

Tổng quan về các công nghệ số trong xây dựng 4.0 và ứng dụng tại Việt Nam

Digital technologies of the Construction 4.0 and their applications in Vietnam

> **THS NGUYỄN MẠNH HÙNG¹, PGS.TS NGUYỄN THẾ QUÂN², THS VŨ NAM NGỌC³, TS NGUYỄN MINH ĐỨC⁴**

¹ Bộ Tài chính

² Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, Email: quannt@nuce.edu.vn,

³ Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

⁴ Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

TÓM TẮT:

Cách mạng công nghiệp số hóa đã và đang diễn ra mạnh mẽ trên thế giới. Thực tiễn ở nhiều quốc gia cho thấy cách mạng công nghiệp số hóa mang đến sự thay đổi đáng kể cho các lĩnh vực của nền kinh tế, bao gồm cả ngành xây dựng, theo chiều hướng tích cực. Bài báo này trình bày một bức tranh tổng quan về các công nghệ số xây dựng 4.0 được nghiên cứu, phát triển và ứng dụng trên thế giới. Các công nghệ số trong xây dựng có thể chia thành 7 nhóm chính, bao gồm: khoa học dữ liệu, chế tạo kỹ thuật số, tiền chế, BIM, trí thông minh nhân tạo, các hệ thống mô hình hóa và các công nghệ liên quan đến việc giám sát. Các công nghệ này hỗ trợ và tạo điều kiện cho các hoạt động chức năng như tự động hóa, trao đổi thông tin, phân phối, định vị, mô hình hóa, tối ưu hóa, tái tạo, mô phỏng, tiêu chuẩn hóa và trực quan hóa thực hiện được tốt hơn. Thông qua khảo sát các nguồn thông tin được công bố rộng rãi, bài báo cũng cho thấy rất nhiều công nghệ số đã được ứng dụng tại Việt Nam. Các công nghệ được phát triển và ứng dụng trong suốt các giai đoạn, vòng đời của dự án hỗ trợ việc triển khai thực hiện và nâng cao hiệu quả công tác quản lý dự án đầu tư xây dựng.

Từ khóa: công nghệ số; số hóa xây dựng, xây dựng 4.0; cách mạng công nghiệp 4.0; BIM, IoT; in 3D; tự động hóa trong xây dựng

ABSTRACT:

The industrial revolution 4.0 has brought many countries with significant and positive changes to all sectors of the economy, including the construction industry. This article presents an overview of the digital technologies for the Construction 4.0 which have been developed and applied globally. Digital technologies in construction can be divided into 7 main groups, including: data science, digital fabrication, prefabrication, BIM, artificial intelligence, modeling systems and monitoring technologies. These technologies support and facilitate actions such as automation, communication, distribution, positioning, modeling, optimization, reconstruct, simulation, standardization and visualization. Through a survey of publicly available information sources, the article also shows that many digital technologies have been applied in Vietnam. Technologies are developed and applied throughout the project and facility lifecycle, and support both the project delivery and the project management more efficiently.

Keywords: digital technologies, construction digitalisation, construction 4.0, industry revolution 4.0, BIM, IoT, 3D printing, automation in construction

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cách mạng công nghiệp số hóa đã và đang diễn ra mạnh mẽ trên thế giới. Thực tiễn ở nhiều quốc gia cho thấy cách mạng công nghiệp số hóa mang đến sự thay đổi đáng kể cho các lĩnh vực của nền kinh tế. Đây là cuộc cách mạng lần thứ tư của nhân loại (vì thế còn được gọi là Cách mạng công nghiệp 4.0), sau cuộc cách mạng đầu tiên với việc sử dụng động cơ hơi nước và các loại công cụ cơ giới khác; cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ hai đặc trưng bởi khái niệm sản xuất hàng loạt; và cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ ba với việc sử dụng công nghệ kỹ thuật số và tăng cường tự động hóa {Frost & Sullivan, 2019 #34}.

Cách mạng công nghiệp 4.0 dựa trên nền tảng công nghệ số và tích hợp tất cả các công nghệ thông minh để tối ưu hóa quy trình, phương thức sản xuất. Việc sử dụng công nghệ kỹ thuật số được nâng lên một cấp độ hoàn toàn mới với sự trợ giúp của kết nối thông qua Internet vạn vật (Internet of Things - IoT), trao đổi, truy cập dữ liệu thời gian thực và các hệ thống mạng vật lý không gian ảo, mạng Internet kết nối vạn vật và điện toán đám mây,... Các nghiên cứu gần đây cho thấy các công nghệ đang được quan tâm và có tác động lớn nhất trong Cách mạng công nghiệp 4.0 bao gồm: internet ("internet vạn vật"), dữ liệu lớn, trí tuệ nhân tạo, công nghệ robot, phương

tiện tự điều khiển, công nghệ in 3D, nano và công nghệ sinh học, công nghệ điện toán [16].

Trong thập kỷ qua, trên thế giới và cả Việt Nam, nhiều công nghệ đã được áp dụng trong ngành xây dựng góp phần tăng cường mức độ số hóa, tự động hóa và được tích hợp vào mọi giai đoạn trong chuỗi cung ứng của ngành xây dựng [32]. Đó chính là biểu hiện của việc ngành xây dựng đã và đang chuyển hướng theo cuộc Cách mạng công nghiệp 4.0. Một cách tổng quát hơn, Cách mạng công nghiệp 4.0 trong ngành xây dựng, hay còn gọi là Xây dựng 4.0 có thể hiểu là sự chuyển đổi toàn diện và sâu sắc các quy trình quản lý dự án của các doanh nghiệp xây dựng thông qua việc sử dụng các công nghệ mới hoặc công nghệ hiện có để khai thác dữ liệu được thu thập trong thời gian thực, phục vụ cho việc ra quyết định [7].

Nhắc đến các công nghệ số trong xây dựng 4.0, người ta thường nhắc đến Mô hình thông tin công trình (Building Information Modelling – BIM). Dựa trên nền tảng mô hình số, BIM cho phép tiến hành các ứng dụng thông minh trong suốt vòng đời dự án đầu tư xây dựng. BIM đã được chứng minh rộng rãi là mang lại hiệu quả cao cho các dự án đầu tư xây dựng trên thế giới và cũng đang được áp dụng ở Việt Nam [26]. Tuy nhiên, xây dựng 4.0 không chỉ dựa vào BIM, mà còn có nhiều công nghệ số khác. Các công nghệ số này cho phép tận dụng được các tính năng của các hệ thống khác như các thiết bị di động, các máy móc thông minh, các hệ thống cảm biến, hoặc các phần mềm mới. Các công nghệ sản xuất mới, theo đó, cũng được giới thiệu và nghiên cứu áp dụng vào ngành xây dựng, ví dụ công nghệ sử dụng máy bay không người lái (drone) để khảo sát mặt bằng hiện trạng [13], công nghệ sản xuất bồi đắp (in 3D) [12], quét laser 3D, và các hệ thống định vị toàn cầu (Global Positioning System - GPS) [17], kết nối với internet vạn vật sử dụng việc nhận dạng bằng tần số vô tuyến (Radio Frequency Identification – RFID) để giám sát, theo dõi vật liệu,

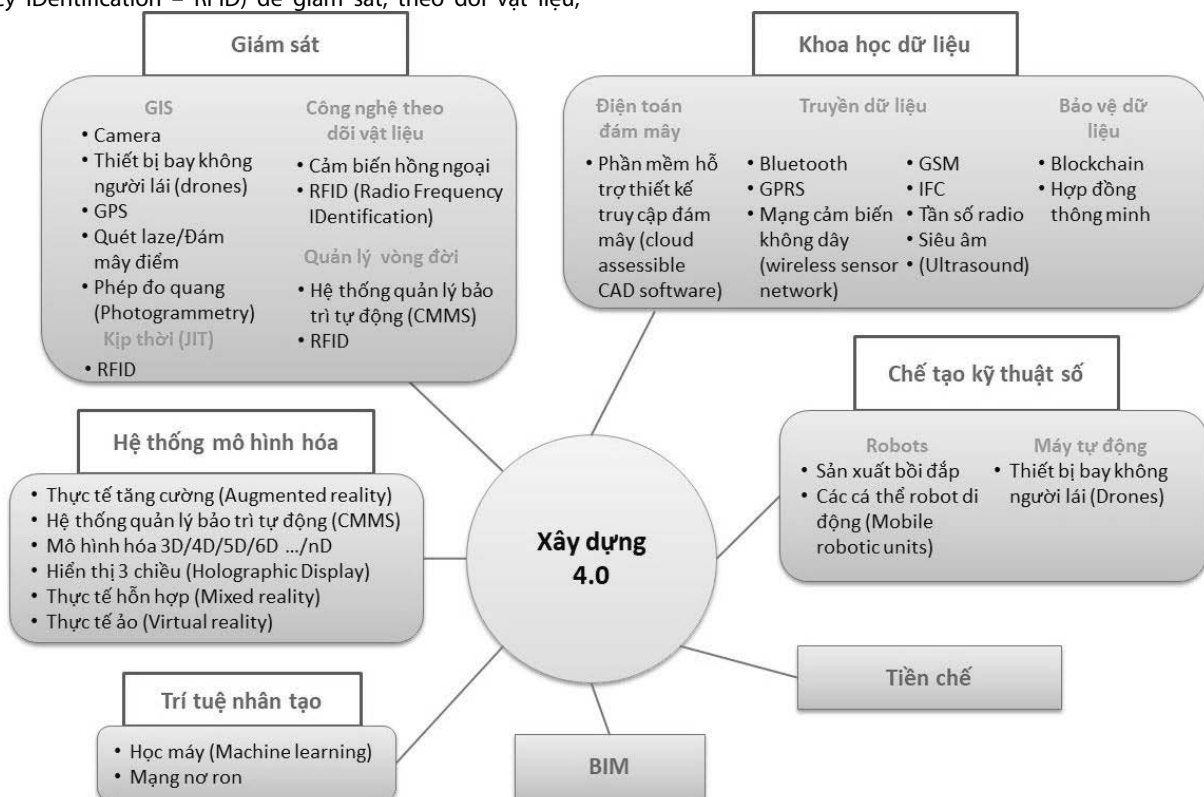
thiết bị, người lao động [12] và cả các tài sản của công trình [21], cũng như các ứng dụng của trí thông minh nhân tạo và dữ liệu lớn [39]. Ngày càng có nhiều công nghệ số mới và các ứng dụng mới được nghiên cứu áp dụng vào lĩnh vực xây dựng, mang lại hiệu quả cao hơn cho các dự án đầu tư xây dựng trong suốt vòng đời của chúng.

Thông qua việc khảo cứu các nghiên cứu trước đó về chủ đề xây dựng 4.0, bài báo này đặt mục tiêu làm rõ các công nghệ số trong xây dựng và ứng dụng của chúng trong quản lý dự án đầu tư xây dựng. Xuất phát từ việc tổng quan các nghiên cứu trên bình diện quốc tế, bài báo này xem xét khả năng ứng dụng của các công nghệ này trong ngành Xây dựng ở Việt Nam. Cách tiếp cận định tính dựa trên số liệu thứ cấp được sử dụng để phân tích làm rõ một số vấn đề về ứng dụng các công nghệ số này trong dự án đầu tư xây dựng, đặc biệt là trong điều kiện tại Việt Nam hiện nay.

2. CÁC CÔNG NGHỆ SỐ TRONG XÂY DỰNG 4.0 TRÊN THẾ GIỚI

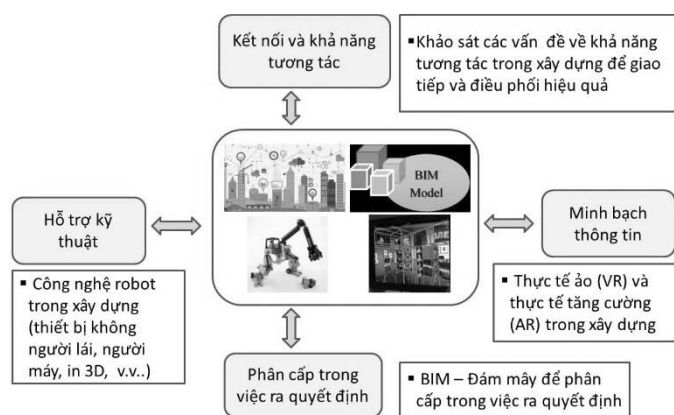
2.1. Phân loại theo lĩnh vực công nghệ

Dựa trên kết quả nghiên cứu tổng quan các công trình nghiên cứu được cơ sở dữ liệu Scopus đăng tải từ năm 2009 – 2020, các tác giả Perrier, Bled và cộng sự [33] đã tổng hợp lại 7 lĩnh vực công nghệ số áp dụng trong xây dựng (Hình 1). Các lĩnh vực công nghệ bao gồm: khoa học dữ liệu, chế tạo kỹ thuật số, tiền chế, BIM, trí thông minh nhân tạo (AI), các hệ thống mô hình hóa (AR/VR, mô hình hóa nD) hoặc các công nghệ liên quan đến việc giám sát như GIS (quét laze, phương tiện bay không người lái, đo quang học, GPS) và theo dõi vật liệu (nhãn RFID). Việc phân các hướng công nghệ số này thành các nhóm trên chỉ mang tính tương đối, bởi các công nghệ trong các nhóm này có thể được sử dụng đồng thời, hoặc có tương tác với nhau, do đó, có thể có các chức năng, phạm vi ứng dụng trùng nhau.



Hình 1: Tổng quan về các lĩnh vực công nghệ số ứng dụng trong ngành Xây dựng [33]

Trong số các công nghệ trên, BIM có thể được coi là một công nghệ trung tâm để số hóa môi trường sản xuất xây dựng [7]. Mô hình BIM với các chiều khác nhau, từ 3D với các tham số hình học, đến việc tích hợp thêm các chiều khác bao gồm chiều thời gian (4D), yếu tố chi phí (5D), yếu tố bền vững (6D) và cả việc quản lý vận hành cơ sở vật chất (7D) sẽ giúp người dùng, từ các đơn vị thiết kế, thi công đến đơn vị vận hành cơ sở vật chất, chia sẻ thông tin trong toàn bộ vòng đời dự án. BIM cho phép các bên cập nhật thêm và tham khảo lại tất cả thông tin được tích hợp vào mô hình BIM [33]. Từ đó, BIM tạo ra một môi trường dữ liệu chung, làm nền tảng để các công nghệ khác có thể triển khai được. Các công nghệ khoa học dữ liệu có thể giúp kết nối và trao đổi dữ liệu giữa BIM và các cơ sở dữ liệu bên ngoài. Các công nghệ chế tạo kỹ thuật số, tiến chế đọc dữ liệu từ mô hình BIM để điều khiển hoạt động chế tạo. Các hệ thống mô hình hóa hỗ trợ khai thác mô hình BIM thông qua việc sử dụng trí tuệ nhân tạo, hoặc kết nối với phần mềm khác hoặc sử dụng một số thiết bị ngoại vi như kính thực tế ảo, kính hololens, v.v... Thông thường, cần phát triển một số ứng dụng người dùng (user-defined) để kết nối mô hình BIM với các thiết bị ngoại vi này. Các công nghệ giám sát hỗ trợ việc thu thập dữ liệu từ môi trường thực để tích hợp vào mô hình BIM, từ đó dữ liệu được khai thác để kiểm soát các đối tượng vật chất và tiến trình thực hiện dự án. Nói cách khác, BIM có thể đóng vai trò như một Môi trường dữ liệu chung (Common Data Environment - CDE) để kết nối với các công nghệ số khác hoặc tạo ra nền tảng để các công nghệ số kia hoạt động có hiệu quả. Hình 2 thể hiện vị trí trung tâm của BIM và mối liên hệ với các trụ cột của công nghệ số trong xây dựng, được phát triển từ nguyên lý của Cách mạng công nghiệp 4.0, đó là: vấn đề kết nối và khả năng tương tác, minh bạch hóa thông tin, hỗ trợ kỹ thuật và phân cấp trong việc ra quyết định [15]. Một số ví dụ áp dụng cũng được thể hiện trong hình này.



Hình 2: Các trụ cột của công nghệ số trong xây dựng [15]

2.2. Phân loại theo chức năng hoạt động

Theo kết quả nghiên cứu của Perrier, Bled và cộng sự [33], các công nghệ số xây dựng có thể được chia thành các nhóm theo 10 loại hoạt động chính: tự động hóa, trao đổi thông tin, phân phối, định vị, mô hình hóa, tối ưu hóa, tái tạo, mô phỏng, tiêu chuẩn hóa và trực quan hóa.

- Tự động hóa: Tự động hóa được hiểu là không cần sự can thiệp của con người, một phần hoặc toàn bộ các hoạt động vẫn có thể thực hiện được nhờ các công nghệ và/hoặc thiết bị. Một số công nghệ tự động hóa được nghiên cứu áp dụng bao gồm: sử dụng cần cẩu rô bốt (crabots), in 3D, robot di động trên công trường, mạng nơ-ron nhân tạo, trí thông minh nhân tạo, sử dụng thiết bị bay không người lái (UAV)/Drone [33]. Một số chức năng

tự động hóa đã được ứng dụng rộng rãi như việc sử dụng robot trên các công trường xây dựng [12] hoặc trong hoạt động sản xuất tiên chế, máy bay không người lái kèm theo máy quét laze để khảo sát thực địa nhằm thu thập dữ liệu phục vụ thiết kế, thi công, để đo khối lượng công việc được thực hiện từ đó hỗ trợ việc quản lý năng suất lao động [41].

- Trao đổi thông tin: Một số công nghệ đã được nghiên cứu phát triển để truyền dữ liệu, thông tin hoặc kiến thức cho con người, như các công nghệ truyền thông di động, công nghệ thực tế hỗn hợp/ thực tế ảo (MR/VR), định danh tần số vô tuyến (RFID), mạng cảm biến không dây (WSN). Trong số đó, RFID và công nghệ mạng cảm biến không dây được coi là hai trong số những công nghệ thông tin và truyền thông phát triển nhanh nhất [41]. Các công nghệ truyền thông di động được áp dụng khá phổ biến cùng với công nghệ Internet để cải thiện việc chia sẻ và giao tiếp thông tin theo thời gian thực. Ngoài ra, các công nghệ như VR/MR kết hợp với thiết bị di động có thể tăng cường nhận thức của khách hàng về sản phẩm cuối cùng ngay trong giai đoạn thiết kế để tránh những thay đổi lãng phí trong quá trình thực hiện dự án [7].

- Phân phối: Các công nghệ hỗ trợ việc đặt con người và vật liệu vào không gian với thời gian phù hợp. Các công nghệ phổ biến bao gồm mô hình hóa đa chiều (nD), RFID và mạng cảm biến không dây (WSN). Các ứng dụng đã được phát triển trong thực tiễn bao gồm kiểm soát nhân sự, xe tải ra vào công trường, phân phối vật liệu trên công trường [7, 33].

- Định vị: Một số lượng lớn các công nghệ được sử dụng để theo dõi vị trí của con người và vật chất trong không gian và thời gian, như mã vạch (barcode), Bluetooth / RFID, camera, hệ thống thông tin địa lý (GIS), hệ thống toàn cầu cho di động (GSM), 3G / 4G, Wi-Fi, hệ thống định vị toàn cầu (GPS), quét laser, LaDAR/LIDAR, cảm biến, UAV / Drone, VR. Một số ứng dụng cụ thể của các công nghệ này như việc quản lý các bộ phận công trình qua việc sử dụng camera để quét mã vạch hoặc thẻ RFID được gắn vĩnh viễn vào các bộ phận này. Tốc độ xử lý của điện thoại thông minh cùng với dung lượng và tính khả dụng của các mạng di động hiện đại hiện nay khiến việc quản lý thông tin hiệu quả hơn [19]. Công nghệ RFID và GPS được sử dụng để theo dõi vị trí của công nhân, tài sản và thiết bị trong thời gian thực [34], RFID cũng đang được sử dụng để kiểm soát truy cập nhằm ngăn chặn nhân viên không có nhiệm vụ xâm nhập vào công trường [32], từ đó hỗ trợ quản lý an toàn, quản lý cơ sở vật chất, quản lý quy trình và đo lường tiến trình thực hiện công việc.

- Mô hình: việc mô hình hóa đa chiều (nD) cho phép tích hợp nhiều chiều thông tin vào mô hình kỹ thuật số, ví dụ như BIM, tạo khả năng thực hiện các ứng dụng BIM (BIM uses) trong các dự án xây dựng.

- Tối ưu hóa: bao gồm các công nghệ hỗ trợ hệ thống hoạt động tối ưu. Ví dụ như mạng nơ-ron được nghiên cứu sử dụng để tối ưu hóa vị trí cần trục trên công trường, khi kết hợp với các kỹ thuật thống kê, mạng nơ-ron cũng được sử dụng để tối ưu hóa quá trình xây dựng và nâng cao hiệu quả thi công. Các công nghệ khác bao gồm thực tế tăng cường, Bluetooth, Thiết bị di động, trí thông minh nhân tạo (AI), thiết kế tham số (PD), RFID, v.v... [39]

- Tái tạo: Hành động này chuyển một hệ thống vật lý hiện có thành một mô hình kỹ thuật số. Một số công nghệ được sử dụng bao gồm: camera, GIS, quét laser/LaDAR/LiDAR, đám mây điểm/Máy quét 3D, Đo ảnh / Đo ảnh âm thanh nổi, UAV/Máy bay không người lái, v.v... Ngoài việc đo vẽ và dựng mô hình hiện trạng khu vực, mặt bằng nơi đặt công trình, các công nghệ tái tạo còn có ứng dụng trong các công trình hiện hữu, đặc biệt là các công trình di sản và bảo tồn [39].

- Mô phỏng: các công nghệ này hỗ trợ mô phỏng các hệ thống thực tế và hoạt động của chúng. Một số công nghệ điển hình bao gồm Blockchain, Digital twin, GIS, IFC, Máy học, Mạng nơ-ron/AI, mô hình hóa đa chiều (nD), VR, v.v... Trong các dự án xây dựng, việc mô phỏng được khuyến khích thực hiện trước khi thi công để tăng cường mức độ trực quan của công trình, giúp xác định trước được các vấn đề về khả năng tiếp cận và các tình huống không an toàn tiềm ẩn trên các công trường xây dựng và có giải pháp phòng tránh sớm trong giai đoạn thiết kế và lập kế hoạch [39].

- Tiêu chuẩn hóa: Trong ngành Xây dựng, tiêu chuẩn hóa có vai trò quan trọng và tạo điều kiện cho khả năng tương tác của các hệ thống dựa trên dữ liệu. Việc tiêu chuẩn hóa được thực hiện thông qua các công cụ như IFC, thiết kế tham số và sản xuất tiên chế. Trong những năm qua, một số lượng lớn các tiêu chuẩn và hướng dẫn BIM đã được phát triển, tạo điều kiện thuận lợi cho việc chuẩn hóa cấu trúc dữ liệu và các bộ phận, cấu kiện, thậm chí đến cả các hạng mục công trình [14].

- Trực quan hóa: một số công nghệ đã được phát triển để giúp quan sát mô hình kỹ thuật số trực quan hơn. Ví dụ, điện thoại thông minh có thể được sử dụng để nhận dạng các bộ phận công trình trên công trường xây dựng khi kết nối với ứng dụng BIM. Các công nghệ thực tế tăng cường (AR), hiển thị ba chiều, thực tế ảo (VR) giúp nâng cao tính trực quan của mô hình số của công trình [19].

2.3. Các công nghệ số trong xây dựng 4.0 ứng dụng trong các giai đoạn của vòng đời dự án

2.3.1. Ứng dụng của các công nghệ số theo các giai đoạn của vòng đời dự án

Theo kết quả nghiên cứu của Perrier, Bled và cộng sự [33], các công nghệ số xây dựng có thể được chia thành các nhóm theo các giai đoạn của vòng đời dự án. Bảng 1 tổng hợp các nhóm công nghệ số đã được phát triển và sử dụng trong từng giai đoạn của vòng đời: thiết kế, thi công, vận hành và bảo trì. Trong thực tế, có

những công nghệ đã được sử dụng cho giai đoạn cải tạo, nâng cấp công trình, nhưng các hoạt động cải tạo, nâng cấp nói chung vẫn phải trải qua các bước thiết kế và thi công, vẫn sử dụng các công nghệ tương tự như công trình xây mới, đặc biệt là các công nghệ tái tạo (reconstruct) nên có thể xem xét cùng các giai đoạn trên của công trình xây dựng mới.

Bảng 1: Ứng dụng của các công nghệ số theo các giai đoạn của vòng đời dự án

Chức năng hoạt động	Giai đoạn		
	Thiết kế	Thi công	Vận hành và bảo trì
Tự động hóa	x	x	x
Trao đổi thông tin	x	x	x
Phân phối		x	
Định vị	x	x	x
Mô hình hóa	x	x	
Tối ưu	x	x	x
Tái tạo	x	x	
Mô phỏng	x	x	
Tiêu chuẩn hóa	x	x	
Trực quan hóa	x	x	

Nguồn: tóm tắt và tổng hợp từ [33]

Các phần tiếp theo sẽ trình bày chi tiết hơn các công nghệ trong từng giai đoạn.

2.3.2. Thiết kế

Trong giai đoạn này, ứng dụng phổ biến nhất của các công nghệ số là ở hoạt động mô phỏng. Ngoài ra, các hoạt động chức năng khác cũng đều đã có ứng dụng cụ thể. Các lĩnh vực quản lý dự án trong giai đoạn này, từ phạm vi, chi phí, thời gian, chất lượng, an toàn lao động (ATLĐ), rủi ro, mua sắm, giao tiếp đều đã có ứng dụng được phát triển. Bảng 2 tổng hợp các công nghệ số đã có ứng dụng cho giai đoạn này, theo các lĩnh vực quản lý dự án.

Bảng 2: Các công nghệ xây dựng 4.0 theo các chức năng hoạt động và lĩnh vực trong giai đoạn thiết kế

Chức năng hoạt động	Lĩnh vực	Ứng dụng cụ thể	Công nghệ sử dụng
Tự động hóa	Phạm vi	- Thiết kế tự động vỏ bao che tòa nhà theo các công trình có sẵn và các ràng buộc hiện có	Thiết kế theo tham số (PD)
Trao đổi thông tin	Giao tiếp	- Nâng cao nhận thức của khách hàng trong giai đoạn thiết kế	Thực tế ảo (VR)
Định vị	Phạm vi	- Dò tìm khu vực khoan	Laze
Mô hình hóa	ATLĐ/Rủi ro	- Mô hình hóa các phương tiện an toàn và thoát hiểm tòa nhà trong trường hợp hỏa hoạn	Mạng cảm biến không dây (WSN) /thiết bị di động
	Thời gian	- Mô hình hóa đa chiều	Mô hình đa chiều (nD)
Tối ưu	Chi phí	- Phương pháp Heuristic để lập kế hoạch dự án	Mạng nơ-ron/AI;
		- Tạo điều kiện cho sản xuất hàng loạt	Thiết kế theo tham số (PD)
	Mua sắm	- Tối ưu hóa vị trí cần trục trên công trường	Mạng nơ-ron
	Thời gian	- Các phương pháp Heuristic để lập kế hoạch dự án	Mạng nơ-ron/AI
Tái tạo	Phạm vi	- Địa hình 3D	Máy bay không người lái (drone)/đám mây điểm
Mô phỏng	Chi phí	- Ước tính chi phí theo kích thước của các yếu tố xây dựng	Mô hình hóa nD/ máy bay không người lái/đám mây điểm
		- Ước tính mức tiêu thụ năng lượng trong tương lai	Mạng cảm biến không dây (WSN) / cảm biến tiên tiến
	An toàn lao động	- Huấn luyện an toàn	Thực tế ảo (VR)
		- Tránh va chạm cần cẩu	Hệ thống thông tin địa lý (GIS)
	Mua sắm	- Tránh va chạm cần cẩu	Hệ thống thông tin địa lý (GIS)
Chất lượng		- Thử nghiệm và kiểm định các giải pháp thiết kế động lực	Thiết bị bay không người lái (UAV)/quét laser

Chức năng hoạt động	Lĩnh vực	Ứng dụng cụ thể	Công nghệ sử dụng
	Rủi ro	- Huấn luyện an toàn	Thực tế ảo (VR)
	Phạm vi	- Hợp đồng thông minh	Công nghệ chuỗi – khối (Blockchain)
	Thời gian	- Mô hình hóa đa chiều	Mô hình hóa đa chiều (nD)
Tiêu chuẩn hóa	Trao đổi thông tin	- Tiêu chuẩn giao tiếp	IFC
	Chất lượng	- Chương trình, ngôn ngữ lập trình	Công nghệ mô phỏng / IFC
		- Tiêu chuẩn hóa các hoạt động thiết kế: tiêu chuẩn xác nhận quy tắc và tiêu chuẩn hóa các đặc tính sản phẩm	Thiết kế tham số (PD)
Trực quan hóa	Trao đổi thông tin	- Hình ảnh 3D của mô hình kỹ thuật số và kết cấu	Thực tế tăng cường (AR)/Thực tế ảo (VR)/ Mô hình đa chiều (nD)
		- Hình ảnh 3D của thông tin tòa nhà	Thực tế ảo (VR)
	Thời gian	- Mô hình hóa đa chiều (nD)	Mô hình hóa đa chiều (nD)

Nguồn: tóm tắt và tổng hợp từ [33].

2.3.3. Thi công

Trong giai đoạn này, các công nghệ được phát triển chú trọng đến việc làm thế nào để đạt được năng suất và độ an toàn cao hơn trên các công trường xây dựng. Ngoài ra, các lĩnh vực quản lý dự án

khác như chi phí, chất lượng, thời gian, giao tiếp, mua sắm, rủi ro cũng đều có ứng dụng công nghệ số. Bảng 3 trình bày các công nghệ số đã có ứng dụng cho giai đoạn thi công, theo các lĩnh vực quản lý dự án.

Bảng 3: Các công nghệ xây dựng 4.0 theo các chức năng hoạt động trong giai đoạn thi công

Chức năng hoạt động	Lĩnh vực	Ứng dụng cụ thể	Công nghệ sử dụng
Tự động hóa	Chi phí	- Tự động hóa lắp ráp	Robot di động trên công trường
		- Thay thế nhân công	Robot di động trên công trường
		- Xây dựng nhà	In 3D
	Chất lượng	- Thu thập thông tin về tiến trình thực tế của công trường xây dựng	Máy bay không người lái / quét laze
Thời gian		- Thu thập thông tin về tiến trình thực tế của công trường xây dựng (máy bay không người lái / quét laser)	Máy bay không người lái / quét laze
		- Phân tích dữ liệu thời gian thực tế (học máy)	Học máy (ML)
Trao đổi thông tin	Giao tiếp	- Đọc dữ liệu	Thiết bị di động
		- Truy cập thông tin	Thiết bị di động
	An toàn lao động	- Huấn luyện an toàn (VR)	Thực tế ảo (VR)
Phân phối	An toàn lao động	- Kiểm soát quyền truy cập của con người trên công trường	Công nghệ nhận dạng đối tượng bằng sóng vô tuyến (RFID)
		- Khả năng tiếp cận công trường của xe tải - Cải thiện việc phân bổ tài nguyên vật liệu trên công trường	Công nghệ nhận dạng đối tượng bằng sóng vô tuyến (RFID)- WSN / RFID
	Mua sắm	- Khả năng tiếp cận công trường của xe tải	Công nghệ nhận dạng đối tượng bằng sóng vô tuyến (RFID)
		- Cải thiện việc phân bổ tài nguyên vật liệu trên công trường	Công nghệ nhận dạng đối tượng bằng sóng vô tuyến (RFID)
		- Kiểm soát vật liệu và theo dõi trên công trường	Công nghệ nhận dạng đối tượng bằng sóng vô tuyến (RFID)
Định vị	Chi phí	- Vị trí chất thải	Máy bay không người lái
		- Lập bản đồ các bộ phận hoặc nhóm bộ phận trên công trường	Máy bay không người lái/ UAV / phép đo quang
	ATLD/Rủi ro	- Vị trí và sự di chuyển của công nhân và máy móc	Hệ thống thông tin địa lý (GIS)
		- Phát hiện va chạm	Công nghệ nhận dạng đối tượng bằng sóng vô tuyến (RFID)/Bluetooth/siêu âm
		- Tránh va chạm cản trực	Mạng nơ-ron
		- An toàn cho người lao động (vị trí /vật liệu)	Công nghệ nhận dạng đối tượng bằng sóng vô tuyến (RFID)/UHF
		- Chụp các động tác	Thực tế ảo VR (VR)/ máy ảnh
		- Thu thập dữ liệu thời gian thực tế	Thiết bị di động
- Kết nối Wifi để nắm bắt được vị trí của con người	Thiết bị di động/ WSN		

Chức năng hoạt động	Lĩnh vực	Ứng dụng cụ thể	Công nghệ sử dụng
	Mua sắm	- Phát hiện va chạm	Công nghệ nhận dạng đối tượng bằng sóng vô tuyến (RFID) / Bluetooth / siêu âm
		- Tránh va chạm cần cầu	Hệ thống thông tin địa lý (GIS)
		- Lập bản đồ các hạng mục trên công trường	Thiết bị di động/mô hình hóa nD
		- Theo dõi các mặt hàng trong chuỗi cung ứng	Cảm biến tiên tiến/Công nghệ nhận dạng đối tượng bằng sóng vô tuyến (RFID)
		- Đọc thẻ	Thiết bị di động / Công nghệ nhận dạng đối tượng bằng sóng vô tuyến (RFID)
Mô hình hóa	Chất lượng	- Mô hình 3D	Máy bay không người lái
		- Quản lý chất lượng kỹ thuật số	Mô hình 3D BIM
	Thời gian	- Mô hình 3D	Máy bay không người lái
		- Mô hình hóa nD	Mô hình thông tin xây dựng (BIM)
Tối ưu	An toàn lao động	- Tối ưu hóa luồng	Mô hình hóa nD/mạng nơ-ron
		- Tối ưu hóa vị trí cần trục trên công trường	Mạng nơ-ron
	Mua sắm	- Tối ưu hóa luồng	Mô hình hóa nD /mạng nơ-ron
		- Tối ưu hóa vị trí cần cầu trên công trường	Mạng nơ-ron
		- Mua hàng loạt	Mạng nơ-ron
	Chất lượng	- Các phương pháp Heuristic để lập kế hoạch dự án	Mạng nơ-ron/AI
		- Cải thiện hiệu quả quy trình	Mạng nơ-ron/AI
		- Vị trí và sự di chuyển của công nhân và máy móc	Mạng nơ-ron/AI
	Thời gian	- Các phương pháp Heuristic để lập kế hoạch dự án	Mạng nơ-ron/AI
		- Cải thiện hiệu quả quy trình	Thiết kế tham số (PD)
		- Vị trí và sự di chuyển của công nhân và máy móc	Năng suất và an toàn
	Tái tạo	ATLĐ/Rủi ro	- Phân tích cấu trúc
- Kiểm tra an toàn			Máy bay không người lái
Mô phỏng	ATLĐ/Rủi ro	- Bảo mật dữ liệu cho bằng chứng giao hàng	Công nghệ chuỗi – khối (Blockchain)
		- Phân tích hình ảnh của công trường để phát hiện các vấn đề bảo mật	Mạng nơ-ron
Tiêu chuẩn hóa	Chi phí	- Giảm chi phí	Tiến chế
	Thời gian	- Giảm độ trễ	Tiến chế
Trực quan hóa	Trao đổi thông tin	- Hình ảnh 3D của mô hình kỹ thuật số và kết cấu	Mô hình AR/VR/nD

Nguồn: tóm tắt và tổng hợp từ [33].

2.3.4. Vận hành và bảo trì

Có thể nhận thấy sự gia tăng không ngừng các mối quan tâm đến việc đảm bảo chất lượng công trình, sự làm việc ổn định của cơ sở vật chất và việc nâng cao tuổi thọ, hiệu quả của cơ sở vật chất của ngành xây dựng trong những năm qua. Do đó, có nhiều công nghệ đã được phát triển và sử dụng để đảm bảo cho việc vận

hành và bảo trì các cơ sở vật chất được thuận lợi. Ngoài ra, còn có một số công nghệ được ứng dụng để giải quyết vấn đề giám sát và ứng phó khẩn cấp. Bảng 4 thể hiện các công nghệ số trong giai đoạn vận hành và bảo trì, được thống kê theo các khía cạnh sử dụng để đánh giá hoạt động vận hành và bảo trì: phạm vi, chất lượng, chi phí, rủi ro, an toàn lao động.

Bảng 4: Các công nghệ xây dựng 4.0 theo các chức năng hoạt động trong giai đoạn vận hành

Chức năng hoạt động	Vận hành và bảo trì	Ứng dụng cụ thể	Công nghệ sử dụng
Tự động hóa	ATLĐ/Rủi ro	- Giám sát các biến dạng cấu trúc	Công nghệ nhận dạng đối tượng bằng sóng vô tuyến (RFID)
	Chất lượng	- Xử lý chất thải	Rô-bốt
	Phạm vi	- Định hình lại các chức năng và bố cục của tòa nhà bằng cách thiết kế lại các mô-đun với cần cầu rô-bốt	Cần cầu rô-bốt (Crabots)
Trao đổi thông tin	ATLĐ/Rủi ro	- An toàn, sử dụng điện thoại thông minh để được hướng dẫn trong trường hợp sơ tán	Thiết bị di động / điện thoại thông minh
	Chất lượng	- Theo dõi các hoạt động bảo trì	Công nghệ nhận dạng đối tượng bằng sóng vô tuyến (RFID)
Định vị	Chi phí	- Quản lý năng lượng liên kết	Quét laser / camera hồng ngoại
	ATLĐ/Rủi ro	- Xác định vị trí người cư trú và nguồn lửa trong trường hợp hỏa hoạn - Xác định vị trí để tạo thuận lợi cho ứng phó khẩn cấp - Các công cụ sử dụng GPS đánh giá an toàn cháy nổ	Hệ thống Định vị Toàn cầu GPS

Chức năng hoạt động	Vận hành và bảo trì	Ứng dụng cụ thể	Công nghệ sử dụng
		tòa nhà	
	Chất lượng	- Giám sát tình trạng các bộ phận tòa nhà	Công nghệ nhận dạng đối tượng bằng sóng vô tuyến (RFID)/cảm biến tiên tiến
		- Lập bản đồ tòa nhà để tạo điều kiện thuận lợi cho vận hành và bảo trì ()	Máy bay không người lái / quét laser
		- Giám sát các biến dạng cấu trúc	Cảm biến tiên tiến
Tối ưu	ATLD/Rủi ro	- Tối ưu hóa việc sơ tán người cư trú trong trường hợp hỏa hoạn	Cảm biến tiên tiến

Nguồn: tóm tắt và tổng hợp từ [33].

3. THỰC TRẠNG VỀ VIỆC ÁP DỤNG CÁC CÔNG NGHỆ SỐ TRONG XÂY DỰNG 4.0 Ở VIỆT NAM

3.1. Xu thế tiếp nhận và chuyển đổi sang xây dựng 4.0 ở Việt Nam

Trong bối cảnh cuộc Cách mạng công nghiệp 4.0 đang diễn ra mạnh mẽ trên thế giới, Việt Nam cũng đã xác định chuyển đổi số là nhiệm vụ tất yếu cho nền kinh tế, bao gồm cả ngành xây dựng.

Thời gian qua, Chính phủ đã ban hành nhiều chính sách thúc đẩy các hoạt động đầu tư để hòa nhập với cuộc Cách mạng công nghiệp 4.0. Ngành xây dựng cũng không nằm ngoài cuộc. Thực hiện chỉ đạo của Thủ tướng Chính phủ, Bộ Xây dựng đã ban hành các Quyết định: số 1004/QĐ-BXD ngày 31/7/2020 của Bộ trưởng Bộ Xây dựng phê duyệt “Kế hoạch Chuyển đổi số ngành Xây dựng giai đoạn 2020-2025, định hướng đến năm 2030”; số 1533/QĐ-BXD ngày 7/12/2020 về việc phê duyệt Kế hoạch ứng dụng công nghệ thông tin trong hoạt động của cơ quan Bộ Xây dựng giai đoạn 2021-2025; số 219/QĐ-BXD ngày 28/3/2019 về kế hoạch thực hiện Nghị quyết số 17/NQ-CP ngày 7/3/2019 của Chính phủ về một số nhiệm vụ, giải pháp trọng tâm phát triển Chính phủ điện tử giai đoạn 2019-2020, định hướng đến 2025; số 1735/QĐ-BXD ngày 31/12/2020 về Kế hoạch ứng dụng công nghệ thông tin, chuyển đổi số của cơ quan Bộ Xây dựng năm 2021. Qua đó cho thấy sự vào cuộc khẩn trương, quyết liệt của các cấp, các ngành trong lĩnh vực quản lý nhà nước về xây dựng trong thời đại 4.0. Kế hoạch chuyển đổi số ngành xây dựng giai đoạn 2020-2025, định hướng đến năm 2030 đã xác định chuyển đổi số ngành Xây dựng là nội dung rất quan trọng cần tập trung chỉ đạo, tổ chức thực hiện có hiệu quả để góp phần tăng năng suất lao động, tăng sức cạnh tranh của sản phẩm, hàng hóa và doanh nghiệp trong lĩnh vực xây dựng, nâng cao hiệu lực, hiệu quả quản lý Nhà nước. Đối tượng, lĩnh vực ưu tiên chuyển đổi số gồm: Cơ sở dữ liệu (CSDL) trong đó bao gồm các tiêu chuẩn, quy chuẩn, định mức, đơn giá để phục vụ quản lý Nhà nước của Bộ Xây dựng; Thực hiện Chính phủ điện tử Bộ Xây dựng; Hoạt động xây dựng (tư vấn thiết kế; tư vấn thẩm tra, thẩm định; thi công xây lắp; nghiệm thu công trình); Khai thác và sản xuất vật liệu xây dựng; Quy hoạch xây dựng, phát triển đô thị và hạ tầng kỹ thuật đô thị; Nhà ở, công sở và thị trường bất động sản [3].

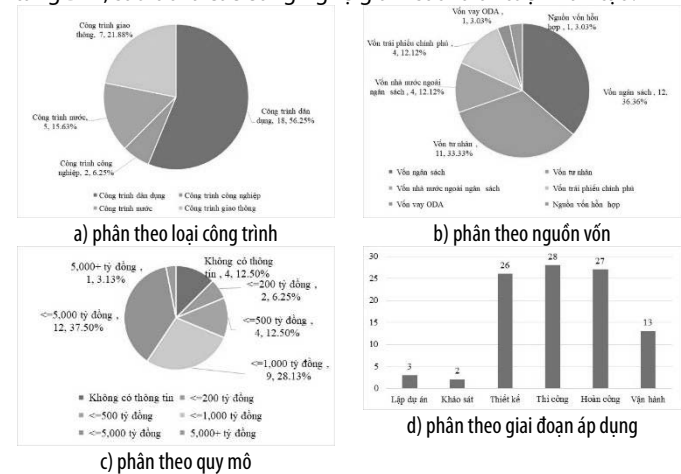
Trong bối cảnh đó, các doanh nghiệp trong ngành xây dựng cũng đã dần dần nâng cao nhận thức về Cách mạng công nghiệp 4.0 nói chung và vấn đề chuyển đổi số của ngành xây dựng nói riêng. Nhiều hội thảo/điễn đàn ở quy mô lớn đã được tổ chức góp phần quan trọng trong việc nâng cao nhận thức chung của cấp lãnh đạo, quản lý và doanh nghiệp. Từ đó, các đơn vị trong ngành xây dựng dần dần đã chủ động tham gia vào công cuộc số hóa ngành xây dựng, tiến hành số hóa các hoạt động xây dựng của mình, áp dụng các công nghệ số trong xây dựng. Trên cơ sở những nhận thức đầy đủ về cách mạng công nghiệp 4.0, các đơn vị đã

triển khai những chương trình và kế hoạch cụ thể nhằm tiếp cận với cuộc cách mạng này.

3.2. Một số ứng dụng trong thực tế của các công nghệ số trong xây dựng 4.0 ở Việt Nam

Các doanh nghiệp đi đầu trong việc ứng dụng công nghệ số trong xây dựng 4.0 ở Việt Nam bao gồm các doanh nghiệp tư vấn, các nhà thầu thi công tham gia trực tiếp vào quá trình triển khai các dự án đầu tư xây dựng. Bằng việc đẩy mạnh áp dụng công nghệ thông tin, từ đó tận dụng được các ứng dụng mới do công nghệ thông tin và các nền tảng, công cụ mới dựa trên công nghệ thông tin mang lại, các doanh nghiệp trong ngành Xây dựng Việt Nam dần nhận thấy họ có khả năng tiếp cận dự án tốt hơn, thiết kế hợp lý hơn, thi công ít rủi ro hơn và quản lý có hiệu quả hơn. Các doanh nghiệp đã dần nhận thức được, việc áp dụng các công nghệ số trong Xây dựng 4.0 đã và đang mang lại cho họ lợi thế cạnh tranh, mở ra các ngành nghề kinh doanh mới.

Kết quả khảo sát việc ứng dụng các công nghệ số thông qua các nguồn thông tin được công bố rộng rãi đáng tin cậy như các ấn phẩm khoa học, các thông cáo báo chí, và website riêng của các đơn vị cho thấy, 7 nhóm công nghệ số trong Xây dựng 4.0 như phân tích trong Mục 2.1 đều đã được ứng dụng tại các dự án đầu tư xây dựng Việt Nam, mỗi nhóm có một hay nhiều ứng dụng đã được triển khai thực tế. Tuy nhiên, các nhóm công nghệ số được ứng dụng nhiều nhất phải kể đến BIM và các ứng dụng trên nền tảng BIM, sau đó là các công nghệ giám sát và trí tuệ nhân tạo.



Hình 3: Các công trình thi điểm áp dụng BIM thời gian vừa qua [10]

Dù được coi là một nước đi sau trong ứng dụng BIM [24, 27], BIM cũng đã được giới thiệu chính thức ở Việt Nam từ năm 2016 [28] với Quyết định 2500/QĐ-TTg của Thủ tướng Chính phủ, và được áp dụng một cách không chính thức từ trước đó [30]. Xuất phát từ việc áp dụng các ứng dụng BIM cơ bản như thiết kế và mô

hình hóa 3D, phát hiện va chạm và xung đột trong thiết kế, quản lý tiến trình, kiểm soát chất lượng, quản lý rủi ro, an toàn lao động trên công trường, phân tích năng lượng và quản lý vận hành công trình, dẫn dắt các doanh nghiệp đã tiến tới áp dụng các ứng dụng BIM nâng cao, tiên tiến hơn khi tích hợp BIM với GIS, với RFID, VR, AR, quét laze, điện toán đám mây, internet vạn vật, thiết bị di động, thậm chí cũng đã bắt đầu tiếp cận cả những công nghệ hiện thế giới cũng vẫn đang ở giai đoạn nghiên cứu phát triển như in 3D, hay sử dụng bản sao số của công trình (digital twins) [10].

Kể từ khi lộ trình áp dụng BIM được công bố, ngày càng nhiều dự án đầu tư xây dựng, cả khối nhà nước và tư nhân áp dụng BIM. Một nghiên cứu gần đây [10] đã tổng hợp lại 32 dự án thí điểm áp dụng BIM theo chương trình của Chính phủ (Hình 3), trong đó có cả các dự án giao thông, xây dựng dân dụng (công trình nhà cửa), công trình nông nghiệp và công trình công nghiệp và phát triển nông thôn. Các dự án có nguồn vốn khá đa dạng, từ vốn ngân sách, vốn nhà nước ngoài ngân sách, các nguồn vốn vay như vốn trái phiếu chính phủ, vốn vay ODA, vốn tư nhân và cả nguồn vốn hỗn hợp.

Một số dự án điển hình sử dụng vốn nhà nước được áp dụng BIM thành công trong thời gian vừa qua có thể kể đến Nhà Quốc hội nước Cộng hòa dân chủ nhân dân Lào, Dự án công trình trụ sở làm việc của Chính phủ và Văn phòng Chính phủ, Trụ sở Tập đoàn công nghiệp - Viễn thông Quân đội, Dự án đầu tư xây dựng cầu Cửa Đại, tỉnh Quảng Ngãi, Nhà ga hành khách cảng hàng không Quốc tế Phú Bài, trạm biến áp 11KV ở Kim Thành, Hải Dương, v.v... Trong lĩnh vực nông nghiệp và phát triển nông thôn, có các dự án điển hình đã và đang áp dụng BIM như dự án hồ chứa nước Cảnh Tạng ở Hòa Bình và dự án Nâng cấp hệ thống thủy lợi sông Lèn và sông Mơ, Thanh Hóa của Ban Quản lý Trung ương các dự án Thủy lợi. Các ứng dụng BIM cụ thể được áp dụng trong các dự án khá đa dạng, tuy nhiên đa số dừng ở các ứng dụng BIM cơ bản cho giai đoạn thiết kế, thi công và hoàn công, chưa bao gồm giai đoạn vận hành. Các nghiên cứu trước cho thấy số lượng dự án sử dụng vốn nhà nước ứng dụng BIM khá ít, lý do chủ yếu là do cơ chế, chính sách chưa thực sự tạo điều kiện thuận lợi [11, 28]. Tuy nhiên, trong các dự án sử dụng vốn khác, cũng đã có một số đơn vị thiết kế, nhà thầu thi công hay các chủ đầu tư có ứng dụng BIM tương đối phổ biến và rộng rãi. Điển hình như các dự án của nhà thầu Coteccons trong cả giai đoạn thiết kế và thi công, hay các dự án của Vingroup, tập trung nhiều vào giai đoạn thiết kế. Một số dự án hạ tầng khác cũng đã và đang được triển khai trên nền tảng BIM, như dự án cầu cảng của Nhà máy nhiệt điện Nghi Sơn của một số nhà đầu tư nước ngoài hay dự án hạ tầng khu công nghiệp Nhơn Trạch, Đồng Nai, khu công nghiệp Phố Nối, Hưng Yên,... [40]. Trong các dự án sử dụng BIM trong thời gian vừa qua, bắt đầu có các ứng dụng BIM nâng cao được triển khai, mô hình hóa đa chiều (nD), kết hợp với các công nghệ số khác, như sử dụng máy bay không người lái để khảo sát hiện trạng (drone), hay sử dụng máy quét laze để quét hiện trạng công trình phục vụ lập hồ sơ hoàn công. Đã có nghiên cứu để cập đến việc sử dụng BIM và máy quét laze để quản lý chất lượng công trình xây dựng [29], thiết kế tự động hóa với Dynamo [25]. Một số dự án ứng dụng BIM cũng đã sử dụng kết hợp điện toán đám mây để tạo ra Môi trường dữ liệu chung (Common Data Environment), làm nền tảng chia sẻ dữ liệu phục vụ các ứng dụng BIM và hoạt động của dự án [10]. Do sử dụng nhiều hệ thống phần mềm khác nhau, các dự án ứng dụng BIM ở Việt Nam cũng đã tận dụng các công nghệ sẵn có được phát triển trên thế giới như IFC làm chuẩn mực trao đổi dữ liệu. Các công nghệ thực tế ảo (VR) và thực tế ảo tăng cường (AR) cũng đã được áp dụng để hỗ trợ việc giám sát, đánh giá thiết kế dự án trực quan hơn [30], hoặc để quản

lý vận hành hệ thống cơ - điện sử dụng công nghệ BIM [36]. Một số dự án bất động sản cũng đã sử dụng công nghệ VR, công nghệ Hologram để trình diễn dự án trực quan hơn, nhằm tăng khả năng bán hàng [8]. Ở phạm vi rộng hơn, một số mô hình các thành phố ảo đã được xây dựng hỗ trợ quy hoạch đô thị, phục vụ du lịch và là nền tảng để triển khai xây dựng các mô hình thành phố ảo (Cyber city) và tiến tới là thành phố thông minh (Smart city) đã và đang được nghiên cứu, ứng dụng trong công tác quy hoạch của nhiều nước trên thế giới, ví dụ như thành phố ảo 3D cho khu đô thị công nghiệp Kiến Thụy, Hải Phòng [23] hay Bản đồ du lịch thành phố ảo Đà Nẵng (<http://danang.virtualtourist.vn/>), khu di tích lịch sử ATK Định Hóa (<http://atk.vr360.com.vn/>). Thành phố Hồ Chí Minh cũng đã bắt đầu sử dụng công nghệ chuỗi khối để trang bị hạ tầng IoT nhằm hỗ trợ Thành phố phát triển đô thị thông minh. Công nghệ này được tin tưởng là có thể giải quyết được những bất cập trong triển khai xây dựng đô thị thông minh cho Thành phố [18].

Kết quả khảo sát cũng cho thấy, các công nghệ giám sát, ngoài các công nghệ sử dụng máy bay không người lái và quét laze như đã đề cập đến ở trên, tất cả các công nghệ được tổng hợp trong Hình 1 đều đã được sử dụng. Camera được sử dụng rộng rãi để giám sát các công trường xây dựng, ví dụ như ở Dự án nút giao nam Cầu Bính quận Hồng Bàng, Hải Phòng [5], hay các dự án của Công ty TNHH Quốc tế VINATA, như nhóm nghiên cứu quan sát được. Tuy nhiên, việc sử dụng camera ở các công trình trên mới ở mức độ đơn giản là cung cấp thông tin theo thời gian thực về các hoạt động trên công trường, dữ liệu thu được chưa được đưa vào một môi trường dữ liệu chung để kết nối với mô hình BIM hoặc các công nghệ, thiết bị khác, nên mức độ khai thác còn hạn chế.

Ứng dụng quét laze/đám mây điểm cũng đã được triển khai để dựng mô hình 3D của công trình hiện hữu. Nhóm nghiên cứu của Đại học Mỏ - Địa chất đã tiến hành quét laze mặt đất để xây dựng mô hình 3D cho thiết bị công nghệ nhà máy nhiệt điện Cẩm Phả. Kết quả thu được là mô hình 3D có mức độ chi tiết (Level of Detail - LoD) cao, được sử dụng để hỗ trợ phân tích, đánh giá chi tiết hiện trạng hệ thống thiết bị công nghệ trong nhà máy nhiệt điện, hỗ trợ hoạt động vận hành [31]. Ứng dụng GPS cũng được sử dụng trong một số công trình xây dựng, ví dụ công trình Keangnam, để đo kiểm tra và bố trí công trình nhà cao tầng theo phương thẳng đứng [38]. Có thể nói, các ứng dụng này đang được triển khai khá rời rạc, từng ứng dụng riêng biệt, chưa được xem xét kết hợp để đưa ra các giải pháp tổng thể, đồng bộ.

Các công nghệ theo dõi cũng được ứng dụng để giám sát và phát hiện biến dạng trong giai đoạn vận hành và bảo dưỡng công trình xây dựng, đặc biệt là công trình cầu. Công nghệ đo quang (photogrammetry) tích hợp trong máy quét KSCAN-MAGIC đã được thử nghiệm áp dụng để kiểm tra cấu kiện cầu đúc sẵn [35]. Nhóm nghiên cứu của Trường Đại học Giao thông Vận tải đã xây dựng mô hình bản sao số cho cầu Nhật Tân, sử dụng các cảm biến hồng ngoại gắn với cầu để nhận dữ liệu thông qua bluetooth từ công trình thực về bản sao số, từ đó dữ liệu được phân tích để có được thực trạng làm việc của cầu. Trên cơ sở đó, người quản lý vận hành và bảo trì có giải pháp giải quyết kịp thời và thích hợp [4]. Ngoài ra, GIS còn được sử dụng tích hợp với GMS/GPRS để quản lý xe chuyên dùng, từ đó giúp Cty TNHH MTV Chiếu sáng và thiết bị đô thị (Hapulico) nâng cao năng suất lao động và chất lượng dịch vụ của mình [9].

Các công nghệ tiên chế và chế tạo số hóa cũng đã được bắt đầu nghiên cứu áp dụng. Sản xuất tiên chế đã có mặt ở Việt Nam từ khá lâu, với các sản phẩm tiên chế là các cấu kiện thép và các cấu kiện bê tông cốt thép đúc sẵn. Tuy nhiên, việc kết hợp chế tạo số hóa vào sản xuất tiên chế mới chỉ phổ biến trong ngành cơ khí,

khí sản xuất các cấu kiện thép, với các thiết bị như máy cắt CNC hoặc máy hàn tự động được liên kết trực tiếp với máy tính điện tử. Ứng dụng này chưa được áp dụng đối với việc sản xuất tiền chế các cấu kiện, bộ phận công trình bằng bê tông cốt thép. Mới gần đây, cùng với sự phát triển mạnh mẽ và phổ biến của BIM, một số đơn vị sản xuất cấu kiện tiền chế bê tông cốt thép mới bắt đầu quan tâm nghiên cứu ứng dụng, ví dụ như Cty Cổ phần Đầu tư và Xây dựng Xuân Mai [1]. Một số doanh nghiệp khác như Seico Group cũng đã tham gia vào một vài dự án sản xuất tiền chế theo phương thức DfMA [2] với một doanh nghiệp của Singapore, tuy nhiên, sản phẩm được sử dụng cho các dự án khôi phục sau lũ của Indonesia chứ không phải ở Việt Nam.

Công nghệ sản xuất tiền chế đang được quan tâm hiện nay là công nghệ in 3D. Khác với công nghệ sản xuất truyền thống, đây là công nghệ sản xuất bồi đắp, không sử dụng ván khuôn. Trên thế giới, công nghệ này đã được giới thiệu từ cuối những năm 2000, đầu những năm 2010 bởi Đại học Loughborough, với một số công bố đầu tiên [20]. Kế thừa các kết quả nghiên cứu này, hiện Viện Vật liệu Xây dựng - Bộ Xây dựng, với nhân sự đã tham gia dự án này của Đại học Loughborough đang tiến hành một nghiên cứu về công nghệ này trong điều kiện Việt Nam.

Đối với nhóm công nghệ về trí thông minh nhân tạo, một số tác giả trong nước đã công bố khá nhiều giải pháp ứng dụng các giải pháp trong nhóm này để giải quyết các bài toán trong xây dựng, bao gồm cả lĩnh vực quản lý xây dựng. Việc sử dụng Matlab để huấn luyện mạng ANNs trong bài toán lượng chi phí xây dựng chung cư [22] hay bài toán ước lượng thời gian của dự án sử dụng bê tông đúc sẵn [37] là hai trong số các ứng dụng thực tiễn của nhóm công nghệ này ở Việt Nam, và còn nhiều ứng dụng trong các bài toán cụ thể khác. Một số nhóm nghiên cứu đang phát triển ứng dụng AI trong việc giám sát an toàn lao động trên công trường, tuy nhiên kết quả nghiên cứu chưa được công bố.

Các đơn vị trong nước cũng khá chú trọng đến việc kế thừa các tiến bộ khoa học công nghệ và giải pháp phù hợp từ nước ngoài vào các dự án trong nước. Từ đầu những năm 2010, Công ty Archibus Việt Nam đã tiếp nhận giải pháp quản lý vận hành tòa nhà từ Archibus (Mỹ), với mục tiêu kết hợp với BIM để tăng hiệu quả sử dụng. Gần đây, một số đơn vị đã tiếp cận các giải pháp quản lý cho một số loại công trình đặc biệt như công trình bệnh viện, với công nghệ CMMS.

Kết quả khảo sát các nguồn thông tin được công bố rộng rãi cho thấy chỉ có một số rất ít các ứng dụng như thực tế hỗn hợp (MR), rô bốt trong xây dựng, hợp đồng thông minh, thiết bị bay không người lái cho chế tạo kỹ thuật số là chưa có bằng chứng được áp dụng trong thực tiễn ngành xây dựng Việt Nam.

4. Bàn luận

Dù là một nước đi sau trong việc chuyển đổi số, thực tế cho thấy trong những năm qua, ngành Xây dựng Việt Nam vừa kế thừa, vừa tự phát triển rất nhiều công nghệ số hóa. Có những ứng dụng đã được phát triển và đưa vào thực tiễn từ khá lâu, như các ứng dụng trí thông minh nhân tạo với các nhà khoa học từ các trường đại học khối kiến trúc, xây dựng phía Nam là những người tiên phong. Nhiều tổ chức, cá nhân đã tiếp nhận chuyển giao các công nghệ có sẵn ở nước ngoài để đưa vào ngành Xây dựng Việt Nam, rút ngắn quá trình nghiên cứu phát triển. Tuy nhiên, cũng có nhiều nhà khoa học đã và đang tiến hành các nghiên cứu song song với nhóm nghiên cứu khác ở các nước trên thế giới, để cải tiến các giải pháp có sẵn, hoặc tìm ra các giải pháp tối ưu hơn trong điều kiện Việt Nam. Các nguồn thông tin được công bố rộng rãi cho thấy, Việt Nam chưa có một công nghệ số xây dựng 4.0 nào được coi là công

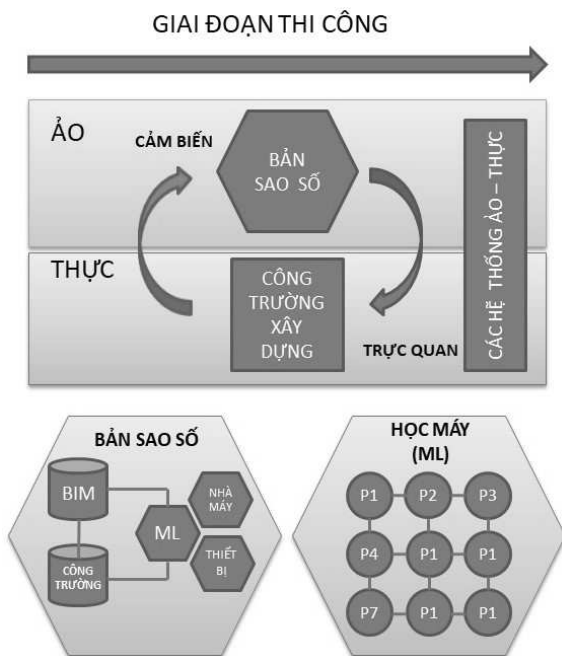
nghệ tiên phong, phát kiến đầu tiên, mà chỉ dừng ở việc kế thừa và phát triển, cải tiến các công nghệ đã có trên thế giới.

BIM là một giải pháp xây dựng 4.0 được ngành xây dựng Việt Nam chấp nhận rộng rãi và rất nhiều đơn vị trong ngành đang chuyển đổi sang áp dụng giải pháp này. Với việc thành lập Ban chỉ đạo BIM - Bộ Xây dựng, môi trường pháp lý để áp dụng BIM ngày càng được cải thiện, BIM đã được thiết lập cơ sở pháp lý để thực hiện trong các dự án đầu tư xây dựng. Các chương trình đào tạo nâng cao kiến thức chính thống được tổ chức bởi tổ chức này, kết hợp với các đơn vị trong và ngoài nước để chia sẻ kinh nghiệm thực tế (có thể tham khảo thông tin từ trang web <https://bim.gov.vn/>), đã và đang góp phần không nhỏ trong việc nâng cao nhận thức về BIM cho những người làm việc trong ngành xây dựng. Đồng thời, Bộ Xây dựng cũng đã công bố một số hướng dẫn được cập nhật về BIM; đây là các tài liệu cơ bản giúp những người làm nghề xây dựng định hình cách thức tiến hành và các ứng dụng BIM cơ bản, từ đó tích lũy kinh nghiệm để chinh phục các ứng dụng BIM nâng cao.

Việc ứng dụng các công nghệ số xây dựng 4.0 được phân ra là ứng dụng cho công trình xây mới và cho công trình hiện hữu. Với công trình xây mới, tối ưu nhất là có được một mô hình kỹ thuật số (digital engineering model) của công trình, có thể được dựng trên nền tảng BIM. Mô hình số này, với sự hỗ trợ của các công nghệ phù hợp về khoa học dữ liệu, có thể đóng vai trò như một Môi trường Dữ liệu chung (CDE), từ đó các công nghệ số, bao gồm cả các thiết bị ngoại vi, có thể nạp thêm dữ liệu, cập nhật dữ liệu vào mô hình để tăng chiều của mô hình (nD) hoặc truy xuất dữ liệu nhằm triển khai các ứng dụng cụ thể trong suốt vòng đời dự án. Mức độ chi tiết hay mức độ phát triển thông tin của mô hình hoàn toàn phụ thuộc vào yêu cầu của các ứng dụng và công nghệ khi khai thác mô hình. Do việc dựng mô hình số công trình (bao gồm cả mô hình BIM) khá tốn công sức, vì vậy cần nâng cao hiệu quả sử dụng mô hình bằng cách đa dạng hóa các ứng dụng liên kết tương thích (các ứng dụng bổ sung có thể sử dụng được nội dung mô hình đã số hóa). Một cách tiếp cận để đa dạng hóa các ứng dụng là việc sử dụng trí thông minh nhân tạo, ví dụ như học máy (ML). Trí thông minh nhân tạo khi được sử dụng cùng một số công nghệ thu thập dữ liệu phù hợp, có thể hỗ trợ việc kết nối mô hình số với mô hình vật lý trong thực tế dễ dàng hơn, từ đó tăng cường khả năng tự động hóa trong xây dựng. Hình 4 thể hiện đề xuất của một nhóm tác giả nước ngoài về một kịch bản cho tự động hóa trong xây dựng, trong giai đoạn thi công, sử dụng trí thông minh nhân tạo và bản sao số [6], có thể tham khảo và vận dụng vào điều kiện Việt Nam.

Với công trình hiện hữu, mô hình số thường có yêu cầu về mức độ chi tiết thấp hơn, do các phần công trình, bộ phận bị che khuất không thể dựng được vào mô hình. Mặt khác, để tăng năng suất và độ chính xác khi dựng mô hình, người ta thường dùng thêm các công cụ giám sát để thu thập dữ liệu hiện trạng, các công cụ như bluetooth, mạng cảm biến không dây, các phần mềm hỗ trợ được sử dụng để chuyển dữ liệu thu thập được từ thực tế vào mô hình số, kể cả dữ liệu theo thời gian thực. Từ đó, mô hình số có thể được sử dụng cho việc phân tích, đánh giá vòng đời dự án (về sử dụng năng lượng, về phát thải rác, v.v...), phục vụ quản lý vận hành (như quản lý không gian, quản lý tài sản, đồ đạc, quản lý chi phí vận hành, quản lý cho thuê, v.v... như các chức năng quản lý của phần mềm Archibus) hoặc cho các hoạt động quản lý bảo trì (bảo trì dự báo, kế hoạch bảo trì, ước lượng chi phí bảo trì, v.v...), cải tạo, sửa chữa, hoặc xác định lại tuổi thọ hiệu quả của công trình. Dù mức độ chi tiết của mô hình cần dựng lại cho công trình hiện hữu phụ thuộc vào yêu cầu thông tin của ứng dụng, nói chung, càng có

hiều ứng dụng khai thác được mô hình thì hiệu quả càng cao. Ngoài trừ khi được sử dụng với các ứng dụng AI thuần túy là các phần mềm tin học hay mô phỏng, nói chung mô hình số sẽ được khai thác tốt hơn khi kết nối với các thiết bị ngoại vi. Như kinh nghiệm thế giới cho thấy, các thiết bị ngoại vi sẽ hỗ trợ việc thu thập, xử lý dữ liệu, tăng mức độ tương tác giữa các mô hình với nhau và giữa con người với mô hình, cũng như tạo ra các ứng dụng mới để tận dụng mô hình hiệu quả hơn. Khi sử dụng tích hợp cả các thiết bị ngoại vi (thiết bị vật lý) và các ứng dụng AI, các ứng dụng học máy hay học sâu sẽ đem lại các tính năng mới, từ đó hỗ trợ tốt hơn các hoạt động quản lý theo tiến trình của dự án đầu tư xây dựng và cả cơ sở vật chất là sản phẩm của dự án. Mặt khác, trong xu thế phát triển bền vững, các công nghệ số hỗ trợ tốt hơn cho việc phát triển các công trình xanh, tiết kiệm năng lượng, giảm phát thải, tăng cường các giá trị theo cả vòng đời dự án, công trình không chỉ về khía cạnh kinh tế, tài chính, mà cả về khía cạnh xã hội, từ đó áp dụng được các nguyên lý của kinh tế tuần hoàn trong xây dựng.



Hình 4: Kịch bản tự động hóa trong giai đoạn thi công với học máy (ML) [6]

Các công nghệ tiên chế thông qua sản xuất số hóa, với các ứng dụng xuyên suốt từ khi có ý tưởng dự án cho đến giai đoạn thiết kế, sản xuất, lắp dựng và thi công, và nghiệm thu bàn giao, và vận hành, bảo trì, cải tạo, nâng cấp, tái sử dụng các bộ phận, cấu kiện, vật liệu trong ngành xây dựng cũng như các ngành khác của nền kinh tế sẽ là giải pháp phù hợp nhất. Tuy nhiên, các công nghệ tiên chế cần sự hỗ trợ, kết hợp của nhiều công nghệ số khác, đặc biệt là trí thông minh nhân tạo và các công nghệ cho phép sự tham gia sớm của các bên hữu quan trong suốt vòng đời dự án, từ đó đòi hỏi thêm các công nghệ hỗ trợ quản lý sự đồng thuận như chuỗi khối (blockchain), hợp đồng thông minh (smart contract), vốn chưa được các nhà khoa học Việt Nam, đặc biệt trong ngành Xây dựng, quan tâm đúng mức.

5. KẾT LUẬN

Trong xu thế toàn cầu về Cách mạng công nghiệp 4.0, ngành xây dựng trên thế giới nói chung và ngành Xây dựng Việt Nam nói riêng cũng đã triển khai cuộc cách mạng riêng của mình, đó là xây dựng 4.0. Bài báo đã tổng kết các nghiên cứu gần đây trên thế giới

để làm rõ các công nghệ đã và đang được nghiên cứu phát triển, ứng dụng thực tiễn của xây dựng 4.0. Kết quả nghiên cứu cho thấy, có 7 nhóm công nghệ số xây dựng 4.0 đã được phát triển, bao gồm: khoa học dữ liệu, chế tạo kỹ thuật số, tiên chế, BIM, trí thông minh nhân tạo, các hệ thống mô hình hóa và các công nghệ liên quan đến việc giám sát như GIS. Các công nghệ trong các nhóm này được phát triển để hỗ trợ và thực hiện 10 loại hoạt động chính cần thiết trong việc triển khai và quản lý các dự án đầu tư xây dựng, bao gồm: tự động hóa, trao đổi thông tin, phân phối, định vị, mô hình hóa, tối ưu hóa, tái tạo, mô phỏng, tiêu chuẩn hóa và trực quan hóa. Các công nghệ số đã có các ứng dụng tích cực trong toàn bộ các giai đoạn của vòng đời dự án đầu tư xây dựng: thiết kế, thi công, vận hành và bảo trì, và cả giai đoạn cải tạo, nâng cấp, từ đó tạo ra các khả năng tự động hóa các hoạt động xây dựng. Các nội dung quản lý dự án cơ bản đều đã có sự hỗ trợ của các công nghệ số 4.0, trong đó các nội dung được chú trọng nhiều bao gồm thời gian, chi phí, chất lượng, an toàn lao động (thường đi kèm với rủi ro, vì thực chất việc mất an toàn lao động cũng là một loại rủi ro liên quan đến con người và tài sản). Dù là một nước đi sau trong việc chuyển đổi số, thực tế cho thấy trong những năm qua, ngành xây dựng Việt Nam vừa kế thừa, vừa tự phát triển rất nhiều công nghệ số hóa.

Nghiên cứu này có điểm hạn chế là do việc khảo sát các công nghệ trên thế giới sử dụng nguồn thông tin chủ yếu là các nghiên cứu được công bố trên các Tạp chí, nên có độ trễ nhất định so với thực tế đang xảy ra. Kết quả được xem xét có thể chưa cập nhật được các nghiên cứu mới được thực hiện gần đây mà chưa được công bố, hoặc do thời gian để một công bố được xuất bản khá dài, nên các công nghệ đã được ứng dụng từ trước đây ít nhất vài tháng mới xuất hiện trong các cơ sở dữ liệu. Hạn chế tiếp theo là việc khảo sát chủ yếu được thực hiện thông qua các kênh thông tin phổ biến, rộng rãi, nên có thể bỏ sót các công nghệ đang được áp dụng ở một số đơn vị, mà do bảo mật thông tin hoặc chỉ đơn thuần là do chưa chú trọng đến việc truyền thông, nên chưa được phổ biến rộng rãi.

Tuy nhiên, nghiên cứu này cũng đã cung cấp bức tranh tổng quát về các công nghệ số xây dựng 4.0 trên thế giới và cả tình hình áp dụng tại Việt Nam, từ đó những người làm nghề hiểu được thực tế và khả năng ứng dụng các công nghệ số này, làm căn cứ xây dựng lộ trình áp dụng cho đơn vị mình. Mô hình kỹ thuật số công trình, bao gồm cả nhà cửa và cơ sở hạ tầng kỹ thuật, sẽ là nền tảng cơ bản để phát triển mô hình số cho đô thị, từ đó hỗ trợ phát triển các đô thị thông minh. Theo xu hướng phát triển này, mô hình kỹ thuật số cần tích hợp công nghệ thông tin và truyền thông (ICT), và các thiết bị vật lý khác nhau được kết nối với mạng IoT để tối ưu hóa hiệu quả của các hoạt động và dịch vụ của thành phố và kết nối với người dân, từ đó nâng cao chất lượng cuộc sống, cải thiện chất lượng phục vụ của chính quyền thành phố, giảm tiêu thụ năng lượng, quản lý hiệu quả các nguồn tài nguyên thiên nhiên. Thủ tướng Chính phủ đã phê duyệt Đề án phát triển đô thị thông minh bền vững Việt Nam giai đoạn 2018 - 2025 và định hướng đến năm 2030, đó là cơ sở để nhiều địa phương nắm bắt thời cơ, ban hành các đề án, kế hoạch, đã và đang triển khai chương trình phát triển đô thị thông minh cho địa phương mình.

Về các hướng nghiên cứu tiếp theo, để có thể đảm bảo sự phát triển của ngành xây dựng trong cách mạng công nghiệp 4.0 tích hợp được các xu thế khác như phát triển bền vững, các nhà khoa học trên thế giới và cả Việt Nam cần chú trọng phát triển, cải tiến các công nghệ cho phép ứng dụng kinh tế tuần hoàn trong ngành xây dựng. Các nền tảng pháp lý cho các công nghệ này phát triển, bao gồm nhưng không giới hạn bởi môi trường pháp lý phù hợp,

cũng như các công nghệ số phục vụ các mối quan hệ về mặt pháp luật, như hợp đồng thông minh, cần được ưu tiên phát triển.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số 64.2021.KHXD-TD.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Ban chỉ đạo BIM - Bộ xây dựng (2021), *Hội thảo trực tuyến - Giao lưu khoa học Công nghệ BIM trong lĩnh vực nhà tiền chế tại Việt Nam và Nhật Bản*, Online, truy cập ngày 5 tháng 8 năm 2021, tại trang <http://bim.gov.vn/>
2. BCA (2016), BIM for DfMA (Design for Manufacturing and Assembly) Essential Guide, Building and Construction Authority (BCA) Singapore, Singapore.
3. Bộ trưởng Bộ Xây dựng (2020), Quyết định số 1004/QĐ-BXD ngày 31/07/2020 Về việc Phê duyệt "Kế hoạch Chuyển đổi số ngành Xây dựng giai đoạn 2020-2025, định hướng đến năm 2030", 1004/QĐ-BXD, Bộ Xây dựng, online.
4. Chi Phong (2020), *Chip theo dõi tình trạng công trình xây dựng*, Tạp chí Giáo dục và Thời đại điện tử, Online, truy cập ngày 6 tháng 7 năm 2021, tại trang web <https://giaoducthoidai.vn/khoa-hoc/chip-theo-doi-tinh-trang-cong-trinh-xay-dung-az9XhMhGR.html>.
5. Công ty TNHH TBCN Anh Ninh Cộng Lực (2018), *Camera Cộng lực hợp tác cùng Tập đoàn CK4 lắp đặt camera giám sát tại công trường xây dựng nút giao Nam Cầu Bình*, truy cập ngày 16 tháng 6 năm 2021, tại trang web <http://camerahaiphong.net/t/lap-camera-giam-sat-cong-truong-du-an-dau-tu-xay-dung-nut-giao-nam-cau-binh-526>.
6. Correa, FR (2020), Integrating Industry 4.0 Associated Technologies into Automated and Traditional Construction, *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, IAARC Publications, tr. 285-292.
7. Dallasega, Patrick, Rauch, Erwin và Linder, Christian (2018), "Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: A systematic literature review", *Computers in industry*, 99, tr. 205-225.
8. Dang Kiva (2015), *Ứng dụng công nghệ Hologram vào trình diễn dự án tại Việt Nam*, REIC, Online, truy cập ngày 8 tháng 8 năm 2021, tại trang web <https://www.reic.vn/cong-nghe/635/ung-dung-cong-nghe-hologram-vao-trinh-dien-du-an-tai-viet-nam.html>.
9. Đào Ngọc Quý (2016), *Hapulico: Nâng cao năng suất chất lượng bằng công nghệ GIS và GSM/GPRS*, Hapulico, Online, truy cập ngày 8 tháng 8 năm 2021, tại trang web <http://hapulico.com/hapulico-nang-cao-nang-suat-chat-luong-bang-cong-nghe-gis-va-gsmgprs.html>.
10. Dao, Quoc Viet và Nguyen, The-Quan (2021), "A Case Study of BIM Application in a Public Construction Project Management Unit in Vietnam: Lessons Learned and Organizational Changes", *Engineering Journal*, 25(7), tr. 177-192.
11. Dao, Thuy-Ninh, Nguyen, The-Quan và Chen, Po-Han (2020), "BIM Adoption in Construction Projects Funded with State-managed Capital in Vietnam: Legal Issues and Proposed Solutions", *CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure*, Springer, tr. 1211-1216.
12. Gerbert, Philipp và các cộng sự. (2016), "Digital in Engineering and Construction: The Transformative Power of Building Information Modeling", *The Boston Consulting Group* <http://futureofconstruction.org/content/uploads/2016/09/BCG-Digital-in-Engineering-and-Construction-Mar-2016.pdf>.
13. Hilfert, Thomas và König, Markus (2016), "Low-cost virtual reality environment for engineering and construction", *Visualization in Engineering*, 4(1), tr. 1-18.
14. Hjelseth, Eilif (2017), "BIM understanding and activities", *WIT Transactions on The Built Environment*, 169, tr. 3-14.
15. Hossain, Md Aslam và Nadeem, Abid (2019), Towards digitizing the construction industry: State of the art of construction 4.0, *Proceedings of the ISEC*.
16. ILO (2018), *Cách mạng công nghiệp 4.0 tại Việt Nam: hàm ý đối với thị trường lao động*, Online.
17. Kang, Tae Wook và Hong, Chang Hee (2015), "A study on software architecture for effective BIM/GIS-based facility management data integration", *Automation in construction*, 54, tr. 25-38.
18. Khánh Trình (2019), *Ứng dụng công nghệ Blockchain cho đô thị thông minh*, Báo Nhân dân điện tử, Online, truy cập ngày 7 tháng 8 năm 2021, tại trang web <https://nhandan.vn/tin-chung/1/ung-dung-cong-nghe-blockchain-cho-do-thi-thong-minh-378018/>.

19. Laine, Risto và Ikonen, Jouni (2011), A construction plan image service for smart phones, *Proceedings of the 12th International Conference on Computer Systems and Technologies*, tr. 292-297.
20. Le, Thanh T và các cộng sự. (2012), "Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete", *Materials and structures*, 45(8), tr. 1221-1232.
21. Lin, Yu-Cheng (2008), "Enhancing facility management using RFID and web technology in construction", *Robotics and Automation in Construction*, tr. 199-210.
22. Lưu Trường Văn và Phan Văn Khoa (2010), "Sử dụng Matlab để huấn luyện mạng ANNs trong bài toán ước lượng chi phí xây dựng chung cư", *Tạp chí Kỹ thuật và Công nghệ - Trường Đại học Mở TP.HCM* 5(1), tr. 57-63.
23. Mai Văn Sỹ, Trần Thị Hải Vân và Nguyễn Thị Mai Dung (2019), *Công nghệ "Thành phố ảo" trong quy hoạch và quản lý đô thị tại Việt Nam*, Viện quy hoạch xây dựng Hà Nội, Online, truy cập ngày 8 tháng 8 năm 2021, tại trang web <http://vqh.hanoi.gov.vn/index.php?language=vi&nv=news&op=tin-lien-ket/Cong-nghe-Thanh-pho-ao-trong-quy-hoach-va-quan-ly-do-thi-tai-Viet-Nam-1086.html>.
24. Nguyen, Bao Ngoc và các cộng sự. (2018), The content of BIM short courses in Vietnam: current approaches and recommendations, *42nd AUBEA conference 2018, Educating building professional for the future of the globalised world*, tr. 261-273.
25. Nguyễn Mạnh Tuấn (2018), "Ứng dụng Dynamo cho dự án BIM trong giai đoạn thiết kế ý tưởng", *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD)-ĐHXD*, 12(1), tr. 71-76.
26. Nguyen, The-Quan, Dau-Thi, Nguyet-Anh và Dao, Thuy-Ninh (2020), "Human resources for BIM jobs in the AEC industry in Vietnam: an investigation on job positions and requirements", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 945, tr. 012037.
27. Nguyen, The-Quan, Luu, Quang-Phuong và Ngo, Van-Yen (2020), "Application of BIM in design conflict detection: a case study of Vietnam", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 869, tr. 022038.
28. Nguyen, The-Quan và Nguyen, Dinh-Phong (2021), "Barriers in BIM Adoption and the Legal Considerations in Vietnam", *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 12(1), tr. 283-295.
29. Nguyen, Thu Anh, Nguyen, Phong Thanh và Do, Sy Tien (2020), "Application of BIM and 3D laser scanning for quantity management in construction projects", *Advances in Civil Engineering*, 2020.
30. Nguyễn Việt Hùng và các cộng sự. (2015), *Nghiên cứu xây dựng lộ trình áp dụng Mô hình thông tin công trình (BIM) nhằm nâng cao hiệu quả thiết kế, xây dựng và quản lý công trình tại Việt Nam (RD 03-14)*, Viện Kinh tế, Bộ Xây dựng, Hà Nội.
31. Nguyễn Viết Nghĩa (2020), "Ứng dụng công nghệ quét laser mặt đất để xây dựng mô hình 3D cho thiết bị công nghệ nhà máy nhiệt điện Cẩm Phả", *Tạp chí Công nghiệp* mô. 1(5/2020), tr. 69-71.
32. Oesterreich, Thuy Duong và Teuteberg, Frank (2016), "Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry", *Computers in industry*, 83, tr. 121-139.
33. Perrier, Nathalie và các cộng sự. (2020), "Construction 4.0: A survey of research trends", *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 25(24), tr. 416-437.
34. Tezel, BA và Aziz, ZUH (2017), "From conventional to IT based visual management: a conceptual discussion for lean construction", *Journal of information technology in construction*, 22, tr. 220-246.
35. ThinkSmart (2021), *Số hóa hệ thống cầu đường sắt Việt Nam bằng máy quét 3D KSCAN-MAGIC*, Online, truy cập ngày 6 tháng 7 năm 2021, tại trang web <https://thinksmart.com.vn/ung-dung-may-quet-3d-trong-kiem-tra-cau-duong-sat/>.
36. Trần Anh Bình (2019), *Báo cáo đề tài cấp Bộ Xây dựng "Nghiên cứu và đề xuất mô hình quản lý vận hành hệ thống cơ - điện sử dụng công nghệ BIM kết hợp với AR (Augmented Reality)"*, Đại học Xây dựng, Hà Nội.
37. Trần Đức Học và các cộng sự. (2018), "Ứng dụng trí tuệ nhân tạo để dự đoán tiến độ thi công nhà lắp ghép", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Đà Nẵng*, tr. 41-44.
38. Trần Viết Tuấn và Diêm Công Huy (2013), "Nghiên cứu ứng dụng công nghệ GPS trong bố trí thi công xây dựng nhà siêu cao tầng", *Khoa học kỹ thuật xây dựng*, 1 (2013), tr. 33-37.
39. Tscherkassky-Aleksici, M (2018), "Internet of Things for Facility Management", *Journal for Facility Management*, 1(16).
40. Viện quản lý đầu tư xây dựng (2021), *Hồ sơ năng lực đơn vị*.
41. Woodhead, Roy, Stephenson, Paul và Morrey, Denise (2018), "Digital construction: From point solutions to IoT ecosystem", *Automation in Construction*, 93, tr. 35-46.