

**Phương pháp tiến hóa biện chứng khái niệm và hệ thống trong chuyển đổi số
giao thông: Khung phân tích và cơ chế kiểm chứng đề xuất**

Trần Minh*, Nguyễn Văn Diễn

Trường Đại học Thành Đô, xã Hoài Đức, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 21/5/2026; ngày chuyển phản biện 22/5/2026;

ngày nhận phản biện 18/6/2026; ngày chấp nhận đăng 29/6/2026

Tóm tắt:

Bài viết áp dụng phương pháp tiến hóa biện chứng khái niệm và hệ thống để phân tích chuyển đổi số giao thông như một quá trình chuyển bậc của hệ thống, thay vì chỉ là lựa chọn công nghệ hoặc đầu tư hạ tầng. Phương pháp xem giao thông như một hệ thống giao thông tại thời điểm t ($H(t)$) gồm thượng tầng, hạ tầng, lực lượng lao động - sản xuất, dòng chảy, chức năng và phẩm chất toàn hệ (Q). Trên cơ sở phân tích tài liệu thứ cấp và hai mini-case tại Việt Nam, bài viết đề xuất chuỗi thao tác gồm: tiến hóa khái niệm, nhận diện mâu thuẫn chủ yếu, xác định phẩm chất đích (Q^*), dự địa phát triển tích cực/rủi ro phản phát triển ($d+/d-$), lựa chọn bậc chuyển, thiết kế sandbox, chỉ số đánh giá hiệu quả (KPI), rollback và cập nhật ngược. Đóng góp chính là bổ sung một lớp thao tác hóa có cấu trúc cho các khung quy hoạch di chuyển đô thị bền vững (SUMP), hệ thống giao thông thông minh (ITS), di chuyển như một dịch vụ (MaaS) và bản sao số giao thông, giúp kết nối mâu thuẫn của hệ với bậc chuyển, cơ chế kiểm chứng và điều kiện triển khai. Hai mini-case về metro/giao thông công cộng Hà Nội và đường sắt tốc độ cao Bắc - Nam được dùng để minh họa phương pháp bằng dữ liệu công khai, chưa nhằm chứng minh hiệu quả thực nghiệm độc lập.

Từ khóa: bản sao số giao thông, chuyển đổi số giao thông, dữ liệu giao thông, hệ thống giao thông thông minh, quy hoạch giao thông tích hợp, sandbox, tiến hóa hệ thống.

Chỉ số phân loại: 1.2, 2.1

A dialectical evolution method for concepts and systems in transport digital transformation: An analytical framework and proposed verification mechanism

Minh Tran*, Van Dien Nguyen

Thanh Do University, Hoai Duc commune, Hanoi, Vietnam

Received 21 May 2026; revised 18 June 2026; accepted 29 June 2026

*Tác giả liên hệ: Email: trminh@thanhdowni.edu.vn

Abstract:

This article applies a dialectical evolution method for concepts and systems to analyse digital transformation in transport as a system-transition process, rather than merely as technology selection or infrastructure investment. The method views transport as a system $H(t)$ comprising the superstructure, infrastructure, labour and production forces, flows, functions and whole-system quality (Q). Based on secondary-document analysis and two Vietnamese mini-cases, the article proposes an operational sequence including concept evolution, dominant-contradiction identification, target quality (Q^*), positive/negative development opportunities and risks ($d+/d-$), transition-level selection, sandbox design, key performance indicators (KPIs), rollback and reverse updating. Its main contribution is to add a structured operational layer to existing frameworks such as sustainable urban mobility plan (SUMP), intelligent transport systems (ITS), mobility as a service (MaaS) and transport digital twins, linking system contradictions with transition levels, verification mechanisms and implementation conditions. The two mini-cases illustrate how the method can be applied with publicly available data; they do not constitute independent empirical validation.

Keywords: digital transformation in transport, integrated transport planning, intelligent transport systems, sandbox, system evolution, transport data, transport digital twins.

Classification numbers: 1.2, 2.1

1. Đặt vấn đề

Giao thông đang chịu tác động đồng thời của đô thị hóa, chuyển đổi số, trí tuệ nhân tạo, dữ liệu lớn, yêu cầu giảm phát thải và nâng cao chất lượng sống. Nếu tiếp tục hiểu dự án giao thông chủ yếu là công trình đường, cầu, ga, bến, tuyến và phương tiện, các giải pháp sẽ thiên về mở rộng hạ tầng vật lý, trong khi giao thông hiện đại ngày càng vận hành như một hệ phức hợp gồm hạ tầng vật lý, dữ liệu, nền tảng, chính sách, hành vi người dân, quy hoạch đô thị và mô hình phát triển kinh tế - xã hội.

Trên thế giới, các tiếp cận hiện đại đều vượt khỏi tư duy “xây thêm đường”. Hướng dẫn SUMP coi quy hoạch di chuyển đô thị bền vững là quá trình tích hợp, có sự tham gia và giám sát - đánh giá [1]; chiến lược di chuyển bền vững và thông minh của Liên minh châu Âu đặt giao thông trong yêu cầu chuyển đổi xanh, số hóa và tăng khả năng chống chịu [2]; Singapore nhấn mạnh mạng giao thông thuận tiện, bao trùm, an toàn và lành mạnh [3]; London/TfL mở dữ liệu và API để hình thành hệ sinh thái ứng dụng [4,

5]. Các nghiên cứu về MaaS, thành phố thông minh, ITS và bản sao số cho thấy giao thông đang chuyển thành hệ dữ liệu - dịch vụ - điều khiển - phản hồi [6-11].

Ở Việt Nam, chuyển đổi số quốc gia được xác lập trong Quyết định số 749/QĐ-TTg [12], trong khi ngành giao thông đứng trước áp lực phát triển hạ tầng chiến lược, cao tốc, metro, logistics, chuyển đổi năng lượng xanh, số hóa quản lý và bảo đảm an toàn dữ liệu [13-16]. Câu hỏi trọng tâm vì vậy không chỉ là “xây công trình gì” hoặc “ứng dụng công nghệ nào”, mà là: hệ giao thông đang ở bậc phát triển nào, mâu thuẫn chủ yếu là gì, bậc chuyển nào cần lựa chọn, lực số/AI thâm vào đâu, kết quả được kiểm chứng bằng dữ liệu, KPI và phản hồi thực tiễn nào.

Nghiên cứu này đề xuất phương pháp tiến hóa biện chứng khái niệm và hệ thống áp dụng cho chuyển đổi số giao thông. Mục tiêu không thay thế các phương pháp quốc tế, mà bổ sung một tầng phương pháp luận giúp kết nối khái niệm - hệ thống - mâu thuẫn - dư địa - bậc phát triển - giải pháp - nhiệm vụ - kiểm chứng.

2. Phương pháp nghiên cứu và nguyên tắc dữ liệu

Bài viết sử dụng phương pháp nghiên cứu lý luận kết hợp phân tích tài liệu thứ cấp và minh họa bằng mini-case. Tài liệu được chia thành ba nhóm: (i) tài liệu phương pháp luận về tiến hóa biện chứng khái niệm và hệ thống; (ii) các khung, báo cáo và nghiên cứu quốc tế về SUMP, ITS, MaaS, dữ liệu mở, bản sao số và quy hoạch giao thông tích hợp; (iii) văn bản, báo cáo và thông tin công khai của Việt Nam về chuyển đổi số, quy hoạch giao thông, đường sắt đô thị, đường sắt tốc độ cao và chuyển đổi năng lượng xanh. Bảng 1 tóm tắt tiêu chí lựa chọn tài liệu và mini-case.

Bảng 1. Tiêu chí lựa chọn tài liệu và mini-case.

Nhóm dữ liệu/tài liệu	Tiêu chí lựa chọn	Vai trò trong bài
Khung quốc tế	Liên quan trực tiếp đến SUMP, ITS, MaaS, dữ liệu mở, bản sao số, quy hoạch giao thông tích hợp hoặc tích hợp giao thông - đô thị.	Làm cơ sở đối sánh và xác định khoảng trống mà phương pháp đề xuất cần bổ sung.
Văn bản/chính sách Việt Nam	Là văn bản chính sách, quy hoạch, nghị quyết, quyết định hoặc nguồn công khai chính thức liên quan đến chuyển đổi số, giao thông đô thị, metro, đường sắt tốc độ cao và chuyển đổi xanh.	Làm căn cứ xác định yêu cầu hệ trên, bối cảnh Việt Nam và các phẩm chất đích cần hướng tới.
Mini-case	Có tính thời sự, có dữ liệu công khai tối thiểu, đại diện cho hai cấp hệ khác nhau: cấp đô thị đối với metro/giao thông công cộng Hà Nội và cấp quốc gia đối với đường sắt tốc độ cao Bắc - Nam.	Minh họa cách chuyển từ dữ liệu công khai sang nhận diện mâu thuẫn, lựa chọn bậc chuyển, đề xuất KPI, sandbox và rollback.

Nguyên tắc dữ liệu là “nguồn trước, kết luận sau”. Mọi số liệu thực chứng và tài liệu tham khảo đều phải có nguồn kiểm tra được. AI, nếu được sử dụng, chỉ hỗ trợ biên tập, rà soát logic và gợi ý nguồn cần kiểm tra; không được tạo số liệu, tạo tài liệu tham khảo giả hoặc thay thế bằng chứng thực tế. Hai mini-case trong bài chỉ minh họa phương pháp bằng dữ liệu công khai, không phải khảo sát thực nghiệm độc lập.

3. Cơ sở phương pháp luận

3.1. Tiến hóa khái niệm và mô hình hệ giao thông H

Luận điểm nền tảng của phương pháp là: muốn thiết kế đúng hệ thống, trước hết phải hiểu đúng khái niệm. Nếu “dự án giao thông” chỉ được hiểu là “dự án xây dựng công trình”, giải pháp thường dừng ở đường, cầu, ga, phương tiện, vốn đầu tư và tiến độ thi công. Khi khái niệm này tiến hóa thành “hệ thống kiến tạo dòng chảy phát triển đô thị”, cấu trúc giải pháp mở rộng sang dữ liệu, điều khiển, kết nối đầu cuối, hành vi người dân, mô hình đô thị, phát triển quanh ga, phản hồi xã hội và kiểm chứng tác động.

Công thức khái quát được sử dụng là: **Khái niệm A hiện hành + Lực tiến hóa B + Lượng mới + Miền tương tác mới + Mâu thuẫn mới + Giải mâu thuẫn chủ yếu + Tái cấu trúc = Khái niệm A mới**. Áp dụng vào giao thông, lực số/AI/dữ liệu/nền tảng/cảm biến làm xuất hiện miền tương tác mới và mâu thuẫn mới, buộc khái niệm giao thông chuyển từ hệ đường - phương tiện sang hệ tổ chức dòng di chuyển, dòng dữ liệu, dòng quyết định, dòng tài chính, dòng trách nhiệm và dòng phản hồi.

Hệ giao thông H(t) được đọc theo sáu lớp cấu thành (bảng 2). Q* là phẩm chất đích đa chiều, được vận hành hóa theo từng bối cảnh bằng các chỉ số về thông suốt, an toàn, xanh, công bằng, đúng giờ, liên thông, thuận tiện, dự báo, thích ứng và kiểm chứng. Bài viết không đề xuất một công thức tổng hợp Q* cố định, vì trọng số giữa các phẩm chất phụ thuộc mục tiêu chính sách, bối cảnh đô thị và năng lực dữ liệu.

Bảng 2. Sáu lớp cấu thành của hệ giao thông H.

Lớp	Nội dung	Ý nghĩa đối với chuyển đổi số giao thông
Thượng tầng	Chiến lược, quy hoạch, pháp luật, thể chế, tiêu chuẩn, cơ chế đầu tư, cơ chế dữ liệu, chính sách giá vé, trách nhiệm liên ngành.	Quy định mục tiêu, luật chơi, trách nhiệm, quyền dữ liệu và cơ chế kiểm chứng.
Hạ tầng	Đường, cầu, ga, bến, phương tiện, tín hiệu, camera, cảm biến, vé điện tử, trung tâm điều hành, bản đồ số, dữ liệu, an toàn thông tin.	Tạo nền vật lý - số để dòng chảy vận hành an toàn, thông suốt và có thể đo lường.
Lực lượng lao động - sản xuất	Cán bộ quản lý, kỹ sư giao thông, kỹ sư dữ liệu, chuyên gia AI, điều độ viên, lái xe/lái tàu, doanh nghiệp, người dân.	Quyết định năng lực hấp thụ công nghệ và năng lực vận hành số/AI.

Dòng chảy	Dòng người, dòng xe, dòng hàng hóa, dòng dữ liệu, dòng tài chính, dòng quyết định, dòng cảnh báo, dòng bảo trì, dòng phản hồi.	Là đối tượng cần tối ưu, kiểm chứng và điều khiển thời gian thực.
Chức năng	Vận chuyển, kết nối, giảm ùn tắc, giảm phát thải, bảo đảm an toàn, tạo công bằng tiếp cận, hỗ trợ quy hoạch đô thị.	Cho biết hệ sinh ra để làm gì và chuyển đổi số phải nâng chức năng nào.
Chất lượng	Thông suốt, đúng giờ, an toàn, xanh, công bằng, thông minh, chống chịu, tự học và có kiểm chứng.	Là kết quả cuối cùng để xác nhận hệ có phát triển hoặc chuyển bậc hay không.

Phân biệt cải thiện, phát triển và tiến hóa giúp tránh nhầm lẫn giữa “làm tốt hơn cục bộ” với “chuyển bậc hệ thống”. Bảng 3 tóm tắt ba mức biến đổi này.

Bảng 3. Ba mức biến đổi của hệ giao thông: cải thiện, phát triển và tiến hóa.

Mức biến đổi	Bản chất	Ví dụ trong giao thông
Cải thiện	Làm tốt hơn cục bộ, chưa đổi cấu trúc, chưa sinh phẩm chất Q mới.	Vá đường, mở thêm làn, thêm biển báo, tăng số xe.
Phát triển	Tăng năng lực d+ trong phẩm chất hiện có, nhưng chưa vượt điểm chuyển bậc.	Mở mạng giao thông công cộng, tăng kết nối vùng, tăng năng lực vận chuyển.
Tiến hóa	Tái cấu trúc hệ, vượt điểm chuyển bậc, sinh phẩm chất Q mới.	Giao thông dữ liệu hóa, AI điều độ, bảo trì dự báo, sandbox, rollback, hệ sinh thái di chuyển - đô thị thông minh.

3.2. Khái niệm công cụ và tiêu chí vận hành

Các khái niệm công cụ của phương pháp chỉ có ý nghĩa khi gắn với đối tượng H cụ thể, dữ liệu hoặc bằng chứng thực tiễn, khả năng kiểm chứng và nhiệm vụ quản lý/thiết kế. Bảng 4 trình bày các khái niệm công cụ cốt lõi; bảng 5 tổng hợp tiêu chí đo tối thiểu để nhận biết, vận hành hóa và kiểm chứng chúng trong phân tích chuyển đổi số giao thông.

Bảng 4. Giải thích ngắn các khái niệm công cụ trong phương pháp.

Khái niệm	Giải thích vận hành	Ví dụ ngắn trong chuyển đổi số giao thông
Lực tiến hóa	Yếu tố mới có khả năng làm hệ H tích lũy lượng mới, tái cấu trúc và hình thành phẩm chất mới. Lực tiến hóa có thể là công nghệ, dữ liệu, AI, nhu cầu xã hội, thể chế mới hoặc áp lực môi trường.	Dữ liệu thời gian thực và AI không chỉ giúp đếm xe, mà có thể làm hệ giao thông chuyển từ điều khiển theo kế hoạch cứng sang điều khiển thích ứng theo dòng chảy thực tế.
Dư địa d+	Khả năng phát triển theo chiều tích cực còn chưa được khai thác: tăng thông suốt, giảm thời gian đi lại, tăng an toàn, tăng liên thông, tăng trải nghiệm người dân.	Nếu dữ liệu xe buýt, metro, bãi đỗ và đường bộ được liên thông, d+ là khả năng tối ưu hành trình đa phương thức cho người dân.
Dư địa d-	Mặt phản phát triển hoặc rủi ro phát sinh cùng với d+: lệ thuộc nền tảng, mất an toàn dữ liệu, bất bình đẳng tiếp cận, giám sát quá mức, chi phí vận hành tăng.	Triển khai camera và AI có thể giảm ùn tắc, nhưng d- là nguy cơ lộ dữ liệu cá nhân hoặc sử dụng dữ liệu ngoài mục đích giao thông.
Sandbox	Không gian thử nghiệm có giới hạn về phạm vi, thời gian, đối tượng, dữ liệu, trách nhiệm và tiêu chí dừng. Sandbox dùng để kiểm chứng giải pháp trước khi nhân rộng.	Thử nghiệm điều khiển đèn tín hiệu bằng AI tại một cụm nút giao trong 3-6 tháng, chưa áp dụng ngay cho toàn thành phố.
KPI d+/d-	Bộ chỉ số kiểm chứng đồng thời mặt tốt cần tăng và mặt xấu phải không chế. Nếu chỉ đo d+ mà bỏ d- thì giải pháp có thể tạo thành công bề mặt nhưng thất bại hệ thống.	KPI d+ có thể là giảm 15% thời gian chờ ở nút giao; KPI d- là không tăng tai nạn, không tăng khiếu nại dữ liệu cá nhân, không làm giảm tốc độ xe buýt.
Rollback	Cơ chế quay lui hoặc thu hồi giải pháp khi sandbox không đạt KPI, d- vượt ngưỡng hoặc hệ có dấu hiệu mất an toàn. Rollback phải được thiết kế trước khi thử nghiệm.	Nếu mô hình AI điều khiển đèn làm ùn tắc lan sang trục bên cạnh, hệ thống phải quay về chu kỳ đèn cũ hoặc chuyển sang chế độ bán tự động.
Cập nhật ngược	Quá trình đưa kết quả kiểm chứng, dữ liệu mới, bài học, d+ đã mở và d- phát sinh quay trở lại hồ sơ phát triển, kho dư địa và thiết kế vòng tiếp theo.	Sau thử nghiệm về điện tử liên thông, dữ liệu về nhóm người dùng khó tiếp cận được cập nhật để thiết kế phương án hỗ trợ người cao tuổi hoặc người không dùng điện thoại thông minh.
Điểm chuyển bậc	Ngưỡng tại đó lượng tích lũy đủ lớn làm hệ chuyển sang chất mới. Điểm chuyển bậc không phải mốc khởi công hay mốc ban hành văn bản, mà là khi hệ vận hành theo logic mới.	Một đô thị chưa chuyển bậc chỉ vì có app giao thông. Chỉ khi dữ liệu, điều khiển, phương tiện, dịch vụ và hành vi đi lại được kết nối thành hệ sinh thái vận hành mới có thể nói tới chuyển bậc.
Mốc tiến hóa	Thời điểm hoặc trạng thái được ghi nhận sau khi hệ đã vượt điểm chuyển bậc, hình thành phẩm chất mới và có bằng chứng kiểm chứng đủ tin cậy.	Mốc tiến hóa có thể là khi tỷ lệ chuyển đi đa phương thức được hỗ trợ số tăng ổn định, thời gian đi lại giảm, tai nạn không tăng và người dân duy trì sử dụng dịch vụ mới.
Hệ thu thập dữ liệu tiến hóa	Hệ thu thập dữ liệu không chỉ để báo cáo hiện trạng, mà để nhận biết quá trình trở thành của H: trạng thái H(t), mâu thuẫn, d+, d-, tài nguyên, ràng buộc, điểm cận biên và kết quả kiểm chứng.	Không chỉ thu số lượt xe qua nút giao, mà còn thu dữ liệu về thời gian chờ, dòng người chuyển tuyến, phản ánh của người dân, sự cố, an toàn và hiệu quả sau can thiệp.

Bảng 5. Tiêu chí đo tối thiểu cho các khái niệm công cụ của phương pháp.

Khái niệm	Cách nhận biết vận hành	Tiêu chí đo tối thiểu	Dữ liệu cần có
Q*	Phẩm chất đích của hệ sau chuyển đổi, được suy ra từ yêu cầu hệ trên, nhu cầu vận hành, dữ liệu/phản hồi thực tế và các khung giao thông đã được thừa nhận.	Mức thông suốt, an toàn, xanh, công bằng, đúng giờ, liên thông, thuận tiện; khả năng dự báo, thích ứng và kiểm chứng.	Quy hoạch, KPI ngành, dữ liệu vận hành, phản hồi người dân, dữ liệu trước - sau nếu có sandbox.
d+	Dư địa hoặc lợi ích tích cực có thể mở ra khi giải được mâu thuẫn.	Mức cải thiện KPI tích cực: giảm thời gian chờ, tăng đúng giờ, tăng sản lượng khách, tăng hài lòng, giảm phát thải.	Dữ liệu vận hành, báo cáo dự án, dashboard, khảo sát hoặc phản hồi người dùng.
d-	Rủi ro, mặt phản phát triển hoặc tác dụng phụ có thể phát sinh cùng với d+.	Mức tăng rủi ro: tai nạn, quá tải, chi phí, khiếu nại, rủi ro dữ liệu, loại trừ nhóm yếu thế.	Nhật ký vận hành, báo cáo sự cố, phản ánh người dân, dữ liệu an toàn và bảo mật.
Điểm chuyển bậc	Ngưỡng mà hệ bắt đầu vận hành theo logic mới, không chỉ thêm thiết bị hoặc tăng quy mô cũ.	Có thay đổi đồng thời ở dữ liệu, điều khiển, quy trình, nhân lực và KPI; Q* bắt đầu xuất hiện ổn định.	Hồ sơ vận hành, quy trình mới, dữ liệu trước - sau, quyết định chuẩn hóa hoặc nhân rộng.
Mốc tiến hóa	Trạng thái được ghi nhận sau khi hệ vượt điểm chuyển bậc và duy trì phẩm chất mới.	KPI d+ đạt ngưỡng, KPI d- trong giới hạn, cơ chế mới vận hành ổn định qua một giai đoạn theo dõi.	Dữ liệu kiểm chứng theo giai đoạn, báo cáo đánh giá, phản hồi người dùng và đơn vị vận hành.
Hệ thu thập dữ liệu tiến hóa	Hệ thu thập dữ liệu để nhận biết H(t), mâu thuẫn, d+/d-, tài nguyên, ràng buộc và kết quả kiểm chứng.	Có nguồn dữ liệu, tần suất cập nhật, chủ thể quản lý, khả năng truy ngược, quy trình kiểm tra chất lượng dữ liệu.	Danh mục nguồn dữ liệu, metadata, dashboard, quy chế chia sẻ và kiểm tra dữ liệu.
Kho dự địa phát triển	Tập có cấu trúc các d+/d-, nguồn mâu thuẫn, tài nguyên, KPI, sandbox và rollback.	Mỗi dự địa có mô tả d+, d-, nguồn sinh, tài nguyên, KPI, ngưỡng đỏ và phương án xử lý.	Hồ sơ dự địa, bảng KPI, dữ liệu kiểm chứng, nhật ký sandbox và bài học cập nhật ngược.
Sandbox	Phạm vi thử nghiệm có giới hạn để kiểm chứng can thiệp trước khi nhân rộng.	Có phạm vi, thời gian, chủ thể, dữ liệu, KPI d+/d-, ngưỡng dừng, trách nhiệm và phương án rollback.	Kế hoạch thí điểm, nhật ký vận hành, dữ liệu trước - sau, biên bản đánh giá và phản hồi liên quan.
Rollback	Cơ chế quay lui, dừng hoặc điều chỉnh can thiệp khi d- vượt ngưỡng hoặc kết quả không đạt yêu cầu.	Có điều kiện kích hoạt, phương án quay lui, chủ thể quyết định, thời gian phản ứng và trạng thái an toàn cần khôi phục.	Quy trình vận hành, nhật ký sự cố, lệnh dừng/điều chỉnh, dữ liệu sau rollback.

Các khái niệm trên tạo thành vòng vận hành: lực tiến hóa làm xuất hiện lượng mới và mâu thuẫn mới; d+ cho biết khả năng phát triển cần mở; d- cho biết rủi ro cần khóa; sandbox là nơi kiểm chứng; KPI d+/d- là thước đo; rollback là cơ chế an toàn; cập nhật ngược là cơ chế học để vòng sau tốt hơn vòng trước.

4. Đối sánh với các tiếp cận hiện có

SUMP mạnh ở quy hoạch tích hợp, sự tham gia và giám sát - đánh giá [1]. Singapore cho thấy, giao thông phải được thiết kế cùng cấu trúc đô thị, việc làm, nhà ở, dịch vụ công và điểm trung chuyển [3, 17]. London/TfL cho thấy, dữ liệu mở chỉ tạo giá trị khi có chuẩn dữ liệu, cập nhật, cộng đồng phát triển và cơ chế phản hồi [4, 5]. MaaS tích hợp thông tin, phương thức, thanh toán và lựa chọn hành trình [6], trong khi ITS và bản sao số hỗ trợ mô hình hóa, mô phỏng, điều khiển, nhưng đòi hỏi khả năng tương tác, an toàn và trách nhiệm [9-11, 18].

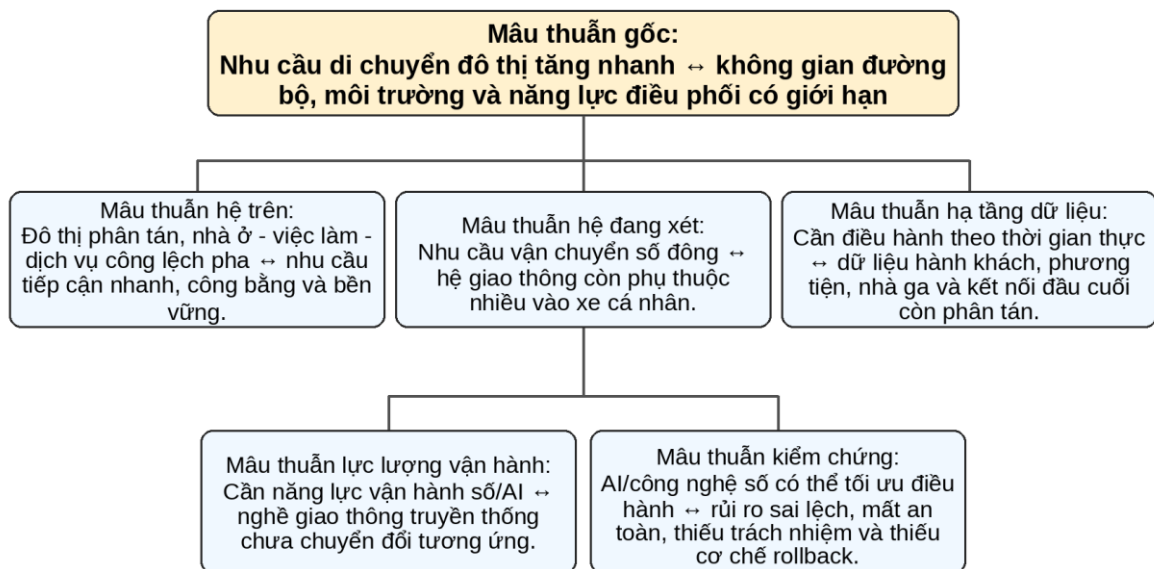
Điểm bổ sung của phương pháp tiến hóa biện chứng không nằm ở việc thay thế các khung này, mà ở việc đặt trước một lớp thao tác hóa: nhận diện mâu thuẫn chủ yếu, xác định Q*, lựa chọn bậc chuyển, thiết kế sandbox, KPI d+/d-, rollback và cập nhật ngược. Bảng 6 tóm tắt vị trí bổ sung này.

Bảng 6. So sánh khả năng hỗ trợ ra quyết định của các khung tiếp cận.

Tiêu chí	SUMP	ITS	MaaS	Bản sao số	Phương pháp đề xuất
Nhận diện mâu thuẫn chủ yếu	Có gián tiếp qua phân tích vấn đề	Không phải trọng tâm	Ít rõ	Có thể hỗ trợ mô phỏng vấn đề	Là bước trung tâm
Chọn bậc phát triển	Không nêu thành thang bậc	Tập trung công nghệ/vận hành	Tập trung dịch vụ	Tập trung mô hình hóa	Có thang bậc tiến hóa
Gắn hệ trên đô thị/vùng	Mạnh	Trung bình	Trung bình	Tùy mô hình	Mạnh, qua hệ trên - hệ dưới
Thiết kế sandbox	Có thể có trong triển khai	Có thể có	Có thể có	Có thể có	Thành phần bắt buộc
KPI lợi ích/rủi ro	Có giám sát - đánh giá	Có KPI kỹ thuật	Có KPI dịch vụ	Có KPI mô phỏng	KPI d+/d- đồng thời
Rollback	Không nhấn mạnh	Có thể có trong vận hành	Ít rõ	Có thể mô phỏng kịch bản	Thành phần rõ trong phương pháp
Cập nhật ngược	Có trong giám sát - đánh giá	Có qua dữ liệu vận hành	Có qua phản hồi người dùng	Có qua cập nhật mô hình	Gắn với hồ sơ phát triển và kho dự địa
Phạm vi phù hợp nhất	Quy hoạch đô thị bền vững	Điều hành và hạ tầng thông minh	Dịch vụ di chuyển tích hợp	Mô phỏng và tối ưu hệ	Lựa chọn mâu thuẫn, bậc chuyển và kiểm chứng

5. Bối cảnh Việt Nam và quy trình lựa chọn bậc chuyên

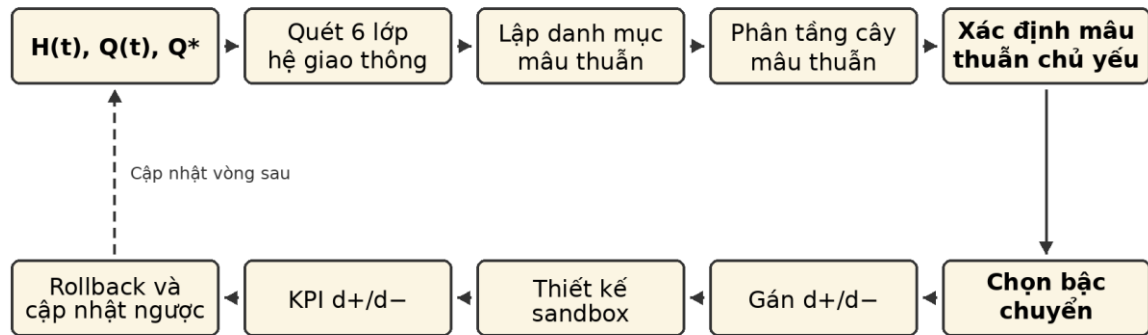
Việt Nam đang ở trạng thái giao thông đa bậc. Ở cấp quốc gia, nhu cầu phát triển cao tốc, đường sắt tốc độ cao, kết nối vùng và logistics rất lớn; riêng đường sắt tốc độ cao Bắc - Nam được xác định là trục vận tải chiến lược và hành lang phát triển quốc gia [19-21]. Ở cấp đô thị, Hà Nội và Thành phố Hồ Chí Minh đối mặt với mâu thuẫn giữa nhu cầu đi lại tăng nhanh, xe cá nhân lớn, không gian đường bộ hữu hạn và yêu cầu tăng vận tải công cộng; Hà Nội đặt mục tiêu vận tải công cộng đáp ứng ít nhất 30% nhu cầu đi lại vào năm 2030 và thúc đẩy quản lý giao thông thông minh [22, 23]. Các báo cáo quốc tế về giao thông đô thị châu Á và Việt Nam cũng nhấn mạnh yêu cầu đọc giao thông qua chỉ số, dữ liệu vận hành, hạ tầng, tài chính, bao trùm xã hội và tính bền vững [24-27].



Hình 1. Minh họa cây mâu thuẫn trong giao thông đô thị.

Quy trình phân tích bắt đầu từ $H(t)$, $Q(t)$, Q^* , quét sáu lớp hệ thống, lập danh mục mâu thuẫn, phân tầng cây mâu thuẫn, xác định mâu thuẫn chủ yếu, chọn bậc chuyên, gán $d+/d-$, thiết kế sandbox, KPI và rollback. Hình 1 minh họa cây mâu thuẫn điển hình trong giao thông đô thị.

Từ hình 1, quy trình được thao tác hóa thành lưu đồ ở hình 2.



Hình 2. Lưu đồ nhận diện mâu thuẫn chủ yếu và lựa chọn bậc chuyển.

Để giảm tính chủ quan, mỗi mâu thuẫn ứng viên M_i được chấm theo năm tiêu chí: khoảng cách tới Q^* (Gap), tác động hệ thống nếu giải được mâu thuẫn (Impact), tính cấp thiết (Urgency), mức độ sẵn có dữ liệu kiểm chứng (Data) và rủi ro phát sinh d- (Risk):

$$S(M_i) = w_1 \cdot \text{Gap}_i + w_2 \cdot \text{Impact}_i + w_3 \cdot \text{Urgency}_i + w_4 \cdot \text{Data}_i - w_5 \cdot \text{Risk}_i$$

Trọng số $w_1 \dots w_5$ có thể xác định bằng tham vấn chuyên gia/Delphi, phân tích thứ bậc (AHP), mục tiêu chính sách hoặc trọng số bằng nhau ở bước sàng lọc ban đầu kèm phân tích độ nhạy. Bảng 7 trình bày thang điểm; bảng 8 và bảng 9 lần lượt liên kết mâu thuẫn với bậc chuyển và thang bậc phát triển của hệ giao thông.

Bảng 7. Thang đánh giá các tiêu chí trong công thức điểm ưu tiên của mâu thuẫn ứng viên ($S(M_i)$).

Điểm	Ý nghĩa chung khi đánh giá Gap, Impact, Urgency, Data và Risk
1	Rất thấp hoặc chưa có dữ liệu.
2	Thấp, mới có dấu hiệu ban đầu.
3	Trung bình, có bằng chứng nhưng chưa đủ mạnh.
4	Cao, có dữ liệu hoặc bằng chứng khá rõ.
5	Rất cao, có dữ liệu rõ, tác động lớn hoặc cấp thiết.

Bảng 8. Các mâu thuẫn chủ yếu và bậc chuyển tương ứng của hệ giao thông.

Mâu thuẫn chủ yếu	Biểu hiện thực tế	Bậc chuyển cần lựa chọn
Nhu cầu kết nối tăng nhưng hạ tầng vật lý thiếu	Thiếu đường, cầu, tuyến, ga, bến; kết nối vùng yếu; năng lực vận tải không theo kịp nhu cầu phát triển.	Bậc hạ tầng giao thông vật lý. Trọng tâm là bổ sung năng lực nền: tuyến, nút, bến, ga, phương tiện và kết nối cơ bản.
Có hạ tầng nhưng các tuyến, phương thức và điểm trung chuyển rời rạc	Đi lại nhiều chặng, khó chuyển tuyến, chi phí thời gian cao, thiếu đồng bộ giữa đường bộ, đường sắt, xe buýt, bến bãi và dịch vụ cuối chặng.	Bậc mạng giao thông có tổ chức. Trọng tâm là liên thông tuyến, phương thức, lịch trình, điểm trung chuyển và quy hoạch vận hành.
Nhu cầu đi lại đô thị tăng nhưng không gian đường bộ hữu hạn	Ùn tắc, phụ thuộc xe cá nhân, ô nhiễm, tai nạn, mất thời gian và suy giảm chất lượng sống đô thị.	Bậc giao thông công cộng tích hợp. Trọng tâm là chuyển từ tối ưu xe cá nhân sang tối ưu dòng người bằng metro, xe buýt nhanh (BRT), xe buýt, đi bộ, xe đạp và kết nối đầu cuối.
Có giao thông công cộng nhưng thiếu dữ liệu sống về dòng di chuyển	Không biết chính xác dòng khách, thời gian chờ, điểm nghẽn, nhu cầu theo giờ, theo tuyến và theo khu vực; quyết định chủ yếu dựa trên báo cáo chậm.	Bậc giao thông số hóa dựa trên dữ liệu. Trọng tâm là dữ liệu hóa dòng người, dòng phương tiện, dòng sự cố, dòng phản hồi và dòng vận hành.
Có dữ liệu nhưng điều hành còn chậm, phân tán và thiếu dự báo	Phản ứng chậm với sự cố; tín hiệu đèn chưa tối ưu; điều độ chưa theo thời gian thực; dự báo ùn tắc, trễ chuyển và quá tải còn yếu.	Bậc giao thông thông minh có điều khiển. Trọng tâm là phân tích dữ liệu, mô phỏng, dự báo, điều độ và điều khiển theo thời gian thực.
Có AI, cảm biến, nền tảng nhưng thiếu kiểm chứng, trách nhiệm và cơ chế an toàn	Công nghệ dễ chạy theo phong trào; thuật toán có thể sai lệch; dữ liệu có thể thiếu đại diện; chưa rõ khi nào dừng, sửa hoặc quay lại phương án cũ.	Bậc giao thông thông minh có kiểm chứng. Trọng tâm là sandbox, KPI $d+/d-$, trách nhiệm giải trình, giám sát rủi ro và rollback.
Giao thông phát triển tách rời đô thị, đất đai, nhà ở, việc làm và môi trường	Xây thêm đường nhưng vẫn tắc; đô thị mở rộng lệch pha với giao thông; nhà ở, việc làm, dịch vụ và vận tải công cộng không đồng tiến hóa.	Bậc hệ sinh thái di chuyển thông minh gắn với hệ trên đô thị/vùng. Trọng tâm là tích hợp giao thông với quy hoạch đô thị, dữ liệu, đất đai, môi trường, dịch vụ công và phát triển vùng.

Bảng 9. Thang bậc phát triển của hệ giao thông.

Bậc	Tên bậc	Dấu hiệu nhận biết
0	Đường đi tự phát	Dòng di chuyển hình thành chủ yếu theo nhu cầu tự phát, thiếu quy hoạch và điều phối.
1	Hạ tầng giao thông vật lý	Có đường, cầu, ga, bến, tuyến, phương tiện cơ bản.
2	Mạng giao thông có tổ chức	Các tuyến, nút, phương thức được kết nối thành mạng vận hành có quy tắc.
3	Giao thông công cộng tích hợp	Vận tải khối lượng lớn, kết nối đầu cuối, vé và thông tin hành trình được tích hợp.
4	Giao thông số hóa	Dữ liệu hành trình, phương tiện, vé, hạ tầng và vận hành được số hóa, có khả năng truy xuất.
5	Giao thông thông minh có điều khiển	Dữ liệu sống hỗ trợ điều hành thời gian thực, cảnh báo, điều phối và tối ưu.
6	Giao thông tự học, dự báo, tối ưu có kiểm chứng	AI, mô phỏng, bản sao số, bảo trì dự báo, sandbox và KPI d+/ d– được dùng có kiểm soát.
7	Hệ sinh thái di chuyển - phát triển đô thị thông minh	Giao thông, quy hoạch đô thị, đất đai, nhà ở, việc làm, môi trường và phát triển vùng được đồng thiết kế.

Quy tắc chọn bậc là: mâu thuẫn nằm ở tầng nào thì bậc chuyển phải đủ cao để tái cấu trúc tầng đó. Không chọn bậc quá thấp vì chỉ cải thiện cục bộ; cũng không chọn bậc quá cao khi hệ dưới chưa đủ năng lực hấp thụ, vì dễ tạo d– như lãng phí đầu tư, phụ thuộc công nghệ, dữ liệu rỗng hoặc mất niềm tin xã hội.

6. Minh họa ứng dụng trên hai mini-case Việt Nam

Hai mini-case được sử dụng để minh họa cách chuyển từ dữ liệu công khai sang mâu thuẫn chủ yếu, bậc chuyển, sandbox, KPI d+/d– và rollback. Trường hợp Hà Nội cho thấy mâu thuẫn không còn là “có hay không có metro”, mà là metro đã xuất hiện như hạ tầng trục trong khi kết nối đầu cuối, liên thông bus - metro - đi bộ - bãi đỗ, dữ liệu hành khách và điều hành đa phương thức còn là điểm nghẽn. Dữ liệu công khai cho biết Hà Nội Metro đã vận hành hai tuyến đường sắt đô thị, phục vụ hơn 20,6 triệu lượt hành khách năm 2025 và định hướng phát triển mạng metro lớn hơn đến năm 2035-2045 [23, 28].

Trường hợp đường sắt tốc độ cao Bắc - Nam là bậc chuyển quốc gia. Mâu thuẫn chủ yếu là nhu cầu tạo trục vận tải chiến lược, hiện đại, đồng bộ trong khi năng lực điều phối dự án, công nghệ, giải phóng mặt bằng, tái định cư, kết nối ga - đô thị - logistics và kiểm soát rủi ro có tính phân tán theo địa phương, ngành và giai đoạn [19, 21]. Vì vậy, dự án không chỉ là công trình đường sắt, mà cần được thiết kế như hệ sinh thái di

chuyển và hành lang phát triển quốc gia có kiểm chứng theo giai đoạn. Bảng 10 tóm tắt liên kết này.

Bảng 10. Ma trận liên kết mini-case - mâu thuẫn chủ yếu - bậc chuyển - cơ chế kiểm chứng.

Mini-case	Mâu thuẫn chủ yếu	Bậc chuyển gợi ý	Cơ chế kiểm chứng tối thiểu
Metro/giao thông công cộng Hà Nội	Đã có tuyến metro nhưng kết nối đầu cuối, liên thông đa phương thức và dữ liệu điều hành còn là điểm nghẽn.	Từ hạ tầng tuyến sang mạng giao thông công cộng tích hợp, sau đó sang giao thông số hóa dựa trên dữ liệu.	Sandbox quanh một số ga; KPI d+ về sản lượng khách, thời gian chuyển tuyến, độ đúng giờ; KPI d- về quá tải, chi phí, dữ liệu cá nhân; rollback theo tuyến, ga hoặc chức năng.
Đường sắt tốc độ cao Bắc - Nam	Nhu cầu trực vận tải chiến lược quốc gia đối mặt với điều phối dự án, công nghệ, giải phóng mặt bằng, tái định cư và kết nối vùng.	Từ công trình đường sắt tốc độ cao sang hệ sinh thái di chuyển và hành lang phát triển quốc gia.	Sandbox theo cụm ga/đoạn tuyến; KPI d+ về kết nối, tiến độ, an toàn, phát thải; KPI d- về đội vốn, chậm tiến độ, phụ thuộc công nghệ, tác động xã hội; cập nhật ngược theo giai đoạn.

Hai mini-case cho thấy, cùng một lĩnh vực giao thông nhưng mỗi hệ có mâu thuẫn chủ yếu khác nhau, do đó bậc chuyển, sandbox, KPI và rollback cũng khác nhau. Bảng 11 nêu thêm dữ liệu công khai đã có, KPI có thể xây dựng và dữ liệu cần bổ sung khi triển khai sandbox thực tế.

Bảng 11. Dữ liệu công khai, KPI đề xuất và mức kiểm chứng trong hai mini-case.

Mini-case	Dữ liệu công khai đã có	KPI d+ có thể xây dựng	KPI d- cần theo dõi	Mức kiểm chứng hiện tại	Dữ liệu cần bổ sung khi sandbox
Metro/giao thông công cộng Hà Nội	Lượt tàu, km khai thác, lượt hành khách, tuyến vận hành, quy hoạch metro.	Sản lượng khách; độ đúng giờ; thời gian chuyển tuyến; mức tích hợp bus - metro; mức hài lòng.	Quá tải giờ cao điểm; chi phí vận hành; loại trừ người không dùng điện thoại thông minh; rủi ro dữ liệu cá nhân.	Minh họa bằng dữ liệu công khai, chưa phải đo kiểm thực nghiệm độc lập.	Khảo sát hài lòng; log chuyển tuyến; dữ liệu thời gian thực quanh ga; dữ liệu khiếu nại/sự cố.
Đường sắt tốc độ cao Bắc - Nam	Chiều dài tuyến, tổng mức đầu tư, chủ trương đầu tư, cơ chế tách dự án, quy hoạch đường sắt.	Tiến độ; năng lực kết nối vùng; tích hợp ga - đô thị - logistics; an toàn; phát thải theo kịch bản.	Đội vốn; chậm tiến độ; tái định cư; phụ thuộc công nghệ; thiếu nhân lực vận hành; tác động xã hội.	Minh họa bằng văn bản công khai, chưa có dữ liệu vận hành sau đầu tư.	Dữ liệu thực hiện theo đoạn tuyến/cụm ga; dữ liệu tái định cư; dữ liệu chi phí - tiến độ; dữ liệu vận hành sau đầu tư.

7. Kiểm chứng, hàm ý áp dụng và giới hạn nghiên cứu

Phương pháp không chỉ tìm lỗi hay điểm nghẽn, mà lập kho dư địa phát triển gồm các cặp $d+/d-$. Mỗi dư địa cần được ghi thành hồ sơ gồm: mô tả $d+$, mâu thuẫn sinh ra, tài nguyên cần huy động, KPI trước/sau, sandbox, ngưỡng nhân rộng, $d-$ tương ứng, KPI cảnh báo sớm, ngưỡng đỏ, cơ chế xử lý, rollback và bài học cập nhật ngược. Cách làm này giúp kiểm tra xem công nghệ có thật sự mở được $d+$ và khóa được $d-$ hay không.

Có thể phân biệt bốn mức kiểm chứng. Mức thứ nhất là kiểm chứng logic của phương pháp: mâu thuẫn $\rightarrow$ bậc chuyển $\rightarrow$ sandbox $\rightarrow$ KPI $d+/d-$ $\rightarrow$ rollback $\rightarrow$ cập nhật ngược. Mức thứ hai là kiểm chứng minh họa bằng dữ liệu công khai qua hai mini-case. Mức thứ ba là kiểm chứng bán định lượng thông qua $S(M_i)$, tiêu chí chấm điểm, trọng số và KPI. Mức thứ tư là kiểm chứng thực nghiệm, đòi hỏi sandbox thật, dữ liệu trước - sau, sai số đo lường, độ tin cậy thống kê và ngưỡng chấp nhận định lượng cho từng KPI.

Trong phạm vi bài viết này, ba mức đầu được thao tác hóa ở mức phương pháp luận và minh họa; mức kiểm chứng thực nghiệm chưa được thực hiện. Vì vậy, bài viết chưa xác định sai số đo lường, độ tin cậy thống kê hoặc ngưỡng chấp nhận định lượng cho từng KPI. Các tham số này chỉ có thể được xác lập khi có địa bàn, tuyến, cụm ga, hành lang, dữ liệu vận hành và thiết kế sandbox cụ thể.

Hàm ý áp dụng tại Việt Nam là: quy hoạch giao thông đô thị cần bắt đầu từ bậc phát triển hiện tại và mâu thuẫn chủ yếu; dự án giao thông lớn cần có hồ sơ phát triển hệ ngay từ giai đoạn chuẩn bị; triển khai ITS và AI giao thông cần nghiệm thu theo tác động chứ không chỉ theo lắp đặt thiết bị; đồng thời cần phát triển nghề giao thông số như kỹ sư dữ liệu giao thông, điều độ viên dữ liệu, kiểm định viên AI giao thông và chuyên gia an toàn dữ liệu giao thông.

Về phạm vi áp dụng, phương pháp phù hợp nhất với các bài toán có tính hệ thống, nhiều chủ thể và có rủi ro công nghệ/chính sách rõ rệt, chẳng hạn phát triển mạng metro, điều hành giao thông đô thị bằng dữ liệu, tổ chức logistics vùng, triển khai ITS hoặc thiết kế hành lang đường sắt tốc độ cao. Với các nhiệm vụ kỹ thuật thuần túy đã có quy trình chuẩn, phương pháp này chủ yếu đóng vai trò kiểm tra bậc phát triển, rủi ro $d-$ và cơ chế cập nhật ngược.

Về giới hạn, phương pháp yêu cầu dữ liệu đủ tin cậy, chủ thể quản trị có thẩm quyền và cơ chế thử nghiệm được chấp nhận. Nếu thiếu dữ liệu trước - sau, thiếu quyền chia sẻ dữ liệu hoặc không có ngưỡng dừng rõ ràng, sandbox dễ trở thành thử nghiệm hình thức. Vì vậy, thiết kế dữ liệu, trách nhiệm và rollback phải được coi là điều kiện triển khai, không phải phần bổ sung sau cùng.

Điểm cần nhấn mạnh là kết quả của mỗi vòng triển khai không chỉ là quyết định “tiếp tục hay dừng” một giải pháp. Kết quả quan trọng hơn là hồ sơ phát triển được làm giàu: mâu thuẫn nào đã được kiểm chứng, chỉ số nào đủ tin cậy, dữ liệu nào còn thiếu, rủi ro nào đã lộ diện, tài nguyên nào có thể huy động và điều kiện nào phải có trước khi nhân rộng. Nhờ đó, chuyển đổi số giao thông không vận hành như chuỗi dự án rời rạc, mà như quá trình học có tổ chức của toàn hệ.

Khi triển khai thực tế, có thể vận hành phương pháp theo sáu bước ngắn. Bước một là xác định rõ hệ đang xét, ranh giới hệ, hệ trên, hệ dưới và phẩm chất Q^* mong muốn. Bước hai là quét sáu lớp của $H(t)$ để lập danh mục mâu thuẫn, sau đó phân tầng để tìm mâu thuẫn chủ yếu thay vì xử lý biểu hiện bề mặt. Bước ba là lựa chọn bậc chuyển phù hợp với tầng mâu thuẫn, tránh chọn công nghệ quá cao khi hệ dưới chưa đủ năng lực hấp thụ. Bước bốn là thiết kế sandbox với phạm vi, thời gian, chủ thể, dữ liệu và trách nhiệm rõ ràng. Bước năm là xác lập KPI $d+/d-$, ngưỡng dừng và phương án rollback trước khi thử nghiệm. Bước sáu là cập nhật ngược toàn bộ dữ liệu, bài học, $d+$ đã mở và $d-$ phát sinh vào hồ sơ phát triển để chuẩn bị vòng can thiệp tiếp theo.

8. Kết luận

Bài viết đề xuất phương pháp tiến hóa biện chứng khái niệm và hệ thống như một khung phương pháp luận bổ sung cho các tiếp cận hiện có về chuyển đổi số giao thông. Đóng góp chính là kết nối theo chuỗi thao tác hóa: khái niệm - hệ thống - mâu thuẫn - Q^* - bậc chuyển - sandbox - KPI $d+/d-$ - rollback - cập nhật ngược. Phương pháp không phủ định SUMP, ITS, dữ liệu mở, MaaS hay bản sao số, mà bổ sung tầng giúp xác định mâu thuẫn chủ yếu, lựa chọn bậc chuyển phù hợp và thiết kế cơ chế kiểm chứng trước khi lựa chọn giải pháp công nghệ.

Đối với Việt Nam, hai mini-case về metro Hà Nội và đường sắt tốc độ cao Bắc - Nam cho thấy cách chuyển nhận xét chung thành ma trận vận hành cụ thể: mâu thuẫn nào, Q^* nào, bậc chuyển nào, sandbox nào, KPI $d+/d-$ nào và cập nhật ngược ở đâu. Hướng nghiên cứu tiếp theo là áp dụng phương pháp vào một tuyến, cụm ga, hành lang hoặc đô thị cụ thể để lượng hóa Q^* , xác định trọng số, đo dữ liệu trước - sau, đánh giá sai số, kiểm tra độ tin cậy thống kê và xác lập ngưỡng chấp nhận cho từng KPI trong sandbox thực tế.

Tuyên bố về sử dụng AI và dữ liệu

Bài viết sử dụng công cụ AI để hỗ trợ tái cấu trúc, biên tập, chuẩn hóa câu chữ, rà soát logic và gợi ý nguồn tham khảo cần kiểm tra. Tác giả không sử dụng AI để tạo số liệu, tạo tài liệu tham khảo giả hoặc thay thế bằng chứng thực tế. Các tài liệu tham khảo là nguồn thật đã được đối chiếu bằng thông tin công khai; các số liệu trong bài chỉ được dùng khi có nguồn truy ngược.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Rupprecht Consult (2019), *Guidelines for Developing and Implementing A Sustainable Urban Mobility Plan* (2nd Ed.), European Commission/Eltis, https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/system/files/2023-09/sump_guidelines_2019_second%20edition.pdf, accessed 5 May 2026.
- [2] European Commission (2020), *Sustainable and Smart Mobility Strategy: Putting European Transport on Track for The Future*, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0789>, accessed 5 May 2026.
- [3] Land Transport Authority (2019), *Land Transport Master Plan 2040*, https://www.lta.gov.sg/content/ltagov/en/who_we_are/our_work/land_transport_master_plan_2040.html, accessed 5 May 2026.
- [4] Transport for London (2026a), “Unified API”, <https://tfl.gov.uk/info-for/open-data-users/unified-api>, accessed 8 May 2026.
- [5] Transport for London (2026b), “Unified API documentation”, <https://tfl.gov.uk/info-for/open-data-users/api-documentation>, accessed 8 May 2026.
- [6] P. Jittrapirom, V. Caiati, A.M. Feneri, et al. (2017), “Mobility as a service: A critical review of definitions, assessments of schemes, and key challenges”, *Urban Planning*, **2(2)**, pp.13-25, DOI: 10.17645/up.v2i2.931.
- [7] M. Batty, K.W. Axhausen, F. Giannotti, et al. (2012), “Smart cities of the future”, *The European Physical Journal Special Topics*, **214**, pp.481-518, DOI: 10.1140/epjst/e2012-01703-3.
- [8] M. Batty (2013), “Big data, smart cities and city planning”, *Dialogues in Human Geography*, **3(3)**, pp.274-279, DOI: 10.1177/2043820613513390.
- [9] A. Rudskoy, I. Ilin, A. Prokhorov (2021), “Digital twins in intelligent transport systems”, *Transportation Research Procedia*, **54**, pp.927-935, DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.152.
- [10] C. Creß, Z. Bing, A.C. Knoll (2021), “Intelligent transportation systems using roadside infrastructure: A literature survey”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, DOI: 10.1109/TITS.2023.3343434.
- [11] S. Dasgupta, M. Rahman, A.D. Lidbe, et al. (2021), “A transportation digital-twin approach for adaptive traffic control systems”, *arXiv*, DOI: 10.48550/arXiv.2109.10863.
- [12] Prime Minister of Viet Nam (2020), *Decision No. 749/QĐ-TTg dated 3 June 2020 Approving The National Digital Transformation Programme to 2025, with Orientations to 2030*, <https://chinhphu.vn/default.aspx?docid=200163&pageid=27160>, accessed 8 May 2026 (in Vietnamese).

[13] Prime Minister of Viet Nam (2021), *Decision No. 1454/QĐ-TTg dated 1 September 2021 Approving The Road Network Master Plan for 2021-2030, with a Vision to 2050*, <https://congbao.chinhphu.vn/van-ban/quyet-dinh-so-1454-qd-ttg-34265.htm>, accessed 8 May 2026 (in Vietnamese).

[14] Prime Minister of Viet Nam (2025a), *Decision No. 12/QĐ-TTg dated 3 January 2025 Approving Adjustments to The Road Network Master Plan for 2021-2030, with A Vision to 2050*, <https://vanban.chinhphu.vn/?docid=212250&pageid=27160>, accessed 8 May 2026 (in Vietnamese).

[15] Prime Minister of Viet Nam (2022), *Decision No. 876/QĐ-TTg dated 22 July 2022 Approving The Action Programme on Green Energy Transition and Reduction of Carbon and Methane Emissions in The Transport Sector*, <https://vanban.chinhphu.vn/?docid=206188&pageid=27160>, accessed 8 May 2026 (in Vietnamese).

[16] National Assembly of Viet Nam (2024a), “The National Assembly adopts a resolution on the investment policy for the North-South high-speed railway project”, *National Assembly Portal*, <https://quochoi.vn/tintuc/Pages/tin-hoat-dong-cua-quoc-hoi.aspx?ItemID=91817>, accessed 8 May 2026 (in Vietnamese).

[17] International Transport Forum (2020), *Integrated Land-use and Transport Planning: Singapore's Experience*, <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/integrated-land-use-transport-planning-singapore-lta.pdf>, accessed 8 May 2026.

[18] European Parliament and Council of the European Union (2010), *Directive 2010/40/EU on The Framework for The Deployment of Intelligent Transport Systems in The Field of Road Transport and for Interfaces with Other Modes of Transport*, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/40/oj/eng>, accessed 15 May 2026.

[19] National Assembly of Viet Nam (2024b), *Resolution No. 172/2024/QH15 dated 30 November 2024 on The Investment Policy for The North-South High-speed Railway Project*, <https://vanban.chinhphu.vn/?docid=212035&pageid=27160>, accessed 15 May 2026 (in Vietnamese).

[20] Prime Minister of Viet Nam (2025b), *Decision No. 2404/QĐ-TTg dated 29 October 2025 Approving Adjustments to The Railway Network Master Plan for 2021-2030, with A Vision to 2050*, <https://vanban.chinhphu.vn/?docid=215732&pageid=27160>, accessed 15 May 2026 (in Vietnamese).

[21] Government of Viet Nam (2026), *Resolution No. 98/NQ-CP dated 6 April 2026 Implementing National Assembly Resolution No. 265/2025/QH15 on Allowing*

Compensation, Support and Resettlement Components of The North-South High-speed Railway Project to be Separated into Independent Projects, <https://chinhphu.vn/?docid=217562&pageid=27160>, accessed 15 May 2026 (in Vietnamese).

[22] Government Portal - Thang Long Hanoi (2026), “By 2030, Hanoi is determined to definitively address prolonged traffic congestion”, <https://thanglong.chinhphu.vn/den-nam-2030-ha-noi-quyet-tam-xu-ly-dut-diem-un-tac-giao-thong-keo-dai-103260110101729269.htm>, accessed 15 May 2026 (in Vietnamese).

[23] Hanoi Portal (2026), “Turning Hanoi Metro into a leading brand nationwide”, <https://hanoi.gov.vn/tin-tuc-su-kien-noi-bat/dua-ha-noi-metro-tro-thanh-thuong-hieu-hang-dau-trong-ca-nuoc-4260114182809337.htm>, accessed 15 May 2026 (in Vietnamese).

[24] United Nations Economic and Social Commission for Asia and The Pacific (2018), *Sustainable Urban Transport Index (SUTI) for Asian Cities*, https://uncrd.un.org/sites/default/files/11th-est_ps6-2_bgp.pdf, accessed 15 May 2026.

[25] P.H. Chung (2018), *Report on The Result of Collection and Compilation of 10 SUTI Index in Hanoi City*, https://www.unescap.org/sites/default/files/Final%20Report-SUTI_Hanoi.pdf, accessed 15 May 2026.

[26] Asian Development Bank (2019), *Asian Development Outlook 2019 Update: Fostering Growth and Inclusion in Asia's Cities*, <https://www.adb.org/publications/asian-development-outlook-2019-update>, accessed 16 May 2026.

[27] World Bank (2019), *Vietnam Development Report 2019: Connecting Vietnam for Growth and Shared Prosperity*, <https://documents1.worldbank.org/curated/en/590451578409008253/pdf/Vietnam-Development-Report-2019-Connecting-Vietnam-for-Growth-and-Shared-Prosperity.pdf>, accessed 16 May 2026.

[28] Hanoi Metro (2026), “Metro network plan of Hanoi city”, <https://metrohanoi.vn/metro-network/quy-hoach-mang-luoi-metro-thanh-pho-ha-noi/>, accessed 16 May 2026 (in Vietnamese).