



KINH NGHIỆM PHÁT TRIỂN HỆ THỐNG ITS CẢNH BÁO SỚM ĐA HIỂM HỌA CHO GIAO THÔNG ĐÔ THỊ MIỀN NÚI: ÁP DỤNG CHO CAO BẰNG LESSONS FROM DEVELOPING MULTI-HAZARD EARLY WARNING ITS FOR MOUNTAINOUS URBAN TRANSPORT: APPLICATION TO CAO BANG

TS. Thân Đình Vinh¹

Tóm tắt: Biến đổi khí hậu đang làm gia tăng tần suất và cường độ mưa cực đoan, qua đó làm tăng nguy cơ sạt lở, ngập cục bộ và gián đoạn giao thông tại các đô thị miền núi. Nghiên cứu này tổng hợp có cấu trúc kinh nghiệm phát triển hệ thống giao thông thông minh (ITS) tích hợp cảnh báo sớm đa hiểm họa cho giao thông đô thị miền núi, đồng thời đối chiếu với bối cảnh quy hoạch, rủi ro thiên tai và định hướng chuyển đổi số của tỉnh Cao Bằng để xây dựng khung ưu tiên triển khai. Nghiên cứu góp phần làm rõ cách tiếp cận tích hợp giữa cảnh báo thiên tai, quản trị hạ tầng và quy hoạch giao thông thích ứng với biến đổi khí hậu đối với đô thị miền núi Việt Nam.

Từ khóa: Cảnh báo sớm đa hiểm họa, Cao Bằng, giao thông đô thị miền núi, GIS, ITS, viễn thám.

Abstract: Climate change is increasing the frequency and intensity of extreme rainfall, thereby exacerbating the risks of landslides, localized flooding, and transport disruption in mountainous urban areas. This study provides a structured synthesis of experiences in developing intelligent transportation systems (ITS) integrated with multi-hazard early

warning for mountainous urban transport, and then contrasts these lessons with the planning context, disaster risks, and digital transformation orientation of Cao Bang Province in order to formulate a priority implementation framework. The study contributes to clarifying an integrated approach that links hazard warning, infrastructure governance, and climate-adaptive transport planning for mountainous urban areas in Vietnam.

Keywords: Multi-hazard early warning, Cao Bang, mountainous urban transport, GIS, ITS, remote sensing.

Nhận bài ngày 25/1/2026, chỉnh sửa ngày 16/02/2026, chấp nhận đăng ngày 28/3/2026.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Biến đổi khí hậu đang làm gia tăng mức độ bất định của các hiện tượng thời tiết cực đoan, đặc biệt là mưa lớn với cường độ tần suất cao, lũ quét, ngập cục bộ và sạt lở đất ở các khu vực địa hình phức tạp [1], [2]. Đối với hệ thống đô thị, giao thông là hạ tầng quan trọng phát triển KT-XH, bảo đảm kết nối không gian, khả năng tiếp cận dịch vụ cơ bản và duy trì hoạt động cứu hộ khi xảy

ra thiên tai. Khi các hiện tượng cực đoan gia tăng, hạ tầng giao thông không chỉ chịu rủi ro hư hỏng vật chất mà còn có nguy cơ gián đoạn chức năng vận hành, gây tác động dây chuyền đến kinh tế - xã hội và an toàn cộng đồng [3]-[5].

So với đô thị đồng bằng, đô thị miền núi dễ bị tổn thương hơn do độ dốc lớn, mạng sông suối dày, nền địa hình chia cắt và số lượng tuyến thay thế thấp. Trên cùng một hành lang, mưa cực đoan có thể đồng thời kích hoạt sạt lở Taluy, xói lở nền đường, ngập vùng thấp và mất an toàn khai thác cầu, cống [3], [5], [9]. Vì vậy, cảnh báo sớm cho giao thông miền núi cần tiếp cận theo hướng đa hiểm họa, nghĩa là xem mưa lớn như tác nhân kích hoạt nhiều cơ chế rủi ro cùng lúc thay vì xử lý từng hiểm họa một cách tách rời [1], [2].

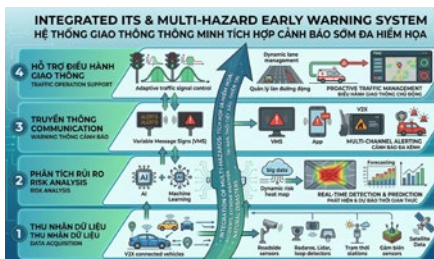
Trong bối cảnh đó, ITS tích hợp cảnh báo sớm đa hiểm họa được xem là hướng đi phù hợp vì cho phép kết nối bốn lớp chức năng: Thu nhận dữ liệu, phân tích rủi ro, truyền thông cảnh báo và hỗ trợ điều hành giao thông [4], [6]-[10]. Các tiến bộ về deep learning, WebGIS, cảm biến IoT địa kỹ thuật, edge computing (công nghệ

¹Trưởng Bộ môn Giao thông, Khoa Đô thị, Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

Head of the Transportation Department, Faculty of Urban Studies, Hanoi Architectural University

Email: Thandinhvinh08@gmail.com

xử lý dữ liệu ngay tại hoặc gần nơi thu thập dữ liệu để hỗ trợ cảnh báo nhanh theo thời gian thực) và V2X (công nghệ cho phép phương tiện giao tiếp với hạ tầng, phương tiện khác và môi trường giao thông nhằm hỗ trợ cảnh báo, an toàn và điều hành giao thông thông minh) đã mở rộng khả năng giám sát theo thời gian thực trên các hành lang giao thông miền núi. Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu hiện nay vẫn thiên về lập bản đồ nguy cơ hoặc mô hình dự báo riêng lẻ, trong khi các nghiên cứu ITS hiện nay thường tập trung vào đô thị lớn và ít gắn trực tiếp với bối cảnh đa hiểm họa của mạng lưới đường miền núi [4], [8], [10].



Hình 1. Các chức năng ITS tích hợp cảnh báo sớm đa hiểm họa

Đối với hệ thống giao thông, tính dễ bị tổn thương ở Cao Bằng không chỉ do đặc điểm địa hình dốc và mưa lớn mà còn từ cấu trúc mạng lưới còn ít tuyến thay thế, một số trục quốc lộ đi xuyên qua trung tâm đô thị, mặt cắt đường hạn chế và đường tránh chưa hoàn chỉnh [15]. Cùng với đó, quy hoạch tỉnh cũng đặt mục tiêu đẩy mạnh chuyển đổi số, xây dựng cơ sở dữ liệu và nền tảng thông tin dùng chung, mở rộng hạ tầng số và tăng cường an toàn thông tin [15]. Điều này tạo ra một tiền đề quan trọng để xem ITS cảnh báo sớm đa hiểm họa không chỉ như một giải pháp công nghệ, mà như một công cụ quản trị hạ tầng và hỗ trợ điều hành theo dữ liệu.

Thực tiễn năm 2024 càng làm rõ tính cấp thiết của vấn đề khi mưa lớn kéo dài làm nước sông Bằng và sông Hiến dâng nhanh, gây ngập nhiều khu vực của thành phố Cao Bằng, trong khi hoàn lưu bão Yagi gây thiệt hại lớn về hạ tầng, nhà ở và sản xuất trên địa bàn tỉnh [17]. Trên cơ sở đó, nghiên cứu này nhằm: (i) Hệ thống hóa kinh nghiệm phát triển ITS cảnh báo sớm đa hiểm họa cho giao thông đô thị miền núi; (ii) Xác định các bài học cốt lõi về dữ liệu, công nghệ và tổ chức vận hành; và (iii)

Đề xuất khung ưu tiên triển khai cho Cao Bằng theo hướng khả thi, có lộ trình và phù hợp với bối cảnh địa phương.

II. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu sử dụng cách tiếp cận tổng quan phân tích có cấu trúc kết hợp đánh giá bối cảnh địa phương. Nguồn tài liệu gồm ba nhóm chính: (i) Các công trình nghiên cứu khoa học quốc tế về MHEWS (hệ thống cảnh báo sớm đa hiểm họa, có chức năng giám sát, phát hiện và cảnh báo nhiều loại rủi ro thiên tai nhằm hỗ trợ ứng phó kịp thời), ITS, AI, IoT, WebGIS, V2X và khả năng chống chịu của mạng lưới giao thông miền núi [1]-[10]; (ii) Các tài liệu trong nước về cảnh báo lũ quét, sạt lở dọc giao thông, WebGIS quản lý rủi ro và định hướng phát triển giao thông thông minh [11]-[14]; và (iii) Tài liệu địa phương về quy hoạch tỉnh, hiện trạng hạ tầng, địa hình và thiệt hại thiên tai của Cao Bằng [15]-[17].

Việc lựa chọn tài liệu được thực hiện theo bốn tiêu chí:

1. Có bối cảnh miền núi hoặc địa hình phức tạp;
2. Có liên quan trực tiếp đến cảnh báo cho giao thông;
3. Mô tả ít nhất một cấu phần của hệ thống như dữ liệu, công nghệ, tổ chức vận hành hoặc hiệu quả ứng dụng;
4. Phù hợp để rút ra bài học có thể áp dụng cho điều kiện Việt Nam.

Trên cơ sở đó, từng tài liệu được sắp xếp và đối chiếu theo năm nhóm tiêu chí gồm: Bối cảnh hiểm họa, dữ liệu và công nghệ, kiến trúc ITS, tổ chức vận hành - phối hợp và mức độ phù hợp với Cao Bằng.

Quy trình phân tích được triển khai theo bốn bước:

Bước 1: Tổng hợp và phân nhóm các mô hình cảnh báo sớm đa hiểm họa trong tài liệu quốc tế và trong nước.

Bước 2: So sánh trường hợp theo ba trục: Loại hiểm họa chủ đạo, mức độ tích hợp công nghệ và điều kiện nguồn lực triển khai.

Bước 3: Trích xuất các biến nền từ bối cảnh Cao Bằng, gồm địa hình - thủy hệ, cấu trúc mạng lưới đường, các hành lang đô thị ven sông, điểm có nguy cơ ngập hoặc sạt lở, năng lực dữ liệu - thể chế và định hướng chuyển đổi số.

Bước 4: Đối chiếu các bài học với điều kiện địa phương để xây dựng khung ưu tiên triển khai và lộ trình theo giai đoạn. Cách tiếp cận này giúp bài báo chuyển từ mô tả kinh nghiệm sang đề xuất ứng dụng có cơ sở hơn cho trường hợp Cao Bằng.

III. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Bối cảnh đa hiểm họa và nhu cầu cảnh báo sớm cho Cao Bằng

Kết quả đối chiếu với báo cáo điều chỉnh quy hoạch tỉnh cho thấy rủi ro giao thông tại Cao Bằng được hình thành bởi sự cộng hưởng của ba lớp nhân tố. Lớp thứ nhất là điều kiện tự nhiên, gồm địa hình dốc, mạng sông suối dày, dòng chảy ngắn và phản ứng nhanh với mưa lớn. Lớp thứ hai là cấu trúc không gian đô thị, trong đó nhiều khu dân cư và trục giao thông phát triển dọc thung lũng hoặc ven sông, đặc biệt tại thành phố Cao Bằng với hai hành lang sông Bằng - sông Hiến giữ vai trò cấu trúc đối với không gian đô thị. Lớp thứ ba là hạn chế của mạng lưới giao thông, thể hiện ở số lượng tuyến thay thế thấp, một số quốc lộ xuyên qua khu vực trung tâm và khả năng phân lưu lượng còn hạn chế khi xảy ra sự cố [15], [16].

Trong điều kiện đó, rủi ro không phân bố ngẫu nhiên mà tập trung theo các hành lang dễ bị tác động bởi BĐKH. Các khu vực ven sông và vùng trũng có nguy cơ ngập cục bộ khi mưa lớn kết hợp nước dâng nhanh; các đoạn đường bám sườn dốc dễ phát sinh sạt lở taluy, xói lở nền đường và mất an toàn công trình; trong khi một sự cố tại trục xuyên tâm hoặc đoạn tuyến kết nối cơ sở quan trọng có thể làm giảm mạnh khả năng tiếp cận của toàn mạng lưới. Vì vậy, nhu cầu cảnh báo sớm ở Cao Bằng không chỉ dừng ở việc phát hiện hiểm họa, mà phải hỗ trợ trực tiếp cho các quyết định vận hành như hạn chế lưu thông, phân luồng, kích hoạt tuyến tránh, bảo đảm tiếp cận bệnh viện, trung tâm hành chính và tổ chức cứu hộ.

Mặt khác, quy hoạch tỉnh cũng đặt ra các định hướng về phân vùng rủi ro thiên tai, nâng cấp mạng lưới trạm cảnh báo, xây dựng cơ sở dữ liệu và nền tảng thông tin dùng chung, mở rộng hạ tầng số và tăng cường an toàn thông tin [15]. Đây là điều kiện quan trọng để triển khai ITS theo lộ trình từng bước, bắt đầu từ nền dữ liệu và điểm xung yếu trước khi tiến đến giám sát, cảnh báo và điều hành theo thời gian thực.

Bảng 1. Nhóm rủi ro chính đối với giao thông đô thị miền núi ở Cao Bằng

Nhóm rủi ro	Biểu hiện chính	Áp dụng ITS cảnh báo sớm
Ngập vùng thấp ven sông	Ngập cục bộ tại các khu vực trũng, đoạn ven sông Bằng - sông Hiến, nút giao gần cửa xả	Cảnh báo mực nước, mưa theo thời gian thực; cập nhật trạng thái đường và tuyến thay thế
Sạt lở taluy và xói lở nền đường	Tập trung ở các đoạn bảm sườn dốc, khu vực nền đất yếu hoặc thoát nước không ổn định	Lập bản đồ điểm đen; bố trí cảm biến/camera tại vị trí ưu tiên; cảnh báo theo ngưỡng mưa, mực nước
Gián đoạn di chuyển trên mạng lưới giao thông	Một điểm sự cố có thể làm giảm mạnh khả năng tiếp cận của toàn mạng lưới do thiếu tuyến dự phòng	Tích hợp cảnh báo với phân luồng, tuyến tránh và kế hoạch ứng cứu

Nguồn: Tổng hợp từ [15]-[17]

3.2. Kinh nghiệm quốc tế và trong nước về ITS cảnh báo sớm đa hiểm họa

Tổng hợp tài liệu cho thấy các mô hình hiện nay có thể chia thành ba nhóm. Nhóm thứ nhất là mô hình cảnh báo sạt lở và biến dạng mái dốc, sử dụng học sâu, ảnh viễn thám, mạng cảm biến không dây, cảm biến địa kỹ thuật và camera hiện trường để nhận diện nguy cơ theo điểm hoặc theo đoạn tuyến [3], [6], [8]. Nhóm thứ hai là mô hình cảnh báo ngập và lũ quét thời gian thực, tích hợp mưa, trạm đo, edge computing và WebGIS để cảnh báo trực tiếp cho cơ quan vận hành giao thông [7], [8], [11], [12]. Nhóm thứ ba là mô hình quản lý giao thông động, trong đó cảnh báo được liên kết với tối ưu lộ trình sơ tán, V2X, bảng điều khiển điều hành và kế hoạch ứng cứu [4], [9], [10].



Hình 2. Các nhóm mô hình cảnh báo sớm đa hiểm họa

Phân tích so sánh cho thấy hệ thống hiệu quả nhất thiết phải bắt đầu từ kiến trúc công nghệ phức tạp, mà phải được xây dựng trên ba nền tảng cốt lõi: Dữ liệu nền đáng tin cậy, cơ chế phối hợp liên ngành và chuỗi hành động sau cảnh báo. Nếu thiếu bản đồ điểm đen, thiếu danh mục tài sản hạ tầng và thiếu quy trình phản ứng theo cấp độ cảnh báo, thông tin cảnh báo khó chuyển hóa thành thay đổi

thực chất trong vận hành mạng lưới [1], [4], [5], [14]. Điều này phù hợp đối với các địa phương nguồn lực hạn chế, nơi đầu tư dàn trải vào thiết bị dễ dẫn đến chi phí bảo trì cao nhưng hiệu quả sử dụng thấp như Cao Bằng. Dưới đây là các bài học được tổng kết:

- Thứ nhất, cảnh báo sớm cho giao thông miền núi cần tiếp cận theo chuỗi dữ liệu - phân tích - hành động; nghĩa là dữ liệu khí tượng, thủy văn, GIS nền, ảnh viễn thám, thông tin hiện trường và trạng thái mạng lưới phải được liên thông trên một nền tảng thống nhất [1], [5], [8].

- Thứ hai, hệ thống nên được phân cấp theo mức độ đầu tư, bắt đầu từ bản đồ nguy cơ tĩnh và điểm xung yếu, sau đó phát triển cảnh báo bán tự động tại hành lang ưu tiên rồi mới mở rộng sang điều hành theo thời gian thực [4], [14].

- Thứ ba, cơ chế phối hợp giữa giao thông, khí tượng thủy văn, tài nguyên môi trường, phòng chống thiên tai và chính quyền địa phương giữ vai trò quyết định trong việc chuyển cảnh báo thành hành động [5], [11], [14].

Bảng 2. Nhóm công nghệ trọng tâm và đề xuất áp dụng cho Cao Bằng

Nhóm công nghệ	Loại hiểm họa hỗ trợ tốt	Điều kiện triển khai chính	Mức ưu tiên
GIS + bản đồ điểm đen	Ngập, sạt lở, gián đoạn mạng lưới	Dữ liệu nền địa hình, mạng lưới và lịch sử sự cố	Rất cao
Camera/cảm biến tại điểm xung yếu	Ngập cục bộ, sạt lở taluy	Chọn ít điểm nhưng có núi ro cao; có nguồn điện và truyền dữ liệu	Cao
Radar mưa - ngưỡng cảnh báo	Mưa lớn, lũ quét, sạt lở do mưa	Khai thác dữ liệu khí tượng thủy văn, hiệu chỉnh ngưỡng theo địa phương	Cao
V2X/điều hành động quy mô lớn	Gián đoạn mạng lưới diện rộng	Hạ tầng số và phương tiện kết nối cao	Trung bình, dài hạn

Nguồn: Tổng hợp từ [3]-[14]

3.3. Đề xuất áp dụng triển khai cho Cao Bằng

Từ tổng hợp kinh nghiệm và đặc điểm hiện trạng nghiên cứu đề xuất bốn nhóm áp dụng cho Cao Bằng.

Thứ nhất, ưu tiên xây dựng cơ sở dữ liệu không gian thống nhất về giao thông - hiểm họa - tài sản hạ tầng. Hệ dữ liệu này cần bao gồm bản đồ mạng lưới đường, cầu, cống, taluy, vị trí ngập thường xuyên, điểm

sạt lở, khu vực chịu ảnh hưởng, cùng các cơ sở quan trọng như bệnh viện, trường học, trung tâm hành chính và điểm phục vụ cứu nạn. Đây là điều kiện nền để tích hợp cảnh báo, điều hành và đánh giá ưu tiên đầu tư về sau.

Thứ hai, khoanh vùng hành lang ưu tiên và triển khai thí điểm theo nguyên tắc rủi ro cao - tác động lớn - khả năng đầu tư phù hợp. Các vị trí ưu tiên trước mắt gồm: (i) Đoạn ven sông Bằng và sông Hiến có nguy cơ ngập; (ii) Các đoạn đường bảm sườn dốc thường xảy ra sạt lở hoặc xói lở; và (iii) Các trục xuyên tâm có vai trò bảo đảm tiếp cận bệnh viện, trung tâm hành chính hoặc cửa ngõ đô thị. Trong giai đoạn đầu, mô hình phù hợp là cảnh báo bán tự động dựa trên ngưỡng mưa, camera, WebGIS và cập nhật trạng thái đường. Sau khi tích lũy đủ dữ liệu, hệ thống có thể mở rộng sang cảm biến tại hành lang giao thông chính có độ dốc lớn và giám sát theo thời gian thực ở các hành lang trọng điểm.

Thứ ba, gắn cảnh báo với cơ chế điều hành liên ngành. Tương ứng với mỗi mức cảnh báo cần xác định rõ hành động đi kèm như cảnh báo hiện trường, hạn chế phương tiện, phân luồng tạm thời, kích hoạt tuyến tránh, bố trí lực lượng trực gác, thông báo tới cộng đồng và cập nhật cho các đơn vị cứu hộ. Về mặt tổ chức, dữ liệu mưa - thủy văn, trạng thái đường và thông tin hiện trường cần được liên thông giữa các đơn vị giao thông, phòng chống thiên tai, tài nguyên môi trường, công an, chính quyền địa phương và cơ quan truyền thông cảnh báo.

Thứ tư, lồng ghép ITS cảnh báo sớm với quy hoạch và lộ trình chuyển đổi số của tỉnh. Thông tin thu được từ hệ thống không chỉ phục vụ cảnh báo trước mắt mà còn cần được sử dụng ngược trở lại để ưu tiên đầu tư hạ tầng khung như nâng cấp thoát nước đô thị, gia cố mái dốc, hoàn thiện các tuyến tránh, nâng cấp hạ tầng số và điều chỉnh tổ chức giao thông tại các điểm xung yếu. Theo hướng này, ITS cảnh báo sớm đa hiểm họa cần được xem là một hợp phần của quản trị hạ tầng dựa trên dữ liệu, phù hợp với định hướng xây dựng cơ sở dữ liệu dùng chung, chính quyền số và hạ tầng số của tỉnh.

Trường hợp Cao Bằng cho thấy ITS cảnh báo sớm đa hiểm họa là một giải pháp quản

Bảng 3. Đề xuất lộ trình triển khai ITS cảnh báo sớm đa hiểm họa cho Cao Bằng

Giai đoạn	Nội dung trọng tâm	Sản phẩm đầu ra chính
Ngắn hạn	Nội dung trọng tâm: • Chuẩn hóa dữ liệu GIS • Lập danh mục điểm xung yếu • Xây dựng bản đồ cảnh báo nền	• Cơ sở dữ liệu giao thông - hiểm họa • Bản đồ ưu tiên can thiệp
Trung hạn	Nội dung trọng tâm: • Thí điểm camera/cảm biến tại hành lang ưu tiên • Cảnh báo bán tự động theo ngưỡng mưa	Sản phẩm đầu ra chính: • Bảng thông tin/WebGIS • Quy trình cảnh báo - phản ứng cho cơ quan quản lý
Dài hạn	Nội dung trọng tâm: • Tích hợp điều hành động, tuyến tránh • Dữ liệu quy hoạch - đầu tư	Sản phẩm đầu ra chính: • Nền tảng ITS phục vụ thích ứng khí hậu cấp đô thị/tỉnh

Nguồn: Đề xuất của tác giả trên cơ sở tổng hợp [1]-[17]

trị hạ tầng chứ không chỉ là giải pháp công nghệ. Giá trị lớn nhất của hệ thống không nằm ở số lượng cảm biến hay thuật toán phức tạp, mà ở khả năng kết nối dữ liệu rủi ro với quyết định điều hành mạng lưới. Cách tiếp cận này phù hợp với các đô thị miền núi Việt Nam, nơi nguồn lực đầu tư còn hạn chế nhưng nhu cầu bảo đảm tiếp cận an toàn và liên tục trong thiên tai ngày càng tăng.

IV. KẾT LUẬN

ITS cảnh báo sớm đa hiểm họa là hướng tiếp cận có tiềm năng đối với giao thông đô thị miền núi trong bối cảnh mưa cực đoan và các rủi ro dây chuyền ngày càng gia tăng. Tổng hợp các nghiên cứu cho thấy hiệu quả của hệ thống phụ thuộc trước hết vào dữ liệu nền, khả năng tích hợp nhiều nguồn thông tin và cơ chế phối hợp liên ngành; công nghệ chỉ phát huy giá trị khi được gắn với quy trình điều hành cụ thể.

Đối với Cao Bằng, tính cấp thiết của bài toán này xuất phát từ sự cộng hưởng giữa địa hình chia cắt, mạng sông suối dày, cấu trúc đô thị ven sông, hạn chế của mạng lưới giao thông và các đợt mưa lớn gây ngập, sạt lở trong những năm gần đây. Trên cơ sở đối chiếu với bối cảnh quy hoạch và định hướng chuyển đổi số của tỉnh, nghiên cứu đề xuất bốn ưu tiên gồm: (1) Xây dựng cơ sở dữ liệu không gian và bản đồ điểm xung yếu; (2) Lựa chọn hành lang ưu tiên để thí điểm cảnh báo bán tự động; (3) Gắn cảnh báo với phân luồng, tuyến tránh và cơ chế phối hợp liên ngành; và (4) Lồng ghép dữ liệu cảnh báo với quy hoạch đầu tư hạ tầng chống chịu.

Đóng góp chính của bài báo không nằm ở việc đề xuất một công nghệ mới, mà ở việc làm rõ khung ưu tiên triển khai ITS cảnh báo sớm đa hiểm họa cho một tỉnh miền núi cụ thể. Tuy vậy, các kết quả hiện vẫn mang tính định hướng và cần được kiểm chứng tiếp theo thông qua lập bản đồ rủi ro theo đoạn

tuyến, xác lập ngưỡng mưa - ngập - sạt lở phù hợp với địa phương và tổ chức thí điểm tại một số hành lang trọng điểm của đô thị Cao Bằng. Đây cũng là hướng nghiên cứu tiếp theo cần thiết để lượng hóa hiệu quả của khung đề xuất trong thực tiễn.

Mai Nhung (BT)

Tài liệu tham khảo:

- [1] World Meteorological Organization (WMO), United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR) (2024), *Global Status of Multi-Hazard Early Warning Systems 2024*, Geneva: WMO.
- [2] Mladineo, N., Mladineo, M., Benvenuti, E., Kekez, T., Nikolić, Ž. (2022), "Methodology for the Assessment of Multi-Hazard Risk in Urban Homogenous Zones", *Applied Sciences*, 12(24), 12843. <https://doi.org/10.3390/app122412843>.
- [3] Xie, S., Yang, Z., Wang, M., Xu, G., Bai, S. (2025), "Evaluating the Resilience of Mountainous Sparse Road Networks in High-Risk Geological Disaster Areas: A Case Study in Tibet, China", *Applied Sciences*, 15(5), 2688. <https://doi.org/10.3390/app15052688>.
- [4] Hassan, S. A., Amlan, H. A., Alias, N. E., Ab-Kadir, M. A., Sukor, N. S. A. (2022), "Vulnerability of road transportation networks under natural hazards: A bibliometric analysis and review", *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 83, 103393. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103393>.
- [5] Oh, J. E., Espinet Alegre, X., Pant, R., Koks, E., Russell, T., Schoenmakers, R., Hall, J. W. (2019), *Addressing Climate Change in Transport: Volume 2: Pathway to Resilient Transport*, Vietnam Transport Knowledge Series, Washington, DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/32412>.
- [6] Zhou, C., Chen, M., Chen, J., Chen, Y., Chen, W. (2024), "A Multi-Hazard Risk Assessment Model for a Road Network Based on Neural Networks and Fuzzy Comprehensive

Evaluation", *Sustainability*, 16(6), 2429. <https://doi.org/10.3390/su16062429>.

[7] Pham, N. T. T., Nong, D., Sathyan, A. R., Garschagen, M. (2020), "Vulnerability assessment of households to flash floods and landslides in the poor upland regions of Vietnam", *Climate Risk Management*, 28, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2020.100215>.

[8] Youssef, A. M., Mahdi, A. M., Pourghasemi, H. R. (2022), "Landslides and flood multi-hazard assessment using machine learning techniques", *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 81, 370. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02874-x>.

[9] Yuen, B., Kong, L. (2009), "Climate Change and Urban Planning in Southeast Asia", *S.A.P.I.E.N.S. Surveys and Perspectives Integrating Environment and Society*, 2(3).

[10] Rozenberg, J., Espinet Alegre, X., Avner, P., Fox, C., Hallegatte, S., Koks, E., Rentschler, J., Tariverdi, M. (2019), *From A Rocky Road to Smooth Sailing: Building Transport Resilience to Natural Disasters*, Washington, DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/31913>.

[11] Tran, T., Tran Thanh Thuy, Huynh Thi Lan Huong (2023), "multi-hazard risk assessment of typhoon, typhoon-rainfall and post-typhoon-rainfall in the Mid-Central Coastal region of Vietnam", *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 14(3), 402-419. <https://doi.org/10.1108/IJDRBE-12-2021-0159>.

[12] Dong, B., Ding, S., Wu, L., Li, X. (2025), "Short-term natural disaster impacts on transportation infrastructure: a systematic review", *Natural Hazards*, 121, 17321-17362. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07504-9>

[14] Bộ Giao thông Vận tải (2024), *Chiến lược phát triển giao thông thông minh tại Việt Nam đến năm 2030, tầm nhìn 2045*.

[15] Ủy ban nhân dân tỉnh Cao Bằng (2026), *Báo cáo tóm tắt điều chỉnh quy hoạch tỉnh Cao Bằng thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050*.

[16] Cổng Thông tin điện tử tỉnh Cao Bằng. Địa hình tỉnh Cao Bằng. <https://caobang.gov.vn/dia-hinh/dia-hinh-tinh-cao-bang-938712>, truy cập 10/3/2026.

[17] Báo điện tử tỉnh Cao Bằng. <https://baocaobang.vn/toan-tinh-thiet-hai-tren-880-ty-dong-do-anh-huong-hoan-luu-bao-so-3-3172284.html>, truy cập ngày 13/3/2026.