

# Nghiên cứu thiết kế cơ sở dữ liệu GIS liên thông làm nền tảng cho quản lý bảo trì và hướng tới bản sao số hạ tầng giao thông đô thị

Design of an interoperable gis database for urban road infrastructure maintenance and digital twin development

> TS LÊ KHÁNH GIANG

Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: gianglk@utc.edu.vn

## TÓM TẮT

Bài báo đề xuất khung cấu trúc cơ sở dữ liệu (CSDL) GIS liên thông cho hạ tầng đường bộ (HTĐB) đô thị, trong đó GIS được định vị là nền tảng dữ liệu trung tâm phục vụ quản lý và bảo trì hạ tầng. Cấu trúc CSDL được xây dựng dựa trên mô hình tài sản tuyến tính và tổ chức dữ liệu theo không gian - thời gian, phù hợp triển khai ở cấp quận (cũ) hoặc phường/xã (mới) và có khả năng tích hợp lên hệ thống GIS cấp cao hơn. Thực nghiệm triển khai tại quận Đống Đa (cũ), Hà Nội cho thấy mô hình đề xuất có tính khả thi, hỗ trợ hiệu quả công tác quản lý HTĐB và tạo nền tảng CSDL cho các ứng dụng quản lý nâng cao, hướng tới phát triển Digital Twin.

**Từ khóa:** GIS; cơ sở dữ liệu hạ tầng đường bộ; quản lý bảo trì; bản sao số.

## ABSTRACT

This paper proposes an interoperable GIS database structure for urban road infrastructure, positioning GIS as a central data backbone for management and maintenance. The database structure is developed based on a linear asset model and spatiotemporal data organization, enabling the former district-level implementation or the current ward/commune level and scalability to higher-level GIS systems. A pilot implementation in the former Dong Da District, Hanoi demonstrates the feasibility of the proposed approach, its effectiveness in supporting infrastructure management and its potential as a data foundation for Digital Twin development.

**Keywords:** Geographic Information Systems (GIS); road infrastructure database; maintenance management; digital twin.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

HTĐB đô thị giữ vai trò then chốt trong phát triển kinh tế - xã hội. Quá trình đô thị hóa nhanh tại các thành phố lớn đã làm gia tăng áp lực lên HTĐB hiện hữu, đòi hỏi công tác quản lý và bảo trì HTĐB phải được thực hiện một cách khoa học, hiệu quả và có tính hệ thống. Tuy nhiên, trong thực tiễn quản lý hiện nay, dữ liệu HTĐB thường tồn tại phân tán, thiếu chuẩn hóa và chưa được tổ chức trong một CSDL thống nhất, gây khó khăn cho việc tích hợp thông tin, phân tích và hỗ trợ ra quyết định.

Trong bối cảnh chuyển đổi số, hệ thống thông tin địa lý (GIS) ngày càng được khẳng định là nền tảng quan trọng trong quản lý HTĐB, cho phép tích hợp dữ liệu không gian với dữ liệu thuộc tính, lịch sử kiểm tra và bảo trì, qua đó hỗ trợ quản lý tài sản HTĐB theo vòng đời. Đối với HTĐB đô thị, nơi mạng lưới đường dày đặc và thường xuyên biến động, GIS đóng vai trò như một hệ thống quản lý dữ liệu tập trung, thay thế cho cách lưu trữ rời rạc và thiếu liên kết [1].

Về mặt dữ liệu, HTĐB có đặc trưng tuyến tính rõ rệt, trong đó các hoạt động kiểm tra và bảo trì thường diễn ra trên các đoạn tuyến cụ thể. Do đó, nhiều hệ thống GIS chuyên ngành đã tiếp cận theo hướng quản lý tài sản tuyến tính, cho phép gắn các thông tin nghiệp vụ theo vị trí dọc tuyến mà không làm thay đổi hình học tuyến đường, giúp giảm trùng lặp dữ liệu và thuận lợi cho cập nhật trong dài hạn [2].

Tại Việt Nam, khung pháp lý và tiêu chuẩn kỹ thuật cho quản lý dữ liệu HTĐB đã từng bước được hoàn thiện, tiêu biểu là TCVN 13421:2021 về dữ liệu quản lý kết cấu HTĐB, cùng với các quy định về CSDL nền địa lý quốc gia và kiến trúc dữ liệu đô thị. Các tiêu chuẩn này đặt ra yêu cầu rõ ràng về chuẩn hóa dữ liệu, định danh đối tượng và khả năng chia sẻ, liên thông dữ liệu giữa các cấp quản lý [3-4]. Tuy nhiên, việc triển khai các tiêu chuẩn này vào các hệ thống GIS cụ thể, đặc biệt ở phường/xã - nơi trực tiếp quản lý và cập nhật dữ liệu hiện trạng vẫn còn nhiều hạn chế.

Bên cạnh đó, khái niệm bản sao số (Digital Twin - DT) cho hạ tầng đô thị đang được quan tâm như một hướng tiếp cận mới trong quản lý và hỗ trợ ra quyết định. Các nghiên cứu gần đây cho thấy DT không chỉ là mô hình trực quan hay 3D, mà trước hết là bài toán về nền tảng dữ liệu, trong đó GIS đóng vai trò lớp dữ liệu trung tâm bảo đảm tính chuẩn hóa, liên thông và quản lý theo không gian - thời gian. GIS là “nơi gặp gỡ” tự nhiên của dữ liệu về vị trí và thời gian và khi tích hợp dữ liệu không gian - thời gian, DT mới có thể phản ánh đầy đủ tính động của đô thị. Do đó, cho thấy nhu cầu xây dựng CSDL GIS làm nền tảng để từng bước hướng tới phát triển DT ở các cấp độ cao hơn (Hình 1) [5].



Hình 1. Phân loại Digital Twin

Tổng hợp các nghiên cứu và thực tiễn triển khai cho thấy còn tồn tại một khoảng trống: Phần lớn các nghiên cứu tập trung vào ứng dụng GIS cho các bài toán phân tích cụ thể, trong khi thiếu các nghiên cứu đi sâu vào thiết kế cấu trúc CSDL GIS với vai trò là hạ tầng dữ liệu nền tảng, đặc biệt trong bối cảnh tuân thủ TCVN và yêu cầu liên thông đa cấp (phường/xã - thành phố - quốc gia). Đồng thời, mối liên hệ giữa thiết kế CSDL GIS và định hướng phát triển DT HTĐB vẫn chưa được làm rõ [6]. Do đó, bài báo này tập trung nghiên cứu thiết kế CSDL GIS liên thông cho HTĐB đô thị, lấy quản lý bảo trì làm bài toán trung tâm và định vị CSDL GIS như nền tảng, quyết định khả năng mở rộng từ mô hình số tĩnh sang các cấp độ DT cao hơn.

**2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU**

**2.1. Cách tiếp cận**

Nghiên cứu áp dụng cách tiếp cận hướng dữ liệu, trong đó CSDL GIS được xem là thành phần trung tâm của hệ thống quản lý bảo trì HTĐB đô thị. Thay vì tập trung vào các thuật toán phân tích hoặc mô hình mô phỏng cụ thể, nghiên cứu nhấn mạnh vào thiết kế cấu trúc CSDL, bảo đảm tính chuẩn hóa, khả năng liên thông và khả năng khai thác lâu dài trong thực tiễn quản lý.

Phương pháp nghiên cứu được triển khai theo 4 bước chính:

- 1) Xác định yêu cầu quản lý và phạm vi dữ liệu.
- 2) Xây dựng khung thiết kế CSDL GIS dựa trên tiêu chuẩn và quy định hiện hành.
- 3) Thiết kế mô hình dữ liệu logic và vật lý cho HTĐB.
- 4) Triển khai thí điểm và kiểm chứng cấu trúc CSDL thông qua một nghiên cứu trường hợp ở cấp quận (cũ), phục vụ quản lý và bảo trì đường bộ, đồng thời đánh giá tiềm năng mở rộng của hệ thống ở mức cấu trúc và logic dữ liệu.

**2.2. Phạm vi và đối tượng dữ liệu**

Phạm vi nghiên cứu tập trung thí điểm tại TP Hà Nội để kiểm chứng khả năng triển khai và khai thác của mô hình CSDL GIS đề xuất. Đối tượng dữ liệu bao gồm:

- Mạng lưới đường bộ đô thị (tuyến đường, mặt đường);
- Các công trình và tài sản gắn với tuyến (cầu, hầm, biển báo, đèn tín hiệu...);
- Dữ liệu kiểm tra hiện trạng và bảo trì, duy tu theo thời gian.

**2.3. Nguyên tắc thiết kế CSDL GIS**

CSDL GIS được thiết kế dựa trên các nguyên tắc sau:

- 1) Tuân thủ quy chuẩn và tiêu chuẩn quốc gia.
- 2) Phân tách rõ dữ liệu nền và dữ liệu chuyên ngành.
- 3) Lấy tuyến đường làm đối tượng trung tâm.
- 4) Hỗ trợ quản lý theo không gian - thời gian.
- 5) Bảo đảm khả năng liên thông và mở rộng.

**2.4. Quy trình xây dựng và tích hợp CSDL**



Hình 2. Quy trình xây dựng và tích hợp dữ liệu

Quy trình xây dựng CSDL GIS được thực hiện theo mô hình ETL (Extract - Transform - Load) nhằm bảo đảm chất lượng và tính nhất quán của dữ liệu (Hình 2).

1) Extract: Thu thập dữ liệu từ nhiều nguồn khác nhau, bao gồm CSDL quản lý chính thống, bản đồ số và dữ liệu khảo sát thực địa.

2) Transform: Đây là bước quan trọng nhất trong GIS: Chuẩn hóa hệ tọa độ, cấu trúc thuộc tính, mã định danh và miền giá trị theo thiết kế CSDL đề xuất.

3) Load: Nạp dữ liệu vào CSDL GIS và thiết lập các mối quan hệ không gian “Topology” và thuộc tính cần thiết.

Quy trình ETL giúp dữ liệu có thể cập nhật và khai thác ổn định trong khi vận hành.

**2.5. Đánh giá khả năng liên thông và mở rộng hướng tới Digital Twin**

Khả năng liên thông và mở rộng của CSDL GIS được đánh giá ở mức cấu trúc và logic dữ liệu, thông qua các tiêu chí: Khả năng tái sử dụng cấu trúc CSDL cho các quận (cũ) hoặc phường/xã (mới) khác, mức độ tuân thủ tiêu chuẩn quốc gia và tính phù hợp của mô hình dữ liệu tuyến tính kết hợp dữ liệu sự kiện.

Việc đánh giá được thực hiện thông qua triển khai thí điểm và các thao tác truy vấn, khai thác dữ liệu trong môi trường GIS, nhằm kiểm chứng tính khả thi của cấu trúc CSDL trong thực tiễn quản lý bảo trì HTĐB.

Trong nghiên cứu này, DT được tiếp cận ở mức định hướng dữ liệu. CSDL GIS được thiết kế nhằm bảo đảm khả năng tích hợp các nguồn dữ liệu bổ sung trong tương lai, làm nền tảng cho các ứng dụng quản lý và phân tích nâng cao. Việc triển khai DT hoàn chỉnh không nằm trong phạm vi nghiên cứu.

**3. THIẾT KẾ CẤU TRÚC CSDL GIS VÀ KIỂM CHỨNG THỰC NGHIỆM**

**3.1. Tổng quan cấu trúc CSDL GIS đề xuất**

CSDL GIS được thiết kế nhằm phục vụ quản lý và bảo trì HTĐB đô thị ở cấp quận (cũ) hoặc phường/xã (mới), đồng thời bảo đảm khả năng mở rộng và tích hợp trong tương lai. Cấu trúc CSDL được tổ chức theo mô hình phân tầng, gồm: (i) CSDL nền địa lý làm lớp tham chiếu và (ii) CSDL GIS chuyên ngành giao thông làm lớp nghiệp vụ. Trong đó, CSDL chuyên ngành giao thông đóng vai trò trung tâm, được thiết kế dựa trên mô hình tài sản tuyến tính và tổ chức dữ liệu theo sự kiện không gian - thời gian, phù hợp với đặc thù quản lý HTĐB đô thị (Hình 3).



Hình 3. Mô hình CSDL GIS giao thông đô thị



Hình 6. Lược đồ ứng dụng mô tả các lớp đối tượng địa lý trong gói dữ liệu giao thông [7]

3.3.1. Đối tượng trung tâm: Tuyến đường bộ

Bảng 1. Lớp dữ liệu tuyến đường bộ (Road\_Centerline)

Tên trường	Kiểu dữ liệu	Mô tả
ma_duong	String (UUID)	Mã định danh tuyến
ten_duong	String	Tên đường
cap_ky_thuat	String (Domain)	Cấp kỹ thuật
loai_mat	String (Domain)	Loại mặt đường
chieu_rong	Float	Chiều rộng mặt đường (m)
don_vi_ql	String	Đơn vị quản lý
so_lan_xe	Polyline (M-enabled)	Hình học tuyến

Tuyến đường bộ được xác định là đối tượng lõi trong mô hình CSLD. Mỗi tuyến đường được biểu diễn bằng một lớp đối tượng không gian dạng đường (polyline), có mã định danh duy nhất và được sử dụng để liên kết với toàn bộ các dữ liệu liên quan khác trong hệ thống (Bảng 1). Lớp dữ liệu tuyến đường được gán giá trị đo dọc theo tuyến nhằm hỗ trợ quản lý các thông tin nghiệp vụ theo vị trí tương đối dọc tuyến (khoảng cách đo từ điểm đầu tuyến), tạo điều kiện thuận lợi cho việc liên kết và khai thác dữ liệu sự kiện.

3.3.2. Mô hình dữ liệu sự kiện kiểm tra và bảo trì

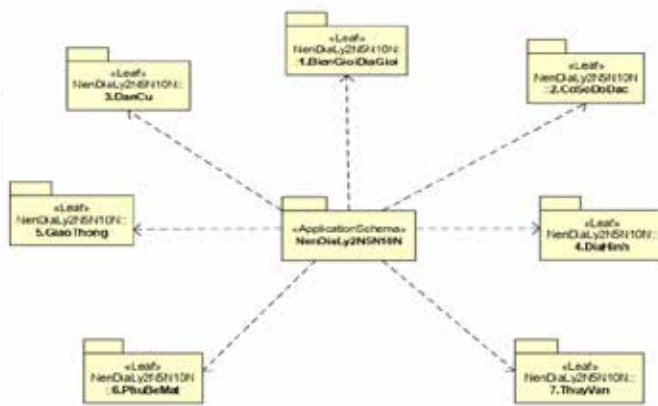
Các hoạt động kiểm tra hiện trạng và bảo trì được tổ chức dưới dạng các bảng dữ liệu sự kiện độc lập, không gắn hình học trực tiếp mà liên kết với tuyến đường thông qua mã định danh và vị trí tương đối dọc tuyến (Hình 7). Việc tách riêng dữ liệu kiểm tra (Bảng 2) và dữ liệu bảo trì (Bảng 3) phản ánh đúng bản chất khác nhau của các quy trình quản lý và hỗ trợ lưu trữ dữ liệu theo không gian - thời gian.



Hình 7. Mô hình dữ liệu tuyến - sự kiện - thời gian trong CSDL GIS quản lý HTĐB

Bảng 2. Bảng dữ liệu sự kiện kiểm tra

Trường	Kiểu	Mô tả
ma_kiem_tra	String	Mã sự kiện kiểm tra
ma_duong	String	Mã tuyến đường
vi_tri_dau	Float	Vị trí bắt đầu dọc tuyến (m)
vi_tri_cuoi	Float	Vị trí kết thúc dọc tuyến (m)
ngay_kiem_tra	Date	Thời gian kiểm tra
nguai_kiem_tra	Text	Người kiểm tra
anh_hien_truong	Attachment	Ảnh hiện trường
danh_gia_hien_trang	Domain	Đánh giá hiện trạng



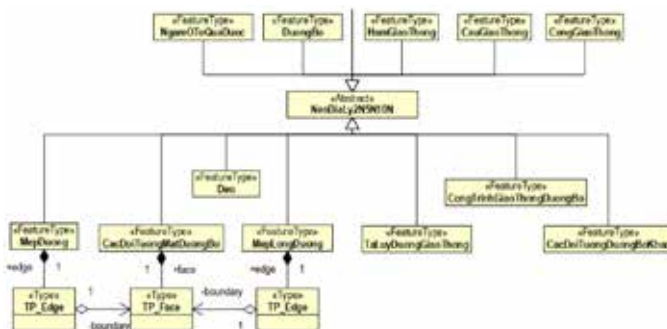
Hình 4. Mô hình cấu trúc CSDL nền địa lý quốc gia [7]

3.2. CSDL GIS nền địa lý

CSDL GIS nền địa lý được sử dụng làm lớp dữ liệu tham chiếu không gian cho toàn bộ hệ thống, tuân thủ các quy định hiện hành về CSDL nền địa lý quốc gia. Dữ liệu nền địa lý cung cấp khung không gian thống nhất về hệ tọa độ, ranh giới hành chính và các yếu tố địa lý cơ bản, bảo đảm tính nhất quán và khả năng tích hợp dữ liệu giữa các lớp chuyên ngành. Mô hình cấu trúc CSDL nền địa lý quốc gia tỷ lệ 1:2.000, 1:5.000 và 1:10.000 được tổ chức theo 7 gói UML gồm 7 chủ đề dữ liệu địa lý như Hình 4.

3.3. Cấu trúc CSDL GIS chuyên ngành giao thông

Mô hình đối tượng dữ liệu địa lý tổng quát gói dữ liệu giao thông (Hình 5). Lược đồ ứng dụng mô tả các lớp đối tượng địa lý trong gói dữ liệu giao thông (Hình 6).



Hình 5. Mô hình đối tượng dữ liệu địa lý tổng quát gói dữ liệu giao thông [7]

Bảng 3. Bảng dữ liệu sự kiện bảo trì

Trường	Kiểu	Mô tả
ma_bao_tri	String	Mã sự kiện bảo trì
ma_duong	String	Mã tuyến đường
vi_tri_dau	Float	Vị trí bắt đầu dọc tuyến (m)
vi_tri_cuoi	Float	Vị trí kết thúc dọc tuyến (m)
loai_bao_tri	Domain	Hình thức bảo trì
don_vi_thi_cong	Text	Đơn vị thi công
ngay_bao_tri	Date	Thời gian thực hiện
ngay_het_han_bao_hanh	Date	Ngày hết hạn bảo hành
kinh_phi	Float	Kinh phí

Cách tổ chức này cho phép quản lý linh hoạt các đoạn tuyến theo thời gian, duy trì tính toàn vẹn của hình học tuyến đường và giảm trùng lặp dữ liệu không gian.

**3.4. Dữ liệu tài sản hạ tầng gắn với tuyến đường**

Bên cạnh tuyến đường, CSDL GIS gồm các lớp dữ liệu mô tả các tài sản và công trình phụ trợ gắn với tuyến (Bảng 4). Mỗi lớp tài sản được liên kết với tuyến đường thông qua mã định danh tuyến, cho phép truy vấn và phân tích tổng hợp theo tuyến hoặc theo khu vực quản lý.

Bảng 4. Các lớp dữ liệu tài sản HTĐB

Nhóm	Lớp dữ liệu	Hình học	Mục đích
Cầu	tim_cau	Polyline	Kết nối tuyến
Hầm	tim_ham	Polyline	Giao thông ngầm
Biển báo	bien_bao	Point	An toàn
Đèn tín hiệu	den_tin_hieu	Point	Điều tiết
Chiếu sáng	chieu_sang	Point	Vận hành
Thoát nước	thoat_nuoc	Polyline	Chống ngập

**3.5. Quan hệ dữ liệu và triển khai trong môi trường GIS**

Các mối quan hệ giữa các lớp dữ liệu được thiết lập theo mô hình 1 - N, trong đó một tuyến đường có thể liên kết với nhiều sự kiện kiểm tra, bảo trì và nhiều tài sản HTĐB. CSDL được triển khai trong môi trường Geodatabase, với việc sử dụng các cơ chế chuẩn hóa dữ liệu như miền giá trị và quan hệ thuộc tính, nhằm bảo đảm tính nhất quán và khả năng khai thác lâu dài.

**3.6. Thực nghiệm triển khai và kiểm chứng**

**3.6.1. Mục tiêu và phạm vi thực nghiệm**

Thực nghiệm được thực hiện nhằm kiểm chứng khả năng triển khai và khai thác của cấu trúc CSDL GIS để xuất trong thực tiễn quản lý và bảo trì HTĐB đô thị. Quận Đống Đa (cũ) được lựa chọn làm khu vực thí điểm do có mật độ hạ tầng cao và dữ liệu quản lý tương đối đầy đủ.

**3.6.2. Thu thập và chuẩn hóa dữ liệu**

Dữ liệu đầu vào gồm CSDL nền địa lý và dữ liệu HTĐB cấp quận (cũ), được thu thập từ các nguồn quản lý chính thống và khảo sát thực địa. Toàn bộ dữ liệu được chuẩn hóa về hệ tọa độ, cấu trúc thuộc tính và mã định danh theo đúng thiết kế CSDL đã đề xuất.



Hình 8. CSDL HTĐB quận Đống Đa (cũ), TP Hà Nội

**3.6.3. Triển khai xây dựng CSDL GIS**

Cấu trúc CSDL được triển khai thí điểm trên ArcGIS 10.5 theo đúng mô hình logic đã thiết kế, trong đó tuyến đường là đối tượng

trung tâm và các sự kiện kiểm tra, bảo trì được quản lý theo vị trí dọc tuyến. Kết quả triển khai cho thấy cấu trúc CSDL có thể áp dụng trực tiếp trong thực tiễn quản lý mà không cần điều chỉnh lớn (Hình 8).

**3.6.4. Minh họa khả năng khai thác dữ liệu**

Một số phân tích GIS cơ bản như truy vấn, hiển thị dữ liệu theo tình trạng và chồng xếp không gian được thực hiện nhằm kiểm chứng khả năng khai thác dữ liệu. Kết quả cho thấy CSDL cho phép tích hợp và khai thác đồng thời nhiều lớp thông tin, hỗ trợ hiệu quả cho công tác quản lý và bảo trì HTĐB (Hình 9).



Hình 9. Truy vấn và hiển thị thông tin



Hình 10. Hiển thị phân loại tình trạng hư hỏng đường trên bản đồ và bảng thuộc tính. Dựa trên dữ liệu hiện trạng và lịch sử bảo trì được lưu trữ trong CSDL, các đoạn tuyến được phân loại theo mức độ ưu tiên bảo trì (Hình 10). Kết quả này cho thấy cấu trúc CSDL có khả năng hỗ trợ lập kế hoạch bảo trì và ra quyết định, đồng thời tạo tiền đề cho việc tích hợp các mô hình phân tích nâng cao trong tương lai.

**4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ**

Nghiên cứu đề xuất cấu trúc CSDL GIS phục vụ quản lý và bảo trì HTĐB đô thị, dựa trên mô hình tài sản tuyến tính và tổ chức dữ liệu theo sự kiện không gian - thời gian. Kết quả thực nghiệm cho thấy mô hình có tính khả thi trong thực tiễn, hỗ trợ quản lý dữ liệu nhất quán và duy trì tính toàn vẹn của dữ liệu không gian. Cấu trúc CSDL này có thể được sử dụng như một nền tảng cho các hệ thống quản lý HTĐB tương lai.

Khuyến nghị áp dụng cấu trúc CSDL GIS để xuất cho công tác quản lý và bảo trì HTĐB ở cấp quận (cũ) hoặc phường/xã (mới), đồng thời chuẩn hóa dữ liệu theo các tiêu chuẩn quốc gia để nâng cao khả năng tích hợp. Các nghiên cứu tiếp theo có thể mở rộng phạm vi ứng dụng, tích hợp thêm dữ liệu vận hành và giám sát theo thời gian thực nhằm phục vụ các hệ thống quản lý HTĐB đô thị thông minh.

**TÀI LIỆU THAM KHẢO**

[1]. Hector-Hsu, J., Kniss, V., Cotton, B., Sarmiento, M., & Chang, C. (2012), Best practices in geographic information systems-based transportation asset management.  
 [2]. Introduction to ArcGIS Roads and Highways.  
 [3]. TCVN 13421:2021 - Dữ liệu quản lý kết cấu hạ tầng giao thông đường bộ.  
 [4]. Thông tư 41/2024/TT-BGTVT Hướng dẫn quản lý vận hành, khai thác, bảo trì kết cấu HTĐB.  
 [5]. Urban digital twins: Integrating infrastructure, natural environment and people.  
 [6]. Yadav, Y., Colucci, E., Boccardo, P., & Zlatanova, S. (2024), A Geodatabase Design for the Development of a Digital Twin for Urban Environments: A Case Study from Turin, Italy. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 48, 525-532.  
 [7]. Thông tư 08/2023/TT-BTNMT quy định kỹ thuật về mô hình cấu trúc, nội dung, chất lượng, thu nhận và trình bày CSDL nền địa lý quốc gia.