

ỨNG DỤNG DIGITAL TWIN TRONG QUẢN LÝ HỆ THỐNG HẠ TẦNG KỸ THUẬT ĐÔ THỊ

APPLICATION OF DIGITAL TWIN IN THE MANAGEMENT OF URBAN TECHNICAL
INFRASTRUCTURE SYSTEMS

Nguyễn Minh Nhất - Viện Đào tạo và Hợp tác quốc tế, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội, TP. Hà Nội.
Email: nhatnm@hau.edu.vn; ĐT: 0988281866

Tóm tắt: Digital Twin được xem là công cụ chủ chốt trong quản lý hệ thống hạ tầng kỹ thuật đô thị. Mô hình số động này phản ánh trạng thái vận hành theo thời gian thực, đồng thời hỗ trợ phân tích và dự báo để nâng cao hiệu quả quản lý. Nghiên cứu làm rõ cơ sở lý thuyết cùng các nguyên tắc dữ liệu cốt lõi, đồng thời phân tích ứng dụng trong năm lĩnh vực trọng yếu của hạ tầng kỹ thuật đô thị: giao thông, cấp thoát nước, hạ tầng ngầm, năng lượng và quản lý tích hợp đa hạ tầng. Kết quả cho thấy Digital Twin giúp giám sát liên tục, giảm rủi ro sự cố, tối ưu bảo trì, cải thiện điều phối liên ngành và tạo cơ sở đánh giá hiệu quả vận hành. Phân tích chỉ ra các thách thức về dữ liệu, an ninh, nguồn lực và thể chế. Từ đó, nghiên cứu đề xuất giải pháp chuẩn hóa, bảo mật, đầu tư theo lộ trình và phát triển nhân lực nhằm bảo đảm triển khai bền vững trong đô thị Việt Nam.

Từ khóa: Digital Twin; Hạ tầng kỹ thuật đô thị; Quản lý đô thị; Chuẩn dữ liệu; Ứng dụng công nghệ

Abstract: Digital Twin is regarded as a key tool in the management of urban technical infrastructure systems. This dynamic digital model reflects real-time operational states while supporting analysis and forecasting to enhance management effectiveness. The study clarifies theoretical foundations and core data principles, and examines applications in five critical domains of urban technical infrastructure: transportation, water supply and drainage, underground facilities, energy, and integrated multi-infrastructure management. Findings indicate that Digital Twin enables continuous monitoring, reduces operational risks, optimizes maintenance, improves inter-sectoral coordination, and provides a basis for performance evaluation. The analysis also identifies major challenges related to data, security, resources, and institutional frameworks. Accordingly, the study proposes solutions for standardization, data protection, phased investment, and capacity building to ensure sustainable implementation in Vietnamese cities.

Keywords: Digital Twin; Urban technical infrastructure; Urban management; Data standards; Technology application

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây, sự quan tâm đến mô hình số song hành với thực thể vật lý đã gia tăng rõ rệt trong lĩnh vực quản lý hạ tầng đô thị. Khái niệm Digital Twin được tiếp cận như một hệ thống phản ánh liên tục trạng thái của tài sản và hạ tầng trên môi trường số, cho phép giám sát, phân tích và dự báo ở mức chính xác cao [3]. Khi mở rộng lên cấp độ đô thị, Urban Digital Twin trở thành công cụ quan trọng hỗ trợ việc điều hành, vận hành và duy trì sự ổn định của hệ thống hạ tầng kỹ thuật phức tạp [10].

Nhiều công trình nghiên cứu đã cho thấy tiềm năng ứng dụng Digital Twin trong các miền hạ tầng khác nhau. Trong lĩnh vực giao thông, các nghiên cứu đã khai thác Digital Twin để mô phỏng và điều chỉnh luồng phương tiện nhằm nâng cao an toàn và giảm tắc nghẽn [1]. Ở hệ thống cấp và thoát nước, công nghệ này giúp phát hiện sớm sự cố và tối ưu bảo trì dự phòng [21]. Tương tự, các nghiên cứu trong lĩnh vực năng lượng khẳng định khả năng

của Digital Twin trong việc giám sát lưới điện và tích hợp nguồn năng lượng tái tạo [12]. Những bằng chứng này cho thấy Digital Twin không chỉ dừng lại ở mức công cụ mô phỏng mà còn tham gia trực tiếp vào chu trình quản lý vận hành hạ tầng.

Bên cạnh các triển khai thực tiễn, nhiều nỗ lực xây dựng khung nguyên tắc và chuẩn dữ liệu đã được công bố nhằm đảm bảo tính đồng bộ của hệ thống. Gemini Principles nhấn mạnh đến lợi ích công, tính minh bạch và giá trị dữ liệu trong quá trình phát triển Digital Twin [4]. Các nghiên cứu sau này mở rộng thành Information Management Framework với mục tiêu tạo môi trường liên vận hành an toàn và hiệu quả. Sự gắn kết giữa nguyên tắc và ứng dụng thực tiễn cho thấy Digital Twin đã chuyển từ giai đoạn ý niệm sang giai đoạn hình thành hệ sinh thái chuẩn hóa.

Tuy nhiên, thực tế chỉ ra rằng việc áp dụng Digital Twin trong đô thị vẫn còn nhiều hạn chế. Sự phân mảnh dữ liệu, thiếu chuẩn trao đổi thông tin và vấn đề bảo mật là những trở ngại lớn cần

giải quyết để có thể triển khai trên diện rộng [9]. Báo cáo của [19] cũng cho thấy các thành phố tiên phong triển khai Digital Twin phải đối diện với yêu cầu chi phí đầu tư lớn và năng lực nhân lực chuyên môn cao. Ngoài ra, các nghiên cứu nhấn mạnh đến việc thiếu khung pháp lý và chính sách đồng bộ, điều này hạn chế khả năng ứng dụng Digital Twin trong quản lý đô thị bền vững.

Từ những luận cứ trên, vấn đề trọng tâm không chỉ dừng lại ở việc định nghĩa và mô tả Digital Twin mà còn là phân tích cách công nghệ này đang được triển khai để nâng cao hiệu quả quản lý hệ thống hạ tầng kỹ thuật đô thị. Bài viết hướng tới việc tổng hợp và phân loại các ứng dụng thực tế, chỉ ra nguyên tắc dữ liệu liên quan, đồng thời làm rõ thách thức và định hướng giải pháp trong quá trình đưa Digital Twin vào hoạt động quản lý đô thị hiện đại.

2. Cơ sở lý thuyết về Digital Twin

2.1. Khái niệm về Digital Twin

Digital Twin được hiểu là một mô hình số động, phản ánh trung thực trạng thái của một thực thể vật lý trong suốt vòng đời của nó, với sự kết nối hai chiều giữa thế giới thực và bản sao số [3]. Digital Twin không chỉ dừng lại ở chức năng mô phỏng, mà còn cho phép theo dõi, phân tích và dự báo nhằm hỗ trợ quá trình quản lý và ra quyết định. Như vậy, khác với các mô hình số tĩnh, Digital Twin có khả năng phản hồi động, đảm bảo rằng mọi biến đổi trong thực thể vật lý được phản ánh tức thì trong mô hình số và ngược lại, các kết quả phân tích từ

mô hình có thể tác động trở lại hoạt động quản lý.

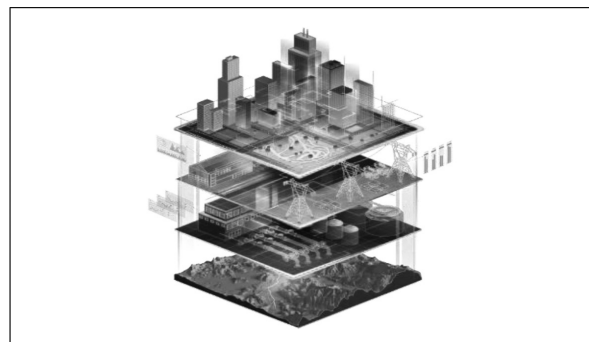
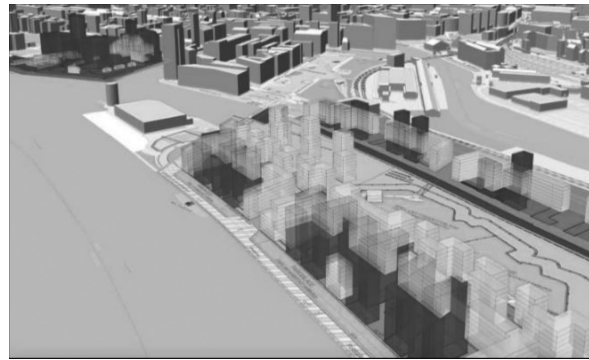
Trong nghiên cứu về hạ tầng kỹ thuật, Digital Twin thường được phân chia thành hai loại chính. Asset twin tập trung vào từng thành phần riêng lẻ như cầu, đường ống hay trạm bơm, trong khi system twin phản ánh toàn bộ hệ thống kỹ thuật như mạng lưới giao thông hoặc cấp nước [12]. Phân loại này cho phép các nhà quản lý lựa chọn quy mô và phạm vi ứng dụng phù hợp với mục tiêu vận hành.

Một đặc điểm quan trọng khác của Digital Twin là vòng đời dữ liệu. Vòng đời này bao gồm các giai đoạn thu thập dữ liệu, xử lý và tích hợp, xây dựng mô hình, phân tích, ứng dụng trong quản lý và liên tục cập nhật. Sự quản lý hiệu quả toàn bộ vòng đời dữ liệu là điều kiện cốt lõi để Digital Twin trở thành công cụ hữu ích trong quản lý hạ tầng.

Để đảm bảo tính liên thông và khả năng ứng dụng, nhiều chuẩn dữ liệu quốc tế đã được sử dụng khi triển khai Digital Twin. CityGML 3.0 cho phép mô tả hình học và ngữ nghĩa của các đối tượng đô thị ba chiều, giúp kết nối thông tin không gian với thông tin vận hành. Chuẩn IFC (ISO 16739) được áp dụng rộng rãi trong quản lý thông tin công trình và hạ tầng dân dụng, góp phần bảo đảm khả năng trao đổi và tích hợp dữ liệu. Các chuẩn này tạo nền tảng để Digital Twin vận hành hiệu quả trong môi trường quản lý hạ tầng kỹ thuật đô thị.

2.2. Khung nguyên tắc

Việc triển khai Digital Twin trong quản lý hạ tầng kỹ thuật đô thị không chỉ đòi hỏi nền tảng công



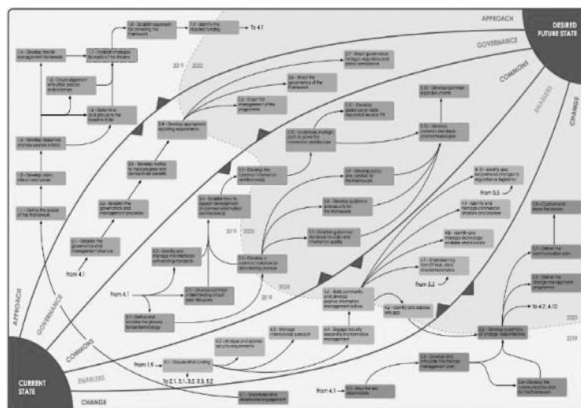
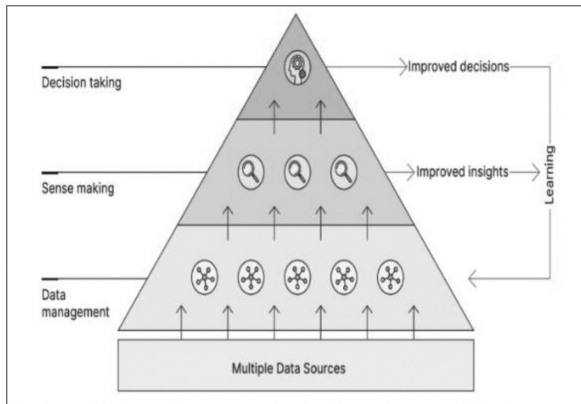
Hình 1. Mô hình nhiều lớp của Digital Twin [13]

nghệ mà còn cần những nguyên tắc định hướng để bảo đảm hệ thống vận hành minh bạch, an toàn và có giá trị thực tiễn. Các nguyên tắc này được hình thành qua hai khung cơ bản đã được công bố và áp dụng rộng rãi, gồm Gemini Principles và Information Management Framework (IMF)

- Gemini Principles: do Centre for Digital Built Britain công bố năm 2018, gồm ba trụ cột chính với mười nguyên tắc cốt lõi [4]:

- Vì lợi ích công: bảo đảm mọi Digital Twin hướng tới phục vụ cộng đồng, đóng góp vào phát triển bền vững.
- Tạo ra giá trị: tối ưu hiệu quả vận hành, nâng cao năng suất và giảm chi phí quản lý hạ tầng.
- Bảo đảm lòng tin: duy trì an toàn dữ liệu, quyền riêng tư và trách nhiệm giải trình.

Các trụ cột trên được cụ thể hóa thành mười nguyên tắc về mục tiêu, chức năng và tính bền vững, đóng vai trò nền tảng cho việc thiết kế và triển khai Digital Twin.



Hình 2. Khung nguyên tắc Gemini Principles và Information Management Framework [6]

- Information Management Framework (IMF): được phát triển dựa trên Gemini Principles, nhằm tạo “ngôn ngữ chung” cho việc quản lý và chia sẻ dữ liệu giữa các hệ thống Digital Twin. IMF bao gồm ba thành phần chính:

- Ontology: thống nhất ngữ nghĩa và khái niệm

để tránh mâu thuẫn trong trao đổi dữ liệu.

- Tiêu chuẩn trao đổi dữ liệu: bảo đảm tính liên vận hành giữa các hệ thống và phần mềm khác nhau.

- Giao thức quản lý dữ liệu: xác định trách nhiệm, quyền truy cập và cơ chế bảo mật thông tin.

Nghiên cứu chỉ ra rằng IMF đặc biệt cần thiết trong lĩnh vực hạ tầng kỹ thuật, nơi dữ liệu thường đa dạng về nguồn gốc và định dạng. Các biến thể như IMF-environment đã được đề xuất để tập trung vào dữ liệu môi trường và biến đổi khí hậu, bổ sung thêm chiều cạnh quản lý bền vững.

Việc áp dụng Gemini Principles và IMF không chỉ mang ý nghĩa kỹ thuật mà còn tạo cơ sở cho chính sách và thể chế quản lý, giúp Digital Twin có thể triển khai đồng bộ trong quản lý hạ tầng kỹ thuật đô thị.

3. Phương pháp nghiên cứu

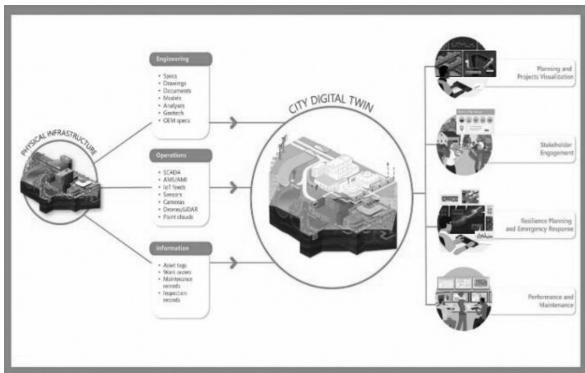
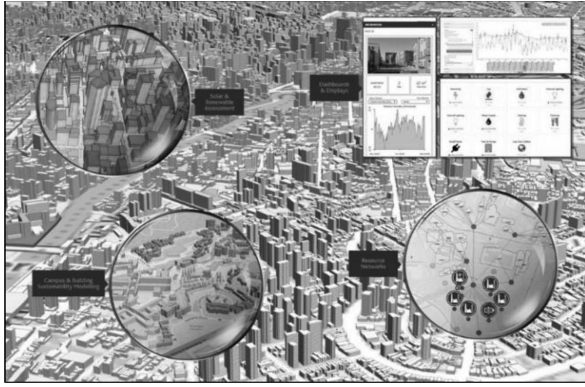
Bài viết tiến hành tổng hợp tài liệu từ các công trình khoa học đã công bố trên các tạp chí quốc tế và các báo cáo chính sách liên quan đến Digital Twin. Các nghiên cứu gần đây cho thấy sự phát triển mạnh của Digital Twin trong nhiều lĩnh vực hạ tầng và đã cung cấp nguồn bằng chứng đa dạng để phân tích. Các nghiên cứu trong nước cũng đã bước đầu tiếp cận chủ đề này góp phần bổ sung bối cảnh ứng dụng tại Việt Nam. Đồng thời, các báo cáo chính sách và khung định hướng cũng được đưa vào nhằm bổ sung góc nhìn thể chế và quản lý.

Tiêu chí lựa chọn tài liệu tập trung vào giai đoạn từ 2018 đến 2025, với các bài nghiên cứu, báo cáo và văn bản pháp lý có liên quan trực tiếp đến ứng dụng Digital Twin trong hạ tầng kỹ thuật đô thị. Sau khi sàng lọc, các tài liệu được hệ thống hóa để nhận diện chủ đề trọng tâm. Các nhóm nội dung chính được hình thành bao gồm khái niệm và khung nguyên tắc, ứng dụng trong từng lĩnh vực hạ tầng (giao thông, nước, hạ tầng ngầm, năng lượng và quản lý tích hợp), cùng với thách thức và hàm ý chính sách. Việc phân tích so sánh giữa các công trình nghiên cứu, báo cáo chính sách và các nghiên cứu trong nước giúp hình thành bức tranh tổng thể về vai trò và ứng dụng của Digital Twin trong quản lý hạ tầng kỹ thuật đô thị.

4. Ứng dụng Digital Twin trong quản lý hạ tầng kỹ thuật đô thị (xem hình 3)

4.1. Giao thông đô thị

Ứng dụng Digital Twin trong giao thông đô thị tập trung vào việc số hóa mạng lưới đường bộ, nút giao và hệ thống tín hiệu nhằm phản ánh trạng thái vận hành theo thời gian thực. Mô hình số cho phép giám sát luồng phương tiện, tối ưu hóa hoạt động



Hình 3. Ứng dụng Digital Twin trong quản lý hạ tầng kỹ thuật đô thị [13]

điều khiển đèn tín hiệu, dự báo tình huống ùn tắc và hỗ trợ nâng cao an toàn giao thông [1; 21]. Khi tích hợp dữ liệu từ camera, cảm biến và hệ thống định vị, Digital Twin có thể mô phỏng nhiều kịch bản điều tiết giao thông, giúp cơ quan quản lý chủ động trong việc đưa ra giải pháp.

Nhiều đô thị đã triển khai thành công. Singapore phát triển Virtual Singapore, trong đó một hợp phần quan trọng là mô phỏng dòng phương tiện để đánh giá tác động của các chính sách giao thông. Thành phố Cambridge (Anh) áp dụng Digital Twin để điều chỉnh luồng phương tiện theo thời gian thực, qua đó giảm ùn tắc tại các nút giao trọng điểm. Cảng Rotterdam (Hà Lan) sử dụng Digital Twin để quản lý lưu lượng vận tải kết nối với đô thị, bảo đảm sự phối hợp hiệu quả giữa các loại hình giao thông. Các trường hợp này chứng minh tính khả thi của công nghệ trong quản lý hạ tầng giao thông đô thị ở nhiều quy mô khác nhau [19].

Tại Việt Nam, TP. Hồ Chí Minh đã công bố kế hoạch thí điểm ứng dụng Digital Twin trong quản lý giao thông thông minh. Hệ thống hướng đến mô phỏng mạng lưới đường bộ đô thị, tối ưu hóa vận hành đèn tín hiệu và dự báo tình trạng ùn tắc tại các tuyến trọng điểm. Đây là bước đi đầu tiên trong việc đưa công nghệ Digital Twin vào quản lý hạ tầng giao thông đô thị, tạo tiền đề để nhân rộng sang các đô thị lớn khác trong tương lai.

4.2. Cấp nước và thoát nước đô thị

Digital Twin trong lĩnh vực cấp nước và thoát nước đô thị cho phép xây dựng mô hình số động của toàn bộ mạng lưới đường ống, trạm bơm và hệ thống xử lý. Ứng dụng này giúp theo dõi áp lực, lưu lượng, chất lượng nước và tình trạng vận hành theo thời gian thực. Khi kết hợp với dữ liệu cảm biến IoT và hệ thống giám sát từ xa, Digital Twin có khả năng phát hiện rò rỉ, dự báo sự cố, hỗ trợ lập kế hoạch bảo trì dự phòng và tối ưu hóa việc vận hành các trạm bơm [2]. Trong quản lý thoát nước, công nghệ này tạo điều kiện mô phỏng dòng chảy mưa, dự báo ngập úng và hỗ trợ đưa ra giải pháp điều tiết kịp thời.

Nhiều thành phố trên thế giới đã triển khai Digital Twin cho lĩnh vực này. London xây dựng hệ thống mô hình số để giám sát mạng lưới thoát nước, từ đó giảm thiểu rủi ro ngập khi mưa lớn. Singapore áp dụng Digital Twin để quản lý đồng bộ cả hệ thống cấp và thoát nước, cho phép dự báo sự cố và điều chỉnh kế hoạch vận hành tối ưu. Tại Nhật Bản, Chính phủ đã đưa ứng dụng Digital Twin vào quản lý hạ tầng nước đô thị như một cấu phần trong lộ trình phát triển đô thị thông minh [7]. Những minh chứng này khẳng định vai trò của Digital Twin trong việc bảo đảm an toàn và bền vững cho hệ thống cấp thoát nước đô thị.

Tại Việt Nam, tình trạng ngập úng tại Hà Nội và TP. Hồ Chí Minh đặt ra nhu cầu cấp bách phải

có công cụ quản lý tiên tiến. Hiện nay, các dự án thoát nước chủ yếu dừng ở mức mô hình thủy lực và số hóa bản đồ ngập, ví dụ dự án cải tạo hệ thống thoát nước Hà Nội giai đoạn II hay Trung tâm điều hành chống ngập tại TP.HCM. Tuy chưa có hệ thống Digital Twin chính thức cho cấp thoát nước, nhưng việc kết hợp dữ liệu cảm biến và mô hình số hoàn toàn có thể kế thừa kinh nghiệm từ các đô thị như Singapore và Tokyo để triển khai trong tương lai gần.

4.3. Hạ tầng ngầm và hành lang kỹ thuật

Hạ tầng ngầm là một trong những cấu phần phức tạp nhất của hệ thống hạ tầng kỹ thuật đô thị. Khác với hạ tầng trên mặt đất có thể quan sát trực tiếp, các công trình ngầm thường nằm chông chéo, đa dạng về chức năng và do nhiều đơn vị quản lý. Chính vì vậy, việc ứng dụng Digital Twin trước hết giúp giải quyết vấn đề minh bạch hóa dữ liệu. Mỗi đường ống cấp nước, tuyến cáp điện hay tuynel kỹ thuật khi được số hóa trong mô hình Digital Twin sẽ được định vị chính xác, thể hiện các thông số hình học và tình trạng vận hành. Điều này giúp giảm thiểu rủi ro trong thi công đào mở, vốn là nguyên nhân thường gặp gây ra sự cố hạ tầng tại các thành phố lớn [5].

Ứng dụng tiếp theo là khả năng giám sát và cảnh báo sự cố. Với việc tích hợp cảm biến, mô hình Digital Twin có thể phát hiện sự thay đổi áp lực trong đường ống, rung chấn bất thường tại tuynel, hay nguy cơ quá tải trong hệ thống cáp điện. Các cảnh báo này không chỉ hỗ trợ xử lý kịp thời mà còn tạo cơ sở để triển khai bảo trì dự phòng thay vì sửa chữa thụ động. Trong dài hạn, đây chính là công cụ chuyển đổi quản lý hạ tầng ngầm từ “phản ứng” sang “chủ động”.

Ở các đô thị tiên tiến, Digital Twin còn được khai thác để tối ưu hóa công tác quy hoạch và phối hợp liên ngành. Singapore đã xây dựng hệ thống mô hình ngầm tích hợp, cho phép các sở ngành tham chiếu cùng một cơ sở dữ liệu khi lập kế hoạch phát triển. Nhờ đó, xung đột kỹ thuật trong quá trình cấp phép và thi công được giảm thiểu đáng kể, tiết kiệm cả thời gian và chi phí. Nhật Bản cũng coi quản lý hạ tầng ngầm bằng Digital Twin là một ưu tiên trong lộ trình phát triển thành phố thông minh, nhất là để đối phó với rủi ro động đất và thiên tai [7].

Tại Việt Nam, tình trạng chông chéo hạ tầng ngầm tại Hà Nội hay TP.HCM đã được nhiều lần chỉ ra. Các tuyến cáp nước, thoát nước, điện lực và viễn thông thường thiếu sự phối hợp đồng bộ, dẫn đến việc cùng một đoạn đường phải đào nhiều lần, gây lãng phí và mất an toàn. Gần đây, một số

địa phương đã bước đầu xây dựng bản đồ số 3D và cơ sở dữ liệu GIS về hạ tầng ngầm. Tuy vậy, các mô hình này vẫn chủ yếu là tĩnh, chưa tích hợp dữ liệu thời gian thực để trở thành Digital Twin đúng nghĩa. Việc ứng dụng Digital Twin nếu được triển khai sẽ không chỉ hỗ trợ quản lý hiệu quả hơn mà còn góp phần nâng cao năng lực điều phối giữa các ngành, đồng thời giảm thiểu sự cố trong thi công đô thị.

4.4. Năng lượng và tiện ích đô thị

Digital Twin trong năng lượng và tiện ích đô thị được ứng dụng để tái hiện mô hình số động của hệ thống điện, trạm biến áp, mạng phân phối và chiếu sáng công cộng. Mô hình này kết nối dữ liệu vận hành từ thiết bị đo đếm và cảm biến hiện trường, cho phép giám sát trạng thái theo thời gian thực, dự báo phụ tải và mô phỏng các kịch bản sự cố. Khả năng phản ánh tức thời của Digital Twin giúp nhà quản lý giảm thời gian khôi phục khi xảy ra gián đoạn, đồng thời tối ưu hóa hoạt động bảo trì dự báo, thay thế phương thức sửa chữa bị động truyền thống.

Một ứng dụng quan trọng khác là hỗ trợ tích hợp nguồn năng lượng phân tán và năng lượng tái tạo vào lưới điện đô thị. Digital Twin cho phép mô phỏng khả năng tiếp nhận điện mặt trời áp mái, điện gió và hệ thống lưu trữ, từ đó đề xuất kịch bản điều độ tối ưu và cân bằng phụ tải. Khi kết hợp với hệ thống quản lý nhu cầu, mô hình số cũng giúp điều chỉnh hành vi tiêu thụ điện, góp phần giảm áp lực phụ tải đỉnh và nâng cao tính ổn định toàn hệ thống [19].

Đối với tiện ích công cộng, Digital Twin hỗ trợ giám sát và điều hành mạng lưới chiếu sáng đô thị. Thông tin về trạng thái thiết bị, thời gian hoạt động và điều kiện môi trường được tích hợp để điều chỉnh cường độ ánh sáng, phát hiện hỏng hóc sớm và tối ưu hóa chi phí vận hành. Trong các hệ thống làm mát hoặc sưởi khu vực, việc áp dụng Digital Twin giúp cân bằng cung cầu theo thời gian, giảm tiêu thụ năng lượng và lượng phát thải. Các báo cáo quốc tế nhấn mạnh rằng việc đồng bộ hóa quản lý các tiện ích thông qua mô hình số đóng góp quan trọng cho mục tiêu giảm phát thải carbon của đô thị [15].

Để bảo đảm các ứng dụng này triển khai bền vững, cần đến một nền tảng dữ liệu thống nhất và khung nguyên tắc rõ ràng. Gemini Principles và Information Management Framework đưa ra chuẩn mực về lợi ích công, minh bạch dữ liệu và khả năng liên thông, giúp các đơn vị điện lực và quản lý tiện ích chia sẻ thông tin mà vẫn bảo đảm an toàn và quyền riêng tư [5]. Bên cạnh đó, việc đánh giá hiệu

quả cần dựa trên bộ chỉ số định lượng về độ tin cậy cung cấp, hiệu quả năng lượng và tác động môi trường. Khi các chỉ số này được theo dõi trực tiếp trên nền Digital Twin, cơ quan quản lý có cơ sở rõ ràng để so sánh kịch bản và điều chỉnh chính sách.

4.5. Quản lý tích hợp đa hạ tầng

Một trong những triển vọng quan trọng nhất của Digital Twin trong đô thị là khả năng quản lý tích hợp nhiều hệ thống hạ tầng kỹ thuật trên cùng một nền tảng. Thay vì mỗi lĩnh vực giao thông, cấp nước, năng lượng hay hạ tầng ngầm được giám sát tách biệt, Digital Twin cho phép xây dựng mô hình số tổng thể kết nối các lớp dữ liệu khác nhau, phản ánh mối quan hệ liên ngành giữa các công trình và dịch vụ đô thị. Cách tiếp cận này giúp cơ quan quản lý có cái nhìn toàn diện hơn về vận hành đô thị, đồng thời tăng khả năng phối hợp trong xử lý sự cố và lập kế hoạch phát triển [5].

Ứng dụng quản lý tích hợp thể hiện rõ nhất trong các dự án Digital Twin đô thị quy mô lớn. Singapore với Virtual Singapore đã xây dựng mô hình ba chiều tích hợp nhiều lớp hạ tầng và dịch vụ, cho phép các bên liên quan sử dụng dữ liệu thống nhất trong phân tích và ra quyết định. Ở châu Âu, một số thành phố như Helsinki và Rotterdam đã phát triển Digital Twin để kết nối các lĩnh vực giao thông, năng lượng, môi trường và logistics, từ đó phục vụ điều hành liên thông và hoạch định chính sách giảm phát thải [19]. Những kinh nghiệm này cho thấy quản lý tích hợp đa hạ tầng bằng Digital Twin không chỉ tạo thuận lợi cho vận hành thường ngày mà còn là công cụ hỗ trợ mục tiêu phát triển bền vững ở cấp chiến lược.

Tại Việt Nam, hạ tầng kỹ thuật đô thị hiện đang chịu sự quản lý phân tán bởi nhiều cơ quan và doanh nghiệp chuyên ngành. Điều này dẫn đến tình trạng dữ liệu thiếu đồng bộ, gây khó khăn trong phối hợp xử lý sự cố hay lập quy hoạch tổng thể. Việc từng bước xây dựng Digital Twin cho quản lý đa hạ tầng sẽ tạo nền tảng kỹ thuật để kết nối các nguồn dữ liệu hiện có, giảm tình trạng phân mảnh và hỗ trợ điều hành dựa trên thông tin thống nhất. Dù chưa có mô hình tích hợp hoàn chỉnh, nhưng các động thái thí điểm trong giao thông thông minh hay số hóa hệ thống cấp thoát nước cho thấy tiềm năng để mở rộng sang hướng quản lý đồng bộ, phù hợp với xu thế quốc tế [21].

Khả năng tích hợp đa hạ tầng cũng đặt ra yêu cầu về chuẩn dữ liệu và khung nguyên tắc quản lý. Gemini Principles và Information Management Framework nhấn mạnh đến giá trị công, tính minh bạch và khả năng liên vận hành, là nền tảng để xây dựng một hệ sinh thái Digital Twin tích hợp.

Khi các đô thị áp dụng khung này, dữ liệu từ nhiều ngành khác nhau có thể liên kết an toàn, qua đó tạo nên một môi trường số đồng bộ phục vụ cả vận hành ngắn hạn và hoạch định dài hạn [4].

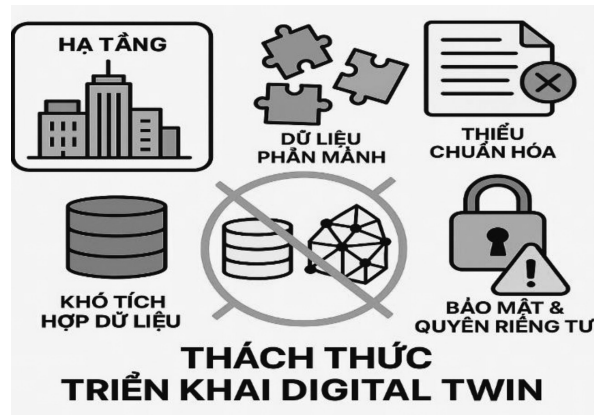
5. Thách thức triển khai và định hướng giải pháp

5.1. Thách thức

Mặc dù Digital Twin mang lại nhiều tiềm năng cho quản lý hạ tầng kỹ thuật đô thị, việc triển khai thực tế vẫn gặp phải một số thách thức lớn cần được nhận diện và xử lý kịp thời để bảo đảm tính khả thi và bền vững [12].

Dữ liệu về hạ tầng còn phân mảnh và thiếu chuẩn hóa. Các lĩnh vực giao thông, cấp thoát nước, điện lực hay viễn thông thường do các đơn vị khác nhau quản lý, sử dụng hệ thống thu thập và lưu trữ riêng biệt. Việc thiếu một chuẩn chung khiến khả năng tích hợp để xây dựng mô hình số tổng thể bị hạn chế, dẫn đến khó đạt được mức độ liên vận hành cần thiết.

Bên cạnh đó, vấn đề bảo mật và quyền riêng tư đặt ra nhiều rủi ro. Digital Twin đòi hỏi kết nối và xử lý khối lượng dữ liệu lớn theo thời gian thực, bao gồm cả thông tin liên quan đến công trình trọng yếu và hạ tầng thiết yếu. Nếu không có giải pháp bảo mật đầy đủ và cơ chế phân quyền rõ ràng, nguy cơ rò rỉ hoặc bị khai thác dữ liệu có thể ảnh hưởng đến an toàn và lòng tin của cộng đồng [14].



Hình 4. Thách thức triển khai Digital Twin trong quản lý hạ tầng kỹ thuật đô thị

Đặc biệt, chi phí triển khai và yêu cầu về nhân lực kỹ thuật còn là rào cản đáng kể. Để vận hành một hệ thống Digital Twin hiệu quả cần đầu tư hạ tầng cảm biến, năng lực xử lý dữ liệu, phần mềm mô phỏng và nguồn lực tài chính dài hạn. Đồng thời, nguồn nhân lực có hiểu biết liên ngành giữa kỹ thuật xây dựng, hạ tầng đô thị và công nghệ số ở nhiều quốc gia, trong đó có Việt Nam, vẫn còn thiếu hụt.

Cuối cùng, khung pháp lý và thể chế quản lý

chưa theo kịp sự phát triển của công nghệ. Nhiều quốc gia mới dừng lại ở các nguyên tắc định hướng như Gemini Principles hay Information Management Framework, trong khi việc ứng dụng đòi hỏi phải có quy định cụ thể về quyền sở hữu dữ liệu, trách nhiệm vận hành và cơ chế chia sẻ giữa các bên. Thiếu nền tảng pháp lý rõ ràng sẽ khiến các dự án Digital Twin khó duy trì và mở rộng trong dài hạn [19].

5.2. Định hướng giải pháp

Để Digital Twin trở thành công cụ hữu hiệu trong quản lý hệ thống hạ tầng kỹ thuật đô thị, các giải pháp cần được xây dựng theo hướng đồng bộ, vừa đáp ứng yêu cầu kỹ thuật vừa phù hợp với điều kiện quản lý. Trọng tâm không chỉ nằm ở việc ứng dụng công nghệ mà còn ở khâu tổ chức, thể chế và nguồn lực bảo đảm triển khai lâu dài.

Thứ nhất, cần phát triển hệ thống chuẩn dữ liệu liên vận hành. Việc áp dụng các khung nguyên tắc như Gemini Principles và Information Management Framework sẽ giúp các cơ quan và doanh nghiệp hạ tầng chia sẻ dữ liệu trên nền tảng chung, bảo đảm tính tương thích và thống nhất trong quản lý.

Thứ hai, phải tăng cường cơ chế bảo mật và bảo vệ quyền riêng tư. Các giải pháp kỹ thuật như phân lớp truy cập, mã hóa dữ liệu và kiểm toán an ninh cần được áp dụng, đồng thời hoàn thiện quy định pháp lý về quyền sở hữu và quyền khai thác dữ liệu. Đây là điều kiện tiên quyết để xây dựng lòng tin xã hội và khuyến khích các bên tham gia chia sẻ thông tin.

Thứ ba, việc triển khai Digital Twin đòi hỏi một lộ trình tài chính và nhân lực rõ ràng. Các dự án nên bắt đầu từ những hạ tầng trọng yếu hoặc khu vực ưu tiên, sau đó mở rộng theo từng giai đoạn khi dữ liệu và năng lực đã được củng cố. Song song, cần xây dựng chương trình đào tạo và hợp tác liên ngành để phát triển đội ngũ chuyên gia có khả năng kết hợp kiến thức kỹ thuật đô thị với công nghệ số.

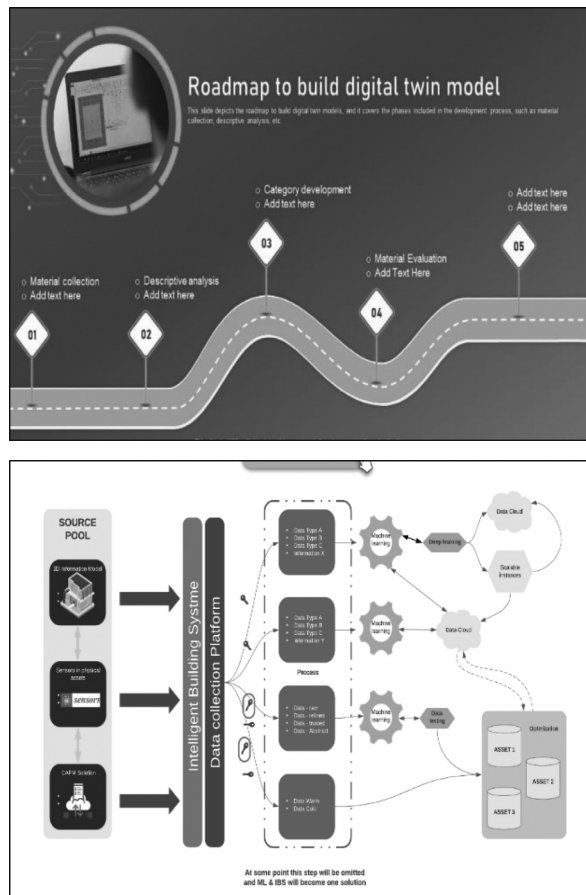
Cuối cùng, vai trò của chính sách và thể chế quản lý là không thể thiếu. Cần ban hành các quy định cụ thể về chia sẻ dữ liệu, phân định trách nhiệm và cơ chế giám sát, đồng thời lồng ghép định hướng Digital Twin vào chiến lược phát triển đô thị thông minh. Sự dẫn dắt từ phía cơ quan quản lý nhà nước sẽ bảo đảm cho các dự án Digital Twin được triển khai thống nhất, tránh phân tán nguồn lực và tạo hiệu quả lâu dài.

6. Kết luận

Digital Twin đang nổi lên như một công cụ quan trọng trong quản lý hệ thống hạ tầng kỹ thuật đô thị. Bằng việc xây dựng mô hình số động phản ánh trạng thái vận hành của các công trình và dịch vụ đô thị, công nghệ này không chỉ hỗ trợ giám sát thời gian thực mà còn mở rộng năng lực dự báo, mô phỏng và tối ưu hóa quản lý. Những ứng dụng trong giao thông, cấp thoát nước, hạ tầng ngầm, năng lượng và quản lý tích hợp đa hạ tầng cho thấy Digital Twin có khả năng tạo ra sự thay đổi căn bản trong cách tiếp cận quản lý đô thị.

Tuy vậy, để công nghệ này phát huy hiệu quả, cần giải quyết đồng thời các thách thức về dữ liệu, bảo mật, nguồn lực và thể chế quản lý. Kinh nghiệm quốc tế khẳng định vai trò của chuẩn dữ liệu, khung nguyên tắc minh bạch và cơ chế phối hợp liên ngành trong việc bảo đảm tính bền vững cho các mô hình Digital. Tại Việt Nam, các bước đi ban đầu như thí điểm trong giao thông hay số hóa hạ tầng thoát nước đã mở ra cơ hội để từng bước tiếp cận mô hình này, song vẫn cần chiến lược tổng thể và sự dẫn dắt chính sách rõ ràng.

Có thể khẳng định rằng Digital Twin không chỉ là công cụ kỹ thuật mà còn là nền tảng quản lý mới, góp phần nâng cao hiệu quả vận hành, tối ưu hóa sử dụng nguồn lực và hỗ trợ mục tiêu phát triển bền vững của đô thị. Việc sớm định hình lộ trình triển



Hình 5. Lộ trình và cấu trúc hệ thống dữ liệu trong triển khai Digital Twin [13]

khai và đồng bộ hóa các giải pháp sẽ quyết định khả năng nắm bắt cơ hội của các đô thị Việt Nam trong tiến trình chuyển đổi số và hội nhập quốc tế. □

Lời cảm ơn:

Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn các chuyên gia và đồng nghiệp đã đóng góp ý kiến quý báu trong quá trình hình thành và hoàn thiện nghiên cứu này. Chúng tôi cũng xin ghi nhận sự hỗ trợ nhiệt tình từ các đơn vị chuyên môn và cơ quan quản lý, những người đã tạo điều kiện thuận lợi cho việc thu thập số liệu và trao đổi học thuật.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Buuveibaatar, M., Shin, S., Lee, W. (2025). Digital Twin framework for road infrastructure management. *Applied Sciences*, 15(10): 5765. <https://doi.org/10.3390/app15105765>
- [2]. Chen, C., Lu, Y., Wu, B., Lu, L. (2025). Digital Twin-based and knowledge graph-enhanced emergency response in urban infrastructure construction. *Applied Sciences*, 15(11): 6009. <https://doi.org/10.3390/app15116009>
- [3]. Chen, L., Xie, X., Lu, Q., Parlikad, A.K., Pitt, M., Yang, J. (2021). Gemini Principles-based Digital Twin maturity model for asset management. *Sustainability*, 13(15): 8224. <https://doi.org/10.3390/su13158224>
- [4]. Centre for Digital Built Britain (CDBB) (2018). *The Gemini Principles: Guiding values for the National Digital Twin and Information Management Framework*. CDBB, Cambridge, UK.
- [5]. Diaz-Sarachaga, J.M. (2024). Developing an assessment governance framework for urban digital twins: Insights from smart cities. *Cities*, 156(5): 105558. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105558>
- [6]. Digital Twin Hub (2025). *Building better connections*. Digital Twin Hub. <https://digitaltwinhub.co.uk>
- [7]. Government of Japan Cabinet Office (2023). *Roadmap for Applications of Digital Twin Technology as a Smart City Reference (English)*. Government of Japan, Tokyo.
- [8]. Lê, Q.A., Nguyễn, T.B (2025). Research on application of Digital Twin for collecting data to manage building's energy. *Tạp chí Khoa học Giáo dục Kỹ thuật (Journal of Technical Education Science - JTE HCMUTE)*.
- [9]. Luo, J., Liu, P., Kong, X., Shen, J., Wu, Q., Xu, D. (2025). Urban digital twins for citizen-centric planning: A systematic review of built environment perception and public participation. *Observation and Geoinformation*, 250: 110380.
- [10]. Ngô, Q.T., Nguyễn, N.P., Đào, M.H. (2024). Tiềm năng ứng dụng bản sao kỹ thuật số – Digital Twin trong thi công xây dựng nhà nhiều tầng tại Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Kiến trúc & Xây dựng*.
- [11]. Nguyễn, T.V.H. (2023). Bản sao song sinh kỹ thuật số (Digital Twin) – Từ quy trình sản xuất công nghiệp đến quy hoạch, xây dựng và quản lý đô thị thông minh. *Tạp chí Kiến trúc*, số 04-2023.
- [12]. Omrany, H., Mehdi-pour, A., Oteng, D., Al-Obaidi, K.M. (2025). The uptake of urban digital twins in the built environment: A pathway to resilient and sustainable cities. *Computational Urban Science*, 5 : 20. <https://doi.org/10.1007/s43762-025-00177-x>
- [13]. Stradigi (2025). *Digital Twin*. Stradigi. <https://www.stradigimc.com/services/digital-twin/>
- [14]. Suffia, G. (2023). How to regulate a Digital Twin City? Insights from a Proactive Law approach. *Proceedings of the 24th Annual International Conference on Digital Government Research*, 122–128. <https://doi.org/10.1145/3598469.3598482>
- [15]. Tan, Y.R., Hofmeister, M., Phua, S.Z., Brownbridge, G., Rustagi, K., Akroyd, J., Mosbach, S., Bhavne, A., Kraft, M. (2025). Beyond connected digital twins – Can digital twins really deliver sustainable cities? *Sustainable Cities and Society*, 131: 106596. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106596>
- [16]. Tô, T.H.Q., Đinh, Đ.B., Trần, T.P.T. (2022). Ứng dụng bản sao số để quản lý đô thị Việt Nam: Thuận lợi và thách thức. *Tạp chí Xây dựng*.
- [17]. Trần, N.H.T., Lâm, H.C.T. (2024). Ứng dụng công nghệ song sinh số trong phát triển lưới điện thông minh – khảo sát cho lưới điện của Thành phố Hồ Chí Minh. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*.
- [18]. VarCities / IES & ISOCARP Institute (2024). *Policy Brief: Digital twins for greener, healthier cities*. VarCities, Brussels.
- [19]. World Economic Forum. (2022). *Digital Twin Cities: Framework and Global Practices*. WEF, Geneva.
- [20]. Zhu, M., Jin, J. (2025). Data-driven urban digital twins and critical infrastructure under climate change: A review of frameworks and applications. *Smart and Resilient Infrastructure in the Wake of Climate Change*, 10