

Phụ lục 2**KỊCH BẢN ĐIỂN HÌNH ỨNG DỤNG BẢN SAO SỐ ĐÔ THỊ
THAM KHẢO CHO CÁC ĐỊA PHƯƠNG**

(Kèm theo Công văn số /BKHCN-CDSQG ngày tháng năm 2026 của Bộ Khoa học và Công nghệ)

I. GIỚI THIỆU CHUNG

Phụ lục này giới thiệu hai kịch bản điển hình ứng dụng bản sao số đô thị (Urban Digital Twin, viết tắt là UDT) là quản lý giao thông đô thị và quản lý ngập lụt đô thị. Đây là hai bài toán phổ biến, cấp thiết ở hầu hết các đô thị Việt Nam và minh họa rõ nét đặc trưng cốt lõi của Bản sao số đô thị theo quy định tại Mục 3, 4 và 5 Phần III của Hướng dẫn kỹ thuật.

Mỗi kịch bản được trình bày theo cấu trúc thống nhất gồm năm phần: bối cảnh và mục tiêu; sơ đồ kiến trúc tổng thể theo 09 lớp tham chiếu kèm bảng mô tả vai trò từng lớp; sơ đồ quy trình vận hành gồm 09 bước khép kín theo 03 giai đoạn; sơ đồ luồng dữ liệu minh họa vòng lặp Twin hai chiều; và khuyến nghị triển khai cụ thể về quy mô, ngân sách, chỉ số đánh giá hiệu quả và các điều kiện an toàn khi đưa vào vận hành.

Các kịch bản trong Phụ lục này không mang tính bắt buộc sao chép. Các địa phương căn cứ loại đô thị theo Nghị quyết số 111/2025/UBTVQH15 (hiệu lực từ ngày 01 tháng 01 năm 2026, gồm bốn loại là loại đặc biệt, loại I, loại II và loại III), chức năng đô thị theo Nghị quyết số 06-NQ/TW và năng lực hiện trạng để điều chỉnh quy mô, danh mục cảm biến, danh mục mô hình phân tích, danh mục dịch vụ chuyên ngành và lộ trình triển khai cho phù hợp. Các đô thị khác như đô thị du lịch, đô thị di sản, đô thị cảng hoặc đô thị công nghiệp có thể phát triển thêm các kịch bản chuyên ngành dựa trên cùng khung 09 lớp và 05 cấp độ trưởng thành.

II. KỊCH BẢN 1. BẢN SAO SỐ ĐÔ THỊ QUẢN LÝ GIAO THÔNG ĐÔ THỊ**1. Bối cảnh và mục tiêu**

Ùn tắc giao thông, tai nạn và ô nhiễm khí thải là ba điểm nghẽn phổ biến nhất của đô thị Việt Nam, đặc biệt tại các đô thị loại đặc biệt và loại I. Mô hình quản lý truyền thống dựa trên camera giám sát kết hợp với cán bộ điều khiển thủ công không còn đáp ứng được tốc độ phát sinh sự cố cũng như yêu cầu tối ưu hoá đa mục tiêu của vận hành giao thông hiện đại. Bản sao số đô thị giao thông chuyển hệ thống từ trạng thái giám sát thụ động sang trạng thái điều hành chủ động, cho phép dự báo ùn tắc trước 05 đến 60 phút, tự tối ưu hoá chu kỳ đèn tín hiệu theo thời gian thực, cảnh báo sớm tai nạn và đề xuất lộ trình thay thế cho người dân qua ứng dụng di động. Kịch bản đặt mục tiêu đạt tối thiểu Cấp độ trưởng thành 3 (Dự báo) sau 12 đến 18 tháng triển khai. Kịch bản phù hợp với đô thị loại đặc biệt (thành phố Hà Nội và Thành phố Hồ Chí Minh) và các đô thị loại I có mật độ phương tiện cao.

2. Sơ đồ kiến trúc tổng thể theo 09 lớp tham chiếu



Sơ đồ Kiến trúc tổng thể Bản sao số đô thị Quản lý giao thông

Sơ đồ này trình bày kiến trúc tổng thể của Bản sao số đô thị giao thông được tổ chức theo 09 lớp tham chiếu quy định tại Mục 5 Phần III của Hướng dẫn kỹ thuật, trong đó có 07 lớp xếp chồng theo chiều dọc (từ lớp 1 đến lớp 7) và 02 lớp xuyên suốt (lớp 8 và lớp 9) hoạt động song song với toàn bộ hệ thống. Vai trò và thành phần chính của từng lớp được mô tả tại bảng sau.

Lớp kiến trúc	Vai trò, để làm gì	Thành phần chính
Lớp 1. Người dùng	Các chủ thể tiếp nhận kết quả và ra quyết định trên hệ thống Bản sao số đô thị, bao gồm cả người tương tác qua giao diện và các hệ thống tự động kết nối qua giao diện lập trình ứng dụng (API).	Lãnh đạo Ủy ban nhân dân và Sở Giao thông vận tải; cán bộ trực ban Trung tâm giám sát điều hành (IOC); người dân sử dụng ứng dụng di động; các hệ thống phối hợp bên ngoài gồm Cảnh sát giao thông, cứu hộ, doanh nghiệp vận tải như Grab, Xanh SM.
Lớp 2. Tương tác và trực quan hoá	Chuyển đổi dữ liệu số phức tạp thành thông tin trực quan, dễ hiểu để phục vụ điều hành, cảnh báo và tương tác hai chiều với công dân.	Bảng điều khiển 3D hoặc 4D hiển thị mạng lưới giao thông theo thời gian thực; kênh cảnh báo đa nền tảng gồm tin nhắn ngắn (SMS), Zalo, thông báo đẩy trên ứng dụng; công nghệ thực tế ảo và thực tế tăng cường (VR/AR) phục

Lớp kiến trúc	Vai trò, để làm gì	Thành phần chính
		vụ diễn tập sự cố; Cổng giao diện lập trình ứng dụng (API Gateway) cho dữ liệu mở.
Lớp 3. Ứng dụng dịch vụ lõi	Tập hợp các dịch vụ nghiệp vụ chuyên ngành giao thông thực hiện chức năng giám sát, phân tích, dự báo, mô phỏng và điều khiển đối tượng thực thông qua mô hình số.	Dự báo lưu lượng bằng mô hình mạng nơ-ron đồ thị (GAT, T-GNN); dự báo tốc độ bằng mô hình chuỗi thời gian (LSTM, Informer); phát hiện ùn tắc bằng AutoEncoder; phát hiện sự cố bằng XGBoost; mô phỏng kịch bản What-if; tối ưu đèn tín hiệu bằng học tăng cường sâu (DRL).
Lớp 4. Quản lý dữ liệu và mô hình	Thực hiện vai trò bộ não và hệ thần kinh trung ương của toàn bộ hệ thống, chịu trách nhiệm thu nạp, làm sạch, lưu trữ, quản trị dữ liệu và quản lý vòng đời mô hình phân tích.	Kafka streaming cho dữ liệu thời gian thực; Spark ETL cho xử lý theo lô; Data Lake tổ chức theo bốn vùng Raw, Processed, Analytics và Serving; Đồ thị tri thức (Knowledge Graph) mô tả quan hệ liên ngành; Hệ thống quản trị vòng đời mô hình MLOps; Bộ máy Digital Twin.
Lớp 5. Hạ tầng số	Cung cấp năng lực tính toán, lưu trữ và mạng lõi để toàn bộ các lớp bên trên vận hành ổn định, liên tục và có khả năng mở rộng.	Hạ tầng điện toán đám mây kèm Bộ xử lý đồ họa (GPU) cho huấn luyện AI; hệ thống lưu trữ dùng chung; tính toán hiệu năng cao (HPC); Trung tâm dữ liệu đặt trong lãnh thổ Việt Nam bảo đảm chủ quyền dữ liệu.
Lớp 6. Kết nối và thu thập	Thực hiện tuyến truyền dẫn hai chiều giữa lớp Vật lý và lớp Dữ liệu, bảo đảm độ trễ thấp cho các tác vụ điều khiển thời gian thực.	Điện toán biên và điện toán sương mù (Edge, Fog Computing); hạ tầng mạng 5G, cáp quang và mạng diện rộng tiết kiệm năng lượng (LPWAN); Cổng IoT và bộ chấp hành; Cổng điều khiển và Cửa kiểm soát an toàn bắt buộc cho mọi lệnh xuống thiết bị.
Lớp 7. Vật lý	Bao gồm các đối tượng thực (tĩnh và động) được số hoá và chịu tác động ngược từ hệ thống Bản sao số đô thị.	Camera trí tuệ nhân tạo (Camera AI); cảm biến lưu lượng và tốc độ; hệ thống định vị toàn cầu (GPS) của đội xe thương mại; đèn tín hiệu và rào chắn; phương tiện và người đi bộ là đối tượng được ánh xạ số.

Lớp kiến trúc	Vai trò, để làm gì	Thành phần chính
Lớp 8. An toàn, an ninh mạng (xuyên suốt)	Bảo vệ toàn vòng đời dữ liệu và hạ tầng theo chiều sâu, đặc biệt kiểm soát tuyến lệnh điều khiển ngược xuống các thiết bị vận hành thực thể.	Trung tâm giám sát an ninh mạng (SOC) hoạt động 24 giờ theo nguyên tắc không tin mặc định (Zero Trust); mã hoá đường truyền và dữ liệu lưu trữ; phân tách rõ giữa hệ thống điều khiển công nghiệp (OT) và hệ thống văn phòng (IT) theo chuẩn IEC 62443; Tầng kiểm soát an toàn lệnh điều khiển.
Lớp 9. Chính sách, quản trị (xuyên suốt)	Cung cấp khung pháp lý, quy chế vận hành, phân vai trách nhiệm và bộ chỉ số đánh giá hiệu quả để bảo đảm Bản sao số đô thị hoạt động bền vững và có trách nhiệm giải trình rõ ràng.	Quy chế vận hành và khai thác dữ liệu liên ngành; bộ Chỉ số đánh giá hiệu quả (KPI) và Thỏa thuận mức dịch vụ (SLA); Ma trận phân vai trách nhiệm (RACI) giữa các Sở, ngành; quy trình ứng phó và xử lý sự cố.

3. Sơ đồ quy trình vận hành



Sơ đồ Quy trình vận hành Bản sao số đô thị Quản lý giao thông đô thị

Sơ đồ này mô tả quy trình vận hành khép kín của Bản sao số đô thị giao thông, tổ chức thành 03 giai đoạn với tổng cộng 09 bước. Đây là sự cụ thể hoá của 06 bước cơ chế vận hành được quy định tại Mục 4 Phần III của Hướng dẫn kỹ thuật, đồng thời phản ánh đầy đủ đặc trưng vòng lặp Twin hai chiều (Twin Loop) được định nghĩa tại Mục 3.

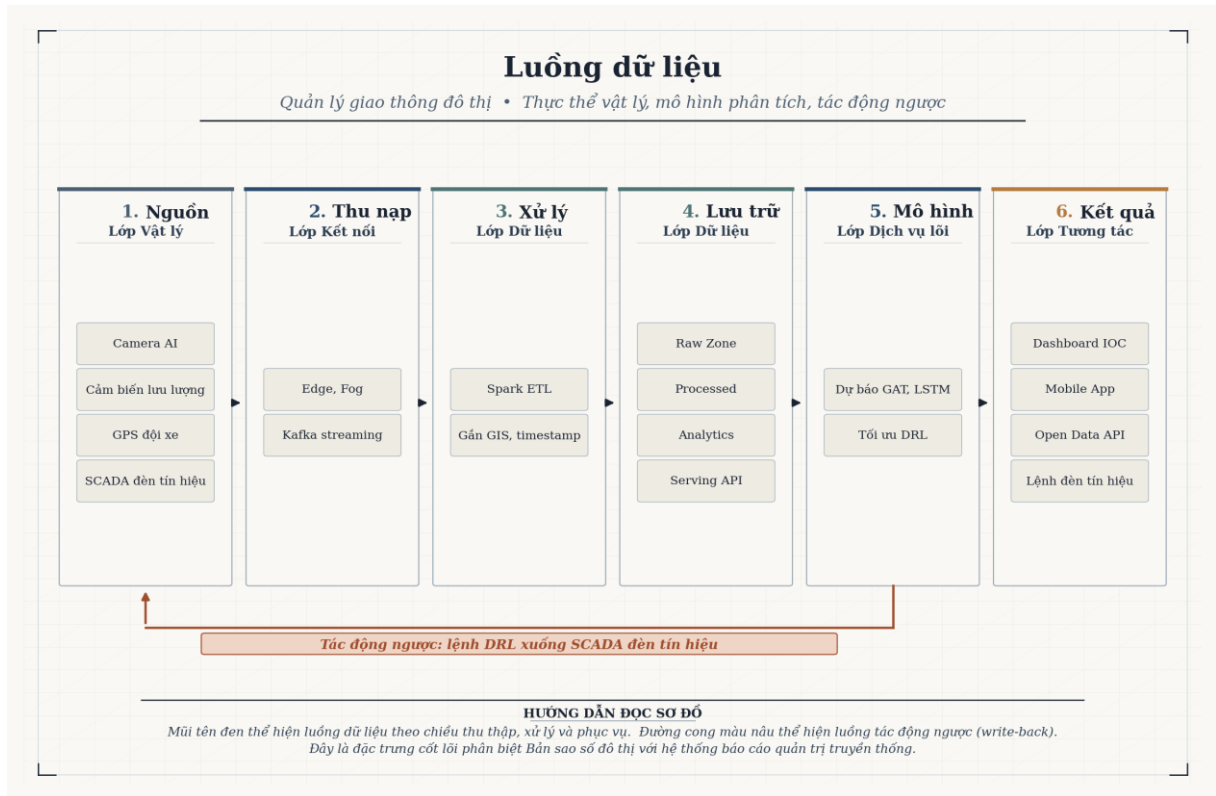
Giai đoạn thứ nhất là thu thập và chuẩn hoá dữ liệu, gồm ba bước. Bước 1, hệ thống thu thập dữ liệu liên tục theo thời gian thực từ năm nguồn chính gồm camera trí tuệ nhân tạo, cảm biến lưu lượng, cảm biến tốc độ, hệ thống định vị toàn cầu của đội xe thương mại và trạng thái SCADA của đèn tín hiệu. Bước 2, dữ liệu thu thập được đưa qua Kafka streaming và Spark ETL để làm sạch, khử nhiễu, chuẩn hoá về định dạng và thước đo thống nhất. Bước 3, dữ liệu đã chuẩn hoá được gắn toạ độ địa lý, gắn mốc thời gian và ánh xạ lên bản đồ Digital Twin 3D của mạng lưới giao thông để tạo nên bóng kỹ thuật số trung thực của thực tế.

Giai đoạn thứ hai là phân tích và dự báo, gồm ba bước. Bước 4, các mô hình trí tuệ nhân tạo chuyên dụng gồm GAT, T-GNN, LSTM và XGBoost chạy song song để dự báo lưu lượng và tốc độ phương tiện trong khoảng thời gian 05 đến 60 phút tới. Bước 5, mô hình AutoEncoder phát hiện các hành vi bất thường như ùn tắc đột biến, tai nạn, vi phạm quy định giao thông. Bước 6, mô hình học tăng cường sâu (DRL) chạy mô phỏng kịch bản What-if để đánh giá nhiều phương án can thiệp trước khi quyết định thật.

Giai đoạn thứ ba là ra quyết định và thực thi, gồm ba bước. Bước 7, hệ thống ra quyết định. Đối với Cấp độ trưởng thành 3, hệ thống đưa khuyến nghị cho cán bộ điều hành. Đối với Cấp độ 4, hệ thống tự thực hiện điều khiển tự động dưới sự giám sát của người duyệt cuối (Human-in-the-Loop). Bước 8, lệnh điều khiển được gửi xuống SCADA đèn tín hiệu thông qua Cổng điều khiển có Cửa kiểm soát an toàn; song song gửi cảnh báo và hướng dẫn lộ trình cho người dân qua ứng dụng di động. Bước 9, hệ thống đo lường các chỉ số đánh giá hiệu quả gồm thời gian di chuyển trung bình, tỷ lệ ùn tắc, thời gian phản ứng sự cố và sai số MAPE của dự báo lưu lượng.

Sau giai đoạn ba, kết quả vận hành được hồi tiếp về dữ liệu huấn luyện để kích hoạt chu kỳ huấn luyện lại các mô hình phân tích. Chu kỳ huấn luyện lại thông thường là hằng tuần cho các mô hình dự báo ngắn hạn và hằng tháng cho các mô hình chiến lược.

4. Sơ đồ luồng dữ liệu



Sơ đồ Luồng dữ liệu Bản sao số đô thị Quản lý giao thông

Sơ đồ này mô tả luồng dữ liệu đi qua sáu công đoạn liên tiếp theo kiến trúc Lakehouse bốn vùng: vùng thô (Raw), vùng đã xử lý (Processed), vùng phân tích (Analytics) và vùng phục vụ (Serving). Dữ liệu từ camera, cảm biến, hệ thống định vị và SCADA được thu nạp qua Edge Computing và Kafka, sau đó được Spark ETL làm sạch và gắn thông tin không gian, thời gian trước khi lưu trữ vào Data Lake. Tại vùng phân tích, các mô hình GAT, LSTM và DRL trích xuất đặc trưng và huấn luyện để đưa kết quả về vùng phục vụ, cung cấp cho bảng điều khiển của Trung tâm giám sát điều hành, ứng dụng di động, Cổng dữ liệu mở và lệnh điều khiển đèn tín hiệu.

Mũi tên màu đỏ trên sơ đồ thể hiện luồng tác động ngược (write-back). Đây là đặc trưng cốt lõi phân biệt Bản sao số đô thị với hệ thống báo cáo thông thường. Cụ thể, lệnh tối ưu do mô hình học tăng cường sâu đề xuất được gửi ngược xuống SCADA đèn tín hiệu qua Cổng điều khiển có Cửa kiểm soát an toàn. Cửa kiểm soát an toàn thực hiện các chức năng gồm kiểm tra tính hợp lý của lệnh, kiểm tra quyền của người hoặc hệ thống phát lệnh, phát hiện và chặn lệnh mâu thuẫn hoặc nguy hiểm và bảo đảm khả năng chuyển về chế độ điều khiển thủ công trong thời gian không quá 05 giây.

5. Khuyến nghị triển khai

Thứ nhất, về phạm vi thí điểm, các địa phương nên bắt đầu trên 01 trục đường huyết mạch hoặc 01 khu vực có tần suất ùn tắc cao nhất, thông thường từ 03 đến 05 nút giao trọng yếu. Việc triển khai đồng thời trên toàn thành phố ngay từ đầu thường dẫn đến đầu tư dàn trải và không có kết quả đo lường rõ ràng.

Thứ hai, về dữ liệu nền, bắt buộc phải có bản đồ GIS giao thông đã chuẩn hoá, dữ liệu lịch sử từ 06 đến 12 tháng từ camera trí tuệ nhân tạo và cảm biến hiện có. Nếu thiếu dữ liệu lịch sử, các mô hình phân tích sẽ không thể huấn luyện và hệ thống chỉ dừng ở mức Cấp độ 1.

Thứ ba, về tận dụng hạ tầng sẵn có, các địa phương ưu tiên sử dụng camera trí tuệ nhân tạo và SCADA đèn tín hiệu đã được đầu tư trong các dự án đô thị thông minh trước đây. Chỉ đầu tư mới cảm biến lưu lượng hoặc cảm biến tốc độ tại các nút giao chưa có dữ liệu, tránh đầu tư trùng lắp.

Thứ tư, về bộ chỉ số đánh giá hiệu quả, đề xuất theo dõi bốn chỉ tiêu gồm sai số MAPE của dự báo lưu lượng dưới 15%; thời gian phản ứng sự cố dưới 02 phút; giảm thời gian di chuyển trung bình từ 10 đến 15% so với trước khi triển khai; tỷ lệ ứng dụng khuyến nghị của hệ thống trong ra quyết định điều hành trên 70%.

Thứ năm, về điều kiện nâng cấp lên Cấp độ trưởng thành 4 và Cấp độ 5, chỉ kích hoạt chế độ tự động điều khiển đèn tín hiệu sau khi đã chạy môi trường thí điểm có kiểm soát (Sandbox) tối thiểu 03 tháng và đạt các tiêu chí sau: có cơ chế người duyệt cuối hoạt động liên tục; có khả năng chuyển về chế độ thủ công trong thời gian không quá 05 giây; có nhật ký kiểm toán đầy đủ với chữ ký số của người phê duyệt.

III. KỊCH BẢN 2. BẢN SAO SỐ ĐÔ THỊ QUẢN LÝ NGẬP LỤT ĐÔ THỊ

1. Bối cảnh và mục tiêu

Ngập lụt đô thị là bài toán cấp thiết tại các đô thị đồng bằng, ven biển và miền Trung Việt Nam, đặc biệt trong bối cảnh biến đổi khí hậu đang gia tăng cường độ mưa cực đoan và tần suất triều cường bất thường. Phương pháp quản lý ngập lụt truyền thống dựa trên các mô hình thủy lực tĩnh với chu kỳ cập nhật thưa không đáp ứng được yêu cầu cảnh báo sớm. Bản sao số đô thị ngập lụt tích hợp dữ liệu quan trắc mưa radar, cảm biến mực nước, mô hình số bề mặt và ảnh vệ tinh với các mô hình học sâu kết hợp thủy lực hai chiều để dự báo bản đồ ngập chi tiết đến cấp ô phố trong khoảng 0 đến 3 giờ tới.

Kịch bản đặt mục tiêu đạt Cấp độ trưởng thành 3 (Dự báo) trong năm đầu triển khai và hướng tới Cấp độ 4 (Mô phỏng và tối ưu vận hành thoát nước) trong các năm tiếp theo. Kịch bản phù hợp với các đô thị loại I và loại II ven biển, các đô thị đồng bằng sông Hồng, đồng bằng sông Cửu Long, cũng như các đô thị thuộc Đề án thành phố chống chịu biến đổi khí hậu.

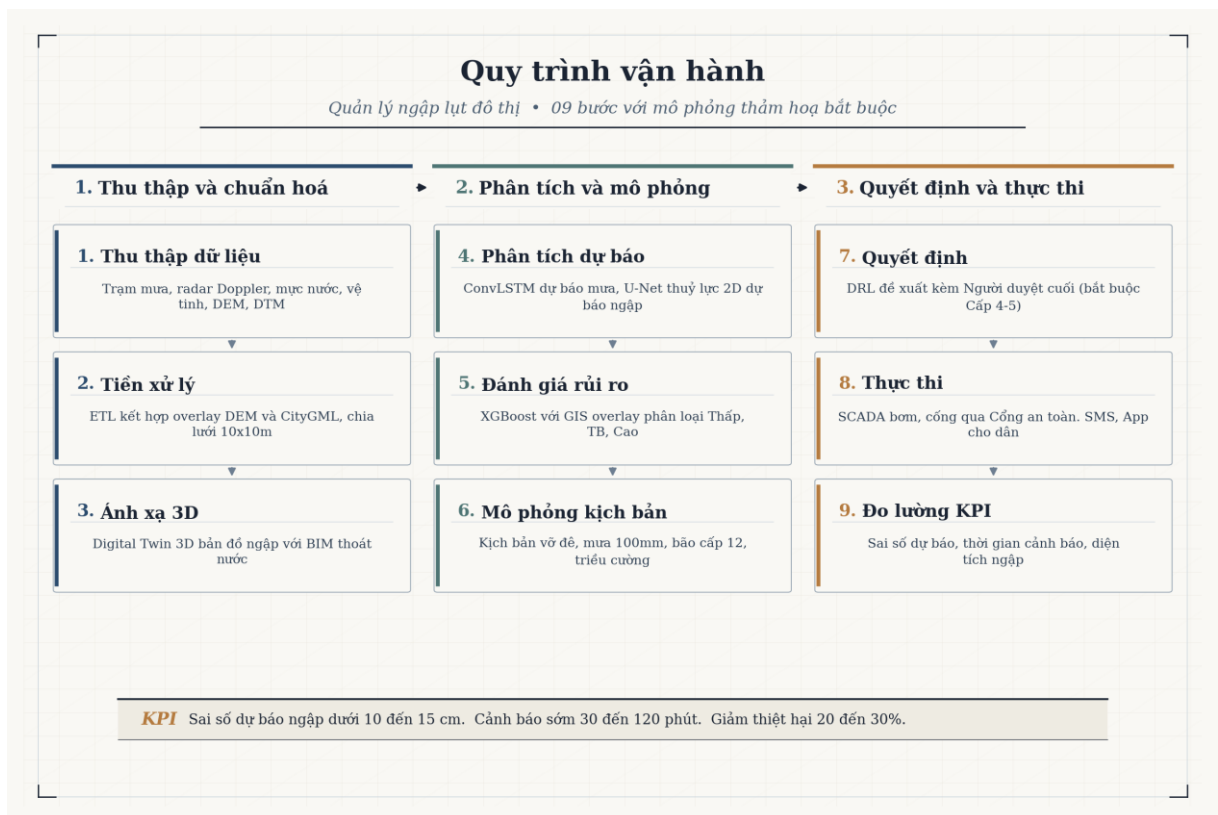


Lớp kiến trúc	Vai trò, để làm gì	Thành phần chính
Lớp 1. Người dùng	Các chủ thể điều hành công tác ứng phó thiên tai và người dân chịu tác động trực tiếp của ngập lụt.	Ban chỉ huy Phòng chống thiên tai và Tìm kiếm cứu nạn; trực ban Trung tâm giám sát điều hành và Khí tượng thủy văn địa phương; người dân nhận cảnh báo sớm qua ứng dụng di động; công ty thoát nước vận hành trạm bơm và cống van.
Lớp 2. Tương tác và trực quan hoá	Cung cấp bản đồ ngập theo thời gian thực cho chỉ huy và kênh cảnh báo sớm đa nền tảng cho người dân.	Digital Twin 3D bản đồ ngập theo thời gian thực; kênh SMS, Zalo và ứng dụng di động cho cảnh báo 0 đến 3 giờ; công nghệ VR và AR phục vụ diễn tập phòng chống thiên tai; Cổng dữ liệu mở cho bảo hiểm, logistics và cứu hộ.

Lớp kiến trúc	Vai trò, để làm gì	Thành phần chính
Lớp 3. Ứng dụng dịch vụ lõi	Chuỗi mô hình nối tiếp từ dự báo mưa, dự báo ngập, đánh giá rủi ro đến tối ưu hoá vận hành thoát nước.	Dự báo mưa 0 đến 3 giờ bằng ConvLSTM; dự báo ngập bằng U-Net kết hợp thuỷ lực 2D (SWMM hoặc HEC-RAS); dự báo mực nước và triều bằng LSTM/TCN; đánh giá rủi ro bằng XGBoost kết hợp GIS; mô phỏng kích bản thảm hoạ; tối ưu trạm bơm bằng học tăng cường sâu có tăng an toàn.
Lớp 4. Quản lý dữ liệu và mô hình	Hợp nhất dữ liệu khí tượng, thuỷ văn, địa hình và công trình; vận hành hệ thống quản lý vòng đời mô hình.	Kafka kết hợp Batch processing; ETL với overlay mô hình số độ cao (DEM) và mô hình số bề mặt (DTM); Data Lake kết hợp cơ sở dữ liệu chuỗi thời gian; dữ liệu CityGML và BIM hệ thống thoát nước; Feature Store và Model Registry; Digital Twin Engine tích hợp SWMM.
Lớp 5. Hạ tầng số	Năng lực tính toán hiệu năng cao bắt buộc cho mô phỏng thuỷ lực 2D và học sâu trên dữ liệu radar.	Điện toán đám mây kèm Bộ xử lý đồ hoạ (GPU); cụm tính toán hiệu năng cao (HPC) cho mô phỏng 2D; hệ thống lưu trữ dung lượng lớn cho dữ liệu radar và ảnh vệ tinh; Trung tâm dữ liệu đặt trong lãnh thổ Việt Nam với dự phòng thảm hoạ.
Lớp 6. Kết nối và thu thập	Hạ tầng truyền dẫn lai ghép: mạng tiết kiệm năng lượng cho cảm biến và băng thông rộng cho radar, vệ tinh.	Mạng diện rộng tiết kiệm năng lượng (LPWAN) và 4G/5G cho cảm biến; liên kết radar Doppler; đường truyền ảnh vệ tinh và thiết bị bay không người lái (UAV); SCADA cho trạm bơm và cống van.
Lớp 7. Vật lý	Hệ thống quan trắc và công trình thuỷ được số hoá, chịu tác động ngược từ quyết định của Bản sao số đô thị.	Trạm đo mưa (Rain Gauge); radar thời tiết Doppler; cảm biến mực nước sông, cống và triều; trạm bơm, cống van và đê; địa hình và bề mặt đô thị dưới dạng mô hình số độ cao (DEM/DTM).
Lớp 8. An toàn, an ninh mạng (xuyên suốt)	Bảo vệ dữ liệu nhạy cảm (đê, triều), bảo vệ lệnh vận hành xuống trạm bơm và phòng chống giả mạo cảm biến.	Trung tâm giám sát an ninh mạng kết hợp an ninh cho hệ điều khiển công nghiệp (OT Security) theo chuẩn IEC 62443; Tầng an toàn

Lớp kiến trúc	Vai trò, để làm gì	Thành phần chính
		chặn lệnh nguy hiểm; bảo vệ dữ liệu đề và công trình phòng hộ; cơ chế chống giả mạo dữ liệu cảm biến.
Lớp 9. Chính sách, quản trị (xuyên suốt)	Khung phối hợp ba bên giữa Sở Giao thông vận tải, Sở Xây dựng và Khí tượng thủy văn; quy trình ứng phó và Sandbox.	Quy chế phối hợp liên ngành; bộ Chỉ số đánh giá hiệu quả về độ chính xác dự báo và thời gian cảnh báo; quy trình “4 tại chỗ” trong ứng phó thiên tai; Sandbox và review rủi ro trước khi vận hành chính thức.

3. Sơ đồ quy trình vận hành



Sơ đồ Quy trình vận hành Bản sao số đô thị Quản lý ngập lụt

Sơ đồ này mô tả chu trình vận hành khép kín của Bản sao số đô thị ngập lụt với 03 giai đoạn và 09 bước. So với kịch bản giao thông, kịch bản ngập lụt có hai điểm khác biệt cơ bản. Thứ nhất, giai đoạn phân tích bao gồm cả bước mô phỏng kịch bản tham họa (vỡ đê, bão cấp 12, mưa 100 mm trong 01 giờ, triều cường dâng bất thường) trước khi đề xuất bất kỳ can thiệp nào, vì sai sót trong vận hành trạm bơm có thể gây hậu quả nghiêm trọng như vỡ đường ống hoặc ngập ngược. Thứ hai, tất cả các quyết định ở giai đoạn ba đều bắt buộc có người duyệt cuối (HITL) do cơ chế vật lý của hệ thống thoát nước không cho phép thu hồi lệnh đã thực thi.

Giai đoạn thứ nhất là thu thập và chuẩn hoá, gồm ba bước:

- Bước 1, hệ thống thu thập đồng thời dữ liệu từ trạm đo mưa, radar Doppler, cảm biến mực nước sông và triều, ảnh vệ tinh và thiết bị bay không người lái cùng với mô hình số độ cao và mô hình số bề mặt.

- Bước 2, ETL thực hiện làm sạch và overlay dữ liệu lên nền địa hình DEM và mô hình CityGML, sau đó chia lưới thủy văn với độ phân giải 10 mét cho phép mô phỏng chi tiết đến cấp ô phố.

- Bước 3, Digital Twin 3D bản đồ ngập được dựng trên nền CityGML kết hợp với BIM hệ thống thoát nước (cống, mương, trạm bơm, đê).

Giai đoạn thứ hai là phân tích và mô phỏng, gồm ba bước:

- Bước 4, mô hình ConvLSTM dự báo mưa ngắn hạn 0 đến 3 giờ, song song mô hình U-Net kết hợp thủy lực 2D tính toán bản đồ ngập.

- Bước 5, XGBoost kết hợp GIS overlay phân loại rủi ro ngập của từng ô phố theo ba mức Thấp, Trung bình và Cao.

- Bước 6, mô phỏng các kịch bản thảm họa giả định để đánh giá dung sai và phương án ứng phó.

Giai đoạn thứ ba là quyết định và thực thi, gồm ba bước:

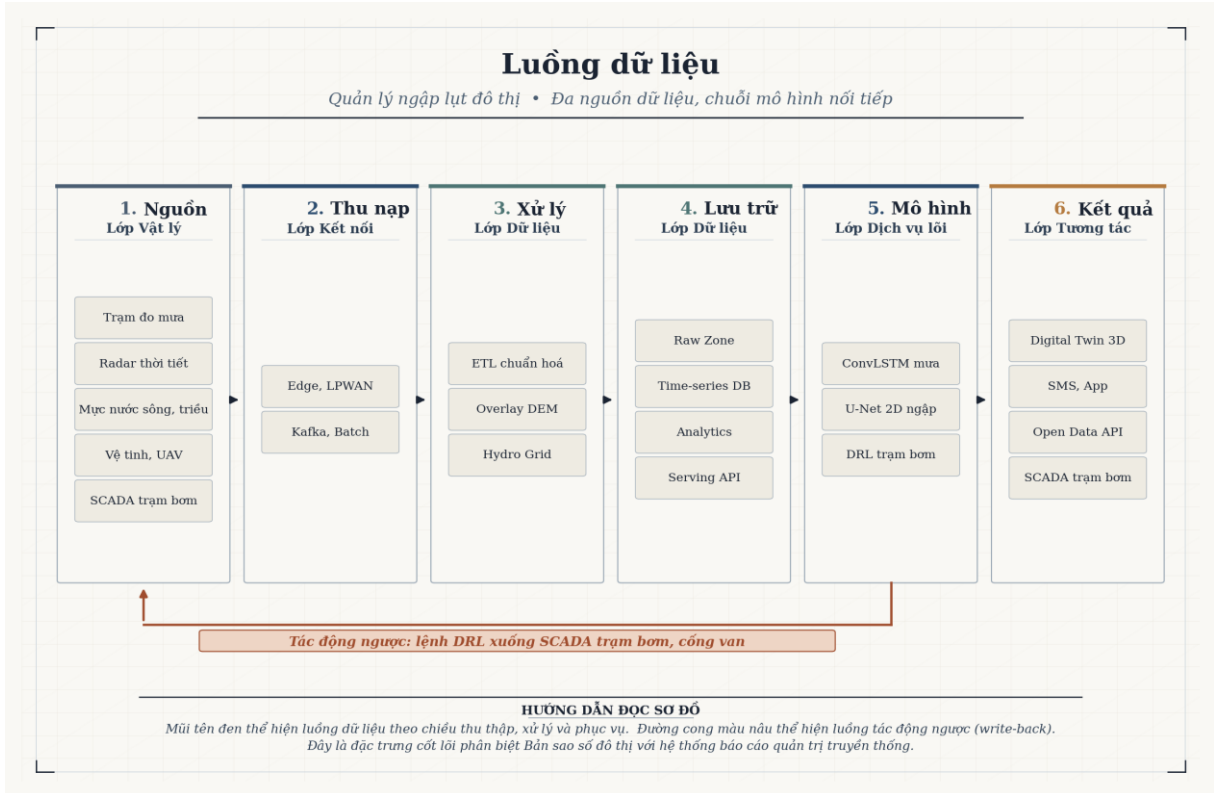
- Bước 7, học tăng cường sâu đề xuất phương án vận hành trạm bơm và cống van. Người duyệt cuối xem xét kèm theo bằng chứng giải thích (Explainable AI) và phê duyệt bằng chữ ký số.

- Bước 8, lệnh được gửi xuống SCADA qua Cửa kiểm soát an toàn; đồng thời cảnh báo sớm được phát cho dân cư qua SMS và ứng dụng di động.

- Bước 9, đo lường các chỉ số gồm sai số dự báo mức ngập, thời gian cảnh báo sớm và diện tích ngập giảm được so với kịch bản không can thiệp.

Chu kỳ huấn luyện lại thường được kích hoạt sau mỗi mùa mưa để cập nhật mô hình theo dữ liệu mới nhất về biến đổi khí hậu, hiện trạng hạ tầng và tình trạng thay đổi sử dụng đất.

4. Sơ đồ luồng dữ liệu



Sơ đồ Luồng dữ liệu Bản sao số đô thị Quản lý ngập lụt

Sơ đồ này thể hiện luồng dữ liệu lai ghép đặc trưng của Bản sao số đô thị ngập lụt. Dữ liệu từ cảm biến mưa và mực nước đi theo đường mạng tiết kiệm năng lượng (LPWAN hoặc NB-IoT) do yêu cầu nuôi cảm biến bằng pin dài hạn, trong khi dữ liệu radar thời tiết và ảnh vệ tinh đi theo đường xử lý theo lô (Batch) do kích thước lớn. Khi vào lớp xử lý, dữ liệu bắt buộc qua bước overlay DEM, DTM và CityGML để gắn không gian ba chiều, sau đó chia lưới thủy văn 10x10 mét phục vụ mô phỏng thủy lực hai chiều.

Ba mô hình chạy nối tiếp theo chuỗi có mỗi phụ thuộc về dữ liệu: ConvLSTM dự báo mưa cho U-Net, U-Net tính bản đồ ngập cho DRL, DRL đề xuất lệnh vận hành trạm bơm. Kết quả gửi đồng thời đến Digital Twin 3D, kênh SMS và ứng dụng di động, Cổng dữ liệu mở và SCADA. Luồng tác động ngược (mũi tên đỏ) từ DRL xuống SCADA trạm bơm và cống van là đặc trưng cốt lõi của Bản sao số đô thị và bắt buộc đi qua Cửa kiểm soát an toàn có thêm tầng an toàn chuyên dụng cho công trình thủy lợi và thoát nước.

5. Khuyến nghị triển khai

Thứ nhất, về phạm vi thí điểm, các địa phương ưu tiên triển khai tại 01 đến 02 lưu vực thoát nước có tần suất ngập cao nhất, thông thường diện tích từ 05 đến 10 km² đối với đô thị loại I và loại II.

Thứ hai, về dữ liệu nền, bắt buộc phải có mô hình số độ cao với độ phân giải tối thiểu 05 mét (lý tưởng là 01 mét từ dữ liệu LiDAR), bản đồ hệ thống thoát nước theo

chuẩn BIM hoặc CityGML, dữ liệu mưa lịch sử tối thiểu 10 năm, dữ liệu triều tại các trạm ven biển. Nếu thiếu bất kỳ dữ liệu nền nào, mô hình thủy lực sẽ có sai số vượt mức cho phép.

Thứ ba, về tận dụng dữ liệu dùng chung, các địa phương nên tận dụng tối đa radar thời tiết và dữ liệu của Trung tâm Khí tượng Thủy văn quốc gia, tránh tự đầu tư radar khi đã có dữ liệu công khai có thể khai thác.

Thứ tư, về bộ chỉ số đánh giá, đề xuất theo dõi năm chỉ tiêu gồm sai số dự báo mức ngập dưới 10 đến 15 cm; tỷ lệ cảnh báo đúng từ 85% trở lên; thời gian cảnh báo sớm trong khoảng 30 đến 120 phút; giảm thiệt hại do ngập từ 20 đến 30% sau hai mùa mưa vận hành; số quyết định ứng phó được hỗ trợ bởi UDT trong mỗi mùa mưa.

Thứ năm, về điều kiện nâng cấp, chế độ tự động điều khiển trạm bơm chỉ được kích hoạt sau khi Sandbox hoàn tất 01 mùa mưa trọn vẹn; có cơ chế người duyệt cuối hoạt động liên tục 24 giờ; có khả năng chuyển về chế độ thủ công trong thời gian không quá 10 giây; và phải được đánh giá rủi ro bởi cơ quan chuyên môn về thủy lợi và thoát nước trước khi đưa vào vận hành chính thức.

IV. CÁC LƯU Ý KHI ÁP DỤNG KỊCH BẢN THAM KHẢO

Thứ nhất, các địa phương không sao chép nguyên trạng hai kịch bản này mà phải điều chỉnh quy mô, danh mục cảm biến, danh mục mô hình phân tích và ngân sách theo loại đô thị, chức năng đô thị và năng lực hiện trạng của mình. Kinh nghiệm quốc tế chỉ ra rằng việc sao chép kiến trúc từ đô thị khác mà không điều chỉnh là nguyên nhân phổ biến nhất dẫn đến thất bại của các dự án Bản sao số đô thị.

Thứ hai, nguyên tắc “một khung, nhiều lộ trình” yêu cầu các đô thị khác nhau cùng sử dụng cấu trúc 09 lớp tham chiếu nhưng được phép lựa chọn các mô-đun khác nhau để ưu tiên. Đô thị du lịch và đô thị di sản ưu tiên các mô-đun quản lý khách và bảo tồn di sản; đô thị cảng ưu tiên mô-đun logistics và thủy triều; đô thị biên giới ưu tiên mô-đun giám sát an ninh và sạt lở; đô thị hành chính, chính trị ưu tiên mô-đun an ninh và quản lý sự kiện công cộng.

Thứ ba, các kịch bản khác trong lĩnh vực quản lý năng lượng, quản lý chất thải, quản lý an ninh trật tự, quản lý quy hoạch và ứng phó thảm họa đều tuân thủ cùng khung 09 lớp và 05 cấp độ trưởng thành. Các địa phương có thể phát triển các kịch bản này dựa trên mẫu của hai kịch bản trong Phụ lục.

Thứ tư, mọi kịch bản Bản sao số đô thị phải được đồng bộ với Trung tâm giám sát điều hành đô thị thông minh (IOC) và Trung tâm giám sát an ninh mạng (SOC) của địa phương. Không được xây dựng hệ thống độc lập, tách rời hoặc song song với hai trung tâm này vì sẽ tạo ra các silo dữ liệu và rủi ro vận hành.

Thứ năm, toàn bộ dữ liệu nhạy cảm bao gồm dữ liệu hạ tầng trọng yếu, dữ liệu cá nhân công dân Việt Nam và dữ liệu vị trí của các cơ quan trọng yếu phải được lưu trữ và xử lý trong lãnh thổ Việt Nam. Không được sử dụng giải pháp hoặc nền tảng Bản sao số đô thị của nước ngoài cho các dữ liệu này. Các địa phương phải tuân thủ chặt chẽ các

văn bản pháp luật quy định về bảo vệ bí mật nhà nước, bảo vệ dữ liệu cá nhân và các quy định pháp luật có liên quan.

Thứ sáu, khi triển khai đến Cấp độ trưởng thành 4 hoặc Cấp độ 5 có khả năng tác động ngược lên hạ tầng vật lý (đèn tín hiệu, trạm bơm, cống van), bắt buộc có cơ chế người duyệt cuối (Human-in-the-Loop), Cửa kiểm soát an toàn chặn lệnh nguy hiểm và quy trình Sandbox tối thiểu 03 tháng đối với giao thông, tối thiểu 01 mùa mưa đối với thoát nước trước khi vận hành chính thức. Ngoài ra phải có cơ chế chuyển về chế độ thủ công nhanh chóng trong trường hợp phát hiện bất thường và có nhật ký kiểm toán đầy đủ với chữ ký số phục vụ trách nhiệm giải trình.