹ thuật và chịu trách nhiệm pháp lý như thí nghiệm cọc, kiểm định kết cấu và phê duyệt kết quả thử nghiệm, AI hiện chưa thể thay thế vai trò của kỹ sư và chuyên gia. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất mô hình "AI – Kỹ sư – Chuyên gia" (Human–AI Collaboration) như một định hướng phát triển bền vững, trong đó AI đóng vai trò là công cụ hỗ trợ thông minh nhằm nâng cao năng suất, chất lượng và độ tin cậy của hoạt động thí nghiệm – kiểm định xây dựng, còn con người giữ vai trò trung tâm trong việc ra quyết định và chịu trách nhiệm chuyên môn. Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ giới hạn kỹ thuật, pháp lý và đạo đức của AI, đồng thời cung cấp cơ sở tham khảo cho các cơ quan quản lý, doanh nghiệp và phòng thử nghiệm trong quá trình chuyển đổi số của ngành xây dựng.

Từ khóa: Trí tuệ nhân tạo (AI); Ngành xây dựng; Thí nghiệm xây dựng; Kiểm định xây dựng; ISO/IEC 17025:2017; Chuyển đổi số; Human–AI Collaboration.

Abstract:

Artificial Intelligence (AI) has emerged as a key driver of digital transformation in the global construction industry. This study systematically investigates the impact of AI on the construction sector, with particular emphasis on construction testing and inspection. Through a comprehensive review of international literature, analysis of current practices, and evaluation of AI's capability to replace or support engineering activities, the study identifies both opportunities and limitations of AI in this field. The findings indicate that AI offers significant advantages in automating data management, analyzing testing signals, detecting structural defects, optimizing laboratory workflows, and improving quality management systems compliant with ISO/IEC 17025:2017. However, AI is not yet capable of replacing engineers and technical experts in tasks requiring field judgment, complex problem-solving, engineering reasoning, and legal accountability, such as pile testing, structural inspection, and approval of testing reports. Based on these findings, the study proposes a Human–AI Collaboration framework, in which AI functions as an intelligent decision-support tool while engineers and experts remain responsible for technical evaluation, professional judgment, and legal accountability. The research also clarifies the technical, legal, and ethical boundaries of AI in construction testing and inspection and provides practical recommendations for government agencies, laboratories, and construction enterprises in implementing digital transformation strategies.

Keywords: Artificial Intelligence (AI); Construction Industry; Construction Testing; Construction Inspection; ISO/IEC 17025:2017; Digital Transformation; Human–AI Collaboration.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

1. Bối cảnh nghiên cứu

Cuộc Cách mạng công nghiệp lần thứ tư (Industry 4.0) đã và đang tạo ra những thay đổi sâu rộng trong mọi lĩnh vực của nền kinh tế toàn cầu. Trong đó, trí tuệ nhân tạo (Artificial Intelligence – AI) được xem là công nghệ cốt lõi, cùng với Internet vạn vật (IoT), dữ liệu lớn (Big Data), điện toán đám mây (Cloud Computing), robot tự động (Robotics), mô hình thông tin công trình (Building Information Modeling – BIM) và bản sao số (Digital Twin), đang từng bước làm thay đổi phương thức thiết kế, thi công, vận hành và quản lý công trình xây dựng.

Theo McKinsey & Company, AI có khả năng tạo ra giá trị kinh tế hàng nghìn tỷ USD mỗi năm thông qua việc tối ưu hóa quy trình, giảm lãng phí, nâng cao năng suất lao động và hỗ trợ ra quyết định trong nhiều ngành công nghiệp, trong đó có xây dựng. Trong khi đó, World Economic Forum nhận định AI sẽ trở thành một trong những động lực quan trọng nhất thúc đẩy chuyển đổi số của ngành xây dựng trong giai đoạn từ nay đến năm 2035.

Ngành xây dựng vốn được đánh giá là một trong những ngành có tốc độ chuyển đổi số chậm so với sản xuất và công nghệ thông tin do đặc thù phụ thuộc nhiều vào điều kiện hiện trường, lao động thủ công, yếu tố địa chất, điều kiện thời tiết và sự đa dạng của từng dự án. Tuy nhiên, sự phát triển nhanh chóng của AI trong những năm gần đây đang từng bước thay đổi nhận định này. Các công nghệ như học online (Machine Learning), nghiên cứu chuyên sâu (Deep Learning), thị giác máy tính (Computer Vision), xử lý ngôn ngữ tự nhiên (Natural Language Processing – NLP), AI tạo sinh (Generative AI) và AI tác nhân (AI Agents) đã bắt đầu được ứng dụng trong lập kế hoạch thi công, dự báo tiến độ, kiểm soát chi phí, giám sát an toàn lao động, nhận diện khuyết tật kết cấu, phân tích hình ảnh công trình, tối ưu hóa thiết kế và quản lý tài sản hạ tầng.

Song song với sự phát triển của AI, nhiều quốc gia phát triển như Hoa Kỳ, Nhật Bản, Đức, Singapore, Hàn Quốc và Trung Quốc đã triển khai các chiến lược quốc gia nhằm tích hợp AI vào toàn bộ vòng đời công trình, từ khảo sát, thiết kế, thi công đến vận hành và bảo trì. Những mô hình như Smart Construction, Digital Construction hay Construction 5.0 đang dần trở thành xu hướng tất yếu của ngành xây dựng hiện đại.

2. AI và sự thay đổi đối với ngành thí nghiệm, kiểm định xây dựng

Trong lĩnh vực thí nghiệm và kiểm định xây dựng, AI đang mở ra nhiều cơ hội mới nhằm nâng cao chất lượng và hiệu quả công việc. Các thuật toán AI có thể hỗ trợ xử lý lượng dữ liệu rất lớn thu được từ cảm biến, thiết bị đo và các hệ thống quan trắc; nhận dạng bất thường trong tín hiệu thí nghiệm; tự động phân loại kết quả; phát hiện sai số; dự báo xu hướng hư hỏng; và hỗ trợ lập báo cáo kỹ thuật.

Đối với các phương pháp thí nghiệm không phá hủy (Non-Destructive Testing – NDT), AI đã được nghiên cứu để phân tích ảnh siêu âm, ảnh nhiệt, tín hiệu radar xuyên đất (Ground Penetrating Radar – GPR), ảnh UAV, ảnh LiDAR và các dạng tín hiệu dao động nhằm phát hiện sớm các khuyết tật mà phương pháp truyền thống khó nhận biết.

Trong công tác thí nghiệm cọc, AI cũng bắt đầu được ứng dụng trong việc xử lý tín hiệu của các phương pháp như:

- Thử động biến dạng lớn (Pile Driving Analyzer – PDA);
- Thử động biến dạng nhỏ (Pile Integrity Test – PIT);
- Siêu âm truyền qua thân cọc (Crosshole Sonic Logging – CSL);
- Đo độ nghiêng hồ khoan (KODEN Test);
- Quan trắc chuyển vị và ứng suất bằng cảm biến thông minh.

Các thuật toán học máy có thể hỗ trợ phân tích hàng nghìn tín hiệu trong thời gian ngắn, nhận diện các dạng sóng bất thường, dự báo khả năng tồn tại khuyết tật và hỗ trợ chuyên gia đưa ra nhận định nhanh hơn so với phương pháp xử lý truyền thống.

Tuy nhiên, kết quả của AI vẫn phụ thuộc rất lớn vào chất lượng dữ liệu đầu vào, điều kiện hiện trường, phạm vi huấn luyện của mô hình và sự giám sát của chuyên gia. Trong các hoạt động chịu ảnh hưởng mạnh của điều kiện địa chất, tải trọng, thiết bị và kinh nghiệm thực địa, AI chưa thể thay thế hoàn toàn vai trò của kỹ sư thí nghiệm.

3. Khoảng trống nghiên cứu

Mặc dù số lượng công bố khoa học về AI trong xây dựng tăng nhanh trong thập kỷ qua, phần lớn tập trung vào các chủ đề như BIM, quản lý dự án, tối ưu hóa tiến độ, robot xây dựng, nhận diện hình ảnh và quản lý tài sản công trình. Trong khi đó, các nghiên cứu chuyên sâu về tác động của AI đối với lĩnh vực thí nghiệm và kiểm định xây dựng vẫn còn hạn chế, đặc biệt là đối với các hoạt động thí nghiệm hiện trường.

Đến nay, chưa có nhiều nghiên cứu phân tích một cách hệ thống khả năng AI tham gia vào toàn bộ chuỗi công việc của một phòng thí nghiệm xây dựng theo các yêu cầu của ISO/IEC 17025:2017, bao gồm: tiếp nhận yêu cầu khách hàng, lập kế hoạch thí nghiệm, kiểm soát thiết bị đo, đánh giá năng lực nhân sự, thực hiện phép thử, xử lý dữ liệu, phê duyệt kết quả, phát hành báo cáo và lưu trữ hồ sơ.... Đặc biệt, đối với các phương pháp thí nghiệm cọc hiện trường như nén tĩnh, thử nhỏ, nén ngang, PDA, PIT, CSL và KODEN, hiện vẫn thiếu các nghiên cứu đánh giá toàn diện về giới hạn kỹ thuật, pháp lý và đạo đức của AI. Đây là khoảng trống quan trọng cần được làm rõ trong bối cảnh nhiều doanh nghiệp bắt đầu ứng dụng AI vào các hoạt động kỹ thuật.

4. Mục tiêu nghiên cứu

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm các mục tiêu sau:

- Phân tích xu hướng phát triển của AI trong ngành xây dựng trên thế giới và tại Việt Nam.
- Tổng hợp các nghiên cứu quốc tế liên quan đến ứng dụng AI trong xây dựng và thí nghiệm – kiểm định xây dựng.
- Đánh giá thực trạng ứng dụng AI trong công tác thí nghiệm và kiểm định xây dựng hiện nay.
- Phân tích các cơ hội và rủi ro khi áp dụng AI vào hoạt động thí nghiệm hiện trường.
- Xác định những công việc AI có thể thay thế, hỗ trợ hoặc chưa thể thay thế con người.

- Làm rõ vai trò không thể thay thế của kỹ sư và chuyên gia trong các hoạt động thí nghiệm thực địa, đặc biệt dưới góc độ kỹ thuật, pháp lý và trách nhiệm nghề nghiệp.
- Đề xuất định hướng phát triển nguồn nhân lực, đào tạo và chuyển đổi số cho các phòng thí nghiệm xây dựng trong kỷ nguyên AI.

5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Về mặt khoa học, nghiên cứu góp phần hệ thống hóa các kết quả nghiên cứu quốc tế về AI trong xây dựng, đồng thời bổ sung góc nhìn chuyên sâu đối với lĩnh vực thí nghiệm và kiểm định xây dựng – một lĩnh vực còn ít được đề cập trong các công bố hiện nay.

Về mặt thực tiễn, kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở tham khảo cho các cơ quan quản lý, doanh nghiệp, phòng thí nghiệm LAS-XD, tổ chức chứng nhận và các kỹ sư trong quá trình xây dựng chiến lược ứng dụng AI, chuyển đổi số và phát triển nguồn nhân lực. Nghiên cứu cũng nhấn mạnh rằng AI là công cụ hỗ trợ mạnh mẽ nhằm nâng cao năng suất, chất lượng và độ tin cậy của hoạt động thí nghiệm, nhưng trách nhiệm chuyên môn, khả năng đánh giá tổng hợp, kinh nghiệm thực địa và việc đưa ra kết luận kỹ thuật cuối cùng vẫn thuộc về con người.

Quan điểm này phù hợp với các nguyên tắc về tính khách quan, năng lực chuyên môn và trách nhiệm của phòng thử nghiệm được quy định trong tiêu chuẩn ISO/IEC 17025:2017, đồng thời phản ánh xu hướng phát triển của ngành xây dựng hiện đại theo mô hình "Human-AI Collaboration", trong đó AI đóng vai trò là công cụ hỗ trợ quyết định, còn con người giữ vai trò chịu trách nhiệm chuyên môn và pháp lý đối với chất lượng công trình.

II. TỔNG QUAN CÁC NGHIÊN CỨU VỀ TRÍ TUỆ NHÂN TẠO TRONG NGÀNH XÂY DỰNG VÀ THÍ NGHIỆM – KIỂM ĐỊNH XÂY DỰNG

1. Sự phát triển của trí tuệ nhân tạo trong ngành xây dựng

1.1 Xu hướng phát triển AI trong ngành xây dựng trên thế giới

Trong khoảng mười năm trở lại đây, trí tuệ nhân tạo (Artificial Intelligence – AI) đã chuyển từ giai đoạn nghiên cứu thử nghiệm sang giai đoạn ứng dụng rộng rãi trong ngành kiến trúc, kỹ thuật và xây dựng (Architecture, Engineering and Construction – AEC). Nếu trước năm 2015, các nghiên cứu chủ yếu tập trung vào việc sử dụng thuật toán học máy (Machine Learning) để dự báo chi phí, tiến độ và năng suất lao động thì từ sau năm 2020, với sự phát triển mạnh mẽ của năng lực tính toán, dữ liệu lớn (Big Data), điện toán đám mây và đặc biệt là AI tạo sinh (Generative AI), phạm vi ứng dụng đã mở rộng sang hầu hết các giai đoạn của vòng đời công trình.

Một tổng quan hệ thống của Datta và cộng sự (2024) cho thấy AI hiện diện trong tất cả các giai đoạn của dự án xây dựng, bao gồm lập kế hoạch, khảo sát, thiết kế, thi công, nghiệm thu, vận hành và bảo trì. Tuy nhiên, mật độ nghiên cứu tập trung nhiều nhất ở giai đoạn lập kế hoạch và thi công, nơi AI được sử dụng để tối ưu hóa tiến độ, dự báo chi phí, phân bổ nguồn lực và hỗ trợ ra quyết định.

Trong khi đó, Chen và cộng sự (2024) nhận định ba động lực lớn thúc đẩy AI trong xây dựng gồm: (i) tình trạng thiếu hụt lao động kỹ thuật tại nhiều quốc gia; (ii) yêu cầu nâng cao

năng suất và giảm chi phí; và (iii) nhu cầu cải thiện mức độ an toàn, chất lượng và tính bền vững của các dự án hạ tầng. Vì vậy, AI không còn được xem là một công cụ hỗ trợ đơn lẻ mà đang trở thành nền tảng của quá trình chuyển đổi số trong toàn ngành xây dựng.

1.2. Các công nghệ AI chủ đạo trong xây dựng

Khác với quan niệm phổ biến cho rằng AI chỉ là các mô hình ngôn ngữ như ChatGPT, AI trong xây dựng là một hệ sinh thái gồm nhiều công nghệ hỗ trợ lẫn nhau. Các nền tảng khác có thể kể đến như:

- Machine Learning (ML): là nền tảng được sử dụng để xây dựng các mô hình dự báo dựa trên dữ liệu lịch sử. Trong xây dựng, ML được áp dụng để dự báo tiến độ thi công, xác suất tai nạn lao động, tuổi thọ công trình, cường độ bê tông, độ lún nền móng và nhiều chỉ tiêu kỹ thuật khác.
- Deep Learning (DL): là nhánh phát triển của ML với khả năng xử lý dữ liệu phi cấu trúc như hình ảnh, video và tín hiệu. Nhờ mạng nơ-ron sâu, DL đặc biệt hiệu quả trong nhận dạng vết nứt, phân loại khuyết tật bê tông, đánh giá bề mặt kết cấu và phân tích dữ liệu thu được từ UAV, camera hoặc máy quét laser. Tổng quan trên 296 nghiên cứu từ năm 2014–2024 cho thấy số lượng ứng dụng DL trong quản lý và kỹ thuật xây dựng tăng nhanh, đặc biệt trong các bài toán thị giác máy tính và giám sát công trường.
- Computer Vision (CV): hiện là lĩnh vực phát triển mạnh nhất. Thay vì kỹ sư phải kiểm tra trực tiếp bằng mắt thường, hệ thống AI có thể phân tích hình ảnh hoặc video để phát hiện nứt, bong tróc, ăn mòn, sai lệch kích thước, lỗi lắp đặt cốt thép hoặc các nguy cơ mất an toàn. Các nghiên cứu gần đây cho thấy việc kết hợp CV với UAV, camera cố định và mô hình BIM giúp tăng tốc đáng kể quá trình kiểm tra và giám sát công trình.
- Bên cạnh đó, Natural Language Processing (NLP) và Generative AI đang được ứng dụng trong việc tự động phân tích hợp đồng, tiêu chuẩn kỹ thuật, nhật ký công trình, hồ sơ chất lượng và hỗ trợ lập báo cáo. Mô hình Retrieval-Augmented Generation (RAG) cho phép AI truy xuất dữ liệu nội bộ của doanh nghiệp, tạo câu trả lời có căn cứ và giảm hiện tượng "ảo giác" của mô hình ngôn ngữ. Điều này mở ra khả năng xây dựng các trợ lý AI chuyên biệt cho doanh nghiệp xây dựng và phòng thí nghiệm.

1.3. AI kết hợp với các công nghệ số trong xây dựng

Một đặc điểm nổi bật của xu hướng hiện nay là AI không hoạt động độc lập mà được tích hợp với các nền tảng số khác.

Kết hợp giữa AI và Building Information Modeling (BIM) giúp tự động phát hiện xung đột thiết kế, tối ưu hóa phương án thi công và cập nhật tiến độ theo thời gian thực. AI có thể phân tích dữ liệu BIM để dự báo nguy cơ chậm tiến độ hoặc vượt chi phí trước khi chúng xảy ra.

Tương tự, Digital Twin (bản sao số) cho phép tạo mô hình số phản ánh trạng thái thực tế của công trình thông qua dữ liệu cảm biến. AI xử lý dữ liệu liên tục từ Digital Twin để phát hiện bất thường, dự báo hư hỏng và đề xuất kế hoạch bảo trì tối ưu. Mô hình này đang được áp dụng ngày càng nhiều trong quản lý cầu, đường, sân bay, cảng biển và các công trình công nghiệp quy mô lớn.

Ngoài ra, AI còn được tích hợp với UAV, LiDAR, Laser Scanning, IoT và Robot tự hành.... Các thiết bị này đóng vai trò thu thập dữ liệu ngoài hiện trường, trong khi AI thực hiện phân tích, nhận dạng và hỗ trợ ra quyết định. Sự kết hợp này giúp giảm thời gian khảo sát, tăng độ bao phủ của dữ liệu và hạn chế rủi ro cho con người trong các môi trường nguy hiểm.

1.4. Chuyển dịch từ tự động hóa sang AI cộng tác

Một xu hướng đáng chú ý trong các nghiên cứu gần đây là sự chuyển dịch từ mô hình "AI thay thế con người" sang mô hình Human-AI Collaboration. Theo quan điểm này, AI đảm nhiệm các nhiệm vụ lặp đi lặp lại, xử lý khối lượng dữ liệu lớn và đưa ra các gợi ý dựa trên xác suất; trong khi con người chịu trách nhiệm đánh giá bối cảnh, cân nhắc các yếu tố kỹ thuật, pháp lý và đạo đức để đưa ra quyết định cuối cùng.

Samsami (2024), trong nghiên cứu tổng quan về kiểm tra và giám sát xây dựng tự động, chỉ ra rằng mặc dù các hệ thống AI có thể nâng cao hiệu quả kiểm tra bằng laser scanning, UAV, robot và thị giác máy tính, việc triển khai thực tế vẫn gặp nhiều thách thức về chất lượng dữ liệu, khả năng khái quát của mô hình, tích hợp đa nguồn dữ liệu và trách nhiệm pháp lý. Tác giả kết luận rằng AI hiện nay nên được xem là công cụ hỗ trợ kỹ sư thay vì thay thế hoàn toàn hoạt động kiểm tra xây dựng.

Quan điểm này cũng được nhiều nghiên cứu khác đồng thuận khi nhấn mạnh rằng các quyết định kỹ thuật trong xây dựng không chỉ phụ thuộc vào dữ liệu mà còn đòi hỏi kinh nghiệm hiện trường, hiểu biết về điều kiện địa chất, tiêu chuẩn kỹ thuật và trách nhiệm nghề nghiệp của kỹ sư. Đây là những yếu tố mà AI hiện nay chưa thể tái tạo đầy đủ.

1.5. Nhận xét tổng hợp

Tổng hợp các công trình nghiên cứu cho thấy AI đang làm thay đổi sâu sắc ngành xây dựng trên phạm vi toàn cầu. Thay vì chỉ phục vụ các bài toán dự báo đơn giản, AI hiện đã tham gia vào hầu hết các giai đoạn của vòng đời công trình thông qua sự kết hợp với BIM, Digital Twin, UAV, IoT, Robot và các nền tảng dữ liệu lớn.

Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu hiện nay vẫn tập trung vào quản lý dự án, giám sát thi công, an toàn lao động và kiểm tra bằng hình ảnh. Số lượng nghiên cứu chuyên sâu về ứng dụng AI trong thí nghiệm và kiểm định xây dựng, đặc biệt là thí nghiệm cọc và cấu kiện tại hiện trường, còn khá hạn chế. Khoảng trống này cho thấy nhu cầu cần có thêm các nghiên cứu đánh giá toàn diện khả năng, giới hạn và trách nhiệm của AI trong các hoạt động đòi hỏi tính chính xác cao, điều kiện hiện trường phức tạp và sự tuân thủ nghiêm ngặt các tiêu chuẩn như ISO/IEC 17025:2017.

2. Các nghiên cứu về ứng dụng AI trong kiểm tra chất lượng công trình và thí nghiệm – kiểm định xây dựng

2.1. AI trong kiểm tra chất lượng công trình xây dựng

Trong hơn một thập kỷ qua, kiểm tra chất lượng công trình (Construction Inspection) là một trong những lĩnh vực có tốc độ ứng dụng trí tuệ nhân tạo (AI) nhanh nhất trong ngành xây dựng. Nguyên nhân chủ yếu xuất phát từ nhu cầu giảm sự phụ thuộc vào phương pháp

kiểm tra trực quan truyền thống vốn tiêu tốn nhiều nhân lực, thời gian và chịu ảnh hưởng bởi yếu tố chủ quan của người đánh giá.

Theo tổng quan của Samsami (2024), kiểm tra xây dựng đang chuyển dịch từ phương pháp thủ công sang mô hình Automated Construction Inspection and Progress Monitoring (ACIPM), trong đó AI được kết hợp với quét laser (Laser Scanning), máy bay không người lái (UAV), robot tự hành, RFID, BIM và thị giác máy tính (Computer Vision) để tự động hóa quá trình kiểm tra và giám sát tiến độ. Tuy nhiên, tác giả cũng nhấn mạnh rằng các thách thức lớn nhất hiện nay vẫn là chất lượng dữ liệu, khả năng tổng quát hóa của mô hình AI, tích hợp dữ liệu đa nguồn và trách nhiệm pháp lý khi sử dụng AI trong đánh giá chất lượng công trình.

Các nghiên cứu gần đây cho thấy AI có thể phát hiện các khuyết tật bề mặt như nứt bê tông, bong tróc lớp bảo vệ, ăn mòn cốt thép, rỗ tổ ong, sai lệch hình học và lỗi thi công với độ chính xác rất cao trong điều kiện dữ liệu thực hiện phù hợp. Đặc biệt, các mô hình nghiên cứu sâu (Deep Learning) như Convolutional Neural Networks (CNN), YOLO, Faster R-CNN và Vision Transformer (ViT) đã đạt kết quả vượt trội trong nhận dạng hình ảnh và phân loại khuyết tật kết cấu. Tuy nhiên, khả năng này chủ yếu giới hạn ở những dạng hư hỏng có thể quan sát được bằng hình ảnh hoặc dữ liệu cảm biến, trong khi nhiều khuyết tật bên trong kết cấu vẫn cần các phương pháp thí nghiệm chuyên dụng để đánh giá.

Điều này cho thấy AI đã thay đổi phương pháp kiểm tra trực quan, nhưng chưa thể thay thế các kỹ thuật kiểm định chuyên sâu dựa trên nguyên lý cơ học, truyền sóng hoặc thí nghiệm hiện trường.

2.2. AI trong giám sát sức khỏe kết cấu (Structural Health Monitoring)

Một trong những hướng nghiên cứu phát triển mạnh nhất hiện nay là Structural Health Monitoring (SHM) – hệ thống giám sát tình trạng kết cấu theo thời gian thực. SHM sử dụng mạng lưới cảm biến để liên tục thu thập dữ liệu về rung động, biến dạng, chuyển vị, nhiệt độ, ứng suất và các thông số môi trường, sau đó AI phân tích nhằm phát hiện sớm các dấu hiệu suy giảm chất lượng công trình.

Theo Cha và cộng sự (2024), Deep Learning đã mở rộng đáng kể phạm vi ứng dụng của SHM thông qua việc xử lý dữ liệu từ nhiều nguồn khác nhau như cảm biến rung, ảnh UAV, Digital Twin và các phương pháp kiểm tra không phá hủy (NDT). Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng các mô hình AI có khả năng phát hiện mẫu bất thường trong dữ liệu mà các phương pháp thống kê truyền thống khó nhận biết. Tuy nhiên, sự phụ thuộc vào dữ liệu đầu vào, hiện tượng quá tải (overfitting), khả năng phân tích kết quả (explainability) và yêu cầu hiệu chuẩn cảm biến vẫn là những thách thức lớn đối với việc ứng dụng AI trong thực tế.

Đối với các công trình cầu, cảng biển, nhà cao tầng và công trình hạ tầng có tuổi thọ dài, AI được sử dụng để dự báo sự phát triển của hư hỏng theo thời gian, hỗ trợ lập kế hoạch bảo trì và tối ưu hóa chi phí vòng đời công trình. Tuy nhiên, các nghiên cứu đều thống nhất rằng AI chỉ đưa ra dự báo dựa trên xác suất; quyết định kỹ thuật cuối cùng vẫn cần được xác nhận thông qua kiểm định hiện trường và đánh giá của kỹ sư có chuyên môn.

2.3. AI trong các phương pháp thí nghiệm không phá hủy (NDT)

Các phương pháp kiểm tra không phá hủy (Non-Destructive Testing – NDT) là lĩnh vực mà AI đang tạo ra nhiều thay đổi đáng kể. Trong các kỹ thuật như siêu âm (UT), từ tính (MT), thăm thấu (PT), chụp ảnh phóng xạ (RT), phát xạ âm (AE) và radar xuyên đất (GPR), AI được sử dụng chủ yếu để xử lý tín hiệu, nhận dạng và hỗ trợ phân loại khuyết tật.

Thay vì phụ thuộc hoàn toàn vào kinh nghiệm của chuyên gia khi đọc tín hiệu hoặc hình ảnh, AI có thể học từ hàng chục nghìn mẫu dữ liệu để xác định các đặc trưng bất thường, giảm sai sót do yếu tố chủ quan và tăng tốc độ xử lý. Trong nhiều nghiên cứu, độ chính xác của AI trong phân loại tín hiệu NDT đạt trên 90% đối với các bộ dữ liệu chuẩn hóa. Tuy nhiên, khi áp dụng ngoài hiện trường với điều kiện môi trường phức tạp, hiệu quả của mô hình thường giảm đáng kể nếu dữ liệu đầu vào khác với dữ liệu huấn luyện.

Do đó, nhiều tác giả đề xuất mô hình Human-in-the-Loop, trong đó AI thực hiện phân tích sơ bộ và kỹ sư NDT xác nhận kết quả trước khi phát hành báo cáo.

2.4. AI trong thí nghiệm cọc và nền móng

So với các lĩnh vực khác của xây dựng, ứng dụng AI trong thí nghiệm cọc vẫn còn ở giai đoạn đầu. Phần lớn các nghiên cứu hiện nay tập trung vào xử lý tín hiệu và hỗ trợ nhận dạng khuyết tật hơn là thay thế hoàn toàn chuyên gia.

Một tổng quan chuyên sâu của Qiu và cộng sự (2025) về Pile Integrity Testing (PIT) cho thấy AI đã được ứng dụng trong các bài toán xử lý tín hiệu của thí nghiệm biến dạng nhỏ (Low-Strain Integrity Testing), hồ sơ nhiệt (Thermal Integrity Profiling – TIP) và các phương pháp NDT khác. Các mô hình học máy truyền thống hoạt động tốt với tập dữ liệu nhỏ khi nhận dạng một loại khuyết tật cụ thể, trong khi các mô hình nghiên cứu sâu đạt độ chính xác rất cao trong phân loại nhiều dạng khuyết tật nếu được thực hiện với cơ sở dữ liệu đủ lớn. Tuy nhiên, nhóm tác giả cũng nhấn mạnh rằng AI trong PIT vẫn đang ở giai đoạn phát triển ban đầu và còn gặp nhiều khó khăn như nhiễu tín hiệu, ảnh hưởng của điều kiện địa chất, thiếu dữ liệu gắn nhãn và rào cản tiêu chuẩn hóa trong thực tế.

Đối với thí nghiệm PDA (Pile Driving Analyzer), mặc dù AI có thể hỗ trợ phân tích dạng sóng và dự báo sức chịu tải dựa trên dữ liệu lịch sử, nhưng các nghiên cứu đều cho rằng việc hiệu chỉnh tham số đất, đánh giá hiện tượng phản xạ sóng, xác định nguyên nhân của tín hiệu bất thường và thực hiện phân tích CAPWAP vẫn đòi hỏi chuyên gia có kinh nghiệm về cơ học nền móng.

Trong các phương pháp siêu âm cọc (CSL), AI bước đầu được nghiên cứu để tự động phát hiện vùng suy giảm vận tốc truyền sóng hoặc vùng suy hao biên độ nhằm hỗ trợ nhận diện khuyết tật. Tuy nhiên, các hiện tượng như lệch ống siêu âm, bọt khí, chất lượng nước trong ống, sai số đầu đo hoặc điều kiện thi công đều có thể tạo ra tín hiệu giả mà AI rất khó phân biệt nếu không có dữ liệu hiện trường đầy đủ.

Đối với KODEN Test, hiện nay chưa có nhiều nghiên cứu công bố về AI trong phân tích dữ liệu đo độ nghiêng thành hố khoan. Phần lớn việc xử lý vẫn dựa trên phần mềm chuyên dụng của nhà sản xuất kết hợp với đánh giá của kỹ sư địa kỹ thuật.

2.5. Những giới hạn chung của AI trong thí nghiệm và kiểm định xây dựng

Tổng hợp các công trình nghiên cứu cho thấy AI mang lại ba lợi ích nổi bật gồm: (i) tăng tốc độ xử lý dữ liệu; (ii) nâng cao khả năng phát hiện mẫu bất thường; và (iii) hỗ trợ chuẩn hóa quá trình phân tích kết quả. Tuy nhiên, các nghiên cứu cũng chỉ ra nhiều giới hạn quan trọng. Thứ nhất, AI chỉ có thể học từ dữ liệu đã được thu thập và gắn chuẩn có sẵn. Khi xuất hiện điều kiện địa chất mới, loại cọc mới, thiết bị khác hoặc phương pháp thi công khác, mô hình có thể đưa ra kết quả sai lệch nếu không được nhập liệu lại. Thứ hai, AI chưa có khả năng quan sát trực tiếp các yếu tố ngoài dữ liệu số như điều kiện hiện trường, kinh nghiệm thi công, hiện tượng bất thường trong quá trình thử nghiệm hoặc các dấu hiệu cảm quan mà kỹ sư có thể nhận biết. Thứ ba, AI không chịu trách nhiệm pháp lý đối với kết quả thí nghiệm. Theo các nguyên tắc của ISO/IEC 17025:2017, việc xem xét tính hợp lệ của dữ liệu, đánh giá sự phù hợp, phê duyệt và phát hành báo cáo thử nghiệm vẫn phải do nhân sự có thẩm quyền của phòng thử nghiệm thực hiện. Điều này đồng nghĩa với việc AI có thể hỗ trợ quá trình ra quyết định nhưng không thể thay thế trách nhiệm chuyên môn và trách nhiệm pháp lý của kỹ sư, trưởng phòng thí nghiệm hoặc người ký báo cáo.

Những hạn chế này là cơ sở quan trọng để khẳng định rằng trong lĩnh vực thí nghiệm và kiểm định xây dựng, đặc biệt là các thí nghiệm cọc và cấu kiện hiện trường, AI nên được xem là một công cụ hỗ trợ thông minh thay vì một chủ thể thay thế con người. Đây cũng là định hướng được nhiều nghiên cứu quốc tế và tổ chức tiêu chuẩn khuyến nghị trong quá trình phát triển các hệ thống kiểm định thông minh.

3. Các nghiên cứu về AI tái sinh (Generative AI), Mô hình ngôn ngữ lớn (LLMs) và AI Agents trong xây dựng và phòng thí nghiệm

3.1. Sự xuất hiện của AI tái sinh và bước chuyển mới trong ngành xây dựng

Sự ra đời của các mô hình ngôn ngữ lớn (Large Language Models – LLMs) như GPT, Claude, Gemini, Llama và các hệ thống AI tái sinh (Generative AI) đã mở ra một giai đoạn phát triển mới của trí tuệ nhân tạo. Nếu các thế hệ AI trước đây chủ yếu tập trung vào phân loại dữ liệu, nhận dạng hình ảnh hoặc dự báo dựa trên các mô hình truyền thống thì Generative AI có khả năng hiểu ngôn ngữ tự nhiên, tổng hợp tri thức từ nhiều nguồn dữ liệu và tạo ra nội dung mới như văn bản, hình ảnh, mã lập trình hoặc tài liệu kỹ thuật.

Đối với ngành xây dựng, sự phát triển này không chỉ làm thay đổi phương thức xử lý dữ liệu mà còn tác động trực tiếp đến quy trình lập hồ sơ, quản lý tài liệu, hỗ trợ thiết kế, lập kế hoạch thi công, quản lý hợp đồng, phân tích tiêu chuẩn kỹ thuật và đào tạo nhân sự. Các nghiên cứu gần đây cho thấy AI đặc biệt phù hợp với những công việc có khối lượng tài liệu lớn, nhiều quy định kỹ thuật và yêu cầu tổng hợp thông tin từ nhiều nguồn khác nhau.

Theo nhiều nghiên cứu tổng quan, Generative AI không thay thế các phần mềm chuyên ngành như BIM, SAP2000, ETABS, PLAXIS hay CAPWAP, mà đóng vai trò như một lớp hỗ trợ thông minh giúp kỹ sư khai thác dữ liệu hiệu quả hơn, rút ngắn thời gian tìm kiếm thông tin và tăng chất lượng ra quyết định.

3.2. Ứng dụng của LLMs trong quản lý dự án xây dựng

Trong quản lý dự án, các mô hình LLM được nghiên cứu và ứng dụng ở nhiều khía cạnh như:

- Phân tích hồ sơ mời thầu và hồ sơ dự thầu.
- Kiểm tra sự phù hợp giữa hợp đồng và tiêu chuẩn kỹ thuật.
- Tự động lập biên bản nghiệm thu, nhật ký công trình và báo cáo tiến độ.
- Truy xuất nhanh các điều khoản trong tiêu chuẩn hoặc quy chuẩn.
- Hỗ trợ đánh giá rủi ro hợp đồng.
- Tổng hợp dữ liệu từ nhiều nguồn để hỗ trợ lãnh đạo ra quyết định.

Điểm mạnh nổi bật của LLM là khả năng xử lý ngôn ngữ tự nhiên. Thay vì phải tìm kiếm thủ công trong hàng nghìn trang tiêu chuẩn, kỹ sư có thể đặt câu hỏi bằng ngôn ngữ tự nhiên để nhận được câu trả lời có cấu trúc. Điều này đặc biệt hữu ích trong môi trường dự án có nhiều tiêu chuẩn quốc gia và quốc tế được áp dụng đồng thời.

Tuy nhiên, các nghiên cứu cũng lưu ý rằng mô hình ngôn ngữ lớn có thể tạo ra thông tin không chính xác hoặc "ảo giác" (hallucination) nếu không được kết nối với nguồn dữ liệu đáng tin cậy. Vì vậy, xu hướng hiện nay là kết hợp LLM với hệ thống Retrieval-Augmented Generation (RAG), trong đó AI chỉ tạo câu trả lời dựa trên các tài liệu đã được doanh nghiệp xác thực.

3.3. AI Agents và mô hình phòng thí nghiệm thông minh

Khác với Chatbot truyền thống, AI Agent là hệ thống có khả năng tự lập kế hoạch, thực hiện nhiều tác vụ liên tiếp và phối hợp với các phần mềm khác để hoàn thành một mục tiêu cụ thể.

Trong môi trường phòng thí nghiệm xây dựng, AI Agent có thể đảm nhận các công việc như:

- Tiếp nhận yêu cầu thử nghiệm từ khách hàng.
- Kiểm tra tính đầy đủ của hồ sơ.
- Đối chiếu phạm vi công nhận của phòng thử nghiệm.
- Gợi ý tiêu chuẩn áp dụng.
- Lập kế hoạch thí nghiệm.
- Phân công nhân sự theo năng lực.
- Kiểm tra tình trạng hiệu chuẩn của thiết bị.
- Theo dõi tiến độ thực hiện.
- Tổng hợp dữ liệu thử nghiệm.
- Soạn thảo báo cáo dự thảo.
- Kiểm tra lỗi hình thức trước khi trình người có thẩm quyền phê duyệt.

Mô hình này giúp giảm đáng kể khối lượng công việc hành chính, đồng thời hạn chế các sai sót do thao tác thủ công. Tuy nhiên, AI Agent vẫn hoạt động trên cơ sở các quy tắc và dữ liệu được thiết lập trước, không có tư cách pháp lý và không thể chịu trách nhiệm chuyên môn đối với kết quả thử nghiệm.

3.4. AI trong hệ thống quản lý theo ISO/IEC 17025:2017

ISO/IEC 17025:2017 yêu cầu phòng thử nghiệm phải bảo đảm tính khách quan, năng lực kỹ thuật, truy xuất nguồn gốc đo lường, kiểm soát dữ liệu, quản lý rủi ro và bảo mật thông tin. Trong bối cảnh đó, AI có thể hỗ trợ đáng kể việc vận hành hệ thống quản lý chất lượng.

a) Kiểm soát yêu cầu khách hàng

AI có thể tự động kiểm tra tính đầy đủ của yêu cầu thử nghiệm, đối chiếu với phạm vi công nhận, phát hiện các điểm chưa rõ và đề xuất nội dung cần xác nhận với khách hàng.

b) Quản lý thiết bị

AI có thể theo dõi:

- Chu kỳ hiệu chuẩn.
- Chu kỳ bảo trì.
- Lịch sử sửa chữa.
- Hiệu suất thiết bị.
- Tần suất sử dụng.

Từ đó, hệ thống dự báo thời điểm cần hiệu chuẩn hoặc bảo trì trước khi xảy ra sự cố.

c) Quản lý năng lực nhân sự

Thông qua cơ sở dữ liệu về đào tạo, chứng chỉ, kinh nghiệm và kết quả đánh giá nội bộ, AI có thể đề xuất nhân sự phù hợp cho từng phép thử, đồng thời cảnh báo khi nhân sự chưa đáp ứng yêu cầu năng lực.

d) Kiểm soát dữ liệu

Đây là lĩnh vực AI phát huy hiệu quả cao nhất.

Hệ thống có thể:

- Phát hiện giá trị ngoại lai.
- So sánh với dữ liệu lịch sử.
- Kiểm tra tính nhất quán.
- Phát hiện sai số nhập liệu.
- Kiểm tra đơn vị đo.
- Phân tích xu hướng.

Nhờ đó, nguy cơ phát hành báo cáo chứa lỗi số liệu được giảm đáng kể.

e) Quản lý rủi ro

AI có thể xây dựng mô hình đánh giá rủi ro dựa trên dữ liệu quá khứ, hỗ trợ phòng thử nghiệm xác định các quá trình có khả năng phát sinh sai sót cao để ưu tiên kiểm soát.

3.5. Những giới hạn của Generative AI trong phòng thử nghiệm

Mặc dù có nhiều ưu điểm, các nghiên cứu đều chỉ ra rằng Generative AI tồn tại những giới hạn cơ bản khi áp dụng vào hoạt động thử nghiệm và kiểm định. *Thứ nhất*, AI không trực tiếp quan sát hiện trường. Trong nhiều phép thử như nén tĩnh cọc, PDA, PIT, CSL hoặc KODEN, kỹ sư phải đánh giá đồng thời các yếu tố như điều kiện địa chất, thời tiết, trạng thái thiết bị, thao tác thi công, rung động môi trường và các hiện tượng bất thường xảy ra trong quá trình thử nghiệm. Đây là những thông tin mà AI không thể tự thu nhận nếu không được cung cấp đầy đủ. *Thứ hai*, AI không có khả năng chịu trách nhiệm pháp lý. Theo yêu cầu của ISO/IEC 17025:2017, báo cáo thử nghiệm phải được xem xét và phê duyệt bởi người có thẩm quyền. Trách nhiệm này gắn với cá nhân và tổ chức được công nhận, không thể chuyển giao cho hệ thống AI. *Thứ ba*, AI chưa có khả năng suy luận kỹ thuật toàn diện trong các tình huống chưa từng xuất hiện. Một tín hiệu PDA bất thường có thể bắt nguồn từ nhiều nguyên nhân khác nhau như chất lượng bê tông, thay đổi địa tầng, sai số cảm biến, hiện tượng phản xạ tại mũi cọc hoặc lỗi lắp đặt thiết bị. Việc phân biệt các nguyên nhân này đòi hỏi sự kết hợp giữa kiến thức cơ học nền móng, kinh nghiệm hiện trường và khả năng đánh giá bối cảnh – những yếu tố mà AI hiện chưa thể thay thế. *Thứ tư*, AI có nguy cơ tạo ra kết luận hợp lý về mặt ngôn ngữ nhưng không chính xác về mặt kỹ thuật nếu dữ liệu đầu vào không đầy đủ hoặc vượt ngoài phạm vi huấn luyện. Trong lĩnh vực kiểm định xây dựng, một kết luận sai có thể dẫn đến hậu quả nghiêm trọng đối với an toàn công trình và trách nhiệm pháp lý của các bên liên quan.

3.6. Đánh giá tổng hợp

Các nghiên cứu hiện nay cho thấy Generative AI và AI Agents sẽ tạo ra cuộc cách mạng trong quản lý tri thức của ngành xây dựng. Những công việc liên quan đến tổng hợp tài liệu, lập hồ sơ, quản lý dữ liệu, phân tích tiêu chuẩn, kiểm soát quy trình và hỗ trợ ra quyết định sẽ được tự động hóa ở mức rất cao. Tuy nhiên, đối với lĩnh vực thí nghiệm và kiểm định xây dựng, AI chỉ nên được xem là một hệ thống hỗ trợ kỹ thuật thông minh (Intelligent Decision Support System), không phải là chủ thể thay thế kỹ sư. Giá trị lớn nhất của AI nằm ở khả năng xử lý dữ liệu nhanh chóng, phát hiện bất thường và cung cấp thông tin có hệ thống; trong khi việc đánh giá bối cảnh hiện trường, xác nhận tính hợp lệ của kết quả, chịu trách nhiệm pháp lý và đưa ra kết luận kỹ thuật cuối cùng vẫn phải do con người thực hiện.

Xu hướng phát triển được nhiều tổ chức và nhà nghiên cứu đồng thuận là mô hình Human-AI Collaboration, trong đó AI nâng cao năng suất và chất lượng công việc, còn kỹ sư giữ vai trò trung tâm trong việc đảm bảo tính chính xác, khách quan và an toàn của hoạt động thí nghiệm – kiểm định xây dựng.

4. Đánh giá mức độ AI có thể thay thế trong các lĩnh vực thí nghiệm và kiểm định xây dựng

4.1. Cơ sở đánh giá

Để đánh giá một cách khách quan khả năng thay thế của trí tuệ nhân tạo (AI) trong ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng, nghiên cứu này đề xuất một khung đánh giá đa tiêu chí gồm sáu nhóm yếu tố:

1. Mức độ chuẩn hóa của quy trình kỹ thuật: Công việc càng được tiêu chuẩn hóa, AI càng dễ hỗ trợ hoặc tự động hóa.
2. Khả năng số hóa dữ liệu: Các phép thử có dữ liệu số, hình ảnh hoặc tín hiệu rõ ràng thuận lợi hơn cho AI.
3. Mức độ phụ thuộc vào điều kiện hiện trường: Công việc chịu ảnh hưởng lớn của địa chất, thời tiết hoặc yếu tố thi công khó được AI thay thế hoàn toàn.
4. Yêu cầu về kinh nghiệm và phán đoán chuyên gia: Những công việc đòi hỏi đánh giá tổng hợp, suy luận kỹ thuật và kinh nghiệm thực tế vẫn cần con người.
5. Trách nhiệm pháp lý và yêu cầu của ISO/IEC 17025:2017: AI không có tư cách pháp lý để chịu trách nhiệm đối với kết quả thử nghiệm.
6. Mức độ chấp nhận của tiêu chuẩn và quy định hiện hành: Các tiêu chuẩn kỹ thuật hiện nay vẫn yêu cầu nhân sự có năng lực thực hiện và phê duyệt kết quả.

Dựa trên các tiêu chí trên, nghiên cứu phân loại khả năng ứng dụng AI thành bốn mức:

- Mức I – AI có thể tự động hóa phần lớn công việc (>80%).
- Mức II – AI hỗ trợ mạnh (50–80%), con người vẫn đưa ra quyết định cuối cùng.
- Mức III – AI chỉ hỗ trợ một phần (20–50%), chủ yếu xử lý dữ liệu và giảm công việc thủ công.
- Mức IV – AI hầu như không thể thay thế (<20%), vai trò của con người vẫn mang tính quyết định.

4.2. Ma trận đánh giá khả năng thay thế của AI theo từng lĩnh vực

Lĩnh vực/Công việc	Mức độ AI hỗ trợ	Vai trò của AI	Vai trò không thể thay thế của con người
Quản lý tài liệu ISO	I	Quản lý hồ sơ, tìm kiếm tài liệu, kiểm tra biểu mẫu	Phê duyệt, chịu trách nhiệm hệ thống
Lập kế hoạch thí nghiệm	II	Đề xuất tiêu chuẩn, phân công sơ bộ	Đánh giá tính phù hợp với điều kiện dự án
Quản lý thiết bị	I	Theo dõi hiệu chuẩn, bảo trì, cảnh báo	Quyết định ngừng sử dụng, nghiệm thu sau sửa chữa
Quản lý nhân sự	II	Đánh giá hồ sơ năng lực	Đánh giá kỹ năng thực tế và đạo đức nghề nghiệp
Thí nghiệm vật liệu trong phòng	II	Phân tích dữ liệu, phát hiện bất thường	Chuẩn bị mẫu, kiểm soát điều kiện thử nghiệm
NDT (UT, MT, PT)	II	Phân tích tín hiệu, nhận dạng khuyết tật	Xác nhận khuyết tật và kết luận kỹ thuật

PIT	III	Phân tích dạng sóng, nhận diện tín hiệu bất thường	Xác định nguyên nhân, đánh giá hiện trường
PDA	III	Hỗ trợ xử lý dữ liệu, gợi ý thông số	Phân tích CAPWAP, hiệu chỉnh mô hình đất
CSL	III	Phân tích biểu đồ truyền sóng	Đánh giá ảnh hưởng của điều kiện thi công và lắp đặt ống
KODEN Test	III	Xử lý số liệu và trực quan hóa	Đánh giá nguyên nhân lệch thành hố khoan
Thử tải nén tĩnh	IV	Thu thập và xử lý số liệu	Tổ chức thí nghiệm, điều khiển tải, xử lý sự cố, đánh giá kết quả
Thử tải ngang	IV	Ghi nhận số liệu	Điều chỉnh hệ thống, xử lý biến dạng bất thường
Thử nhỏ cọc	IV	Phân tích dữ liệu	Kiểm soát an toàn và đánh giá ổn định hệ thống
Quan trắc hiện trường	II	Phân tích dữ liệu cảm biến	Kiểm tra hiện trạng và xác minh dữ liệu
Phê duyệt báo cáo	IV	Kiểm tra hình thức và tính nhất quán	Chịu trách nhiệm chuyên môn và pháp lý

4.3. Phân tích theo từng nhóm công việc

a) Các công việc AI có thể thay thế ở mức cao

Những công việc mang tính lặp lại, có quy trình chuẩn hóa và sử dụng dữ liệu số là nhóm có khả năng tự động hóa cao nhất. Điển hình gồm quản lý tài liệu, lập biểu mẫu, kiểm tra định dạng báo cáo, quản lý lịch hiệu chuẩn, phân tích thống kê, kiểm tra logic dữ liệu và tổng hợp báo cáo. Trong các hoạt động này, AI có thể giúp giảm đáng kể thời gian xử lý, hạn chế sai sót hành chính và tăng hiệu quả vận hành của phòng thí nghiệm.

b) Các công việc AI hỗ trợ nhưng chưa thể thay thế

Đối với các phép thử như PDA, PIT, CSL, KODEN hoặc các phương pháp NDT, AI có thể phân tích nhanh khối lượng lớn dữ liệu, phát hiện tín hiệu bất thường và đề xuất các giả thuyết kỹ thuật. Tuy nhiên, kết quả cuối cùng vẫn cần được xem xét trong bối cảnh cụ thể của từng công trình. Các yếu tố như điều kiện địa chất, lịch sử thi công, đặc điểm thiết bị và hiện tượng phát sinh ngoài hiện trường có thể ảnh hưởng đáng kể đến việc diễn giải dữ liệu mà AI khó có thể nhận biết đầy đủ.

c) Các công việc AI gần như không thể thay thế

Các thí nghiệm cọc hiện trường như nén tĩnh, thử nhỏ, nén ngang và một số phép thử đặc thù khác đòi hỏi kỹ sư phải trực tiếp tổ chức hiện trường, kiểm soát an toàn, xử lý sự cố, đánh giá điều kiện nền móng và đưa ra quyết định trong thời gian thực. Đây là những hoạt động phụ thuộc nhiều vào kinh nghiệm thực tế, khả năng phối hợp giữa nhiều bên và trách nhiệm nghề nghiệp.

Ngoài ra, theo ISO/IEC 17025:2017, việc xem xét tính hợp lệ của dữ liệu, đánh giá kết quả, phê duyệt và phát hành báo cáo phải do người có thẩm quyền thực hiện. AI không thể đảm nhận vai trò này vì không có tư cách pháp lý, không chịu trách nhiệm trước khách hàng và cơ quan quản lý, cũng như không thể chịu trách nhiệm dân sự hoặc hình sự khi xảy ra sai sót.

4.4. Mô hình "AI + Kỹ sư + Chuyên gia"

Từ kết quả tổng hợp các nghiên cứu và phân tích trên, nghiên cứu đề xuất mô hình "AI + Kỹ sư + Chuyên gia" thay cho quan điểm "AI thay thế con người".

Trong mô hình này:

- AI: đảm nhận các công việc xử lý dữ liệu, nhận diện mẫu, kiểm tra tính nhất quán, quản lý tri thức và hỗ trợ ra quyết định.
- Kỹ sư hiện trường: chịu trách nhiệm tổ chức phép thử, kiểm soát chất lượng dữ liệu, xử lý các tình huống phát sinh và xác nhận điều kiện thực tế.
- Chuyên gia: thực hiện đánh giá tổng hợp, đưa ra kết luận kỹ thuật, ký xác nhận kết quả và chịu trách nhiệm chuyên môn cũng như pháp lý.

Mô hình này không chỉ phù hợp với định hướng phát triển của các phòng thí nghiệm hiện đại mà còn đáp ứng các yêu cầu của ISO/IEC 17025:2017 về tính khách quan, năng lực kỹ thuật và trách nhiệm đối với kết quả thử nghiệm.

4.5. Nhận định của nghiên cứu

Từ góc độ kỹ thuật, AI sẽ tiếp tục mở rộng phạm vi ứng dụng trong ngành xây dựng, đặc biệt ở các công việc có dữ liệu số lớn và quy trình chuẩn hóa. Tuy nhiên, trong lĩnh vực thí nghiệm và kiểm định xây dựng, nhất là các phép thử hiện trường liên quan đến nền móng và cọc, AI không nên được xem là sự thay thế cho con người mà là công cụ nâng cao năng lực chuyên môn của kỹ sư.

Trong tương lai gần, lợi thế cạnh tranh của các phòng thí nghiệm sẽ không nằm ở việc "có AI hay không", mà ở khả năng kết hợp hiệu quả giữa AI, kỹ sư hiện trường và chuyên gia kỹ thuật để tạo ra các kết quả thử nghiệm có độ tin cậy cao, phù hợp với tiêu chuẩn quốc tế và đáp ứng yêu cầu ngày càng khắt khe của các dự án xây dựng hiện đại.

III. THỰC TRẠNG ỨNG DỤNG AI TRONG NGÀNH XÂY DỰNG VÀ THÍ NGHIỆM – KIỂM ĐỊNH XÂY DỰNG

1. Bức tranh toàn cầu về ứng dụng AI trong ngành xây dựng

Trong nhiều thập kỷ, ngành xây dựng luôn được đánh giá là một trong những lĩnh vực có tốc độ đổi mới công nghệ chậm hơn so với sản xuất chế tạo, tài chính hay công nghệ thông tin. Đặc điểm của ngành là phụ thuộc nhiều vào điều kiện hiện trường, nguồn nhân lực, tính đơn chiếc của mỗi công trình và sự đa dạng của điều kiện địa chất, khí hậu cũng như quy trình thi công. Những yếu tố này khiến việc tiêu chuẩn hóa và tự động hóa trở nên phức tạp hơn đáng kể.

Tuy nhiên, kể từ sau năm 2020, sự phát triển nhanh của trí tuệ nhân tạo (AI), điện toán đám mây, Internet vạn vật (IoT), cảm biến thông minh, dữ liệu lớn (Big Data) và các mô hình ngôn

ngữ lớn (LLMs) đã thúc đẩy quá trình chuyển đổi số trong ngành xây dựng trên phạm vi toàn cầu. Theo nhiều nghiên cứu gần đây, AI không còn chỉ được sử dụng để dự báo tiến độ hoặc chi phí mà đã tham gia vào gần như toàn bộ vòng đời công trình, từ khảo sát, thiết kế, thi công, giám sát, kiểm định đến vận hành và bảo trì.

Nhiều quốc gia phát triển đã xem AI là một thành phần cốt lõi trong chiến lược xây dựng thông minh (Smart Construction). Tại Nhật Bản, các tập đoàn xây dựng lớn tích hợp AI với robot thi công, máy móc tự hành và hệ thống BIM nhằm giải quyết tình trạng thiếu hụt lao động kỹ thuật và nâng cao năng suất. Singapore phát triển mạnh Digital Twin và AI trong quản lý hạ tầng đô thị, trong khi Hoa Kỳ và châu Âu tập trung vào AI trong quản lý tài sản công trình, giám sát sức khỏe kết cấu (Structural Health Monitoring – SHM) và bảo trì dự báo (Predictive Maintenance).

Điểm chung của các quốc gia này là AI không được triển khai độc lập mà luôn kết hợp với các công nghệ như BIM, Digital Twin, UAV, LiDAR, cảm biến IoT và điện toán biên (Edge Computing). AI đóng vai trò xử lý dữ liệu, nhận diện mẫu, dự báo xu hướng và hỗ trợ ra quyết định; còn dữ liệu được thu thập liên tục từ các thiết bị hiện trường tạo nên nền tảng cho các mô hình học máy hoạt động hiệu quả.

2. Thực trạng ứng dụng AI trong ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng

So với các lĩnh vực như quản lý dự án hoặc thiết kế, mức độ ứng dụng AI trong thí nghiệm và kiểm định xây dựng còn khiêm tốn. Nguyên nhân chủ yếu xuất phát từ đặc thù của ngành: dữ liệu phân tán, điều kiện hiện trường biến động lớn, quy trình thử nghiệm chịu sự chi phối của nhiều tiêu chuẩn kỹ thuật và yêu cầu nghiêm ngặt về truy xuất nguồn gốc, năng lực nhân sự cũng như trách nhiệm pháp lý.

Tại các phòng thử nghiệm hiện đại, AI đã được sử dụng trong một số hoạt động như:

- Nhận diện bất thường trong tín hiệu thí nghiệm.
- Phân tích ảnh và video từ UAV hoặc camera hiện trường.
- Tự động kiểm tra tính đầy đủ của dữ liệu.
- Hỗ trợ xử lý thống kê và lập báo cáo.
- Dự báo xu hướng hư hỏng của công trình từ dữ liệu quan trắc dài hạn.

Đối với các phương pháp kiểm tra không phá hủy (NDT), AI bước đầu đạt hiệu quả trong việc nhận dạng khuyết tật trên bề mặt kết cấu hoặc phân tích tín hiệu siêu âm, từ tính và radar xuyên đất. Trong lĩnh vực thí nghiệm cọc, các nghiên cứu chủ yếu tập trung vào hỗ trợ phân tích tín hiệu PDA, PIT và CSL, song mức độ thương mại hóa còn hạn chế do thiếu cơ sở dữ liệu chuẩn hóa và sự khác biệt lớn giữa các điều kiện địa chất.

Một điểm đáng chú ý là hầu hết các hệ thống AI hiện nay chỉ tham gia ở giai đoạn hậu xử lý dữ liệu. Các hoạt động như khảo sát hiện trường, lắp đặt thiết bị, kiểm soát điều kiện thử nghiệm, xử lý sự cố, đánh giá nguyên nhân bất thường và xác nhận kết quả vẫn phụ thuộc chủ yếu vào kỹ sư và chuyên gia.

3. Thực trạng tại Việt Nam

Tại Việt Nam, chuyển đổi số trong ngành xây dựng đã được quan tâm trong những năm gần đây, đặc biệt thông qua việc thúc đẩy áp dụng BIM trong các dự án đầu tư xây dựng. Tuy nhiên, mức độ ứng dụng AI trong các doanh nghiệp xây dựng và phòng thí nghiệm còn ở giai đoạn đầu. Phần lớn các đơn vị đã triển khai các phần mềm quản lý chất lượng, quản lý thiết bị, quản lý nhân sự hoặc hệ thống ERP, nhưng AI vẫn chủ yếu được sử dụng cho các công việc hành chính như hỗ trợ soạn thảo văn bản, tổng hợp dữ liệu hoặc tìm kiếm thông tin kỹ thuật. Việc tích hợp AI trực tiếp với thiết bị thí nghiệm, cảm biến hiện trường hoặc hệ thống quản lý phòng thí nghiệm (LIMS) còn rất hạn chế.

Đối với các phòng thử nghiệm LAS-XD, nhiều hoạt động vẫn được thực hiện theo quy trình truyền thống. Dữ liệu từ các thiết bị PDA, PIT, CSL, KODEN hoặc thử tải tĩnh thường được xử lý bằng phần mềm chuyên dụng của nhà sản xuất, sau đó kỹ sư tiến hành phân tích và lập báo cáo. AI chưa được tích hợp một cách hệ thống để hỗ trợ đánh giá kết quả hoặc quản lý toàn bộ quy trình thử nghiệm.

Bên cạnh đó, các quy định pháp lý hiện hành cũng chưa có hướng dẫn cụ thể về việc sử dụng AI trong quá trình thử nghiệm và kiểm định. Trách nhiệm chuyên môn vẫn được xác định theo cá nhân hoặc tổ chức được công nhận năng lực, phù hợp với các yêu cầu của ISO/IEC 17025:2017.

4. Những rào cản chính trong quá trình ứng dụng AI

Tổng hợp các nghiên cứu và thực tiễn triển khai cho thấy quá trình ứng dụng AI trong ngành thí nghiệm – kiểm định xây dựng đang đối mặt với năm nhóm rào cản chính.

- *Thứ nhất, dữ liệu chưa được chuẩn hóa:* Phần lớn dữ liệu thử nghiệm hiện trường được lưu trữ dưới nhiều định dạng khác nhau, thiếu hệ thống gắn nhãn và chưa hình thành cơ sở dữ liệu đủ lớn để huấn luyện các mô hình AI có độ tin cậy cao.

- *Thứ hai, sự đa dạng của điều kiện hiện trường:* Hai phép thử có cùng tiêu chuẩn nhưng thực hiện ở các khu vực địa chất khác nhau có thể tạo ra các tín hiệu hoàn toàn khác nhau. Điều này làm giảm khả năng tổng quát hóa của mô hình AI.

- *Thứ ba, hạn chế về nguồn nhân lực:* Đội ngũ kỹ sư thí nghiệm thường có chuyên môn sâu về nền móng và vật liệu, nhưng chưa được đào tạo đầy đủ về khoa học dữ liệu, học máy hoặc lập trình AI. Ngược lại, các chuyên gia AI lại ít có kiến thức về địa kỹ thuật và tiêu chuẩn thí nghiệm xây dựng.

- *Thứ tư, yêu cầu pháp lý và trách nhiệm nghề nghiệp:* AI không có tư cách pháp lý để chịu trách nhiệm về kết quả thử nghiệm. Mọi báo cáo vẫn phải được xem xét, xác nhận và ký bởi người có thẩm quyền theo quy định của ISO/IEC 17025:2017 và các văn bản pháp luật liên quan.

- *Thứ năm, chi phí đầu tư và bảo mật dữ liệu:* Việc xây dựng hệ thống AI đòi hỏi cơ sở hạ tầng số, năng lực lưu trữ, bảo mật thông tin và nguồn lực tài chính đáng kể. Ngoài ra, dữ liệu thử nghiệm thường liên quan đến các dự án quan trọng, do đó việc chia sẻ dữ liệu để huấn luyện AI cần được kiểm soát chặt chẽ nhằm bảo đảm quyền sở hữu trí tuệ và bảo mật thông tin của khách hàng.

5. Nhận xét tổng hợp

Có thể nhận thấy rằng AI đang phát triển với tốc độ rất nhanh và sẽ tiếp tục mở rộng phạm vi ứng dụng trong ngành xây dựng. Tuy nhiên, trong lĩnh vực thí nghiệm và kiểm định xây dựng, AI mới chỉ thay đổi cách thức thu thập, xử lý và quản lý dữ liệu, chưa làm thay đổi bản chất của hoạt động chuyên môn.

Sự khác biệt lớn nhất giữa ngành thí nghiệm xây dựng và nhiều lĩnh vực khác nằm ở chỗ kết quả thử nghiệm không chỉ là sản phẩm của thuật toán mà còn là kết quả của quá trình quan sát hiện trường, kiểm soát điều kiện thử nghiệm, kinh nghiệm chuyên gia và trách nhiệm pháp lý của người thực hiện. Chính vì vậy, tương lai của ngành không phải là “phòng thí nghiệm không có con người”, mà là “phòng thí nghiệm thông minh”, nơi AI và kỹ sư cộng tác để tạo ra các kết quả thử nghiệm nhanh hơn, chính xác hơn và đáng tin cậy hơn.

6. Phân tích SWOT đối với việc ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng

6.1. Mục đích phân tích SWOT

Phân tích SWOT (Strengths – Weaknesses – Opportunities – Threats) là một công cụ được sử dụng rộng rãi trong quản trị chiến lược nhằm đánh giá đồng thời các yếu tố nội tại và ngoại cảnh có ảnh hưởng đến sự phát triển của một tổ chức hoặc một lĩnh vực. Trong nghiên cứu này, SWOT được áp dụng để phân tích tác động của trí tuệ nhân tạo (AI) đối với ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng, từ đó xác định các lợi thế, hạn chế, cơ hội và thách thức trong quá trình chuyển đổi số của các phòng thử nghiệm theo tiêu chuẩn ISO/IEC 17025:2017.

Khác với nhiều ngành công nghiệp khác, ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng không chỉ chịu tác động của tiến bộ công nghệ mà còn bị chi phối bởi các yêu cầu nghiêm ngặt về độ chính xác kỹ thuật, truy xuất nguồn gốc đo lường, tính khách quan, năng lực nhân sự và trách nhiệm pháp lý. Do đó, việc đánh giá SWOT cần xem xét đồng thời cả khía cạnh công nghệ, quản lý chất lượng và thực tiễn hiện trường.

❖ Điểm mạnh (Strengths)

Việc ứng dụng AI mang lại nhiều lợi ích đáng kể cho hoạt động thí nghiệm và kiểm định xây dựng. Thứ nhất, AI có khả năng xử lý khối lượng dữ liệu rất lớn trong thời gian ngắn. Các phép thử như PDA, PIT, CSL, KODEN, thử tải tĩnh hoặc quan trắc dài hạn đều tạo ra lượng dữ liệu đáng kể. AI có thể tự động phân tích tín hiệu, phát hiện giá trị ngoại lai, nhận diện xu hướng và trực quan hóa kết quả nhanh hơn nhiều so với phương pháp truyền thống. Thứ hai, AI góp phần nâng cao tính nhất quán trong xử lý dữ liệu. Khi các quy trình phân tích được chuẩn hóa, AI có thể giảm sự khác biệt giữa các kỹ sư, hạn chế sai sót do thao tác thủ công và tăng khả năng lặp lại của quá trình đánh giá. Thứ ba, AI hỗ trợ hiệu quả cho hệ thống quản lý theo ISO/IEC 17025:2017 thông qua việc tự động theo dõi hiệu chuẩn thiết bị, quản lý hồ sơ, kiểm soát tài liệu, giám sát thời hạn bảo trì, cảnh báo sai lệch dữ liệu và hỗ trợ truy xuất nguồn gốc. Điều này góp phần nâng cao hiệu quả vận hành và giảm rủi ro trong quản lý phòng thử nghiệm. Thứ tư, AI giúp tối ưu hóa nguồn nhân lực bằng cách tự động hóa các công việc lặp lại như nhập liệu, lập biểu mẫu, kiểm tra định dạng báo cáo và tổng hợp số liệu. Nhờ đó, kỹ sư có nhiều thời gian hơn để tập trung vào các nhiệm vụ có giá trị chuyên môn cao như đánh giá hiện trường, phân tích nguyên nhân và tư vấn kỹ thuật. Cuối cùng, AI tạo điều kiện hình thành cơ sở dữ liệu tri thức của doanh nghiệp. Dữ liệu từ nhiều năm hoạt động

có thể được tích lũy, chuẩn hóa và khai thác nhằm hỗ trợ đào tạo nhân sự mới, chia sẻ kinh nghiệm và nâng cao chất lượng ra quyết định.

❖ **Điểm yếu (Weaknesses)**

Bên cạnh những lợi ích, việc ứng dụng AI trong ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng vẫn tồn tại nhiều hạn chế. Điểm yếu lớn nhất là sự phụ thuộc vào chất lượng dữ liệu đầu vào. Nếu dữ liệu thử nghiệm không đầy đủ, không được chuẩn hóa hoặc chứa sai số, AI sẽ tạo ra các kết quả thiếu chính xác. Trong lĩnh vực thí nghiệm hiện trường, dữ liệu thường chịu ảnh hưởng của điều kiện địa chất, thiết bị, thao tác thi công và yếu tố môi trường, làm tăng độ phức tạp của quá trình huấn luyện mô hình. Thứ hai, AI chưa có khả năng quan sát trực tiếp các yếu tố ngoài dữ liệu số. Những dấu hiệu như tiếng động bất thường của kích thủy lực, rung động không đồng đều của hệ phản lực, tình trạng lún cục bộ, thay đổi thời tiết hoặc sai lệch trong thao tác lắp đặt thiết bị đều là các thông tin quan trọng mà kỹ sư hiện trường có thể nhận biết nhưng AI khó đánh giá nếu không được tích hợp cảm biến và dữ liệu bổ sung. Thứ ba, các mô hình AI hiện nay thường hoạt động như "hộp đen" (black box), khiến việc giải thích cơ sở của một kết luận trở nên khó khăn. Trong hoạt động kiểm định xây dựng, nơi mỗi kết luận có thể ảnh hưởng trực tiếp đến quyết định thiết kế, thi công hoặc nghiệm thu, khả năng giải thích và kiểm chứng kết quả là yêu cầu bắt buộc. Ngoài ra, việc đầu tư hạ tầng số, xây dựng cơ sở dữ liệu, phát triển mô hình AI và đào tạo nhân lực đòi hỏi nguồn lực tài chính đáng kể, vượt quá khả năng của nhiều doanh nghiệp nhỏ và vừa.

❖ **Cơ hội (Opportunities)**

Xu hướng chuyển đổi số của ngành xây dựng tạo ra nhiều cơ hội để AI phát triển trong lĩnh vực thí nghiệm và kiểm định. Thứ nhất, sự phát triển của BIM, Digital Twin, IoT và cảm biến thông minh giúp lượng dữ liệu kỹ thuật ngày càng phong phú, tạo điều kiện thuận lợi cho việc huấn luyện và ứng dụng các mô hình AI. Thứ hai, nhiều quốc gia đang thúc đẩy chiến lược xây dựng thông minh và quản lý tài sản hạ tầng dựa trên dữ liệu. Điều này mở ra nhu cầu lớn đối với các phòng thử nghiệm có khả năng cung cấp dịch vụ số, báo cáo thông minh và phân tích dữ liệu nâng cao. Thứ ba, AI tạo điều kiện hình thành các mô hình phòng thí nghiệm thông minh (Smart Laboratory), trong đó toàn bộ quy trình từ tiếp nhận yêu cầu, lập kế hoạch, quản lý thiết bị, thu thập dữ liệu, xử lý kết quả đến phát hành báo cáo được kết nối trên cùng một nền tảng số. Thứ tư, AI góp phần nâng cao năng lực cạnh tranh của doanh nghiệp thông qua việc rút ngắn thời gian phát hành báo cáo, giảm chi phí vận hành, tăng độ chính xác và nâng cao trải nghiệm của khách hàng.

Đối với Việt Nam, quá trình hoàn thiện khung pháp lý về chuyển đổi số và phát triển kinh tế số sẽ tạo môi trường thuận lợi để các doanh nghiệp thí nghiệm – kiểm định từng bước tích hợp AI vào hoạt động chuyên môn, đặc biệt khi các dự án đầu tư công và dự án có yếu tố nước ngoài ngày càng yêu cầu cao về quản lý dữ liệu và minh bạch chất lượng.

❖ **Thách thức (Threats)**

Mặc dù có nhiều tiềm năng, quá trình ứng dụng AI cũng đối mặt với không ít thách thức. Thách thức đầu tiên là nguy cơ phụ thuộc quá mức vào AI. Nếu kỹ sư chỉ dựa vào các kết quả do AI đưa ra mà thiếu kiểm chứng độc lập, nguy cơ đưa ra kết luận sai sẽ tăng lên, đặc biệt trong những trường hợp dữ liệu đầu vào không phản ánh đầy đủ điều kiện thực tế. Thách thức

Thứ hai là vấn đề bảo mật và quyền sở hữu dữ liệu. Dữ liệu thí nghiệm thường liên quan đến các công trình trọng điểm, bí mật kỹ thuật và quyền sở hữu trí tuệ của chủ đầu tư. Việc sử dụng AI trên nền tảng đám mây hoặc chia sẻ dữ liệu để huấn luyện mô hình cần được quản lý chặt chẽ nhằm tránh nguy cơ rò rỉ thông tin. Thách thức thứ ba là khoảng cách về năng lực số giữa các doanh nghiệp. Các đơn vị có nguồn lực mạnh sẽ nhanh chóng triển khai AI và tạo lợi thế cạnh tranh, trong khi nhiều doanh nghiệp nhỏ có thể gặp khó khăn về vốn đầu tư, nhân lực và hạ tầng công nghệ. Một thách thức khác là sự thay đổi nhanh của công nghệ. Các mô hình AI liên tục được cập nhật, đòi hỏi doanh nghiệp phải đầu tư thường xuyên vào đào tạo, nâng cấp hệ thống và thích ứng với các tiêu chuẩn mới về quản trị AI, an toàn thông tin và đạo đức sử dụng AI. Cuối cùng, việc thiếu các hướng dẫn pháp lý cụ thể về sử dụng AI trong thí nghiệm và kiểm định xây dựng có thể tạo ra khoảng trống trong việc xác định trách nhiệm khi xảy ra sai sót. Đây là vấn đề cần được các cơ quan quản lý, tổ chức tiêu chuẩn và cộng đồng nghề nghiệp nghiên cứu trong thời gian tới.

6.2. Ma trận SWOT tổng hợp

Strengths (S)	Opportunities (O)
<ul style="list-style-type: none"> Xử lý dữ liệu nhanh và chính xác. Giảm sai sót trong quản lý dữ liệu. Tăng hiệu quả vận hành ISO/IEC 17025. Hỗ trợ ra quyết định kỹ thuật. 	<ul style="list-style-type: none"> Chuyển đổi số của ngành xây dựng. BIM, Digital Twin, IoT phát triển mạnh. Nhu cầu phòng thí nghiệm thông minh. Gia tăng yêu cầu minh bạch dữ liệu và chất lượng.
Weaknesses (W)	Threats (T)
<ul style="list-style-type: none"> Phụ thuộc chất lượng dữ liệu. Khó đánh giá bối cảnh hiện trường. Khó giải thích kết quả của mô hình AI. Chi phí đầu tư và đào tạo cao. 	<ul style="list-style-type: none"> Phụ thuộc quá mức vào AI. Rủi ro bảo mật và an toàn dữ liệu. Chênh lệch năng lực giữa các doanh nghiệp. Thiếu khung pháp lý chuyên biệt cho AI.

6.3. Thảo luận

Kết quả phân tích SWOT cho thấy AI mang lại nhiều lợi thế về năng suất, quản lý dữ liệu và chuẩn hóa quy trình, nhưng đồng thời đặt ra các yêu cầu mới về quản trị dữ liệu, đào tạo nhân lực và hoàn thiện khung pháp lý. Đối với ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng, chiến lược phù hợp không phải là thay thế kỹ sư bằng AI mà là khai thác các điểm mạnh của AI để nâng cao năng lực của con người.

Điều này phù hợp với xu hướng Human–AI Collaboration đang được nhiều tổ chức quốc tế khuyến nghị. Trong mô hình này, AI đảm nhận vai trò phân tích và hỗ trợ ra quyết định, còn kỹ sư và chuyên gia giữ vai trò kiểm chứng, đánh giá tổng hợp và chịu trách nhiệm chuyên môn. Đây được xem là hướng phát triển bền vững nhất cho các phòng thử nghiệm xây dựng trong giai đoạn chuyển đổi số đến năm 2045.

IV. ỨNG DỤNG AI TRONG THÍ NGHIỆM VÀ KIỂM ĐỊNH XÂY DỰNG THỜI GIAN TỚI

1. Giả định của kịch bản

Kịch bản cơ sở (Baseline Scenario) được xây dựng trên giả định rằng tốc độ phát triển của trí tuệ nhân tạo trong giai đoạn 2026–2045 tiếp tục duy trì theo xu hướng hiện nay. Các công

nghe AI, Machine Learning, Deep Learning, Large Language Models – LLMs, AI Agents và robot thông minh sẽ tiếp tục được cải tiến, đồng thời chi phí đầu tư giảm dần nhờ sự phát triển của hạ tầng điện toán đám mây và phần cứng chuyên dụng. Trong kịch bản này, AI không thay thế hoàn toàn con người mà được tích hợp sâu vào các quy trình quản lý, thiết kế, thi công, vận hành và kiểm định công trình. Mức độ chấp nhận của xã hội, cơ quan quản lý và doanh nghiệp tăng dần cùng với sự hoàn thiện của khung pháp lý, tiêu chuẩn kỹ thuật và các hệ thống quản lý AI như ISO/IEC 42001. Đồng thời, các tiêu chuẩn quản lý phòng thử nghiệm như ISO/IEC 17025:2017 vẫn giữ nguyên nguyên tắc: kết quả thử nghiệm phải được xem xét và phê duyệt bởi nhân sự có năng lực và thẩm quyền.

2. Xu hướng phát triển của ngành xây dựng

Trong giai đoạn 2030–2045, hầu hết các doanh nghiệp xây dựng quy mô lớn sẽ chuyển đổi từ mô hình quản lý truyền thống sang mô hình xây dựng thông minh (Smart Construction). AI sẽ được tích hợp với BIM, Digital Twin, IoT, UAV, LiDAR và các hệ thống cảm biến để hình thành môi trường quản lý dữ liệu theo thời gian thực.

Các thuật toán AI sẽ tự động theo dõi tiến độ, dự báo rủi ro, tối ưu hóa lịch trình thi công, quản lý vật tư và phân tích hiệu quả sử dụng thiết bị. Những công việc mang tính lặp lại như kiểm tra hồ sơ, tổng hợp dữ liệu, lập báo cáo tiến độ và kiểm soát tài liệu sẽ được tự động hóa ở mức cao. Vai trò của kỹ sư chuyển dần từ thực hiện tác vụ sang giám sát hệ thống, kiểm tra ngoại lệ và đưa ra các quyết định kỹ thuật có tính chiến lược.

Ở cấp độ quản lý doanh nghiệp, AI sẽ trở thành một "đồng nghiệp số" (Digital Co-worker), hỗ trợ ban lãnh đạo phân tích dữ liệu dự án, đánh giá hiệu quả đầu tư và dự báo các xu hướng thị trường. Tuy nhiên, các quyết định liên quan đến pháp lý, tài chính, an toàn và trách nhiệm nghề nghiệp vẫn thuộc về con người.

3. Tác động đối với ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng

Đối với lĩnh vực thí nghiệm và kiểm định xây dựng, AI sẽ được triển khai rộng rãi trong các công đoạn tiền xử lý và hậu xử lý dữ liệu. Các phòng thử nghiệm hiện đại sẽ sử dụng hệ thống AI để tự động kiểm tra yêu cầu khách hàng, đối chiếu phạm vi công nhận, lập kế hoạch thử nghiệm, phân công nhân sự, theo dõi hiệu chuẩn thiết bị và kiểm soát tiến độ thực hiện.

Trong quá trình thử nghiệm, AI sẽ hỗ trợ thu thập dữ liệu trực tiếp từ các thiết bị đo, phát hiện giá trị ngoại lai, kiểm tra tính hợp lý của số liệu và so sánh với cơ sở dữ liệu lịch sử. Các báo cáo thử nghiệm sẽ được AI soạn thảo dưới dạng dự thảo, giúp giảm đáng kể thời gian xử lý và hạn chế sai sót về hình thức.

Đối với các phương pháp thí nghiệm cọc như PDA, PIT, Crosshole Sonic Logging (CSL), KODEN Test, thử tải tĩnh, thử tải ngang và thử nhỏ cọc, AI có thể hỗ trợ nhận diện tín hiệu bất thường, gợi ý các nguyên nhân có khả năng xảy ra và trực quan hóa kết quả dưới nhiều dạng biểu đồ hoặc mô hình ba chiều. Tuy nhiên, việc lựa chọn phương pháp thử phù hợp, kiểm soát điều kiện hiện trường, xử lý các tình huống phát sinh và đưa ra kết luận kỹ thuật cuối cùng vẫn phụ thuộc vào kỹ sư và chuyên gia.

Một xu hướng đáng chú ý là sự hình thành các phòng thí nghiệm thông minh (Smart Laboratory), trong đó hệ thống quản lý thông tin phòng thí nghiệm (LIMS), thiết bị IoT và AI được tích hợp thành một nền tảng thống nhất. Dữ liệu được truyền tự động từ thiết bị đo đến

cơ sở dữ liệu trung tâm, giảm thiểu việc nhập liệu thủ công và nâng cao khả năng truy xuất nguồn gốc theo yêu cầu của ISO/IEC 17025:2017.

4. Chuyển dịch cơ cấu nghề nghiệp

Trong kịch bản này, cơ cấu nghề nghiệp của ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng sẽ thay đổi đáng kể. Nhu cầu đối với các vị trí chỉ thực hiện thao tác nhập liệu, tổng hợp số liệu hoặc lập báo cáo theo mẫu sẽ giảm dần do AI đảm nhận phần lớn các công việc này.

Ngược lại, nhu cầu về các vị trí có khả năng kết hợp giữa kiến thức chuyên ngành và công nghệ sẽ tăng mạnh, bao gồm:

- Kỹ sư thí nghiệm có năng lực phân tích dữ liệu.
- Chuyên gia quản lý dữ liệu thí nghiệm.
- Kỹ sư tích hợp AI và thiết bị đo.
- Chuyên gia kiểm định số (Digital Inspection Engineer).
- Quản lý hệ thống phòng thí nghiệm thông minh.
- Chuyên gia đánh giá và xác nhận kết quả do AI hỗ trợ.

Đặc biệt, kỹ năng tư duy phản biện, đánh giá hiện trường, quản lý rủi ro, giao tiếp với khách hàng và trách nhiệm nghề nghiệp sẽ trở thành lợi thế cạnh tranh quan trọng hơn so với khả năng thực hiện các thao tác kỹ thuật lặp lại.

5. Những giới hạn của AI trong kịch bản cơ sở

Mặc dù AI được ứng dụng rộng rãi hơn, nghiên cứu này cho rằng có bốn nhóm công việc mà AI vẫn chưa thể thay thế trong giai đoạn đến năm 2045. Thứ nhất là đánh giá bối cảnh hiện trường: Các yếu tố như địa chất, thời tiết, điều kiện thi công, hiện trạng thiết bị và các tình huống phát sinh ngoài dự kiến đòi hỏi khả năng quan sát và suy luận tổng hợp mà AI khó có thể thực hiện đầy đủ. Thứ hai là xử lý các tình huống chưa từng có tiền lệ: Khi xuất hiện tín hiệu bất thường chưa có trong dữ liệu huấn luyện, AI có thể đưa ra các dự đoán với độ tin cậy thấp hoặc sai lệch. Trong những trường hợp này, kinh nghiệm của chuyên gia đóng vai trò quyết định. Thứ ba là trách nhiệm chuyên môn và pháp lý: Theo các quy định hiện hành và các nguyên tắc của ISO/IEC 17025:2017, kết quả thử nghiệm phải được xem xét, xác nhận và phê duyệt bởi người có thẩm quyền. AI không có tư cách pháp lý để chịu trách nhiệm đối với các kết luận kỹ thuật hoặc hậu quả phát sinh từ việc sử dụng kết quả thử nghiệm. Thứ tư là đạo đức nghề nghiệp và tính khách quan: Việc đánh giá sự phù hợp của công trình không chỉ dựa trên dữ liệu mà còn liên quan đến tính liêm chính khoa học, trách nhiệm đối với an toàn cộng đồng và tuân thủ các quy định pháp luật. Đây là những giá trị thuộc về con người và chưa thể được thay thế bằng thuật toán.

6. Hàm ý đối với các doanh nghiệp thí nghiệm và kiểm định xây dựng

Trong kịch bản cơ sở, lợi thế cạnh tranh của doanh nghiệp không còn phụ thuộc chủ yếu vào số lượng thiết bị hoặc nhân sự, mà phụ thuộc vào khả năng quản trị dữ liệu và tích hợp AI vào quy trình vận hành. Các phòng thử nghiệm có hệ thống dữ liệu chuẩn hóa, quy trình số hóa và đội ngũ kỹ sư hiểu biết về AI sẽ có năng suất cao hơn, giảm thời gian phát hành báo cáo, nâng cao khả năng kiểm soát chất lượng và tăng tính minh bạch trong hoạt động.

Tuy nhiên, đầu tư vào AI không đồng nghĩa với việc cắt giảm vai trò của kỹ sư. Ngược lại, AI làm gia tăng yêu cầu về năng lực chuyên môn của người sử dụng. Kỹ sư tương lai không chỉ cần hiểu nguyên lý thí nghiệm và tiêu chuẩn kỹ thuật mà còn phải có khả năng đánh giá các khuyến nghị của AI, nhận biết sai lệch của mô hình và chịu trách nhiệm đối với quyết định cuối cùng.

7. Kết luận của kịch bản

Kịch bản cơ sở cho thấy đến năm 2045, AI sẽ trở thành hạ tầng công nghệ không thể thiếu trong ngành xây dựng và ngành thí nghiệm – kiểm định xây dựng. Phần lớn các công việc mang tính lặp lại, chuẩn hóa và xử lý dữ liệu sẽ được tự động hóa ở mức cao, góp phần nâng cao năng suất, giảm sai sót và tối ưu hóa nguồn lực. Tuy nhiên, AI không thay thế vai trò trung tâm của con người trong các hoạt động đòi hỏi đánh giá tổng hợp, xử lý tình huống hiện trường, phán đoán kỹ thuật và chịu trách nhiệm pháp lý. Mô hình phát triển bền vững nhất không phải là "AI thay thế kỹ sư", mà là mô hình cộng tác Human-AI, trong đó AI đóng vai trò trợ lý kỹ thuật thông minh, còn kỹ sư và chuyên gia giữ vai trò chủ thể chịu trách nhiệm về chất lượng, an toàn và tính tin cậy của kết quả thử nghiệm.

V. ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH HUMAN-AI ENGINEERING RESPONSIBILITY FRAMEWORK (HAERF)

1. Human-AI Engineering Responsibility Framework (HAERF): Cơ sở lý luận về trách nhiệm kỹ thuật giữa con người và trí tuệ nhân tạo

1.1. Đặt vấn đề

Sự phát triển nhanh chóng của trí tuệ nhân tạo (Artificial Intelligence – AI), đặc biệt là các mô hình Deep Learning, Large Language Models – LLMs và AI Agents, đã làm thay đổi đáng kể phương thức tổ chức và vận hành của ngành xây dựng. Trong nhiều lĩnh vực như thiết kế, quản lý dự án, kiểm soát tiến độ, phân tích dữ liệu và giám sát công trình, AI đã chứng minh khả năng xử lý khối lượng thông tin rất lớn với tốc độ và độ nhất quán vượt xa con người.

Điều này dẫn đến một câu hỏi ngày càng được quan tâm trong cộng đồng kỹ thuật: Nếu AI có thể phân tích dữ liệu chính xác hơn và nhanh hơn con người, liệu AI có thể thay thế kỹ sư trong hoạt động thí nghiệm và kiểm định xây dựng hay không?

Phần lớn các nghiên cứu hiện nay tập trung đánh giá khả năng của AI thông qua các chỉ tiêu như độ chính xác (accuracy), độ nhạy (sensitivity), tốc độ xử lý (processing speed) hoặc khả năng học từ dữ liệu (learning capability). Tuy nhiên, rất ít nghiên cứu xem xét vấn đề dưới góc độ trách nhiệm kỹ thuật (engineering responsibility) – yếu tố cốt lõi quyết định giá trị pháp lý và nghề nghiệp của một kết quả thí nghiệm.

Trong thực tiễn, một báo cáo thử nghiệm không chỉ là tập hợp các số liệu hoặc biểu đồ phân tích. Đó là tài liệu kỹ thuật được sử dụng để thiết kế, nghiệm thu, đánh giá an toàn công trình và giải quyết tranh chấp. Vì vậy, giá trị của báo cáo không chỉ phụ thuộc vào độ chính xác của dữ liệu mà còn phụ thuộc vào người xác nhận tính hợp lệ của dữ liệu và chịu trách nhiệm đối với kết luận kỹ thuật. Đây chính là điểm khác biệt căn bản giữa khả năng tính toán của AI và trách nhiệm nghề nghiệp của kỹ sư.

1.2. Khoảng trống của các nghiên cứu hiện nay

Các công trình nghiên cứu về AI trong xây dựng chủ yếu tập trung vào bốn nhóm chủ đề:

- Ứng dụng AI trong quản lý dự án;
- AI trong thiết kế và tối ưu hóa công trình;
- AI trong nhận dạng khuyết tật và giám sát kết cấu;
- AI trong xử lý dữ liệu và tự động hóa quy trình.

Các nghiên cứu này đã chứng minh AI có thể nâng cao năng suất, giảm sai sót và hỗ trợ ra quyết định trong nhiều hoạt động kỹ thuật. Tuy nhiên, phần lớn đều đánh giá AI từ góc độ năng lực kỹ thuật của thuật toán, trong khi chưa phân tích đầy đủ mối quan hệ giữa năng lực kỹ thuật và trách nhiệm kỹ thuật. Đặc biệt, trong lĩnh vực thí nghiệm và kiểm định xây dựng, nơi kết quả thử nghiệm có thể ảnh hưởng trực tiếp đến an toàn công trình, trách nhiệm pháp lý và quyền lợi của nhiều bên liên quan, hiện vẫn thiếu một khung phân tích giúp trả lời các câu hỏi sau:

- AI có thể thay thế những công việc nào trong chuỗi giá trị của phòng thử nghiệm?
- Đây là ranh giới giữa hỗ trợ kỹ thuật và thay thế trách nhiệm?
- Trách nhiệm của kỹ sư thay đổi như thế nào khi AI tham gia vào quá trình thử nghiệm?
- Những công đoạn nào bắt buộc phải do con người thực hiện theo yêu cầu của hệ thống quản lý chất lượng và pháp luật?

Khoảng trống này cho thấy cần có một khung lý luận mới để phân tích vai trò của AI không chỉ dựa trên năng lực xử lý dữ liệu mà còn dựa trên bản chất của trách nhiệm kỹ thuật.

1.3. Khái niệm về trách nhiệm kỹ thuật

Trong nghiên cứu này, trách nhiệm kỹ thuật (Engineering Responsibility) được hiểu là nghĩa vụ của cá nhân hoặc tổ chức trong việc bảo đảm rằng mọi quyết định kỹ thuật được đưa ra dựa trên dữ liệu hợp lệ, tuân thủ tiêu chuẩn chuyên ngành, đáp ứng yêu cầu pháp luật và được thực hiện với sự cẩn trọng nghề nghiệp. Trách nhiệm kỹ thuật bao gồm bốn thành phần không thể tách rời:

(1) *Trách nhiệm chuyên môn (Technical Responsibility)*: bảo đảm phương pháp thử, thiết bị, dữ liệu và kết quả phù hợp với tiêu chuẩn kỹ thuật.

(2) *Trách nhiệm nghề nghiệp (Professional Responsibility)*: thực hiện công việc một cách khách quan, trung thực và độc lập, phù hợp với chuẩn mực đạo đức nghề nghiệp.

(3) *Trách nhiệm pháp lý (Legal Responsibility)*: chịu trách nhiệm trước khách hàng, cơ quan quản lý và pháp luật đối với kết quả được xác nhận.

(4) *Trách nhiệm xã hội (Social Responsibility)*: bảo đảm rằng kết quả thử nghiệm góp phần duy trì an toàn công trình, bảo vệ tính mạng con người, tài sản và lợi ích của cộng đồng.

Bốn thành phần này không chỉ phản ánh năng lực chuyên môn của kỹ sư mà còn tạo nên giá trị pháp lý của một báo cáo thử nghiệm. Đây là những yếu tố mà AI hiện chưa có tư cách pháp lý hoặc đạo đức để đảm nhận.

1.4. Từ "thay thế công việc" đến "thay thế trách nhiệm"

Một trong những nguyên nhân dẫn đến các tranh luận về AI là việc đồng nhất khái niệm *thay thế công việc* với *thay thế con người*.

Nghiên cứu này cho rằng cần phân biệt rõ ba cấp độ khác nhau:

- *Thay thế thao tác (Task Replacement)*: AI thực hiện các nhiệm vụ lặp lại như nhập liệu, chuyển đổi đơn vị, nhận dạng tín hiệu, lập biểu mẫu hoặc tổng hợp báo cáo sơ bộ.
- *Thay thế quy trình (Process Augmentation)*: AI tham gia vào nhiều công đoạn của quy trình như kiểm tra dữ liệu, cảnh báo bất thường, hỗ trợ lập kế hoạch và tối ưu hóa dòng công việc, nhưng vẫn có sự giám sát của con người.
- *Thay thế trách nhiệm (Responsibility Substitution)*: AI trở thành chủ thể chịu trách nhiệm đối với quyết định kỹ thuật, ký xác nhận kết quả hoặc chịu trách nhiệm pháp lý nếu kết quả sai lệch.

Hai cấp độ đầu phản ánh năng lực công nghệ, trong khi cấp độ thứ ba liên quan đến quyền hạn, đạo đức nghề nghiệp và trách nhiệm pháp lý. Đây là ba khía cạnh không thể hình thành chỉ từ khả năng xử lý dữ liệu của thuật toán.

Do đó, trong phạm vi nghiên cứu này, khái niệm "AI thay thế kỹ sư" được xem là chưa chính xác. Cách diễn đạt phù hợp hơn là AI thay thế một phần công việc của kỹ sư, trong khi trách nhiệm chuyên môn và pháp lý vẫn thuộc về con người.

1.5. Đề xuất Human–AI Engineering Responsibility Framework (HAERF)

Từ các phân tích trên, nghiên cứu đề xuất *Human–AI Engineering Responsibility Framework (HAERF)* như một khung khái niệm nhằm phân định vai trò giữa AI và con người trong hoạt động thí nghiệm – kiểm định xây dựng.

Khung này được xây dựng trên ba nguyên tắc cơ bản:

- *Nguyên tắc 1 – AI tối ưu hóa công việc, không chuyển giao trách nhiệm*: AI được sử dụng để tự động hóa các hoạt động có quy trình chuẩn hóa, xử lý dữ liệu và hỗ trợ phân tích; việc sử dụng AI không làm thay đổi chủ thể chịu trách nhiệm đối với kết quả.
- *Nguyên tắc 2 – Mức độ tham gia của con người tăng theo mức độ ảnh hưởng của quyết định*: Càng gần đến quyết định kỹ thuật cuối cùng, vai trò của kỹ sư, chuyên gia và người có thẩm quyền càng trở nên quan trọng.
- *Nguyên tắc 3 – Trách nhiệm kỹ thuật không thể được chuyển giao cho thuật toán*: Dù AI có thể đưa ra dự báo hoặc khuyến nghị với độ chính xác cao, việc đánh giá tính phù hợp, chấp nhận kết quả và chịu trách nhiệm trước pháp luật vẫn thuộc về con người.

Ba nguyên tắc này tạo thành nền tảng cho toàn bộ các mô hình sẽ được trình bày trong các mục tiếp theo.

1.6. Luận điểm trung tâm của nghiên cứu

Từ góc độ kỹ thuật, pháp lý và quản lý chất lượng, nghiên cứu đề xuất luận điểm trung tâm sau:

+ Giá trị của một kết quả thí nghiệm không chỉ được quyết định bởi độ chính xác của dữ liệu mà còn bởi chủ thể chịu trách nhiệm xác nhận tính hợp lệ của dữ liệu đó. Vì vậy, AI có thể thay đổi cách dữ liệu được thu thập, xử lý và diễn giải, nhưng không thể thay thế trách nhiệm kỹ thuật của con người.

+ Luận điểm này sẽ được kiểm chứng xuyên suốt các mục tiếp theo thông qua phân tích chuỗi giá trị của phòng thử nghiệm, ma trận năng lực AI theo từng công đoạn, các phép thử hiện trường và yêu cầu của hệ thống quản lý theo ISO/IEC 17025:2017. Đồng thời, đây cũng là nền tảng để nghiên cứu đề xuất các mô hình Human–AI Collaboration phù hợp với đặc thù của ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng trong bối cảnh chuyên đổi số.

2. Engineering Responsibility Hierarchy: Mô hình phân tầng trách nhiệm kỹ thuật trong bối cảnh AI

2.1. Từ năng lực của AI đến ranh giới trách nhiệm kỹ thuật

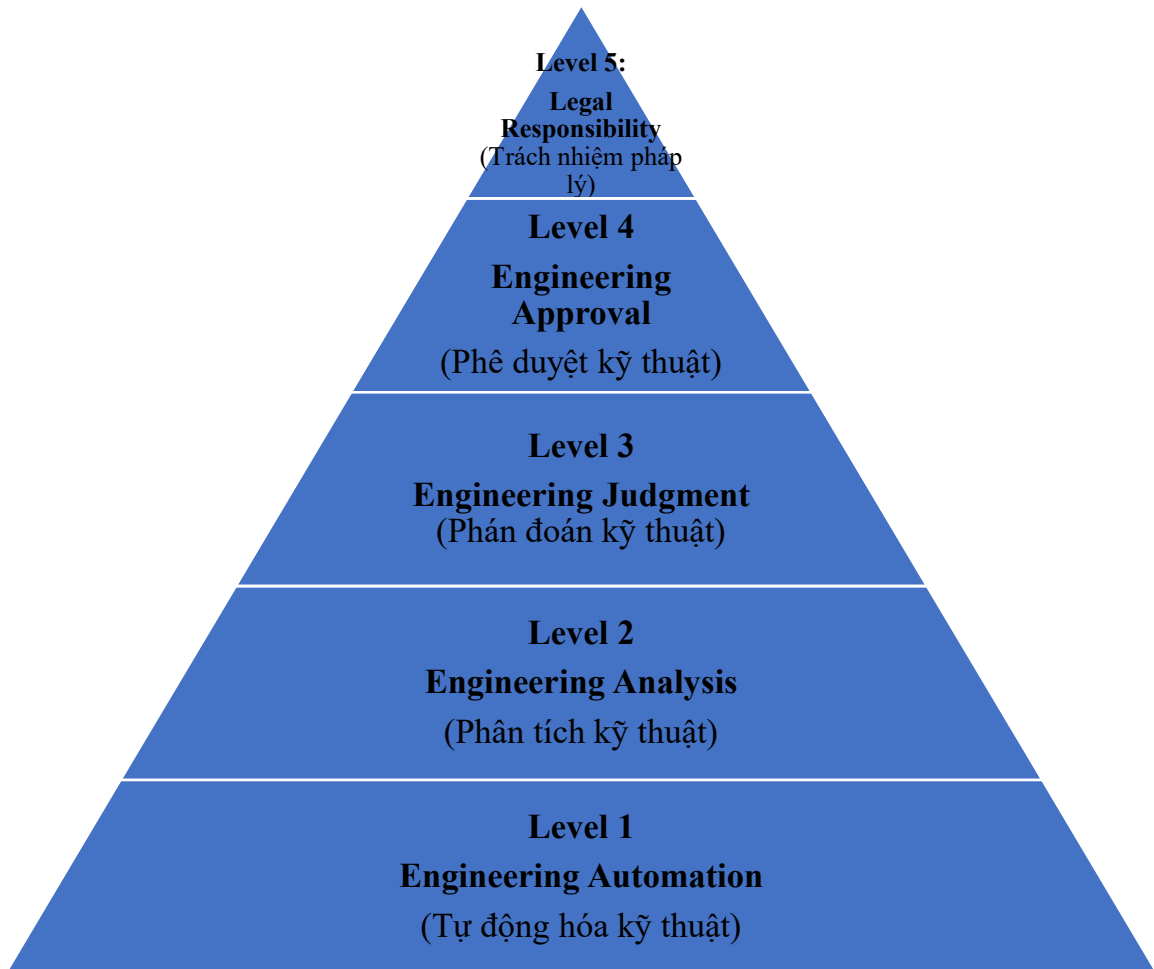
Trong phần lớn các nghiên cứu hiện nay về trí tuệ nhân tạo trong ngành xây dựng, câu hỏi thường được đặt ra là: AI có thể thực hiện được những công việc nào?. Các công trình nghiên cứu chủ yếu đánh giá hiệu quả của AI thông qua các tiêu chí như độ chính xác, tốc độ xử lý, khả năng nhận dạng hình ảnh, dự báo xu hướng hoặc hỗ trợ ra quyết định. Mặc dù các kết quả này có ý nghĩa quan trọng trong việc chứng minh năng lực của AI, chúng chưa giải quyết được một vấn đề cốt lõi đối với hoạt động thí nghiệm và kiểm định xây dựng, đó là ranh giới của trách nhiệm kỹ thuật.

Nghiên cứu này cho rằng câu hỏi cần được đặt ra không còn là *AI có thể làm gì?*, mà là *AI được phép tham gia đến đâu trong chuỗi trách nhiệm kỹ thuật của một phòng thử nghiệm?*. Đây là sự chuyển dịch từ cách tiếp cận dựa trên năng lực công nghệ sang cách tiếp cận dựa trên trách nhiệm chuyên môn và pháp lý.

Trong lĩnh vực thí nghiệm – kiểm định xây dựng, kết quả cuối cùng không chỉ là sản phẩm của quá trình xử lý dữ liệu mà còn là cơ sở cho các quyết định về thiết kế, thi công, nghiệm thu, đánh giá an toàn công trình và giải quyết tranh chấp. Vì vậy, mỗi quyết định kỹ thuật đều gắn với một chủ thể chịu trách nhiệm. Trách nhiệm này không thể được hình thành chỉ từ khả năng tính toán của thuật toán mà còn phụ thuộc vào năng lực chuyên môn, đạo đức nghề nghiệp và địa vị pháp lý của người đưa ra quyết định.

2.2. Mô hình Engineering Responsibility Hierarchy

Dựa trên đặc thù của hoạt động thí nghiệm và kiểm định xây dựng, nghiên cứu đề xuất mô hình Engineering Responsibility Hierarchy nhằm phân định vai trò của AI và con người theo năm cấp độ trách nhiệm kỹ thuật.



Mô hình được xây dựng trên nguyên tắc: *càng tiến gần đến quyết định cuối cùng, vai trò của AI càng giảm và trách nhiệm của con người càng tăng*. Điều này phản ánh đúng bản chất của hoạt động kỹ thuật, trong đó việc xử lý dữ liệu có thể được tự động hóa nhưng trách nhiệm đối với quyết định kỹ thuật vẫn thuộc về con người.

2.3. Phân tích các cấp độ trách nhiệm

- **Cấp độ 1 – Engineering Automation**

Đây là tầng mà AI phát huy hiệu quả cao nhất. Các công việc mang tính lặp lại, có quy trình chuẩn hóa và dữ liệu số hóa như nhập liệu, chuyển đổi đơn vị, nhận dạng tín hiệu, kiểm tra biểu mẫu, thống kê, lưu trữ dữ liệu hoặc lập báo cáo sơ bộ có thể được AI thực hiện với độ chính xác và tốc độ cao. Trong giai đoạn này, AI đóng vai trò như một công cụ tự động hóa, giúp giảm khối lượng công việc thủ công và nâng cao năng suất của phòng thử nghiệm.

- **Cấp độ 2 – Engineering Analysis**

Ở cấp độ này, AI tham gia vào quá trình phân tích kỹ thuật. Các thuật toán học máy và học sâu có thể xử lý tín hiệu PDA, PIT, CSL, KODEN hoặc dữ liệu từ các phương pháp kiểm tra không phá hủy (NDT), phát hiện các giá trị bất thường, nhận dạng mẫu tín hiệu và đề xuất các giả thuyết kỹ thuật. Tuy nhiên, các kết quả này chỉ mang tính hỗ trợ vì AI chưa thể đánh giá đầy đủ bối cảnh hiện trường hoặc các yếu tố ngoài dữ liệu.

- **Cấp độ 3 – Engineering Judgment**

Đây là ranh giới quan trọng giữa AI và kỹ sư. Tại cấp độ này, dữ liệu phân tích phải được đặt trong bối cảnh cụ thể của từng công trình để đưa ra nhận định kỹ thuật. Kỹ sư cần xem xét đồng thời điều kiện địa chất, phương pháp thi công, trạng thái thiết bị, lịch sử công trình và các hiện tượng quan sát được ngoài hiện trường. Những yếu tố này đòi hỏi tư duy phản biện, kinh nghiệm thực tiễn và khả năng tích hợp nhiều nguồn thông tin mà AI hiện chưa thể thay thế.

- **Cấp độ 4 – Engineering Approval**

Sau khi kết quả được đánh giá, người có thẩm quyền của phòng thử nghiệm phải xem xét, xác nhận tính hợp lệ của dữ liệu và phê duyệt báo cáo thử nghiệm. Đây là yêu cầu bắt buộc trong hệ thống quản lý theo ISO/IEC 17025:2017 nhằm bảo đảm tính khách quan, tính chính xác và khả năng truy xuất nguồn gốc của kết quả. AI có thể hỗ trợ kiểm tra hình thức hoặc phát hiện sai lệch, nhưng không có thẩm quyền phê duyệt kết quả.

- **Cấp độ 5 – Legal Responsibility**

Đây là cấp độ cao nhất và cũng là ranh giới mà AI không thể vượt qua. Người ký báo cáo thử nghiệm phải chịu trách nhiệm trước khách hàng, cơ quan quản lý và pháp luật về nội dung của báo cáo. Trách nhiệm này bao gồm cả trách nhiệm dân sự, hành chính hoặc hình sự nếu kết quả thử nghiệm sai lệch gây hậu quả nghiêm trọng. AI không có tư cách pháp lý, không có nghĩa vụ đạo đức và không thể trở thành chủ thể chịu trách nhiệm theo quy định của pháp luật.

2.4. Ý nghĩa đối với ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng

Mô hình Engineering Responsibility Hierarchy cho thấy AI và con người không tồn tại trong môi trường cạnh tranh mà bổ sung cho nhau ở các cấp độ khác nhau của chuỗi giá trị kỹ thuật. AI càng phát huy hiệu quả ở các tầng dưới thì con người càng cần tập trung vào các tầng trên, nơi đòi hỏi khả năng đánh giá tổng hợp, phán đoán chuyên môn và chịu trách nhiệm đối với quyết định cuối cùng.

Đối với các phép thử hiện trường như nén tĩnh cọc, PDA, PIT, CSL, KODEN hoặc thử nhỏ cọc, AI có thể hỗ trợ thu thập và phân tích dữ liệu nhưng không thể thay thế việc khảo sát hiện trường, kiểm soát quá trình thử nghiệm, xử lý các tình huống phát sinh hoặc xác nhận tính hợp lệ của kết quả. Điều này đặc biệt quan trọng trong bối cảnh các phòng thử nghiệm hoạt động theo ISO/IEC 17025:2017, nơi mọi báo cáo đều phải được xem xét và phê duyệt bởi nhân sự có năng lực và thẩm quyền.

2.5. Hàm ý của mô hình

Từ mô hình Engineering Responsibility Hierarchy, nghiên cứu đề xuất một nguyên tắc nền tảng cho việc ứng dụng AI trong ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng: *“AI có thể mở rộng năng lực kỹ thuật của con người thông qua tự động hóa và phân tích dữ liệu, nhưng không thể tiếp nhận trách nhiệm kỹ thuật, bởi trách nhiệm được hình thành từ năng lực chuyên môn, đạo đức nghề nghiệp và quyền hạn pháp lý, chứ không phải từ khả năng tính toán của thuật toán”*.

3. Decision Responsibility Boundary – Ranh giới trách nhiệm kỹ thuật giữa AI và con người

Một trong những vấn đề quan trọng nhất khi ứng dụng AI trong ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng là xác định ranh giới giữa *hỗ trợ kỹ thuật* và *trách nhiệm kỹ thuật*. Nghiên cứu này đề xuất khái niệm Decision Responsibility Boundary (DRB) nhằm mô tả ranh giới mà tại đó AI không còn là công cụ phân tích đơn thuần mà bắt đầu ảnh hưởng trực tiếp đến quyết định kỹ thuật.

Trong chuỗi giá trị của một phòng thử nghiệm, AI có thể tham gia ở nhiều giai đoạn như thu thập dữ liệu, xử lý tín hiệu, phát hiện bất thường, phân tích thống kê và đề xuất phương án đánh giá. Tuy nhiên, khi kết quả phân tích được sử dụng để đưa ra kết luận về chất lượng công trình hoặc khả năng chịu lực của kết cấu thì trách nhiệm chuyển sang con người. Đây chính là ranh giới quyết định của mô hình.

Theo khung đề xuất, AI có thể thực hiện bốn nhóm chức năng: tự động hóa (Automation), nhận dạng (Recognition), phân tích (Analytics) và khuyến nghị (Recommendation). Sau điểm này là các hoạt động gồm đánh giá kỹ thuật (Engineering Judgment), phê duyệt (Approval) và chịu trách nhiệm pháp lý (Legal Accountability). Các hoạt động này phải do kỹ sư hoặc người có thẩm quyền thực hiện.

Đối với các phép thử như PDA, PIT, CSL hay thử tải tĩnh, AI có thể phát hiện tín hiệu bất thường hoặc gợi ý khả năng tồn tại khuyết tật. Tuy nhiên, việc xác định đó là khuyết tật thực hay chỉ là nhiễu tín hiệu, ảnh hưởng của địa chất, sai số thiết bị hoặc điều kiện thi công vẫn phải dựa trên đánh giá của kỹ sư. Trong nhiều trường hợp, cùng một dạng tín hiệu có thể dẫn đến các kết luận khác nhau nếu bối cảnh địa chất hoặc lịch sử thi công thay đổi.

Decision Responsibility Boundary vì vậy không phải là giới hạn về năng lực tính toán của AI mà là giới hạn về quyền hạn và trách nhiệm. AI có thể đề xuất, nhưng không thể quyết định; AI có thể hỗ trợ, nhưng không thể chịu trách nhiệm. Đây là nguyên tắc cốt lõi giúp bảo đảm việc ứng dụng AI phù hợp với yêu cầu của ISO/IEC 17025:2017 và các quy định pháp luật hiện hành.

4. AI Capability Matrix – Ma trận đánh giá khả năng tham gia của AI trong hoạt động thí nghiệm và kiểm định

Để đánh giá một cách hệ thống vai trò của AI trong ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng, nghiên cứu đề xuất AI Capability Matrix. Ma trận này không đánh giá AI theo từng phần mềm hay thuật toán cụ thể mà theo từng công đoạn của chuỗi công việc kỹ thuật, từ đó xác định mức độ phù hợp của AI trong mỗi hoạt động. Nghiên cứu sử dụng bốn cấp độ:

- A – AI có thể tự động hóa phần lớn công việc.
- B – AI hỗ trợ mạnh nhưng cần kỹ sư kiểm chứng.
- C – AI chỉ hỗ trợ một phần do phụ thuộc nhiều vào điều kiện hiện trường.
- D – AI hầu như không thể thay thế do liên quan đến trách nhiệm kỹ thuật hoặc pháp lý.

Áp dụng ma trận này cho các phép thử hiện trường cho thấy:

Đối với PDA, AI có khả năng hỗ trợ tốt trong việc kiểm tra dữ liệu đầu vào, xử lý tín hiệu, lọc nhiễu, xác định thời gian truyền sóng, tính toán theo phương pháp Case và hỗ trợ phân tích CAPWAP. Tuy nhiên, các công việc như lựa chọn vị trí gắn cảm biến, kiểm tra chất

lượng tiếp xúc, đánh giá điều kiện búa đóng, hiệu chỉnh tham số đất, phân tích nguyên nhân tín hiệu bất thường và kết luận sức chịu tải vẫn phụ thuộc nhiều vào chuyên gia.

Đối với PIT, AI có thể nhận dạng tín hiệu phản xạ, phát hiện các điểm thay đổi trở kháng và hỗ trợ phân loại dạng sóng. Tuy nhiên, AI khó phân biệt giữa khuyết tật thực, nhiễu tín hiệu, ảnh hưởng của địa tầng hoặc sai số thao tác nếu không có thông tin hiện trường đầy đủ.

Trong CSL, AI hỗ trợ phân tích vận tốc truyền sóng, suy hao năng lượng và trực quan hóa dữ liệu. Tuy nhiên, việc đánh giá ảnh hưởng của lệch ống, bọt khí, chất lượng nước trong ống hoặc sai lệch đầu đo vẫn cần kinh nghiệm của kỹ sư.

Đối với KODEN Test, AI có thể xử lý dữ liệu đo nghiêng và xây dựng mô hình ba chiều của hố khoan, nhưng việc xác định nguyên nhân lệch thành hố khoan, đánh giá ảnh hưởng của địa tầng hoặc chất lượng dung dịch giữ thành vẫn là công việc của chuyên gia.

Riêng thử tải tĩnh, thử nhỏ và thử tải ngang, AI chỉ hỗ trợ ở mức hạn chế. Mặc dù có thể ghi nhận và xử lý số liệu, AI không thể thay thế các hoạt động như khảo sát hiện trường, tổ chức hệ phản lực, điều khiển gia tải, xử lý sự cố, kiểm soát an toàn hoặc đánh giá ổn định của hệ thống.

Kết quả phân tích cho thấy AI có khả năng tự động hóa rất cao đối với các công việc xử lý dữ liệu, nhưng mức độ tham gia giảm dần khi công việc đòi hỏi kinh nghiệm hiện trường, phán đoán kỹ thuật và trách nhiệm pháp lý.

5. Human Competency Pyramid – Mô hình kim tự tháp năng lực con người trong thời đại AI

Một quan điểm phổ biến cho rằng AI càng phát triển thì vai trò của kỹ sư sẽ càng giảm. Tuy nhiên, nghiên cứu này đưa ra quan điểm ngược lại. Thông qua mô hình *Human Competency Pyramid*, nghiên cứu cho rằng AI càng đảm nhận nhiều công việc lặp lại thì yêu cầu đối với năng lực của con người càng tăng. Kim tự tháp gồm năm cấp độ: AI – Kỹ thuật viên – Kỹ sư – Kỹ sư trưởng – Chuyên gia. Ở tầng thấp nhất, AI thực hiện các nhiệm vụ tự động hóa và phân tích dữ liệu. Kỹ thuật viên chịu trách nhiệm chuẩn bị thiết bị, quan sát hiện trường và bảo đảm dữ liệu đầu vào chính xác. Kỹ sư thực hiện diễn giải kết quả, kiểm chứng khuyến nghị của AI và xử lý các tình huống bất thường. Kỹ sư trưởng và chuyên gia chịu trách nhiệm đánh giá tổng hợp, phê duyệt kết quả và giải quyết các vấn đề kỹ thuật phức tạp.

Điều này cho thấy AI không làm giảm giá trị của con người mà làm thay đổi cấu trúc năng lực nghề nghiệp. Trong tương lai, giá trị của kỹ sư không còn nằm ở khả năng tính toán thủ công mà ở khả năng đánh giá, phản biện, tích hợp thông tin và chịu trách nhiệm đối với các quyết định kỹ thuật.

6. Engineering Responsibility Principle – Nguyên lý trách nhiệm kỹ thuật

Từ các phân tích trên, nghiên cứu đề xuất Engineering Responsibility Principle như nguyên lý nền tảng cho việc ứng dụng AI trong ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng. Nguyên lý này khẳng định rằng: *“Trách nhiệm kỹ thuật không thể được chuyển giao cho trí tuệ nhân tạo vì trách nhiệm được hình thành từ quyền hạn pháp lý, đạo đức nghề nghiệp và năng lực phán đoán của con người, chứ không phải từ khả năng tính toán của thuật toán”*

Nguyên lý này không phủ nhận vai trò của AI mà xác định rõ vị trí của AI trong hệ thống kỹ thuật. AI là công cụ tăng cường năng lực (augmentation), không phải chủ thể chịu trách nhiệm (accountability).

Đối với phòng thử nghiệm theo ISO/IEC 17025:2017, nguyên lý này có ý nghĩa đặc biệt quan trọng. Dù AI tham gia ở bất kỳ công đoạn nào thì người có thẩm quyền vẫn phải xem xét tính hợp lệ của dữ liệu, đánh giá sự phù hợp, phê duyệt và ký phát hành báo cáo. Trách nhiệm này không thể chuyển giao cho phần mềm hay thuật toán.

Nguyên lý này cũng phù hợp với xu hướng quản trị AI có trách nhiệm (Responsible AI), trong đó con người luôn giữ quyền kiểm soát cuối cùng đối với các quyết định có ảnh hưởng lớn đến an toàn, tài sản và lợi ích xã hội.

7. Nhận xét

Kết quả nghiên cứu cho thấy AI sẽ thay đổi sâu sắc phương thức vận hành của các phòng thí nghiệm xây dựng, nhưng mức độ tác động không đồng đều giữa các nhóm công việc.

Những hoạt động có quy trình chuẩn hóa và dữ liệu số hóa cao sẽ được tự động hóa mạnh mẽ. Ngược lại, các công việc phụ thuộc vào điều kiện hiện trường, kinh nghiệm chuyên gia và trách nhiệm pháp lý vẫn do con người đảm nhiệm.

Xu hướng này phù hợp với các nguyên tắc của ISO/IEC 17025:2017 về năng lực, tính khách quan và trách nhiệm đối với kết quả thử nghiệm; đồng thời tương thích với định hướng của ISO/IEC 42001 về quản lý hệ thống AI và các nguyên tắc quản trị AI của NIST, OECD và UNESCO, trong đó con người luôn giữ vai trò giám sát và chịu trách nhiệm đối với các quyết định quan trọng.

Đối với Việt Nam, việc ứng dụng AI cần được thực hiện theo lộ trình phù hợp, ưu tiên xây dựng cơ sở dữ liệu chuẩn hóa, số hóa hồ sơ, phát triển hệ thống quản lý phòng thí nghiệm thông minh và đào tạo đội ngũ kỹ sư có năng lực sử dụng AI. Đồng thời, cần xây dựng các hướng dẫn kỹ thuật và quy định pháp lý để xác định rõ trách nhiệm khi AI tham gia vào quá trình thử nghiệm và kiểm định.

8. Kết luận

Phần này đã chuyển trọng tâm nghiên cứu từ câu hỏi "*AI có thể làm gì?*" sang câu hỏi "*AI được phép tham gia đến đâu trong chuỗi trách nhiệm kỹ thuật?*". Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất ba đóng góp chính gồm: *Decision Responsibility Boundary*, *Engineering Responsibility Hierarchy* và *AI Capability Matrix* như các công cụ phân tích vai trò của AI trong ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng.

Kết quả phân tích khẳng định rằng AI có tiềm năng rất lớn trong tự động hóa, xử lý dữ liệu và hỗ trợ ra quyết định, nhưng không thể thay thế trách nhiệm kỹ thuật của con người. Ranh giới giữa AI và kỹ sư không nằm ở năng lực tính toán mà nằm ở trách nhiệm chuyên môn, trách nhiệm pháp lý và nghĩa vụ đạo đức đối với chất lượng công trình.

Do đó, tương lai của ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng không phải là mô hình "AI thay thế kỹ sư", mà là mô hình cộng tác Human-AI, trong đó AI đóng vai trò trợ lý kỹ thuật thông minh, còn con người giữ vai trò đánh giá, phê duyệt và chịu trách nhiệm cuối cùng đối với mọi quyết định kỹ thuật.

VI. ĐỊNH HƯỚNG PHÁT TRIỂN NGUỒN NHÂN LỰC VÀ MÔ HÌNH PHÒNG THÍ NGHIỆM THÔNG MINH TRONG KỸ NGUYÊN AI

1. Từ "AI thay thế lao động" đến "AI tăng cường năng lực con người"

Trong nhiều năm qua, sự phát triển của trí tuệ nhân tạo đã làm dấy lên nhiều tranh luận về nguy cơ AI thay thế lực lượng lao động kỹ thuật. Đối với ngành xây dựng nói chung và lĩnh vực thí nghiệm – kiểm định xây dựng nói riêng, mối quan tâm này càng trở nên rõ rệt khi các hệ thống AI ngày càng có khả năng xử lý dữ liệu, phân tích tín hiệu và hỗ trợ ra quyết định với tốc độ và độ chính xác cao. Tuy nhiên, các kết quả phân tích trong mục V. cho thấy nhận định "AI sẽ thay thế kỹ sư" chưa phản ánh đầy đủ bản chất của quá trình chuyển đổi số. AI thực chất đang thay thế các nhiệm vụ có tính lặp lại, trong khi đồng thời làm gia tăng yêu cầu đối với các năng lực mà con người có ưu thế như tư duy phản biện, phán đoán kỹ thuật, giao tiếp, quản lý rủi ro và trách nhiệm nghề nghiệp. Điều này dẫn đến sự thay đổi từ mô hình Automation-Centric (lấy tự động hóa làm trung tâm) sang mô hình Human-Centric AI (lấy con người làm trung tâm), trong đó AI đóng vai trò là công cụ tăng cường năng lực của kỹ sư thay vì thay thế họ.

Đối với ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng, sự chuyển dịch này có ý nghĩa đặc biệt quan trọng. Các công việc như nhập liệu, tổng hợp báo cáo, kiểm tra biểu mẫu, phân tích thống kê, nhận dạng tín hiệu hoặc so sánh dữ liệu lịch sử sẽ dần được AI đảm nhiệm. Trong khi đó, kỹ sư sẽ tập trung nhiều hơn vào các hoạt động có giá trị chuyên môn cao như:

- đánh giá điều kiện hiện trường;
- lựa chọn phương pháp thử nghiệm phù hợp;
- phân tích nguyên nhân của các hiện tượng bất thường;
- tư vấn giải pháp kỹ thuật cho chủ đầu tư;
- kiểm soát chất lượng hệ thống thử nghiệm;
- chịu trách nhiệm chuyên môn đối với kết quả.

Như vậy, AI không làm giảm vai trò của kỹ sư mà làm thay đổi bản chất nghề nghiệp. Giá trị của kỹ sư trong tương lai không còn nằm ở khả năng thực hiện các phép tính hoặc thao tác lặp lại mà ở khả năng tích hợp tri thức, kiểm chứng kết quả do AI hỗ trợ và đưa ra các quyết định kỹ thuật có trách nhiệm.

Đây cũng là xu hướng đang được nhiều quốc gia phát triển áp dụng trong quá trình chuyển đổi số của ngành xây dựng. Thay vì đào tạo kỹ sư trở thành người vận hành AI, các chương trình đào tạo hiện đại hướng tới việc hình thành AI-Enabled Engineers – những kỹ sư có khả năng sử dụng AI như một công cụ chuyên môn nhưng vẫn giữ vai trò trung tâm trong quá trình ra quyết định.

2. Đề xuất mô hình phòng thí nghiệm thông minh AI-LAB 2035

Trên cơ sở các kết quả nghiên cứu, tác giả đề xuất mô hình *AI-LAB 2035* như một định hướng phát triển cho các phòng thí nghiệm và kiểm định xây dựng trong giai đoạn chuyển đổi số. Đây là mô hình khái niệm do nghiên cứu đề xuất, nhằm minh họa cách thức tích hợp

AI vào toàn bộ quy trình vận hành của phòng thử nghiệm, đồng thời vẫn bảo đảm tuân thủ các nguyên tắc của ISO/IEC 17025:2017.

Khác với phòng thí nghiệm truyền thống, nơi các công đoạn quản lý và xử lý dữ liệu được thực hiện rời rạc, AI-LAB 2035 hướng tới một hệ thống tích hợp, trong đó AI, hệ thống quản lý thông tin phòng thí nghiệm (LIMS), thiết bị đo, cơ sở dữ liệu và đội ngũ kỹ sư được kết nối trên cùng một nền tảng.

Quy trình vận hành của mô hình gồm các bước:

1. *Tiếp nhận yêu cầu thử nghiệm:* AI hỗ trợ kiểm tra tính đầy đủ của hồ sơ, xác định phạm vi công việc và đối chiếu với phạm vi công nhận của phòng thử nghiệm.
2. *Lập kế hoạch thử nghiệm:* Hệ thống đề xuất tiêu chuẩn áp dụng, thiết bị cần sử dụng, nhân sự phù hợp và lịch trình thực hiện dựa trên cơ sở dữ liệu nội bộ.
3. *Quản lý thiết bị:* AI theo dõi trạng thái thiết bị, chu kỳ hiệu chuẩn, bảo trì và cảnh báo khi thiết bị không đáp ứng điều kiện sử dụng.
4. *Thực hiện thí nghiệm:* Kỹ sư và kỹ thuật viên trực tiếp tổ chức phép thử, trong khi AI hỗ trợ thu thập dữ liệu thời gian thực, kiểm tra tín hiệu và phát hiện các giá trị bất thường.
5. *Xử lý dữ liệu:* AI tự động phân tích số liệu, đối chiếu với dữ liệu lịch sử, nhận diện xu hướng và lập báo cáo dự thảo.
6. *Đánh giá và phê duyệt:* Kỹ sư, chuyên gia và người có thẩm quyền xem xét kết quả, đánh giá các tình huống đặc biệt và quyết định việc phát hành báo cáo.

Trong mô hình này, AI không thay thế các chức năng quản lý hoặc trách nhiệm kỹ thuật mà đóng vai trò là trợ lý kỹ thuật số (Digital Technical Assistant). Mọi quyết định ảnh hưởng đến chất lượng, sự phù hợp hoặc tính hợp pháp của kết quả vẫn do con người thực hiện.

AI-LAB 2035 cũng đặt nền tảng cho việc tích hợp các công nghệ khác như BIM, Digital Twin, IoT, Edge Computing và cảm biến thông minh, hình thành hệ sinh thái phòng thử nghiệm số có khả năng kết nối với các chủ đầu tư, đơn vị tư vấn, nhà thầu và cơ quan quản lý.

3. AI Readiness Index và lộ trình chuyển đổi số cho phòng thí nghiệm

Một trong những rào cản lớn đối với việc ứng dụng AI là sự khác biệt rất lớn về mức độ sẵn sàng giữa các doanh nghiệp. Vì vậy, nghiên cứu đề xuất AI Readiness Index (AIRI) như một công cụ định tính nhằm hỗ trợ các phòng thí nghiệm tự đánh giá khả năng triển khai AI và xây dựng lộ trình chuyển đổi số phù hợp. AIRI không nhằm xếp hạng doanh nghiệp mà giúp xác định các lĩnh vực cần ưu tiên đầu tư. Chỉ số gồm sáu nhóm tiêu chí:

1. *Dữ liệu (Data Readiness):* mức độ số hóa hồ sơ, chuẩn hóa dữ liệu thử nghiệm, khả năng truy xuất và chia sẻ dữ liệu.
2. *Thiết bị (Equipment Readiness):* khả năng kết nối thiết bị với hệ thống số, mức độ tự động hóa trong thu thập dữ liệu và tình trạng hiệu chuẩn.

3. *Hạ tầng công nghệ (Digital Infrastructure)*: hệ thống LIMS, điện toán đám mây, an toàn thông tin và năng lực tích hợp phần mềm.
4. *Nguồn nhân lực (Human Readiness)*: trình độ chuyên môn, kỹ năng sử dụng AI, khả năng phân tích dữ liệu và nhận thức về chuyển đổi số.
5. *Hệ thống quản lý (Management Readiness)*: mức độ tích hợp AI với quy trình ISO/IEC 17025, quản lý rủi ro và quản trị dữ liệu.
6. *Quản trị và pháp lý (Governance Readiness)*: chính sách bảo mật, kiểm soát dữ liệu, quy trình phê duyệt và cơ chế giám sát việc sử dụng AI.

Trên cơ sở các tiêu chí này, nghiên cứu đề xuất năm cấp độ trưởng thành trong chuyển đổi số:

- Cấp độ 1 – Manual Laboratory: hầu hết hoạt động được thực hiện thủ công.
- Cấp độ 2 – Digital Laboratory: hồ sơ và dữ liệu được số hóa nhưng các hệ thống còn rời rạc.
- Cấp độ 3 – Connected Laboratory: dữ liệu, thiết bị và hệ thống quản lý được kết nối.
- Cấp độ 4 – AI-Augmented Laboratory: AI hỗ trợ phân tích dữ liệu, quản lý thiết bị và tối ưu hóa quy trình.
- Cấp độ 5 – Intelligent Laboratory: AI được tích hợp toàn diện vào hoạt động quản lý và kỹ thuật, nhưng mọi quyết định chuyên môn và trách nhiệm pháp lý vẫn do con người đảm nhiệm.

Đối với phần lớn các phòng thí nghiệm tại Việt Nam, mục tiêu khả thi trong giai đoạn 2030–2035 là đạt Cấp độ 3 hoặc Cấp độ 4. Việc hướng tới Cấp độ 5 chỉ nên được thực hiện sau khi doanh nghiệp đã hoàn thành số hóa dữ liệu, chuẩn hóa quy trình, phát triển nguồn nhân lực và xây dựng cơ chế quản trị AI phù hợp với các yêu cầu của ISO/IEC 17025:2017 và các quy định pháp luật liên quan.

Như vậy, AI Readiness Index không chỉ là công cụ đánh giá mà còn là cơ sở để các doanh nghiệp xây dựng lộ trình đầu tư hợp lý, tránh tình trạng đầu tư dàn trải hoặc triển khai AI khi chưa có nền tảng dữ liệu và quản trị tương xứng.

4. Định hướng phát triển nguồn nhân lực ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng trong kỷ nguyên AI

4.1. Sự chuyển dịch về năng lực nghề nghiệp

Lịch sử phát triển của ngành xây dựng cho thấy mỗi cuộc cách mạng công nghệ đều làm thay đổi yêu cầu đối với nguồn nhân lực. Nếu cuộc cách mạng cơ giới hóa làm giảm lao động thủ công và cuộc cách mạng số hóa làm giảm các công việc hành chính thì AI đang làm thay đổi bản chất của nghề kỹ sư. Giá trị của kỹ sư trong tương lai không còn được đánh giá chủ yếu thông qua khả năng tính toán hay lập báo cáo mà thông qua *năng lực giải quyết vấn đề, tư duy phản biện, quản trị dữ liệu và chịu trách nhiệm đối với các quyết định kỹ thuật*.

Đối với lĩnh vực thí nghiệm và kiểm định xây dựng, AI có thể hỗ trợ xử lý tín hiệu PDA, PIT, CSL, KODEN, thống kê dữ liệu, lập báo cáo sơ bộ và kiểm soát quy trình. Tuy nhiên,

AI không thể thay thế kỹ sư trong việc lựa chọn phương pháp thử, đánh giá điều kiện hiện trường, xử lý các tình huống bất thường, xác nhận tính hợp lệ của dữ liệu và chịu trách nhiệm chuyên môn. Vì vậy, định hướng đào tạo trong tương lai không phải là đào tạo "kỹ sư sử dụng AI", mà là đào tạo kỹ sư có khả năng cộng tác hiệu quả với AI (AI-enabled Engineer).

4.2. Mô hình năng lực kỹ sư thí nghiệm trong thời đại AI

Trên cơ sở kết quả nghiên cứu, tác giả đề xuất mô hình năng lực gồm sáu nhóm năng lực cốt lõi mà kỹ sư thí nghiệm – kiểm định xây dựng cần phát triển trong giai đoạn 2026–2045.

(1) Năng lực chuyên môn kỹ thuật

Đây vẫn là nền tảng quan trọng nhất. Kỹ sư phải nắm vững cơ học đất, cơ học kết cấu, nền móng, nguyên lý của các phương pháp thí nghiệm, tiêu chuẩn kỹ thuật và hệ thống quản lý chất lượng. AI chỉ có thể hỗ trợ khi người sử dụng hiểu rõ bản chất của dữ liệu và giới hạn của từng phương pháp thử.

(2) Năng lực dữ liệu (Data Literacy)

Kỹ sư cần có khả năng thu thập, làm sạch, kiểm tra, phân tích và diễn giải dữ liệu. Việc hiểu cấu trúc dữ liệu, phát hiện dữ liệu bất thường và đánh giá chất lượng dữ liệu sẽ trở thành kỹ năng bắt buộc đối với mọi kỹ sư thí nghiệm.

(3) Năng lực sử dụng AI (AI Literacy)

Không phải mọi kỹ sư đều cần lập trình AI, nhưng cần hiểu cách AI hoạt động, giới hạn của mô hình, nguy cơ sai lệch dữ liệu, hiện tượng "hallucination", cũng như biết cách kiểm chứng các kết quả do AI đề xuất. Đây là điều kiện để sử dụng AI một cách an toàn và hiệu quả.

(4) Năng lực tích hợp công nghệ số

Trong tương lai, kỹ sư cần có khả năng làm việc với BIM, Digital Twin, LIMS, IoT, hệ thống cảm biến, UAV và các nền tảng quản lý dữ liệu. AI sẽ phát huy hiệu quả cao nhất khi được tích hợp vào một hệ sinh thái số hoàn chỉnh.

(5) Năng lực tư duy phản biện và ra quyết định

AI có thể cung cấp nhiều phương án khác nhau, nhưng việc lựa chọn phương án phù hợp đòi hỏi khả năng đánh giá đa chiều. Kỹ sư cần biết đặt câu hỏi, phản biện các kết quả do AI tạo ra và xem xét chúng trong bối cảnh kỹ thuật, pháp lý và kinh tế cụ thể của từng dự án.

(6) Đạo đức nghề nghiệp và trách nhiệm pháp lý

Đây là nhóm năng lực không thể thay thế. Trong bối cảnh AI tham gia ngày càng sâu vào hoạt động kỹ thuật, tính trung thực, khách quan, độc lập và trách nhiệm của kỹ sư đối với xã hội càng trở nên quan trọng. AI có thể hỗ trợ tạo ra dữ liệu, nhưng niềm tin của khách hàng vẫn được đặt vào người ký báo cáo và tổ chức được công nhận năng lực.

4.3. Đề xuất chương trình đào tạo nguồn nhân lực

Để đáp ứng yêu cầu chuyển đổi số, nghiên cứu đề xuất xây dựng chương trình đào tạo theo ba cấp độ:

Cấp độ 1 – Kỹ thuật viên và kỹ sư mới

Nội dung tập trung vào tiêu chuẩn kỹ thuật, ISO/IEC 17025:2017, kỹ năng số cơ bản, quản lý dữ liệu và sử dụng AI trong công việc hàng ngày.

Cấp độ 2 – Kỹ sư chính và trưởng nhóm

Đào tạo về phân tích dữ liệu nâng cao, quản trị AI, BIM, Digital Twin, quản lý rủi ro, kiểm chứng kết quả AI và kỹ năng lãnh đạo nhóm kỹ thuật.

Cấp độ 3 – Chuyên gia và lãnh đạo phòng thử nghiệm

Đào tạo về chiến lược chuyển đổi số, quản trị dữ liệu doanh nghiệp, quản trị AI có trách nhiệm, an toàn thông tin, đổi mới sáng tạo và xây dựng hệ thống phòng thí nghiệm thông minh.

Ngoài đào tạo chuyên môn, các doanh nghiệp cần hình thành văn hóa học tập liên tục, cập nhật công nghệ và chia sẻ tri thức nội bộ nhằm giúp đội ngũ kỹ sư thích ứng với tốc độ phát triển nhanh của AI.

5. Kinh nghiệm quốc tế và lộ trình phát triển cho Việt Nam

5.1. Kinh nghiệm từ các quốc gia phát triển

Hoa Kỳ là một trong những quốc gia tiên phong trong việc tích hợp AI vào ngành xây dựng thông qua các trường đại học, viện nghiên cứu và doanh nghiệp công nghệ. AI được ứng dụng mạnh trong quản lý tài sản hạ tầng, giám sát sức khỏe kết cấu (SHM), bảo trì dự báo và phân tích dữ liệu từ cảm biến. Đặc biệt, các tổ chức nghề nghiệp chú trọng phát triển các hướng dẫn về quản trị AI, minh bạch thuật toán và trách nhiệm của kỹ sư khi sử dụng AI trong hoạt động chuyên môn. Đối mặt với tình trạng già hóa dân số và thiếu hụt lao động, Nhật Bản thúc đẩy chương trình Smart Construction, kết hợp AI, robot, UAV và IoT nhằm nâng cao năng suất. Tuy nhiên, các quyết định kỹ thuật quan trọng vẫn do kỹ sư và chuyên gia chịu trách nhiệm. AI được xem là công cụ hỗ trợ để giảm khối lượng công việc, không phải là chủ thể thay thế con người. Singapore xây dựng chiến lược chuyển đổi số dựa trên BIM, Digital Twin và nền tảng dữ liệu quốc gia. Các cơ quan quản lý khuyến khích doanh nghiệp đầu tư vào số hóa dữ liệu trước khi triển khai AI. Bài học quan trọng là AI chỉ phát huy hiệu quả khi có dữ liệu chất lượng cao và quy trình quản trị rõ ràng. Đức tập trung vào tiêu chuẩn hóa, tự động hóa và tích hợp AI trong sản xuất công nghiệp cũng như xây dựng. Các chương trình đào tạo kỹ sư kết hợp chặt chẽ giữa chuyên môn kỹ thuật và khoa học dữ liệu, tạo nguồn nhân lực có khả năng làm việc trong môi trường số hóa. Hàn Quốc phát triển mạnh các công trình thông minh và hệ thống giám sát hạ tầng dựa trên AI. Nhà nước đóng vai trò quan trọng trong việc xây dựng hạ tầng dữ liệu, hỗ trợ doanh nghiệp đổi mới công nghệ và phát triển nguồn nhân lực chất lượng cao.

5.2. Bài học kinh nghiệm cho Việt Nam

Từ kinh nghiệm quốc tế có thể rút ra bốn bài học quan trọng như sau: *Thứ nhất, dữ liệu là nền tảng của AI:* Các phòng thí nghiệm cần ưu tiên số hóa hồ sơ, chuẩn hóa dữ liệu và xây dựng cơ sở dữ liệu dùng chung trước khi đầu tư mạnh vào AI. *Thứ hai, đầu tư cho con người phải đi trước đầu tư cho công nghệ:* Việc trang bị phần mềm AI sẽ không mang lại hiệu quả nếu đội ngũ kỹ sư không đủ năng lực đánh giá và khai thác kết quả. *Thứ ba, AI phải được tích hợp với hệ thống quản lý chất lượng:* đặc biệt là ISO/IEC 17025:2017, thay vì vận hành như

một công cụ độc lập. *Thứ tư*, cần xây dựng cơ chế quản trị AI nhằm bảo đảm tính minh bạch, bảo mật dữ liệu, khả năng truy xuất và phân định rõ trách nhiệm giữa AI với con người.

5.3. Đề xuất lộ trình phát triển ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng tại Việt Nam đến năm 2045

Nghiên cứu đề xuất lộ trình gồm ba giai đoạn.

Giai đoạn 2026–2030: Xây dựng nền tảng số

- Hoàn thành số hóa hồ sơ kỹ thuật và dữ liệu thử nghiệm.
- Triển khai LIMS và kết nối thiết bị đo.
- Đào tạo kỹ năng AI cơ bản cho kỹ sư.
- Hình thành cơ sở dữ liệu dùng chung trong doanh nghiệp.

Giai đoạn 2031–2035: Tích hợp AI vào hoạt động chuyên môn

- Ứng dụng AI trong xử lý dữ liệu PDA, PIT, CSL, KODEN và các phép thử vật liệu.
- Tích hợp AI với BIM, Digital Twin và hệ thống quản lý chất lượng.
- Xây dựng các quy trình kiểm chứng kết quả AI và quản trị rủi ro.

Giai đoạn 2036–2045: Phát triển phòng thí nghiệm thông minh

- Hình thành các AI-LAB có khả năng vận hành trên nền tảng dữ liệu thời gian thực.
- Kết nối dữ liệu với chủ đầu tư, đơn vị tư vấn và cơ quan quản lý.
- Xây dựng hệ thống hỗ trợ ra quyết định dựa trên AI, nhưng vẫn duy trì nguyên tắc con người chịu trách nhiệm cuối cùng.
- Phát triển đội ngũ chuyên gia có năng lực kết hợp giữa kỹ thuật xây dựng, khoa học dữ liệu và quản trị AI.

5.4. Kiến nghị

Để hiện thực hóa lộ trình trên, cần có sự phối hợp giữa Nhà nước, cơ sở đào tạo, doanh nghiệp và các tổ chức nghề nghiệp.

- **Đối với cơ quan quản lý:** nghiên cứu ban hành hướng dẫn về ứng dụng AI trong hoạt động thí nghiệm và kiểm định xây dựng; khuyến khích xây dựng chuẩn dữ liệu và thúc đẩy chuyển đổi số.
- **Đối với các trường đại học:** cập nhật chương trình đào tạo theo hướng tích hợp AI, khoa học dữ liệu và kỹ năng số với kiến thức chuyên ngành xây dựng.
- **Đối với doanh nghiệp:** đầu tư đồng thời vào dữ liệu, hạ tầng số và phát triển con người; xây dựng văn hóa sử dụng AI có trách nhiệm.
- **Đối với các phòng thử nghiệm:** duy trì nguyên tắc "AI hỗ trợ – con người chịu trách nhiệm", bảo đảm mọi quyết định kỹ thuật và báo cáo thử nghiệm đều được xem xét bởi nhân sự có năng lực theo ISO/IEC 17025:2017.

Như vậy, chuyển đổi số trong ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng không nên được nhìn nhận như một quá trình thay thế con người bằng AI, mà là quá trình nâng cao năng lực

của con người thông qua AI. Thành công của quá trình này sẽ phụ thuộc nhiều hơn vào chất lượng nguồn nhân lực, hệ thống quản trị và văn hóa đổi mới sáng tạo hơn là bản thân công nghệ.

VII. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

1. Kết luận

Sự phát triển mạnh mẽ của trí tuệ nhân tạo trong những năm gần đây đang tạo ra những thay đổi sâu sắc đối với ngành xây dựng trên phạm vi toàn cầu. AI không chỉ được ứng dụng trong thiết kế, quản lý dự án và quản lý tài sản công trình mà còn từng bước tham gia vào các hoạt động thí nghiệm, kiểm định và đánh giá chất lượng công trình xây dựng. Với khả năng xử lý dữ liệu lớn, nhận dạng mẫu, dự báo xu hướng và hỗ trợ ra quyết định, AI được kỳ vọng sẽ góp phần nâng cao năng suất lao động, giảm sai sót và tối ưu hóa nguồn lực trong toàn bộ vòng đời của công trình.

Thông qua việc tổng hợp tài liệu quốc tế, phân tích đặc thù của ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng, đồng thời đối chiếu với các yêu cầu của hệ thống quản lý chất lượng theo ISO/IEC 17025:2017, nghiên cứu này cho thấy AI có tiềm năng rất lớn trong việc hỗ trợ xử lý dữ liệu, tự động hóa quy trình và nâng cao hiệu quả quản lý phòng thử nghiệm. Các phương pháp như PDA, PIT, Crosshole Sonic Logging (CSL), KODEN Test, thử tải tĩnh, thử tải ngang và thử nhỏ cọc đều có thể được hưởng lợi từ các công nghệ AI trong các công đoạn thu thập, xử lý và trực quan hóa dữ liệu.

Tuy nhiên, nghiên cứu cũng chỉ ra rằng khả năng của AI không đồng nghĩa với khả năng thay thế con người. Trong lĩnh vực thí nghiệm và kiểm định xây dựng, kết quả thử nghiệm không chỉ là sản phẩm của các phép tính toán mà còn là kết quả của quá trình quan sát hiện trường, đánh giá điều kiện thi công, tích hợp nhiều nguồn thông tin, vận dụng kinh nghiệm chuyên môn và thực hiện trách nhiệm nghề nghiệp. Đây là những yếu tố vượt ra ngoài phạm vi xử lý của các thuật toán hiện nay.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu khẳng định rằng AI sẽ thay thế nhiều công việc, nhưng không thay thế trách nhiệm kỹ thuật. Những nhiệm vụ có quy trình chuẩn hóa và dữ liệu số hóa cao sẽ được tự động hóa ở mức ngày càng lớn. Ngược lại, các hoạt động liên quan đến phán đoán kỹ thuật, đánh giá bối cảnh hiện trường, phê duyệt kết quả và chịu trách nhiệm pháp lý vẫn là vai trò cốt lõi của kỹ sư và tổ chức thử nghiệm.

Do đó, mô hình phát triển phù hợp đối với ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng không phải là "AI thay thế con người", mà là Human–AI Collaboration, trong đó AI đóng vai trò là trợ lý kỹ thuật thông minh, còn con người giữ vai trò chủ thể ra quyết định và chịu trách nhiệm cuối cùng đối với chất lượng kết quả thử nghiệm.

2. Đóng góp của nghiên cứu

Ngoài việc tổng hợp và phân tích các xu hướng ứng dụng AI trong ngành xây dựng, nghiên cứu này có một số đóng góp mới về mặt học thuật và thực tiễn.

Thứ nhất, nghiên cứu chuyển trọng tâm phân tích từ câu hỏi "AI có thể làm gì?" sang câu hỏi "AI được phép tham gia đến đâu trong chuỗi trách nhiệm kỹ thuật?". Đây là một góc nhìn phân tích mới đối với lĩnh vực thí nghiệm và kiểm định xây dựng.

Thứ hai, nghiên cứu đề xuất Human–AI Engineering Responsibility Framework (HAERF) như một khung khái niệm nhằm phân định vai trò của AI và con người trong toàn bộ chuỗi giá trị của hoạt động thí nghiệm – kiểm định. Khung này được xây dựng dựa trên nguyên tắc AI hỗ trợ thực hiện công việc nhưng không thay thế trách nhiệm chuyên môn và pháp lý của kỹ sư.

Thứ ba, nghiên cứu đề xuất mô hình Engineering Responsibility Hierarchy, qua đó phân chia hoạt động kỹ thuật thành năm cấp độ từ tự động hóa đến trách nhiệm pháp lý. Mô hình này giúp xác định rõ phạm vi tham gia của AI trong từng cấp độ và nhấn mạnh rằng vai trò của con người tăng dần khi quyết định kỹ thuật tiến gần đến giai đoạn phê duyệt và chịu trách nhiệm.

Thứ tư, nghiên cứu xây dựng khái niệm Decision Responsibility Boundary, mô tả ranh giới giữa khả năng hỗ trợ của AI và trách nhiệm của kỹ sư. Đây là cơ sở để đánh giá mức độ ứng dụng AI trong các phòng thử nghiệm mà vẫn bảo đảm tuân thủ các yêu cầu về tính khách quan, năng lực và trách nhiệm theo ISO/IEC 17025:2017.

Thứ năm, nghiên cứu đề xuất AI Capability Matrix như một công cụ định tính nhằm đánh giá khả năng tham gia của AI theo từng công đoạn của các phép thử hiện trường, thay vì chỉ đánh giá theo từng phương pháp thí nghiệm. Cách tiếp cận này có thể hỗ trợ các phòng thử nghiệm xây dựng lộ trình ứng dụng AI phù hợp với điều kiện thực tế.

Cuối cùng, nghiên cứu đề xuất mô hình AI-LAB 2035, AI Readiness Index và lộ trình chuyển đổi số đến năm 2045 dành cho các phòng thí nghiệm và kiểm định xây dựng tại Việt Nam. Đây là các mô hình mang tính định hướng, được xây dựng trên cơ sở tổng hợp kinh nghiệm quốc tế và đặc thù của hệ thống phòng thử nghiệm trong nước.

3. Ý nghĩa thực tiễn

Các kết quả nghiên cứu có thể được sử dụng làm tài liệu tham khảo cho nhiều nhóm đối tượng khác nhau. Đối với các cơ quan quản lý nhà nước, nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc xây dựng chính sách, hướng dẫn và tiêu chuẩn liên quan đến ứng dụng AI trong hoạt động thí nghiệm và kiểm định xây dựng. Đối với các tổ chức công nhận và chứng nhận, nghiên cứu góp phần làm rõ mối quan hệ giữa AI và các yêu cầu của hệ thống quản lý chất lượng theo ISO/IEC 17025:2017, đặc biệt trong các vấn đề về năng lực nhân sự, truy xuất nguồn gốc, tính khách quan và trách nhiệm đối với kết quả thử nghiệm. Đối với các doanh nghiệp và phòng thí nghiệm, nghiên cứu đề xuất lộ trình chuyển đổi số, mô hình phòng thí nghiệm thông minh và phương pháp đánh giá mức độ sẵn sàng ứng dụng AI, qua đó hỗ trợ xây dựng chiến lược phát triển phù hợp trong dài hạn. Đối với các cơ sở đào tạo, nghiên cứu gợi mở định hướng đổi mới chương trình đào tạo theo hướng tích hợp kiến thức chuyên ngành với khoa học dữ liệu, AI, BIM và quản trị số, nhằm chuẩn bị nguồn nhân lực đáp ứng yêu cầu của cuộc Cách mạng công nghiệp lần thứ tư.

4. Hạn chế của nghiên cứu

Bên cạnh các kết quả đạt được, nghiên cứu vẫn tồn tại một số hạn chế như: Thứ nhất, các mô hình như HAERF, Engineering Responsibility Hierarchy, Decision Responsibility Boundary, AI Capability Matrix, AI-LAB 2035 và AI Readiness Index là các khung khái niệm do nghiên cứu đề xuất, được xây dựng trên cơ sở tổng hợp tài liệu và phân tích chuyên

gia. Các mô hình này chưa được kiểm chứng bằng dữ liệu thực nghiệm quy mô lớn hoặc khảo sát đa quốc gia. Thứ hai, nghiên cứu tập trung chủ yếu vào lĩnh vực thí nghiệm và kiểm định xây dựng, đặc biệt là các phép thử nền móng và cọc. Do đó, khả năng áp dụng trực tiếp cho các lĩnh vực khác như thiết kế kết cấu, thi công hoặc quản lý vận hành công trình cần được đánh giá thêm. Thứ ba, tốc độ phát triển của AI rất nhanh. Những tiến bộ về mô hình ngôn ngữ lớn, AI tác nhân (AI Agents), robot tự hành hoặc các quy định pháp lý mới có thể làm thay đổi phạm vi ứng dụng AI trong tương lai. Vì vậy, các kết luận của nghiên cứu cần được cập nhật theo sự phát triển của công nghệ và khung pháp lý.

5. Hướng nghiên cứu tiếp theo

Trong thời gian tới, có thể mở rộng nghiên cứu theo các hướng sau:

- Xây dựng bộ chỉ số định lượng để đánh giá hiệu quả ứng dụng AI trong các phòng thí nghiệm theo ISO/IEC 17025.
- Kiểm chứng thực nghiệm AI Capability Matrix trên dữ liệu thực tế từ các phép thử PDA, PIT, CSL, KODEN và thử tải tĩnh.
- Phát triển hệ thống AI hỗ trợ phân tích dữ liệu thí nghiệm tích hợp với LIMS và BIM.
- Nghiên cứu cơ chế kiểm chứng, xác thực và truy xuất nguồn gốc đối với các kết quả do AI hỗ trợ.
- Phân tích tác động của các quy định mới về quản trị AI đến hoạt động thí nghiệm và kiểm định xây dựng.
- Mở rộng mô hình Human–AI Collaboration sang các lĩnh vực khác của ngành xây dựng như giám sát thi công, kiểm định kết cấu, quan trắc công trình và quản lý tài sản hạ tầng.

Những hướng nghiên cứu này sẽ góp phần hoàn thiện cơ sở khoa học cho việc ứng dụng AI trong ngành xây dựng theo hướng an toàn, minh bạch và có trách nhiệm.

6. Thông điệp của nghiên cứu

Trí tuệ nhân tạo sẽ tiếp tục làm thay đổi cách thức ngành xây dựng thu thập, xử lý và khai thác dữ liệu. Tuy nhiên, trong lĩnh vực thí nghiệm và kiểm định xây dựng, giá trị của một báo cáo không chỉ nằm ở độ chính xác của thuật toán mà còn nằm ở năng lực chuyên môn, đạo đức nghề nghiệp và trách nhiệm pháp lý của người ký xác nhận kết quả.

Vì vậy, tương lai của ngành không phải là cuộc cạnh tranh giữa con người và AI, mà là quá trình cộng tác giữa hai chủ thể có vai trò khác nhau nhưng bổ sung cho nhau. AI sẽ giúp kỹ sư làm việc nhanh hơn, chính xác hơn và hiệu quả hơn; trong khi kỹ sư sẽ bảo đảm rằng mọi quyết định kỹ thuật luôn được đưa ra trên cơ sở khoa học, tuân thủ pháp luật và hướng tới mục tiêu cao nhất là chất lượng công trình và an toàn của cộng đồng.

Tóm lại: Trí tuệ nhân tạo có thể thay đổi cách dữ liệu kỹ thuật được thu thập, xử lý và diễn giải, nhưng trách nhiệm kỹ thuật cuối cùng vẫn luôn thuộc về con người.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] McKinsey Global Institute, *The Economic Potential of Generative AI: The Next Productivity Frontier*, McKinsey & Company, 2023.
- [2] World Economic Forum and The Boston Consulting Group, *Shaping the Future of Construction: A Breakthrough in Mindset and Technology*, World Economic Forum, Geneva, 2016.
- [3] S. D. Datta, M. Islam, M. H. R. Sobuz, S. Ahmed, and M. Kar, “Artificial intelligence and machine learning applications in the project lifecycle of the construction industry: A comprehensive review,” *Heliyon*, vol. 10, e26888, 2024. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e26888.
- [4] S. O. Abioye, L. O. Oyedele, L. Akanbi, A. Ajayi, J. M. D. Delgado, M. Bilal, O. O. Akinade, and A. Ahmed, “Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges,” *Journal of Building Engineering*, vol. 44, 103299, 2021. doi: 10.1016/j.jobbe.2021.103299.
- [5] R. Samsami, “A systematic review of automated construction inspection and progress monitoring (ACIPM): Applications, challenges, and future directions,” *CivilEng*, vol. 5, no. 1, pp. 265–287, 2024. doi: 10.3390/civileng5010014.
- [6] Y.-J. Cha, R. Ali, J. Lewis, and O. Büyüköztürk, “Deep learning-based structural health monitoring,” *Automation in Construction*, vol. 161, 105328, 2024. doi: 10.1016/j.autcon.2024.105328.
- [7] P. Qiu, L. Yang, Y. Xie, X. Liu, and Z. Chen, “Pile integrity testing using non-destructive testing techniques and artificial intelligence: A review,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 15, 8580, 2025. doi: 10.3390/app15158580.
- [8] R. Taiwo, I. T. Bello, S. F. Abdulai, A.-M. Yussif, B. A. Salami, A. Saka, and T. Zayed, “Generative AI in the construction industry: A state-of-the-art analysis,” *arXiv:2402.09939*, 2024. doi: 10.48550/arXiv.2402.09939.
- [9] C.-J. Liang, T.-H. Le, Y. Ham, B. R. K. Mantha, M. H. Cheng, and J. J. Lin, “Ethics of artificial intelligence and robotics in the architecture, engineering, and construction industry,” *arXiv:2310.05414*, 2023. doi: 10.48550/arXiv.2310.05414.
- [10] ISO/IEC 17025:2017, *General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories*, International Organization for Standardization, Geneva, 2017.
- [11] ISO/IEC 42001:2023, *Information Technology — Artificial Intelligence — Management System*, International Organization for Standardization, Geneva, 2023.
- [12] National Institute of Standards and Technology, *Artificial Intelligence Risk Management Framework (AI RMF 1.0)*, NIST AI 100-1, U.S. Department of Commerce, 2023. doi: 10.6028/NIST.AI.100-1.
- [13] Organisation for Economic Co-operation and Development, *Recommendation of the Council on Artificial Intelligence*, OECD/LEGAL/0449, Paris, adopted 2019 and updated 2024.
- [14] UNESCO, *Recommendation on the Ethics of Artificial Intelligence*, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris, 2021.
- [15] ISO 19650-1:2018, *Organization and Digitization of Information about Buildings and Civil Engineering Works, Including Building Information Modelling (BIM) — Information Management Using Building Information Modelling — Part 1: Concepts and Principles*, ISO, Geneva, 2018.
- [16] ASTM D5882-16, *Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- [17] ASTM D4945-17, *Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
- [18] TCVN 9397:2012, *Cọc — Kiểm tra khuyết tật bằng phương pháp động biến dạng nhỏ*, Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, 2012.
- [19] TCVN 11321:2016, *Cọc — Phương pháp thử động biến dạng lớn*, Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, 2016.
- [20] TCVN 9393:2012, *Cọc — Phương pháp thử nghiệm hiện trường bằng tải trọng tĩnh ép dọc trục*, Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội, 2012.

Contents

I. ĐẶT VẤN ĐỀ	2
1. Bối cảnh nghiên cứu	2
2. AI và sự thay đổi đối với ngành thí nghiệm, kiểm định xây dựng	2
3. Khoảng trống nghiên cứu	3
4. Mục tiêu nghiên cứu	3
5. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn	4
II. TỔNG QUAN CÁC NGHIÊN CỨU VỀ TRÍ TUỆ NHÂN TẠO TRONG NGÀNH XÂY DỰNG VÀ THÍ NGHIỆM – KIỂM ĐỊNH XÂY DỰNG	4
1. Sự phát triển của trí tuệ nhân tạo trong ngành xây dựng	4
1.1 Xu hướng phát triển AI trong ngành xây dựng trên thế giới	4
1.2. Các công nghệ AI chủ đạo trong xây dựng	5
1.3. AI kết hợp với các công nghệ số trong xây dựng	5
1.4. Chuyển dịch từ tự động hóa sang AI cộng tác	6
1.5. Nhận xét tổng hợp	6
2. Các nghiên cứu về ứng dụng AI trong kiểm tra chất lượng công trình và thí nghiệm – kiểm định xây dựng	6
2.1. AI trong kiểm tra chất lượng công trình xây dựng	6
2.2. AI trong giám sát sức khỏe kết cấu (Structural Health Monitoring)	7
2.3. AI trong các phương pháp thí nghiệm không phá hủy (NDT)	8
2.4. AI trong thí nghiệm cọc và nền móng	8
2.5. Những giới hạn chung của AI trong thí nghiệm và kiểm định xây dựng	9
3. Các nghiên cứu về AI tái sinh (Generative AI), Mô hình ngôn ngữ lớn (LLMs) và AI Agents trong xây dựng và phòng thí nghiệm	9
3.1. Sự xuất hiện của AI tái sinh và bước chuyển mới trong ngành xây dựng	9
3.2. Ứng dụng của LLMs trong quản lý dự án xây dựng	10
3.3. AI Agents và mô hình phòng thí nghiệm thông minh	10
3.4. AI trong hệ thống quản lý theo ISO/IEC 17025:2017	11
3.5. Những giới hạn của Generative AI trong phòng thử nghiệm	12
3.6. Đánh giá tổng hợp	12
4. Đánh giá mức độ AI có thể thay thế trong các lĩnh vực thí nghiệm và kiểm định xây dựng	12
4.1. Cơ sở đánh giá	13
4.2. Ma trận đánh giá khả năng thay thế của AI theo từng lĩnh vực	13
4.3. Phân tích theo từng nhóm công việc	14
4.4. Mô hình "AI + Kỹ sư + Chuyên gia"	15
4.5. Nhận định của nghiên cứu	15
III. THỰC TRẠNG ỨNG DỤNG AI TRONG NGÀNH XÂY DỰNG VÀ THÍ NGHIỆM – KIỂM ĐỊNH XÂY DỰNG	15
1. Bức tranh toàn cầu về ứng dụng AI trong ngành xây dựng	15
2. Thực trạng ứng dụng AI trong ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng	16

3.	Thực trạng tại Việt Nam.....	16
4.	Những rào cản chính trong quá trình ứng dụng AI.....	17
5.	Nhận xét tổng hợp.....	17
6.	Phân tích SWOT đối với việc ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng.....	18
6.1.	Mục đích phân tích SWOT.....	18
□	Điểm mạnh (Strengths).....	18
□	Điểm yếu (Weaknesses).....	19
□	Cơ hội (Opportunities).....	19
□	Thách thức (Threats).....	19
6.2.	Ma trận SWOT tổng hợp.....	20
6.3.	Thảo luận.....	20
IV.	ỨNG DỤNG AI TRONG THÍ NGHIỆM VÀ KIỂM ĐỊNH XÂY DỰNG THỜI GIAN TỐI	20
1.	Giả định của kịch bản.....	20
2.	Xu hướng phát triển của ngành xây dựng.....	21
3.	Tác động đối với ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng.....	21
4.	Chuyển dịch cơ cấu nghề nghiệp.....	22
5.	Những giới hạn của AI trong kịch bản cơ sở.....	22
6.	Hàm ý đối với các doanh nghiệp thí nghiệm và kiểm định xây dựng.....	22
7.	Kết luận của kịch bản.....	23
V.	ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH HUMAN-AI ENGINEERING RESPONSIBILITY FRAMEWORK (HAERF)	23
1.	Human-AI Engineering Responsibility Framework (HAERF): Cơ sở lý luận về trách nhiệm kỹ thuật giữa con người và trí tuệ nhân tạo.....	23
1.1.	Đặt vấn đề.....	23
1.2.	Khoảng trống của các nghiên cứu hiện nay.....	24
1.3.	Khái niệm về trách nhiệm kỹ thuật.....	24
1.4.	Từ "thay thế công việc" đến "thay thế trách nhiệm".....	25
1.5.	Đề xuất Human-AI Engineering Responsibility Framework (HAERF).....	25
1.6.	Luận điểm trung tâm của nghiên cứu.....	25
2.	Engineering Responsibility Hierarchy: Mô hình phân tầng trách nhiệm kỹ thuật trong bối cảnh AI	26
2.1.	Từ năng lực của AI đến ranh giới trách nhiệm kỹ thuật.....	26
2.2.	Mô hình Engineering Responsibility Hierarchy.....	26
2.3.	Phân tích các cấp độ trách nhiệm.....	27
2.4.	Ý nghĩa đối với ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng.....	28
2.5.	Hàm ý của mô hình.....	28
3.	Decision Responsibility Boundary – Ranh giới trách nhiệm kỹ thuật giữa AI và con người	28
4.	AI Capability Matrix – Ma trận đánh giá khả năng tham gia của AI trong hoạt động thí nghiệm và kiểm định	29

5. Human Competency Pyramid – Mô hình kim tự tháp năng lực con người trong thời đại AI	30
6. Engineering Responsibility Principle – Nguyên lý trách nhiệm kỹ thuật	30
7. Nhận xét	31
8. Kết luận	31
VI. ĐỊNH HƯỚNG PHÁT TRIỂN NGUỒN NHÂN LỰC VÀ MÔ HÌNH PHÒNG THÍ NGHIỆM THÔNG MINH TRONG KỶ NGUYÊN AI	32
1. Từ "AI thay thế lao động" đến "AI tăng cường năng lực con người"	32
2. Đề xuất mô hình phòng thí nghiệm thông minh AI-LAB 2035	32
3. AI Readiness Index và lộ trình chuyển đổi số cho phòng thí nghiệm	33
4. Định hướng phát triển nguồn nhân lực ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng trong kỷ nguyên AI.....	34
4.1. Sự chuyển dịch về năng lực nghề nghiệp	34
4.2. Mô hình năng lực kỹ sư thí nghiệm trong thời đại AI.....	35
4.3. Đề xuất chương trình đào tạo nguồn nhân lực	35
5. Kinh nghiệm quốc tế và lộ trình phát triển cho Việt Nam	36
5.1. Kinh nghiệm từ các quốc gia phát triển.....	36
5.2. Bài học kinh nghiệm cho Việt Nam	36
5.3. Đề xuất lộ trình phát triển ngành thí nghiệm và kiểm định xây dựng tại Việt Nam đến năm 2045	37
5.4. Kiến nghị	37
VII. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	38
1. Kết luận	38
2. Đóng góp của nghiên cứu	38
3. Ý nghĩa thực tiễn.....	39
4. Hạn chế của nghiên cứu	39
5. Hướng nghiên cứu tiếp theo.....	40
6. Thông điệp của nghiên cứu.....	40