



Tạp chí điện tử
Khoa học và Công nghệ Giao thông
Trang website: <https://jstt.vn/index.php/vn>



Article info

Type of article:

Original research paper

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.5.54-78>

***Corresponding author:**

Email address:

lhson@vnkgu.edu.vn

Received: 06/03/2026

Received in Revised Form:

17/07/2026

Accepted: 24/07/2026

Proposed Indicators for Assessing Vulnerability, Risk, and Management Priority of Coastal Road Infrastructure under Climate Change: A Case Study of An Giang Province, Vietnam

Le Hoang Son^{1,2*}, Ngo Thi Thanh Huong¹, Ho Thanh Phong¹, Tran Tuan Huy², Nguyen Thi Hoang Hoa², Ly Thien Hao², Nguyen Ba Khanh³

¹University of Transport Technology, 54 Trieu Khuc Street, Thanh Liet Ward, Hanoi, Viet Nam

²Kien Giang University, An Giang, Viet Nam

³Van Hien University, Ho Chi Minh City, Viet Nam

Abstract: Climate change is increasing the impacts of climate-related hazards on coastal road infrastructure, while road operation and maintenance require additional tools to support assessment and management prioritization under multi-hazard conditions. This study proposes an H–E–S–AC indicator set, consisting of Hazard, Exposure, Sensitivity, and Adaptive Capacity, to assess the vulnerability and risk of coastal road infrastructure. Based on this framework, the integrated Multi-hazard Management Priority Index (MPI_{Total}) is developed to combine risk assessment results and the adaptive capacity of road segments. The proposed method is applied to 60 coastal road segments in An Giang Province, formerly Kien Giang Province. The results indicate that risk levels vary across areas and hazard types. MPI_{Total} enables the classification of road segments into four management priority levels. The findings may support maintenance planning, resource allocation, and the consideration of operation and maintenance strategies for coastal road infrastructure in the context of climate change.

Keywords: Coastal road; climate change; vulnerability; multi-hazard risk; H–E–S–AC; MPI_{Total}; operation and maintenance management.



Thông tin bài viết
Dạng bài viết:
Bài báo nghiên cứu

DOI:
<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2026.vn.6.5.54-78>

*Tác giả liên hệ:
Địa chỉ Email:
lhson@vnkgu.edu.vn

Ngày nộp bài: 06/03/2026
Ngày nộp bài sửa: 17/07/2026
Ngày chấp nhận: 24/07/2026

Đề xuất bộ chỉ số đánh giá tính dễ bị tổn thương, rủi ro và ưu tiên quản lý công trình đường bộ ven biển trong bối cảnh biến đổi khí hậu: Trường hợp nghiên cứu tỉnh An Giang

Lê Hoàng Sơn^{1,2*}, Ngô Thị Thanh Hương¹, Hồ Thanh Phong¹, Trần Tuấn Huy², Nguyễn Thị Hoàng Hoa², Lý Thiện Hào², Nguyễn Bá Khánh³

¹Trường Đại học Công nghệ Giao thông vận tải, 54 Triều Khúc, phường Thanh Liệt, Hà Nội, Việt Nam

²Trường Đại học Kiên Giang, An Giang, Việt Nam

³Trường Đại học Văn Hiến, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

Tóm tắt: Biến đổi khí hậu (BĐKH) làm gia tăng tác động của các hiểm họa khí hậu (H) đến công trình đường bộ (CTĐB) ven biển, trong khi công tác quản lý khai thác (QLKT) cần thêm công cụ hỗ trợ đánh giá và ưu tiên quản lý trong điều kiện đa hiểm họa. Nghiên cứu này đề xuất bộ chỉ số H-E-S-AC, gồm hiểm họa (H), phơi bày (E), nhạy cảm (S) và năng lực thích ứng (AC), để đánh giá tính dễ bị tổn thương (V) và rủi ro (R) đối với CTĐB ven biển. Trên cơ sở đó, chỉ số ưu tiên quản lý đa hiểm họa tổng hợp (MPI_{Total}) được xây dựng nhằm tích hợp kết quả đánh giá R và AC của các đoạn tuyến. Phương pháp được áp dụng cho 60 đoạn tuyến đường bộ ven biển thuộc tỉnh An Giang, trước đây là tỉnh Kiên Giang. Kết quả cho thấy mức độ R có sự khác biệt giữa các khu vực và loại H; MPI_{Total} cho phép phân nhóm các đoạn tuyến theo 04 mức ưu tiên quản lý. Kết quả nghiên cứu có thể hỗ trợ lập kế hoạch bảo trì, phân bổ nguồn lực và xem xét các giải pháp QLKT CTĐB ven biển trong bối cảnh BĐKH.

Từ khóa: Công trình đường bộ ven biển; biến đổi khí hậu; tính dễ bị tổn thương; rủi ro đa hiểm họa; H-E-S-AC; MPI_{Total} ; quản lý khai thác.

1. Đặt vấn đề

Công trình đường bộ ven biển là bộ phận quan trọng của hệ thống kết cấu hạ tầng giao thông, đóng vai trò quan trọng trong kết nối không gian ven biển, hỗ trợ phát triển kinh tế biển và duy trì hoạt động của các ngành kinh tế phụ thuộc vào hạ tầng giao thông. Trong bối cảnh phát triển bền vững và thích ứng với BĐKH, các tổ chức quốc tế đều nhấn mạnh vai trò của CTĐB có khả năng

chống chịu và quản lý tài sản dựa trên R nhằm duy trì mức độ phục vụ của công trình trong suốt vòng đời khai thác [1].

Khu vực ven biển tỉnh An Giang có mạng lưới CTĐB phân bố liên tục qua các khu vực Hà Tiên, Kiên Lương, Hòn Đất, Rạch Giá, An Biên và Vĩnh Thuận, là những đơn vị không gian có nhiều điều kiện tự nhiên bất lợi đối với khai thác và bảo trì CTĐB [1]. Địa hình ven biển tương đối thấp và

bằng phẳng, cao trình phổ biến từ $0,4 \pm 1,5$ m so với mực nước biển; nền chủ yếu là đất yếu, bùn sét mềm và chịu ảnh hưởng của quá trình lún cổ kết kéo dài. Bên cạnh đó, hệ thống kênh rạch dày đặc cùng mạng lưới cầu, cống phân bố rộng làm cho CTĐB thường xuyên chịu tác động của ngập lụt, triều cường, xâm nhập mặn và xói lở bờ biển. Những đặc điểm này làm gia tăng V và đặt ra nhiều

thách thức đối với công tác QLKT CTĐB ven biển. Các tuyến đường này không chỉ phục vụ nhu cầu vận tải và kết nối các trung tâm kinh tế ven biển mà còn thích ứng với các tác động của BĐKH trong khu vực.

Phạm vi nghiên cứu và vị trí các đoạn tuyến CTĐB ven biển được lựa chọn khảo sát được trình bày tại Hình 1.



Hình 1. Khu vực nghiên cứu và phân bố các đoạn tuyến CTĐB ven biển tỉnh An Giang – (1a) Mạng lưới CTĐB khu vực ven biển tỉnh An Giang



Hình 1. Khu vực nghiên cứu và phân bố các đoạn tuyến CTĐB ven biển tỉnh An Giang – (1b) Phân bố các đoạn tuyến CTĐB ven biển nghiên cứu

Hình 1 cho thấy các đoạn tuyến nghiên cứu phân bố trên các khu vực ven biển có điều kiện địa hình, môi trường khai thác và mức độ tác động của các H khác nhau. Sự khác biệt này tạo cơ sở để xem xét việc xây dựng bộ chỉ số đánh giá V, R và mức độ ưu tiên quản lý đối với CTĐB ven biển trong các phần tiếp theo.

Biến đổi khí hậu được xem là một trong những thách thức đối với công tác QLKT CTĐB ven biển có mức độ E cao trước các hiện tượng thời tiết cực đoan. Theo các báo cáo của Ủy ban Liên chính phủ về BĐKH (IPCC, 2023) [2] và Hiệp hội Đường bộ Thế giới (PIARC, 2023) [3], Bộ Xây dựng [4-6], Bộ Nông nghiệp và môi trường [7], xu hướng gia tăng nhiệt độ, thay đổi chế độ mưa, nước biển dâng và gia tăng tần suất của các hiện tượng thời tiết cực đoan có thể ảnh hưởng đến chất lượng, khả năng khai thác và tuổi thọ của CTĐB. Theo đó, đánh giá V, R và khả năng chống chịu ngày càng được xem là hợp phần quan trọng trong quản lý tài sản CTĐB.

Đối với CTĐB ven biển, mưa cực đoan có thể làm gia tăng nguy cơ ngập mặt đường, xói lở nền đường và suy giảm khả năng làm việc của hệ thống thoát nước. Nhiệt độ cao kéo dài làm tăng nguy cơ hằn lún vệt bánh xe, lão hóa vật liệu mặt đường và suy giảm chất lượng khai thác. Đồng thời, sạt lở bờ biển có thể ảnh hưởng đến độ bền của kết cấu công trình, làm gia tăng nhu cầu bảo trì và chi phí quản lý trong suốt vòng đời khai thác [2, 3, 8, 9].

Kết quả thu thập và xử lý dữ liệu của nghiên cứu trên 60 đoạn tuyến CTĐB ven biển tỉnh An Giang cho thấy lượng mưa ngày lớn nhất dao động từ 210÷350 mm/24 giờ, lượng mưa giờ lớn nhất dao động từ 65÷110 mm/giờ, trong khi nhiều đoạn tuyến ghi nhận tình trạng ngập kéo dài 6÷12 giờ trong các đợt mưa lớn kết hợp triều cường [1, 10], nhiệt độ không khí trung bình 7 ngày cao nhất trong vùng nghiên cứu đã xuất hiện từ 36,4°C÷37°C ảnh hưởng đến chất lượng khai thác lớp mặt đường bê tông nhựa (BTN) [1, 11]. Bên cạnh đó, hiện tượng xói lở bờ biển được ghi nhận tại một số khu vực thuộc Hà Tiên, Hòn Đất, An Biên và Vĩnh Thuận,

trong khi môi trường ven biển với hàm lượng muối cao vào mùa khô được xem là các yếu tố có thể làm gia tăng tốc độ suy giảm chất lượng công trình [12, 13].

Các kết quả trên cho thấy mức độ tác động của các H có sự khác biệt giữa các đoạn tuyến nghiên cứu. Trong điều kiện nguồn lực quản lý và bảo trì còn hạn chế, cách tiếp cận QLKT chủ yếu dựa trên hiện trạng hư hỏng có thể chưa phản ánh đầy đủ mức độ R tiềm ẩn của công trình. Do đó, trong bối cảnh BĐKH, công tác QLKT CTĐB ven biển cần từng bước chuyển từ quản lý dựa trên hiện trạng sang quản lý chủ động dựa trên đánh giá V và R, làm cơ sở cho việc ưu tiên quản lý và phân bổ nguồn lực bảo trì.

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu quốc tế đã tập trung đánh giá V và R của hạ tầng giao thông dưới tác động của BĐKH. Phần lớn các nghiên cứu áp dụng khung đánh giá của IPCC, trong đó V được xem xét thông qua các hợp phần: E, S và AC, kết hợp với các đặc trưng của H. Các nghiên cứu gần đây đã phát triển các bộ chỉ số và mô hình đa tiêu chí nhằm xếp hạng mức độ V của CTĐB và hỗ trợ ra quyết định trong QLKT [14, 15].

Tại Việt Nam, các nghiên cứu hiện nay chủ yếu tập trung đánh giá tác động của BĐKH ở quy mô vùng hoặc đối với CTĐB nội địa [5]. Các nghiên cứu đánh giá V và R về CTĐB ven biển theo hướng phục vụ QLKT xét đến BĐKH, còn tương đối hạn chế.

Mặc dù các nghiên cứu đã góp phần đánh giá V và R đối với từng loại H, việc tích hợp kết quả đánh giá R của nhiều loại H nhằm hỗ trợ xác định mức độ ưu tiên QLKT giữa các đoạn tuyến trong điều kiện nguồn lực bảo trì có hạn vẫn chưa được xem xét đầy đủ. Khoảng trống này cho thấy sự cần thiết của việc xây dựng bộ chỉ số H, E, S, AC và chỉ số ưu tiên quản lý đa hiểm họa tổng hợp (MPI_{Total}).

2. Cơ sở khoa học và phương pháp nghiên cứu

2.1. Khung lý thuyết đánh giá tính dễ bị tổn thương và rủi ro

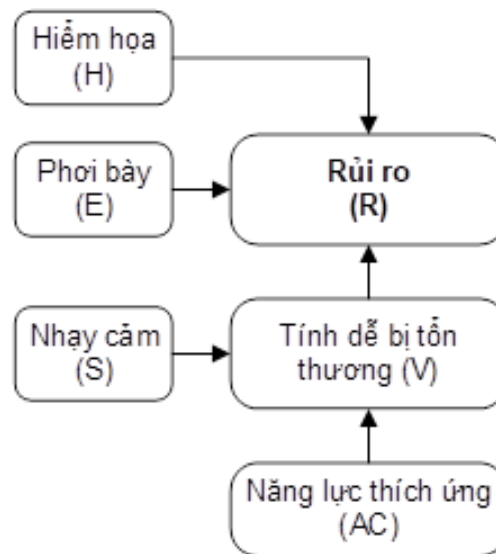
Đánh giá V và R đối với CTĐB trong điều kiện BĐKH hiện nay chủ yếu dựa trên khung đánh giá của IPCC. Theo cách tiếp cận này, R được hình

thành từ sự tương tác giữa H, E và V, trong đó V được xem xét thông qua hai hợp phần S và AC [2]. Khung đánh giá này đã được nhiều tổ chức và nghiên cứu áp dụng trong đánh giá R đối với hạ tầng giao thông và quản lý tài sản đường bộ [2, 3, 11, 14, 16].

Trong nghiên cứu này, khung H–E–S–AC được sử dụng làm cơ sở lý thuyết để xây dựng bộ chỉ số đánh giá V và R đối với CTĐB ven biển. Thành phần H phản ánh cường độ và mức độ xuất hiện của các hiểm họa khí hậu; E phản ánh mức

độ phơi bày của công trình trước các H; S mô tả đặc tính kết cấu, vật liệu làm gia tăng mức độ hư hỏng, phản ánh mức độ nhạy cảm của công trình đối với các tác động bất lợi; trong khi AC phản ánh khả năng phòng ngừa, ứng phó và phục hồi của hệ thống QLKT. Các hợp phần này được tích hợp nhằm lượng hóa V và R của từng đoạn tuyến.

Quy trình đánh giá được xây dựng theo trình tự từ xác định H, đánh giá mức độ E, đánh giá S, đánh giá AC đến xác định V và R của công trình (Hình 2).



Nguồn: Tổng hợp và phát triển từ IPCC (2023), PIARC (2023) và nhóm tác giả.

Hình 2. Khung lý thuyết đánh giá V và R đối với CTĐB ven biển xét đến BĐKH.

Hình 2 trình bày khung lý thuyết được sử dụng trong nghiên cứu. Theo đó, 04 hợp phần H, E, S và AC được sử dụng để lượng hóa V, sau đó kết hợp với H nhằm xác định mức độ R đối với từng đoạn tuyến CTĐB ven biển.

Theo IPCC AR6 [2], Bộ Xây dựng [16], tính dễ bị tổn thương của đoạn tuyến i , đối với hiểm họa j (V_{ij}) được xác định theo biểu thức 1 và mức độ rủi ro được xác định theo biểu thức 2:

$$V_{ij} = \frac{S_{ij} + (1 - AC_{ij})}{2} \quad (1)$$

Trong đó, S_{ij} là mức độ nhạy cảm và AC_{ij} là năng lực thích ứng của đoạn tuyến i đối với hiểm họa j (H_j).

$$R_{ij} = \frac{H_{ij} + E_{ij} + V_{ij}}{3} \quad (2)$$

Trong đó: R_{ij} là mức độ rủi ro, E_{ij} là mức độ phơi bày của đoạn tuyến i đối với hiểm họa j .

Để bảo đảm khả năng so sánh giữa các chỉ tiêu có đơn vị đo lường khác nhau, các biến thành phần được chuẩn hóa về khoảng giá trị từ 0 ÷ 1 theo phương pháp Min–Max trước khi tổng hợp. Các giá trị V và R được phân loại thành 04 mức, gồm thấp, trung bình, cao và rất cao nhằm phục vụ so sánh giữa các đoạn tuyến và hỗ trợ quá trình ra quyết định QLKT.

Bảng 1 được sử dụng nhằm phân loại tương đối mức độ V và R của các đoạn tuyến. Việc chia thành 04 mức độ không nhằm thay thế các tiêu chuẩn kỹ thuật hiện hành, mà chủ yếu phục vụ so sánh giữa các đoạn tuyến và hỗ trợ nhận diện các khu vực cần được ưu tiên xem xét trong công tác QLKT xét đến BĐKH.

Bảng 1. Phân loại mức độ V và R

TT	Chỉ số V, R	Mức độ
1	$0 \div 0.4$	Thấp
2	$0.4 \div 0.6$	Trung bình
3	$0.6 \div 0.8$	Cao
4	$0.8 \div 1$	Rất cao

Ghi chú: Các ngưỡng phân loại mang tính tương đối, được sử dụng nhằm mục đích so sánh và hỗ trợ ra quyết định

2.2. Xây dựng bộ chỉ số

Trên cơ sở khung lý thuyết H–E–S–AC và tổng quan các nghiên cứu trong và ngoài nước, nghiên cứu xây dựng bộ chỉ số phục vụ đánh giá V và R đối với CTĐB ven biển xét đến BĐKH. Việc lựa chọn các chỉ số thành phần được thực hiện theo các nguyên tắc: (i) phản ánh đặc trưng của từng hợp phần H, E, S và AC; (ii) có khả năng thu thập dữ liệu trong điều kiện thực tiễn của khu vực nghiên cứu; (iii) bảo đảm tính đại diện, khả năng định lượng và so sánh giữa các đoạn tuyến; đồng thời (iv) kế thừa các khuyến nghị của IPCC [2], PIARC [3] và các nghiên cứu liên quan về đánh giá

R hạ tầng giao thông dưới tác động của BĐKH [5, 7, 16, 17].

Trong nghiên cứu này, các chỉ số thuộc nhóm H được sử dụng để phản ánh cường độ và mức độ xuất hiện của các hiện tượng khí hậu có khả năng ảnh hưởng đến CTĐB ven biển. Bộ chỉ số E phản ánh mức độ tiếp xúc của từng đoạn tuyến với các H. Nhóm chỉ số S mô tả mức độ dễ bị ảnh hưởng của công trình trước các tác động bất lợi, trong khi nhóm chỉ số AC phản ánh khả năng phòng ngừa, ứng phó và phục hồi của hệ thống QLKT. Danh mục các chỉ số thành phần được trình bày tại Bảng 2 đến Bảng 5.

Bảng 2. Bộ chỉ số thành phần Hiểm họa (H)

Loại hiểm họa (H)	Biến thành phần	Ý nghĩa khoa học	Ý nghĩa đối với QLKT	Ngưỡng quản lý, đánh giá V và R	Thang điểm và chuẩn hóa	Phương pháp thu thập dữ liệu	Ngưỡng tham chiếu
Nhiệt độ cực trị (HT)	HT1. Nhiệt độ không khí cực trị (Tair,max)	Phản ánh cường độ tác động nhiệt lên kết cấu mặt đường; khi nhiệt độ không khí tăng sẽ làm tăng nhiệt độ lớp BTN, giảm mô đun đàn hồi của nhựa và tăng nguy cơ hằn lún vết bánh xe.	Hỗ trợ xác định các đoạn tuyến cần tăng cường kiểm tra hiện tượng hằn lún, lựa chọn vật liệu chịu nhiệt và lập kế hoạch bảo trì mùa khô.	Tair,max < 35°C: chưa gây ảnh hưởng đáng kể; 35–38°C: bắt đầu xuất hiện nguy cơ hằn lún; ≥38°C: điều kiện bất lợi rõ rệt đối với mặt đường BTN.	< 35°C = 0; ≥38°C = 1; 35–38°C: nội suy Min–Max.	Dữ liệu trạm khí tượng	Hồ sơ thiết kế

Bảng 2. (tiếp)

Loại hiểm họa (H)	Biến thành phần	Ý nghĩa khoa học	Ý nghĩa đối với QLKT	Ngưỡng quản lý, đánh giá V và R	Thang điểm và chuẩn hóa	Phương pháp thu thập dữ liệu	Ngưỡng tham chiếu
Nhiệt độ cực trị (HT)	HT2. Nhiệt độ trong lớp BTN (Tpav,max)	Phản ánh trực tiếp trạng thái làm việc của lớp mặt BTN tại độ sâu 20÷50 mm.	Hỗ trợ đánh giá nguy cơ suy giảm khả năng chịu tải của lớp mặt và lựa chọn cấp nhựa phù hợp.	<55°C: chưa coi là hiểm họa; 55–60°C: nguy cơ phổ biến; >60°C: nguy cơ hằn lún rất cao.	<55°C = 0; ≥60°C = 1; nội suy Min–Max.	Tính toán từ mô hình hoặc cảm biến nhiệt độ mặt đường.	
	HR1. Lượng mưa cực đại 1 giờ (R1h)	Phản ánh khả năng quá tải tức thời của hệ thống thoát nước.	Hỗ trợ nhận diện các đoạn tuyến có nguy cơ ngập cục bộ và kiểm tra hệ thống thoát nước.	R1h < R1h.tk: đạt; R1h ≥ R1h.tk: vượt năng lực thiết kế.	<R1h.tk = 0; ≥R1h.tk = 1.	Dữ liệu mưa giờ từ trạm KTTV	Hồ sơ hoàn công
Mưa cực đoạn (HR)	HR2. Lượng mưa cực đại 24 giờ (R24h)	Phản ánh nguy cơ ngập kéo dài và bão hòa nền đường.	Hỗ trợ xác định nhu cầu nâng cấp thoát nước và bố trí bảo trì phòng ngừa.	R24h < R24h.tk: đạt; R24h ≥ R24h.tk: vượt thiết kế.	<R24h.tk = 0; ≥R24h.tk = 1.	Dữ liệu KTTV nhiều năm.	
	HR3. Chu kỳ lặp thiết kế (Ptk)	Phản ánh mức độ đáp ứng của tiêu chuẩn thiết kế trước điều kiện khí hậu hiện tại.	Hỗ trợ đánh giá mức ưu tiên cải tạo công trình thoát nước.	Ptk ≥ 25 năm: đáp ứng; Ptk < 25 năm: chưa đáp ứng.	≥25 năm = 0; <25 năm = 1.	Hồ sơ thiết kế, hồ sơ hoàn công.	Hồ sơ thiết kế
Sạt lở bờ biển (HSL)	HSL1. Chiều cao sóng cực đại (Hs,max)	Phản ánh tải trọng sóng tác động lên công trình bảo vệ đường.	Hỗ trợ đánh giá nhu cầu gia cố mái taluy và công trình bảo vệ bờ.	Hs ≤ Hs.tk: an toàn; Hs > Hs.tk: vượt thiết kế; sóng tràn mặt đường: rất nguy hiểm.	≤Hs.tk = 0; vượt thiết kế = 0.5; Tràn đường = 1.	Số liệu hải văn, mô hình sóng.	Hồ sơ thiết kế

Bảng 2. (tiếp)

Loại hiểm họa (H)	Biến thành phần	Ý nghĩa khoa học	Ý nghĩa đối với QLKT	Ngưỡng quản lý, đánh giá V và R	Thang điểm và chuẩn hóa	Phương pháp thu thập dữ liệu	Ngưỡng tham chiếu
Sạt lở bờ biển (HSL)	HSL2. Tốc độ lùi bờ và hạ thấp đáy biển	Phản ánh xu thế mất ổn định lâu dài của vùng đệm ven biển.	Hỗ trợ xác định các đoạn tuyến cần theo dõi và gia cố khẩn cấp.	Bồi tụ/ổn định = 0; lùi bờ <2 m/năm = 0.5; >5 m/năm hoặc mất chân kè = 1.	Theo cấp nguy cơ.	Viễn thám, UAV, khảo sát địa hình định kỳ.	Quy định của UBND tỉnh [18].
	HSL3. Tổ hợp nước dâng và triều cường	Phản ánh nguy cơ ngập và xói lở khi xảy ra tổ hợp bất lợi.	Hỗ trợ lập phương án ứng phó và cảnh báo giao thông.	Triều bình thường = 0; triều cường gây ngập cục bộ = 0.5; nước dâng gây ngập đáng kể = 1.	Theo cấp nguy cơ.	Trạm hải văn, mô hình thủy động lực, ghi nhận thực địa	Hồ sơ thiết kế

Ghi chú: Các ngưỡng trong bảng được sử dụng làm ngưỡng quản lý phục vụ chuẩn hóa chỉ số và hỗ trợ so sánh tương đối giữa các đoạn tuyến trong phạm vi nghiên cứu; không thay thế các quy định thiết kế hoặc tiêu chuẩn kỹ thuật hiện hành

Bảng 3. Bộ chỉ số thành phần Phơi bày (E)

Loại hiểm họa (H)	Biến thành phần	Ý nghĩa khoa học	Ý nghĩa đối với QLKT	Ngưỡng quản lý, đánh giá E	Thang điểm chuẩn hóa	Phương pháp thu thập dữ liệu	Nguồn tham chiếu
Nhiệt độ cực trị (HT)	ET1. Thời lượng nắng nóng (N35): Số ngày có nhiệt độ không khí > 35°C/năm	Phản ánh thời gian kết cấu mặt đường chịu tác động của nhiệt độ không khí cao, làm tích lũy ứng suất nhiệt và thúc đẩy lão hóa vật liệu BTN.	Hỗ trợ xác định các đoạn tuyến cần tăng tần suất kiểm tra trong mùa khô và ưu tiên sử dụng vật liệu chịu nhiệt.	<15 ngày/năm: thấp; 15–30 ngày: trung bình; >30 ngày: cao.	<15 = 0; >30 = 1; nội suy Min–Max.	Chuỗi số liệu khí tượng nhiều năm.	IPCC AR6 [2], [8]
	ET2. Mức phơi bày nhiệt của mặt đường (Tpav,max)	Phản ánh thời gian và mức độ mặt đường làm việc trong vùng nhiệt độ bất lợi.	Hỗ trợ đánh giá nguy cơ hằn lún và lựa chọn cấp nhựa phù hợp.	Tpav,max < T ₀ : thấp; Tpav,max ≥ T ₀ : cao (T ₀ theo hồ sơ thiết kế).	<T ₀ = 0; ≥T ₀ = 1.	Cảm biến nhiệt hoặc mô hình truyền nhiệt.	Hồ sơ thiết kế mặt đường

Bảng 3. (tiếp)

Loại hiểm họa (H)	Biến thành phần	Ý nghĩa khoa học	Ý nghĩa đối với QLKT	Ngưỡng quản lý, đánh giá E	Thang điểm chuẩn hóa	Phương pháp thu thập dữ liệu	Nguồn tham chiếu
Nhiệt độ cực trị (HT)	ET3. Tổ hợp tải trọng nhiệt (Ptruck)	Phản ánh mức độ tiếp xúc đồng thời giữa nhiệt độ cao và lưu lượng xe tải nặng, làm gia tăng biến dạng dư của BTN.	Hỗ trợ điều tiết giao thông, hạn chế tải trọng trong thời kỳ nhiệt độ cao.	Xe tải nặng $\leq 30\%$; thấp; $> 30\%$: cao.	$\leq 30\% = 0$; $> 30\% = 1$. nội suy	Điều tra giao thông, WIM hoặc bộ đếm xe tự động.	AASHTO, 2024 [19]; FHWA, 2023 [20]
	ER1. Mức vượt ngưỡng mưa 1 giờ	Phản ánh mức độ tiếp xúc của công trình với các trận mưa cường độ lớn vượt năng lực thiết kế thoát nước.	Hỗ trợ kiểm tra hệ thống thoát nước và xác định điểm ngập cục bộ.	R1h $< R_{tk1h}$: thấp; $\geq R_{tk1h}$: cao.	$< R_{tk1h} = 0$; $\geq R_{tk1h} = 1$.	Dữ liệu KTTV.	Hồ sơ thiết kế thoát nước
Mưa cực đoan (HR)	ER2. Mức vượt ngưỡng mưa 24 giờ	Phản ánh mức độ tiếp xúc với các đợt mưa kéo dài gây bão hòa nền đường.	Hỗ trợ đánh giá nhu cầu nâng cấp hệ thống thoát nước.	R24h $< R_{tk24h}$: thấp; $\geq R_{tk24h}$: cao.	$< R_{tk} = 0$; $\geq R_{tk} = 1$.	Dữ liệu KTTV.	Hồ sơ thiết kế thoát nước
	ER3. Tần suất ngập	Phản ánh số lần công trình tiếp xúc với tình trạng ngập trong năm.	Hỗ trợ xác định đoạn tuyến cần ưu tiên cải thiện thoát nước.	0÷3 ngày/năm: thấp; 4÷10 ngày: trung bình; >10 ngày: cao.	0; 0.5; 1.	Điều tra hiện trường; hồ sơ quản lý; ảnh vệ tinh.	TCVN 14182: 2024
	ER4. Thời gian tồn lưu nước	Gia tăng áp lực nước lỗ rỗng trong các lớp móng, thúc đẩy hiện tượng bão hòa nền hạ và sụt lún, gia tăng hiệu ứng bơm nước	Hỗ trợ đánh giá nguy cơ suy giảm kết cấu và bố trí bảo trì phòng ngừa.	≤ 1 giờ: thấp; 1–6 giờ: trung bình; ≥ 6 giờ: cao.	≤ 1 h = 0; ≥ 6 h = 1; nội suy.	Quan trắc hiện trường; camera; điều tra.	Hồ sơ thiết kế

Bảng 3. (tiếp)

Loại hiểm họa (H)	Biến thành phần	Ý nghĩa khoa học	Ý nghĩa đối với QLKT	Ngưỡng quản lý, đánh giá E	Thang điểm chuẩn hóa	Phương pháp thu thập dữ liệu	Nguồn tham chiếu
	ESL1. Khoảng cách đến mép nước biển (Ldist)	Phản ánh mức độ tiếp xúc trực tiếp của nền đường với quá trình xói lở bờ biển. Ldist càng nhỏ, rủi ro sạt lở hàm ếch càng lớn.	Hỗ trợ phân vùng nguy cơ và lập kế hoạch gia cố bờ.	>50 m: thấp; 10–50 m: trung bình; <10 m: cao.	0; 0.5; 1 Min–Max.	GIS; UAV; viễn thám.	UBND tỉnh [18, 21].
Sạt lở bờ biển (HSL)	ESL2. Năng lực bảo vệ hiện hữu	Phản ánh mức độ che chắn của công trình trước tác động của sóng và dòng chảy.	Hỗ trợ đánh giá nhu cầu sửa chữa hoặc bổ sung công trình bảo vệ.	Kè tốt/rùng ngập mặn tốt: thấp; kè hư hỏng: trung bình; không bảo vệ: cao.	0; 0.5; 1.	Khảo sát hiện trường; GIS.	TCVN 9901:2023
	ESL3. Cao trình đường so với mực nước thiết kế (Zroad)	So sánh cao độ đỉnh đường/kè với mực nước triều/sóng tràn. Cao trình thấp, kết cấu mặt đường bị phoi bày trước hiện tượng ngập mặn và xâm thực sóng.	Hỗ trợ xác định nhu cầu nâng cao cao trình nền đường.	Chênh cao >1,0 m: thấp; 0,5–1,0 m: trung bình; ≤0 m: cao.	0; 0.5; 1.	Khảo sát cao độ; Hồ sơ hoàn công	TCVN 4054: 2005

Các chỉ số thành phần trong Bảng 2 đến Bảng 6 được chuẩn hóa về cùng thang giá trị từ 0 đến 1 nhằm loại bỏ ảnh hưởng của sự khác biệt về đơn vị đo và bảo đảm khả năng so sánh giữa các biến. Đối với các chỉ tiêu có chiều tác động khác nhau, phương pháp chuẩn hóa được lựa chọn tương ứng để giá trị sau chuẩn hóa phản ánh nhất quán mức độ H, E, S hoặc AC. Trên cơ sở các giá

trị đã chuẩn hóa, các chỉ số H, E, S và AC được xác định theo phương pháp chỉ số tổng hợp bằng trung bình cộng với trọng số bằng nhau của các biến thành phần. Cách tiếp cận này góp phần nâng cao tính minh bạch của quá trình tổng hợp chỉ số, tạo thuận lợi cho việc so sánh giữa các đoạn tuyến và làm cơ sở cho việc xác định V, R và MPI_{Total} trong các bước phân tích tiếp theo.

Bảng 4. Bộ chỉ số thành phần Nhạy cảm (S)

Loại hiểm họa	Biến thành phần	Ý nghĩa khoa học	Ý nghĩa đối với QLKT	Ngưỡng quản lý	Thang điểm chuẩn hóa	Phương pháp thu thập dữ liệu	Cơ sở khoa học và nguồn tham chiếu
Nhiệt độ cực trị (HT)	ST1. Loại mặt đường	Phản ánh mức độ nhạy cảm của vật liệu mặt đường đối với nhiệt độ cao. BTN có tính nhiệt dẻo nên dễ hằn lún hơn BTXM.	Hỗ trợ lựa chọn giải pháp bảo trì và vật liệu phù hợp với điều kiện nhiệt độ cao.	BTXM = thấp; BTN Polymer = trung bình; BTN 60/70 = cao.	BTXM = 0; BTN Polymer = 0.5; BTN thường = 1.	Hồ sơ thiết kế; khảo sát hiện trường.	AASHTO, 2024[19]; [8]
	ST2. Tuổi khai thác kết cấu	Phản ánh mức độ lão hóa vật liệu và suy giảm khả năng chịu tải theo thời gian.	Hỗ trợ xác định nhu cầu trung tu hoặc đại tu.	<5 năm; 5–10 năm; >10 năm.	0; 0.5; 1.	Hồ sơ quản lý tài sản.	TCVN14182: 2024; Bộ Xây dựng [22]; Hồ sơ thiết kế
	ST3. Chất lượng chất kết dính	Phản ánh khả năng chống biến dạng ở nhiệt độ cao thông qua đặc tính của nhựa đường.	Hỗ trợ lựa chọn cấp nhựa khi cải tạo mặt đường.	Nhựa Polymer = thấp; nhựa 60/70 = cao.	0; 1.	Hồ sơ thiết kế; thí nghiệm vật liệu.	TCCS 38: 2022
	ST4. Chiều dày hiệu dụng lớp BTN	Lớp BTN dày giúp phân bố ứng suất và hạn chế tăng nhiệt cục bộ.	Hỗ trợ đánh giá nhu cầu tăng cường kết cấu.	>15 cm; 12–15 cm; <12 cm.	0; 0.5; 1.	Hồ sơ thiết kế; khoan lõi.	TCCS 38: 2022
Mưa cực đoan (HR)	SR1. Khả năng kháng nước của vật liệu mặt	Phản ánh khả năng chống thấm và chống bong bật của lớp mặt.	Hỗ trợ lựa chọn vật liệu bảo trì chống nước.	BTXM/BTN chặt = thấp; láng nhựa/cấp phối = cao.	0; 1.	Hồ sơ thiết kế; khảo sát hiện trường.	TCCS 38: 2022
	SR2. Điều kiện địa chất nền	Đánh giá mức độ suy giảm sức chịu tải của nền khi bão hòa nước.	Hỗ trợ phân vùng nền yếu và ưu tiên gia cố.	Đất tốt; đất trung bình; đất yếu.	0; 0.5; 1.	Hồ sơ khảo sát địa chất.	TCVN 4054: 2025; TCCS 41:2022

Bảng 4. (tiếp)

Loại hiểm họa	Biến thành phần	Ý nghĩa khoa học	Ý nghĩa đối với QLKT	Ngưỡng quản lý	Thang điểm chuẩn hóa	Phương pháp thu thập dữ liệu	Cơ sở khoa học và nguồn tham chiếu
Mưa cực đoan (HR)	SR3. Khả năng thấm của kết cấu	Phản ánh tốc độ nước xâm nhập vào các lớp áo đường.	Hỗ trợ xác định đoạn tuyến cần tăng cường chống thấm.	Thấp; Trung bình; Cao.	0; 0.5; 1.	Điều tra hiện trường; PCI;	TCCS 38: 2022
	SR4. Hiệu năng thoát nước	Phản ánh khả năng tiêu thoát nước khỏi mặt và nền đường của hệ thống rãnh	Hỗ trợ lập kế hoạch nạo vét, sửa chữa rãnh và cống.	Tự chảy tốt; Tắc nghẽn; Không rãnh.	0; 0.5; 1.	Khảo sát hiện trường; Hồ sơ bảo trì.	TCVN 4054: 2005; TCCS 38: 2022
	SR5. Chỉ số cản trở thoát nước ngang	Phản ánh mức độ thay đổi chế độ thoát nước tự nhiên do phát triển dân cư.	Hỗ trợ xử lý các điểm úng ngập do san lấp và lấn chiếm hành lang đường.	Thông thoáng; Cản trở một phần; Bịt kín.	0; 0.5; 1.	GIS; Khảo sát hiện trường; UAV.	TCVN 4054: 2005; TCCS 38: 2022
Sạt lở bờ biển (HSL)	SSL1. Khả năng chống xói của vật liệu nền	Đánh giá mức độ mất ổn định của nền khi chịu tác động sóng và dòng chảy.	Hỗ trợ xác định nhu cầu gia cố nền và bảo vệ bờ.	Đá/cấp phối; Cát; Bùn sét yếu.	0; 0.5; 1.	Hồ sơ địa chất; Khảo sát hiện trường.	TCVN 9436: 2012; TCVN 9901: 2023
	SSL2. Mức độ gia cố taluy	Phản ánh khả năng chống xói của mái taluy và công trình bảo vệ.	Hỗ trợ xác định đoạn tuyến cần nâng cấp kè.	Kè kiên cố; rọ đá; không gia cố.	0; 0.5; 1.	Điều tra hiện trường.	TCVN 9901: 2023
	SSL3. Mức độ hư hỏng bề mặt	Phản ánh trạng thái nứt và mất liên kết của kết cấu, làm tăng nguy cơ sụt trượt.	Hỗ trợ ưu tiên sửa chữa trước mùa mưa bão.	Kín khít; nứt nhỏ; nứt lớn/ổ gà.	0; 0.5; 1.	Khảo sát hiện trường.	TCVN14182: 2024

Ghi chú: BTXM: Bê tông xi măng

Bảng 5. Bộ chỉ số thành phần Năng lực thích ứng chung đối với hiểm họa (ACch)

Biến	Ý nghĩa khoa học	Ý nghĩa đối với QLKT	Ngưỡng quản lý	Thang điểm	Thu thập dữ liệu	Cơ sở khoa học
ACch1. Năng lực bảo đảm nguồn lực tài chính và bảo trì	Phản ánh khả năng huy động nguồn lực để duy trì chức năng khai thác trước và sau sự kiện khí hậu.	Hỗ trợ bảo trì phòng ngừa, giảm thời gian gián đoạn khai thác.	Thụ động; Có kế hoạch; Chủ động dự phòng.	0; 0.5; 1	Hồ sơ kế hoạch, ngân sách, phỏng vấn đơn vị quản lý.	ISO 55000[23]; PIARC, 2023[3]; [8].
ACch2. Năng lực dữ liệu số và hỗ trợ ra quyết định	Phản ánh mức độ ứng dụng GIS, DSS và dữ liệu số trong quản lý tài sản.	Tăng hiệu quả phân bổ nguồn lực và xác định ưu tiên bảo trì.	Thủ công; GIS; DSS dựa trên rủi ro.	0; 0.5; 1	Hồ sơ quản lý; khảo sát chuyên gia.	ISO 55000[23]; FHWA, 2023[20]; Bộ Xây dựng [6]
ACch3. Năng lực chuẩn hóa quy trình ứng phó	Phản ánh khả năng vận hành dựa trên quy trình và ngưỡng kích hoạt rõ ràng.	Giảm thời gian phản ứng, hạn chế gián đoạn giao thông.	Tùy nghi; Chuẩn hóa; Kích hoạt theo ngưỡng.	0; 0.5; 1	Quy trình vận hành; hồ sơ đơn vị quản lý.	ISO 55000[23]; PIARC, 2023[3].
ACch4. Năng lực quan trắc và phối hợp liên ngành	Phản ánh khả năng tích hợp dữ liệu và phối hợp đa cơ quan trong quản lý R.	Cải thiện dự báo và điều phối ứng phó.	Cô lập; Chia sẻ dữ liệu; Thời gian thực.	0; 0.5; 1	Khảo sát tổ chức quản lý.	IPCC AR6[2]; PIARC, 2023 [3]; Bộ Xây dựng[6]

Ghi chú: GIS: Hệ thống thông tin địa lý; DSS: Hệ thống hỗ trợ ra quyết định

Bảng 6. Bộ chỉ số thành phần Năng lực thích ứng đặc thù đối với từng hiểm họa

Loại hiểm họa	Biến thành phần	Ý nghĩa khoa học	Ý nghĩa đối với QLKT	Ngưỡng quản lý	Thang điểm chuẩn hóa	Phương pháp thu thập dữ liệu	Cơ sở khoa học và nguồn tham chiếu
Nhiệt độ cực trị (HT)	ACT1. Năng lực ứng dụng vật liệu kháng nhiệt	Phản ánh khả năng sử dụng vật liệu có khả năng chống biến dạng ở nhiệt độ cao.	Giảm nguy cơ hần lún và kéo dài tuổi thọ mặt đường.	Chưa áp dụng; áp dụng cục bộ; áp dụng phổ biến.	0; 0.5; 1	Hồ sơ thiết kế, khảo sát hiện trường.	TCVN 13567-2: 2022.

Bảng 6. (tiếp)

Loại hiểm họa	Biến thành phần	Ý nghĩa khoa học	Ý nghĩa đối với QLKT	Ngưỡng quản lý	Thang điểm chuẩn hóa	Phương pháp thu thập dữ liệu	Cơ sở khoa học và nguồn tham chiếu
Nhiệt độ cực trị (HT)	ACT2. Năng lực giảm hấp thụ nhiệt mặt đường	Phản ánh khả năng áp dụng các giải pháp làm giảm nhiệt độ mặt đường (sơn phản xạ, vật liệu phản xạ, mặt đường mát...).	Giảm nhiệt độ làm việc của BTN trong mùa khô.	Chưa có; áp dụng cục bộ; áp dụng hệ thống.	0; 0.5; 1	Khảo sát hiện trường.	PIARC, 2023[3]; FHWA, 2023[20].
	ACT3. Năng lực điều tiết tải trọng theo điều kiện nhiệt độ	Phản ánh khả năng điều chỉnh lưu lượng hoặc tải trọng khi nhiệt độ mặt đường vượt ngưỡng.	Hạn chế biến dạng dư trong thời kỳ nắng nóng.	Không có; có quy định; giám sát và thực hiện thường xuyên.	0; 0.5; 1	Hồ sơ quản lý giao thông; WIM.	FHWA, 2023[20]; PIARC, 2023[3].
	ACR1. Năng lực tiêu thoát nước khẩn cấp	Phản ánh khả năng rút nước nhanh sau mưa lớn.	Giảm thời gian ngập và hạn chế bão hòa nền đường.	Tự chảy; bơm hỗ trợ; bơm chuyên dụng sẵn sàng.	0; 0.5; 1	Hồ sơ quản lý, khảo sát hiện trường.	FHWA, 2023[20]; PIARC, 2023[3].
Mưa cực đoan (HR)	ACR2. Năng lực bảo trì phòng ngừa thích ứng	Phản ánh khả năng duy tu hệ thống thoát nước và mặt đường trước mùa mưa.	Giảm nước thấm vào kết cấu và kéo dài tuổi thọ công trình.	Thấp; trung bình; cao.	0; 0.5; 1	Hồ sơ bảo trì; khảo sát hiện trường.	FHWA, 2023[20]; ISO 55000[23]; Bộ Xây dựng[6].
	ACR3. Năng lực quản lý và phục hồi sau ngập	Phản ánh khả năng cảnh báo, ứng phó và khôi phục khai thác sau mưa lớn.	Giảm thời gian gián đoạn giao thông và chi phí sửa chữa khẩn cấp.	Không có; bán chủ động; chủ động.	0; 0.5; 1	Hồ sơ vận hành; phòng vấn đơn vị quản lý.	ISO 55000[23]; PIARC, 2023[3].

Bảng 6. (tiếp)

Loại hiểm họa	Biến thành phần	Ý nghĩa khoa học	Ý nghĩa đối với QLKT	Ngưỡng quản lý	Thang điểm chuẩn hóa	Phương pháp thu thập dữ liệu	Cơ sở khoa học và nguồn tham chiếu
Sạt lở bờ biển (HSL)	ACSL1. Năng lực bảo vệ mềm bờ biển	Phản ánh khả năng giảm năng lượng sóng thông qua rừng ngập mặn hoặc giải pháp sinh thái.	Giảm tốc độ xói lở và bảo vệ nền đường.	Không có; Che phủ trung bình; Che phủ tốt.	0; 0.5; 1	Ảnh vệ tinh; khảo sát hiện trường.	IPCC AR6 [2]; [8]; Bộ Xây dựng [6].
	ACSL2. Năng lực dự phòng vật tư gia cố	Phản ánh khả năng sẵn sàng vật tư và thiết bị xử lý sạt lở.	Rút ngắn thời gian xử lý sự cố và giảm nguy cơ lan truyền hư hỏng.	Không có; Hạn chế; Đầy đủ.	0; 0.5; 1	Hồ sơ quản lý vật tư.	PIARC, 2023 [3]; FHWA, 2023 [20].
	ACSL3. Năng lực quan trắc chủ động biến động đường bờ	Phản ánh khả năng theo dõi diễn biến xói lở bằng GIS, UAV hoặc ảnh vệ tinh.	Phát hiện sớm khu vực nguy cơ và lập kế hoạch gia cố.	Kiểm tra trực quan; Khảo sát định kỳ; Giám sát bằng GIS/UAV.	0; 0.5; 1	GIS; UAV;	Bộ Xây dựng [6]

2.3. Xây dựng chỉ số ưu tiên quản lý đa hiểm họa tổng hợp (MPI_{Total})

Kết quả đánh giá V và R theo khung H–E–S–AC cho phép lượng hóa mức độ tác động của từng loại H đối với CTĐB ven biển. Tuy nhiên, trong điều kiện khai thác thực tế, một đoạn tuyến thường chịu ảnh hưởng đồng thời của nhiều H như nhiệt độ cực trị, mưa cực đoan, sạt lở bờ biển. Việc đánh giá riêng lẻ từng loại R có thể chưa phản ánh đầy đủ mức độ ưu tiên quản lý trong điều kiện đa H và nguồn lực bảo trì có hạn.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất chỉ số MPI_{Total} nhằm tổng hợp đồng thời mức độ R của

nhiều loại H và AC của công trình trong một đại lượng định lượng thống nhất, phục vụ hỗ trợ ra quyết định QLKT. Chỉ số MPI_{Total} được xác định theo biểu thức (3):

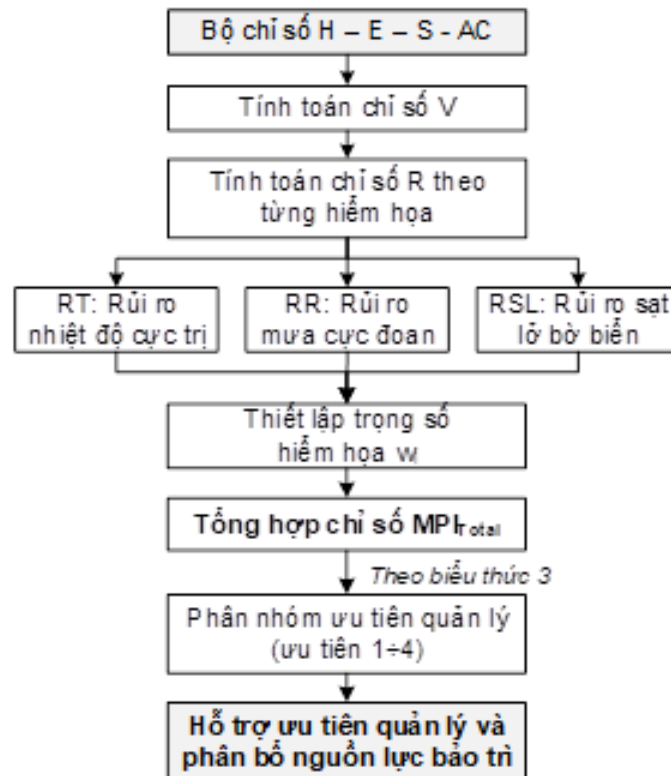
$$MPI_{Total} = \sum_{i=1}^n (R_i \cdot (1-AC_i) \cdot w_i) \quad (3)$$

Trong đó R_i là chỉ số rủi ro của hiểm họa thứ i ; AC_i là năng lực thích ứng tương ứng; w_i là trọng số của từng loại H; n là số loại H được xem xét. Trong nghiên cứu này, do chưa có cơ sở thực nghiệm để xác định mức độ ưu tiên khác nhau giữa các H, các trọng số được giả định bằng nhau ($w_i = 1$). Cần lưu ý rằng, thành phần $(1-AC_i)$ trong công

thức không nhằm tính lại ảnh hưởng của AC trong đánh giá R mà được sử dụng như hệ số phản ánh mức thiếu hụt năng lực thích ứng của đoạn tuyến phục vụ ưu tiên quản lý. Giá trị $(1-AC_i)$ càng lớn

cho thấy năng lực thích ứng càng thấp, do đó đoạn tuyến cần được ưu tiên hơn trong công tác QLKT.

Quy trình xây dựng và áp dụng chỉ số MPI_{Total} được trình bày tại Hình 3.



Hình 3. Quy trình xây dựng và áp dụng MPI_{Total}

Hình 3 cho thấy MPI_{Total} được xây dựng từ kết quả đánh giá R đơn H theo khung H–E–S–AC, sau đó tích hợp các loại R thông qua trọng số và điều chỉnh theo AC của công trình nhằm hình thành chỉ số ưu tiên quản lý tổng hợp. Cách tiếp cận này cho phép chuyển từ đánh giá R của từng H sang hỗ trợ ra quyết định quản lý trong điều kiện đa H.

Để phục vụ phân tầng ưu tiên quản lý, các đoạn tuyến được sắp xếp theo giá trị MPI_{Total} và phân nhóm bằng phương pháp phân vị [24, 25]. Do MPI_{Total} là chỉ số phục vụ xếp hạng tương đối giữa các đoạn tuyến thay vì xác định các ngưỡng R tuyệt đối, nghiên cứu lựa chọn tỷ lệ 20% - 20% - 30% - 30%, tương ứng với 04 mức ưu tiên quản lý. Cách phân nhóm này giúp nhận diện rõ hơn nhóm đoạn tuyến cần ưu tiên can thiệp trước, đồng thời bảo đảm số lượng quan sát đủ lớn trong từng nhóm để phục vụ so sánh và hỗ trợ phân bổ nguồn lực bảo trì. Việc áp dụng phân vị trong phân loại

các chỉ số phục vụ ra quyết định cũng phù hợp với khuyến nghị trong phân tích dữ liệu không gian và đánh giá R [2, 24, 26].

Trên cơ sở giá trị MPI_{Total} , nghiên cứu đề xuất 04 nhóm ưu tiên quản lý nhằm hỗ trợ phân bổ nguồn lực bảo trì đối với các đoạn tuyến CTĐB ven biển. Các nhóm ưu tiên và hành động quản lý được xây dựng theo nguyên tắc: (i) đoạn tuyến có MPI_{Total} cao hơn được ưu tiên can thiệp sớm hơn; (ii) mức độ can thiệp giảm dần theo giá trị MPI_{Total} ; và (iii) chu kỳ đánh giá được điều chỉnh tương ứng với mức ưu tiên quản lý. Nội dung đề xuất của từng nhóm được trình bày trong Bảng 7.

Các nhóm ưu tiên và định hướng hành động trong Bảng 7 là đề xuất của nhóm nghiên cứu trên cơ sở kết quả tính toán MPI_{Total} và nguyên tắc quản lý tài sản dựa trên R; các ngưỡng và chu kỳ can thiệp có thể được hiệu chỉnh phù hợp với điều kiện quản lý thực tế của từng địa phương.

Bảng 7. Đề xuất phân nhóm ưu tiên quản lý theo chỉ số MPI_{Total}

Nhóm ưu tiên	Giá trị MPI_{Total}	Mức ưu tiên	Định hướng bảo trì/QLKT
Ưu tiên I – Rất cao	Nhóm 20% giá trị MPI_{Total} cao nhất	Khẩn cấp	Kiểm tra chi tiết và xử lý các điểm có nguy cơ cao; Ưu tiên bảo trì, gia cố hoặc cải tạo các hạng mục chịu tác động của H trội; Tăng cường giám sát và cảnh báo trong mùa bất lợi. Thời gian xem xét can thiệp: dưới 3 tháng đối với hư hỏng khẩn cấp; hoàn thiện giải pháp trong 6–12 tháng. Bố trí can thiệp ngắn hạn đối với các đoạn tuyến có xu hướng gia tăng R;
Ưu tiên II – Cao	Nhóm 20% giá trị MPI_{Total} kế tiếp	Can thiệp ngắn hạn	Rà soát các yếu tố R trội và AC còn hạn chế; Tăng cường bảo trì phòng ngừa trước mùa mưa, nắng nóng hoặc triều cường. Thời gian xem xét can thiệp: 6–18 tháng. Duy trì mức phục vụ khai thác, thực hiện bảo trì định kỳ và bảo trì phòng ngừa theo H trội;
Ưu tiên III – Trung bình	Nhóm 30% giá trị MPI_{Total} tiếp theo	Bảo trì phòng ngừa	Theo dõi xu hướng biến động của MPI_{Total} nhằm hạn chế chuyển lên nhóm ưu tiên cao hơn. Chu kỳ xem xét: 1÷3 năm. Thực hiện duy tu thường xuyên và giám sát định kỳ;
Ưu tiên IV – Thấp	Nhóm 30% giá trị MPI_{Total} thấp nhất	Theo dõi	Chỉ xem xét can thiệp bổ sung khi xuất hiện dấu hiệu gia tăng nhanh về R hoặc suy giảm AC. Chu kỳ đánh giá lại: 2–5 năm.

Ghi chú: Các ngưỡng phân nhóm được xác định theo phương pháp phân vị và được sử dụng nhằm hỗ trợ xếp hạng ưu tiên quản lý tương đối giữa các đoạn tuyến; không thay thế các tiêu chuẩn kỹ thuật hoặc quy trình kiểm định hiện hành.

2.4. Dữ liệu nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện trên 60 đoạn tuyến CTĐB ven biển thuộc khu vực ven biển tỉnh An Giang, phân bố tại các đơn vị không gian Hà Tiên, Kiên Lương, Hòn Đất, Rạch Giá, An Biên và Vĩnh Thuận, mỗi đoạn tuyến dài từ 2 ÷ 5km. Các đoạn tuyến được lựa chọn nhằm đại diện cho các điều kiện địa hình, môi trường khai thác và mức độ tác động của các H đặc trưng của khu vực ven biển Tây Nam Bộ.

Dữ liệu nghiên cứu được tổng hợp từ nhiều nguồn, bao gồm: (i) số liệu khí tượng, thủy văn và hải văn; (ii) hồ sơ QLKT và bảo trì công trình; (iii)

kết quả khảo sát hiện trạng công trình và điều kiện khai thác; (iv) dữ liệu địa hình, địa chất và GIS; và (v) số liệu điều tra, đánh giá tại hiện trường. Các dữ liệu được kiểm tra tính nhất quán, chuẩn hóa về cùng thang đo trước khi tính toán các chỉ số thành phần H, E, S và AC.

Trên cơ sở bộ dữ liệu đã chuẩn hóa, các chỉ số H, E, S và AC được xác định cho từng đoạn tuyến và từng loại H, gồm hiểm họa đối với nhiệt độ cực trị (HT), mưa cực đoan (HR) và sạt lở bờ biển (HSL). Kết quả được sử dụng để tính toán chỉ số V, R và MPI_{Total} theo quy trình nghiên cứu đã trình bày ở các mục trước. Đặc điểm của bộ dữ liệu nghiên cứu được tổng hợp trong Bảng 8.

Bảng 8. Tổng hợp dữ liệu nghiên cứu

Nội dung	Mô tả
Khu vực nghiên cứu	Hà Tiên, Kiên Lương, Hòn Đất, Rạch Giá, An Biên, Vĩnh Thuận
Số đoạn tuyến	60
Tổng chiều dài tuyến	Gần 200 km
Loại dữ liệu	Khí tượng–thủy văn; địa hình, GIS; khảo sát hiện trường; hồ sơ QLKT
Thời kỳ dữ liệu	Giai đoạn 2015 ÷ 2024
Mục đích sử dụng	Xây dựng H, E, S, AC; tính V, R và MPI_{Total}

Bảng 8 tổng hợp các nguồn dữ liệu và thông tin đầu vào được sử dụng để xây dựng bộ chỉ số H, E, S và AC, làm cơ sở đánh giá V, R và MPI_{Total} .

Kết quả áp dụng bộ chỉ số đối với các đoạn tuyến nghiên cứu được trình bày và thảo luận trong mục 3.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kết quả đánh giá tính dễ bị tổn thương và rủi ro

Trên cơ sở bộ dữ liệu về điều kiện khí hậu, đặc điểm công trình và điều kiện khai thác, nghiên cứu tiến hành xác định các chỉ số H, E, S và AC cho 60 đoạn tuyến CTĐB ven biển thuộc khu vực

nghiên cứu, điểm đầu từ Hà Tiên là đoạn tuyến có tên ID01, các đoạn tuyến được đặt tên tăng dần, kết thúc là ID60 thuộc Vĩnh Thuận (Hình 1b). Các chỉ số thành phần được chuẩn hóa về thang đo $[0÷1]$ và tổng hợp theo các công thức đã trình bày ở Mục 2 nhằm xác định V và R đối với từng loại H.

Kết quả đánh giá cho thấy mức độ V và R có sự khác biệt giữa các đoạn tuyến và giữa các loại H. Đối với các H được xem xét, gồm nhiệt độ cực trị, mưa cực đoạn và sạt lở bờ biển, mức độ R không chỉ phụ thuộc vào đặc trưng của H mà còn chịu ảnh hưởng của điều kiện E, đặc điểm kỹ thuật của công trình và AC tại từng đoạn tuyến.

Bảng 9. Phân bố số đoạn tuyến theo mức độ V và R

Chỉ tiêu đánh giá	Số đoạn tuyến có mức độ đánh giá			
	Thấp	Trung bình	Cao	Rất cao
VT	2 (4%)	4 (6%)	0 (0%)	54 (90%)
VR	0 (0%)	4 (6%)	45 (75%)	11 (19%)
VSL	2 (4%)	17 (28%)	19 (32%)	22 (36%)
RT	2 (4%)	4 (6%)	2 (4%)	52 (86%)
RR	0 (0%)	28 (46%)	26 (44%)	6 (10%)
RSL	9 (15%)	32 (54%)	13 (21%)	6 (10%)

Ghi chú: VT, VR, VSL và RT, RR, RSL là tính dễ bị tổn thương và rủi ro đối với hiểm họa: Nhiệt độ cực trị, mưa cực đoạn, sạt lở bờ biển tương ứng

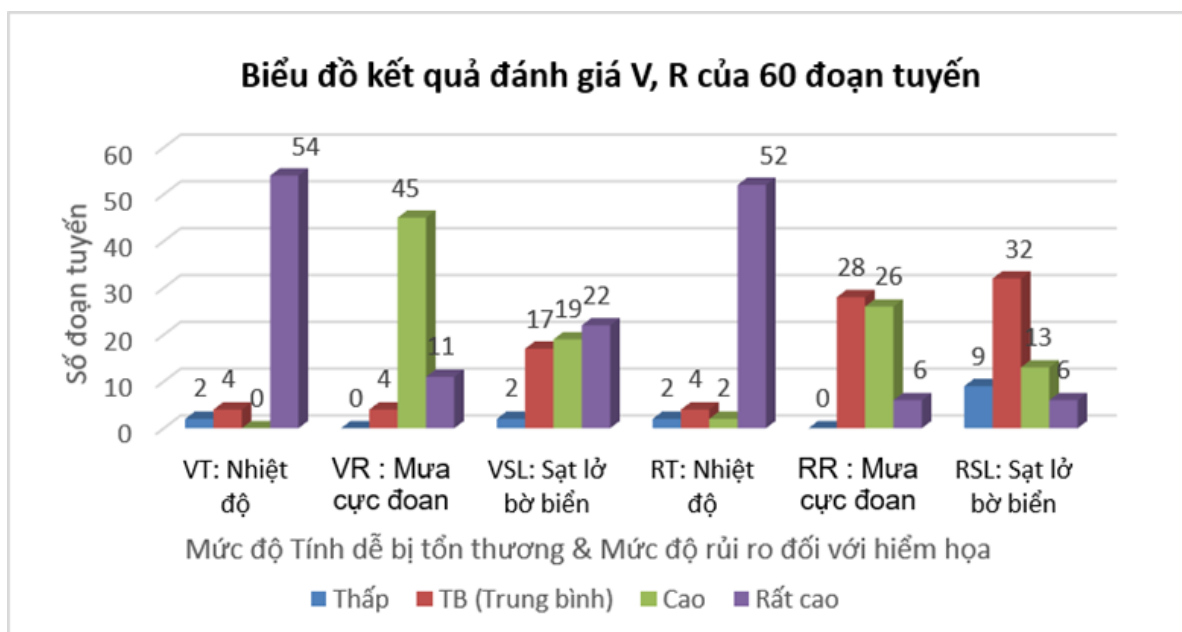
Bảng 9 cho thấy mức độ V đối với nhiệt độ cực trị có xu hướng tập trung ở mức rất cao, với 54/60 đoạn tuyến thuộc nhóm này.

Rủi ro do nhiệt độ cực trị cũng ghi nhận tỷ lệ cao ở nhóm rất cao, với 52/60 đoạn tuyến. Đối với mưa cực đoạn, phần lớn các đoạn tuyến có mức V ở nhóm cao và rất cao, trong khi R phân bố chủ yếu ở nhóm trung bình và cao. Đối với sạt lở bờ biển, cả V và R có sự phân hóa rõ hơn giữa các nhóm, phản ánh sự khác biệt về vị trí không gian, điều kiện địa hình và mức độ tiếp xúc với khu vực

bờ biển.

Hình 4 minh họa sự khác biệt về phân bố mức độ V và R giữa các loại H. Kết quả này cho thấy việc đánh giá riêng từng loại H có thể hỗ trợ nhận diện các đặc điểm R khác nhau của từng đoạn tuyến, đồng thời là cơ sở để xem xét bước tổng hợp đa hiểm họa trong chỉ số MPI_{Total} .

Để xem xét sự phân bố R theo không gian, kết quả đánh giá R được tổng hợp theo các khu vực nghiên cứu, bao gồm Hà Tiên, Kiên Lương, Hòn Đất, Rạch Giá, An Biên và Vĩnh Thuận.



Nguồn: Nhóm nghiên cứu tổng hợp

Hình 4. Kết quả đánh giá mức độ V và mức độ R đối với các H chính tại 60 đoạn tuyến nghiên cứu

Bảng 10. Tổng hợp mức độ R theo khu vực nghiên cứu và loại H

Khu vực	Số đoạn tuyến	Loại rủi ro	Thấp	Trung bình	Cao	Rất cao
Hà Tiên	10	RT	0	0	6	4
		RR	0	1	9	0
		RSL	3	7	0	0
Kiên Lương	8	RT	0	0	1	7
		RR	0	8	0	0
		RSL	6	2	0	0
Hòn Đất	12	RT	0	0	0	12
		RR	0	9	3	0
		RSL	0	5	5	2
Rạch Giá	9	RT	0	1	7	1
		RR	0	0	3	6
		RSL	0	9	0	0
An Biên	11	RT	0	0	10	1
		RR	0	0	11	0
		RSL	0	5	3	3
Vĩnh Thuận	10	RT	0	0	2	8
		RR	0	8	2	0
		RSL	0	4	5	1

Ghi chú: Phân loại rủi ro được thực hiện theo thang điểm R: $R < 0.4$: thấp; $0.4 \leq R < 0.6$: trung bình; $0.6 \leq R < 0.8$: cao; $R \geq 0.8$: rất cao

RT: Rủi ro nhiệt độ cực trị; RR: Rủi ro mưa cực đoan; RSL: Rủi ro sạt lở bờ biển

Bảng 10 cho thấy R do nhiệt độ cực trị xuất hiện ở mức cao và rất cao tại hầu hết các khu vực nghiên cứu, đặc biệt tại Hòn Đất, Kiên Lương và Vĩnh Thuận. Rủi ro do mưa cực đoan có xu hướng phân hóa theo điều kiện thoát nước và đặc điểm địa hình, trong đó Rạch Giá và An Biên ghi nhận nhiều đoạn tuyến thuộc nhóm cao hoặc rất cao. Đối với sạt lở bờ biển, mức R cao hơn tập trung tại một số khu vực như Hòn Đất, An Biên và Vĩnh Thuận. Kết quả này cho thấy mức độ R của CTĐB ven biển có sự khác biệt theo không gian và theo loại H, qua đó có thể được sử dụng làm cơ sở tham khảo cho việc tổng hợp ưu tiên quản lý đa H tổng hợp trong

các nội dung tiếp theo.

3.2. Kết quả xác định ưu tiên quản lý đa hiểm họa tổng hợp (MPI_{Total})

Trên cơ sở kết quả đánh giá R và AC đối với 03 loại H chính gồm nhiệt độ cực trị, mưa cực đoan và sạt lở bờ biển, nghiên cứu tính toán chỉ số MPI_{Total} cho 60 đoạn tuyến theo công thức đã trình bày ở mục 2.

Khác với các chỉ số R của từng loại H, MPI_{Total} được xây dựng nhằm tổng hợp đồng thời mức độ R và AC của công trình trong một đại lượng định lượng thống nhất, qua đó hỗ trợ xác định mức độ ưu tiên quản lý giữa các đoạn tuyến.

Bảng 11. Kết quả tính toán chỉ số MPI_{Total} và phân nhóm ưu tiên quản lý các đoạn tuyến nghiên cứu

Đoạn tuyến	Đơn vị không gian	RT	ACT	RR	ACR	RSL	AC _{SL}	MPI_{Total}	Nhóm ưu tiên	Mức ưu tiên
ID44	An Biên	0.8	0.1	0.7	0.1	0.9	0.2	2.1	I	Khẩn cấp
ID49	An Biên	0.8	0.1	0.7	0.1	0.8	0.1	2.1	I	
ID50	An Biên	0.8	0.1	0.7	0.1	0.7	0.1	2	I	
ID24	Hòn Đất	0.9	0.1	0.6	0.1	0.8	0.2	2	I	
ID23	Hòn Đất	0.9	0.1	0.6	0.1	0.8	0.3	1.9	I	
ID60	Vĩnh Thuận	0.9	0.1	0.5	0.1	0.6	0.1	1.9	I	
ID21	Hòn Đất	0.9	0.1	0.6	0.1	0.6	0.2	1.8	I	
ID40	An Biên	0.8	0.1	0.7	0.1	0.5	0.1	1.8	I	
ID59	Vĩnh Thuận	0.9	0.1	0.5	0.1	0.6	0.1	1.8	I	
ID22	Hòn Đất	0.9	0.1	0.5	0.1	0.6	0.1	1.8	I	
ID47	An Biên	0.8	0.1	0.6	0.1	0.6	0.2	1.8	I	Can thiệp ngắn hạn
ID52	Vĩnh Thuận	0.9	0.1	0.5	0.1	0.5	0.1	1.8	I	
ID53	Vĩnh Thuận	0.9	0.1	0.5	0.1	0.5	0.1	1.8	I	
ID29	Hòn Đất	0.9	0.1	0.5	0.2	0.6	0.1	1.7	II	
ID20	Hòn Đất	0.9	0.1	0.5	0.1	0.6	0.2	1.7	II	
ID30	Hòn Đất	0.9	0.1	0.5	0.1	0.6	0.2	1.7	II	
ID41	An Biên	0.8	0.1	0.7	0.1	0.5	0.2	1.7	II	
ID55	Vĩnh Thuận	0.9	0.1	0.5	0.1	0.6	0.2	1.7	II	
ID48	An Biên	0.8	0.1	0.6	0.1	0.5	0.1	1.7	II	
ID54	Vĩnh Thuận	0.9	0.1	0.5	0.1	0.5	0.2	1.7	II	
ID56	Vĩnh Thuận	0.9	0.1	0.5	0.2	0.6	0.1	1.7	II	
ID43	An Biên	0.8	0.1	0.7	0.1	0.5	0.2	1.7	II	

Bảng 11. (tiếp)

Đoạn tuyến	Đơn vị không gian	RT	ACT	RR	ACR	RSL	AC _{SL}	MPI _{Total}	Nhóm ưu tiên	Mức ưu tiên
ID51	Vĩnh Thuận	0.9	0.1	0.5	0.1	0.4	0.1	1.7	II	Can thiệp ngắn hạn
ID17	Kiên Lương	0.9	0.1	0.5	0.2	0.5	0.1	1.7	II	
ID28	Hòn Đất	0.9	0.1	0.5	0.2	0.5	0.1	1.7	II	
ID19	Hòn Đất	0.9	0.1	0.5	0.1	0.5	0.2	1.7	II	
ID27	Hòn Đất	0.9	0.1	0.5	0.1	0.5	0.2	1.7	II	
ID42	An Biên	0.8	0.1	0.7	0.2	0.5	0.3	1.6	III	Bảo trì phòng ngừa
ID45	An Biên	0.4	0.2	0.7	0.1	0.8	0.2	1.6	III	
ID08	Hà Tiên	0.8	0.1	0.6	0.2	0.4	0.1	1.6	III	
ID04	Hà Tiên	0.8	0.1	0.6	0.2	0.4	0.1	1.6	III	
ID06	Hà Tiên	0.8	0.1	0.6	0.3	0.4	0.1	1.5	III	
ID03	Hà Tiên	0.8	0.1	0.6	0.2	0.4	0.2	1.5	III	
ID18	Kiên Lương	0.9	0.1	0.5	0.3	0.5	0.2	1.5	III	
ID09	Hà Tiên	0.8	0.1	0.6	0.2	0.4	0.3	1.5	III	
ID10	Hà Tiên	0.8	0.1	0.6	0.2	0.4	0.3	1.5	III	
ID05	Hà Tiên	0.8	0.1	0.6	0.3	0.4	0.2	1.5	III	
ID12	Kiên Lương	0.9	0.1	0.5	0.1	0.2	0.1	1.5	III	
ID11	Kiên Lương	0.9	0.1	0.5	0.3	0.3	0.1	1.5	III	
ID25	Hòn Đất	0.9	0.2	0.5	0.3	0.5	0.3	1.4	III	
ID26	Hòn Đất	0.9	0.2	0.5	0.3	0.5	0.4	1.4	III	
ID07	Hà Tiên	0.8	0.1	0.5	0.3	0.3	0.1	1.4	III	
ID16	Kiên Lương	0.9	0.1	0.5	0.3	0.2	0.1	1.4	III	
ID35	Rạch Giá	0.8	0.3	0.8	0.4	0.5	0.4	1.3	IV	Theo dõi
ID36	Rạch Giá	0.8	0.3	0.8	0.4	0.4	0.3	1.3	IV	
ID46	An Biên	0.3	0.2	0.6	0.1	0.7	0.2	1.3	IV	
ID37	Rạch Giá	0.8	0.3	0.8	0.4	0.4	0.4	1.3	IV	
ID38	Rạch Giá	0.8	0.3	0.8	0.4	0.4	0.4	1.3	IV	
ID58	Vĩnh Thuận	0.4	0.4	0.5	0.1	0.8	0.2	1.3	IV	
ID32	Rạch Giá	0.8	0.3	0.8	0.4	0.5	0.5	1.3	IV	
ID13	Kiên Lương	0.9	0.1	0.5	0.2	0.1	0.1	1.3	IV	
ID33	Rạch Giá	0.8	0.4	0.7	0.4	0.5	0.4	1.2	IV	
ID34	Rạch Giá	0.7	0.3	0.7	0.4	0.5	0.4	1.2	IV	
ID01	Hà Tiên	0.7	0.2	0.6	0.2	0.3	0.4	1.2	IV	

Bảng 11. (tiếp)

Đoạn tuyến	Đơn vị không gian	RT	ACT	RR	ACR	RSL	AC _{SL}	MPI _{Total}	Nhóm ưu tiên	Mức ưu tiên
ID02	Hà Tiên	0.8	0.2	0.6	0.4	0.3	0.4	1.2	IV	Theo dõi
ID15	Kiên Lương	0.9	0.1	0.5	0.4	0.1	0.1	1.2	IV	
ID57	Vĩnh Thuận	0.5	0.4	0.5	0.1	0.7	0.4	1.2	IV	
ID31	Rạch Giá	0.8	0.3	0.7	0.6	0.5	0.5	1.1	IV	
ID39	Rạch Giá	0.3	0.5	0.8	0.4	0.5	0.2	1.1	IV	
ID14	Kiên Lương	0.4	0.4	0.5	0.4	0.2	0.1	0.8	IV	

Ghi chú:

- RT, RR và RSL là chỉ số rủi ro đối với hiểm họa nhiệt độ cực trị, mưa cực đoan và sạt lở bờ biển;
- ACT, ACR và ACSL là chỉ số năng lực thích ứng tương ứng.
- MPI_{Total} được tính theo biểu thức (3), giả định $w_i = 1$.

Bảng 12. Tổng hợp kết quả phân nhóm ưu tiên quản lý các đoạn tuyến nghiên cứu

Nhóm ưu tiên	Số đoạn tuyến	Tỷ lệ (%)
I	13	22
II	14	23
III	16	27
IV	17	28

Ghi chú: Nhóm ưu tiên được xác định theo phương pháp phân vị 20%–20%–30%–30%.

Kết quả tính toán ở bảng 11 cho thấy giá trị MPI_{Total} của các đoạn tuyến dao động từ 0.8 đến 2.1, phản ánh sự khác biệt về mức độ tác động tổng hợp của các H và AC của hệ thống công trình. Theo phương pháp phân nhóm phân vị được thể hiện trong bảng 12, 13 đoạn tuyến được xếp vào nhóm ưu tiên I (22%), 14 đoạn tuyến thuộc nhóm ưu tiên II (23%), 16 đoạn tuyến thuộc nhóm ưu tiên III (27%) và 17 đoạn tuyến thuộc nhóm ưu tiên IV (28%).

Các đoạn tuyến có giá trị MPI_{Total} cao tập trung chủ yếu tại khu vực An Biên, Hòn Đất và Vĩnh Thuận, trong đó các đoạn tuyến ID44, ID49, ID50 và ID24 ghi nhận giá trị MPI_{Total} từ 2.0 đến 2.1. Các đoạn tuyến này đồng thời có mức R tương đối cao đối với nhiều loại H và AC còn hạn chế, do đó được xếp vào nhóm ưu tiên quản lý cao nhất. Ngược lại, các đoạn tuyến có giá trị MPI_{Total} thấp hơn chủ yếu thuộc khu vực Rạch Giá, Kiên Lương và một số đoạn tuyến tại Hà Tiên, phản ánh mức

độ tác động tổng hợp thấp hơn hoặc có điều kiện thích ứng thuận lợi hơn.

So với việc đánh giá riêng lẻ từng chỉ số rủi ro, MPI_{Total} cung cấp một thước đo tổng hợp phục vụ quá trình ra quyết định trong QLKT CTĐB ven biển. Chỉ số này cho phép nhận diện các đoạn tuyến cần ưu tiên can thiệp trước, đồng thời hỗ trợ phân bổ nguồn lực bảo trì theo mức độ ưu tiên trong điều kiện nguồn lực còn hạn chế. Đây là điểm mới của nghiên cứu, góp phần bổ sung công cụ hỗ trợ đánh giá và ưu tiên quản lý đa H đối với CTĐB ven biển xét đến BĐKH.

3.3. Thảo luận

Kết quả nghiên cứu cho thấy bộ chỉ số thành phần H–E–S–AC cho phép lượng hóa đồng thời các hợp phần hiểm họa, phơi bày, nhạy cảm và năng lực thích ứng của CTĐB ven biển dưới tác động của BĐKH. So với cách tiếp cận chỉ đánh giá riêng lẻ từng loại H hoặc từng yếu tố kỹ thuật, bộ chỉ số này phản ánh tương đối đầy đủ mối quan hệ

giữa điều kiện khí hậu, đặc điểm công trình và năng lực QLKT, qua đó cung cấp cơ sở để đánh giá V và R của các đoạn tuyến nghiên cứu.

Trên cơ sở kết quả đánh giá V và R, nghiên cứu đề xuất chỉ số MPI_{Total} nhằm tích hợp đồng thời ảnh hưởng của nhiều loại H và AC của công trình trong một chỉ số duy nhất. Khác với các chỉ số R truyền thống chỉ phản ánh mức độ tác động của từng H, MPI_{Total} hướng tới hỗ trợ quá trình ra quyết định trong QLKT thông qua việc phân nhóm ưu tiên giữa các đoạn tuyến. Cách tiếp cận này góp phần chuyển kết quả đánh giá R thành thông tin phục vụ lập kế hoạch QLKT và phân bổ nguồn lực trong điều kiện còn hạn chế.

Kết quả nghiên cứu phù hợp với xu hướng quản lý tài sản CTĐB dựa trên R được khuyến nghị trong các hướng dẫn của IPCC, PIARC và Bộ Xây dựng, trong đó đánh giá R được xem là cơ sở để hỗ trợ lập kế hoạch quản lý và nâng cao AC của CTĐB ven biển trước tác động của BĐKH. Tuy nhiên, các nghiên cứu trước đây chủ yếu tập trung vào đánh giá V hoặc R của từng loại H, trong khi việc tích hợp kết quả đánh giá đa H thành một chỉ số ưu tiên QLKT còn chưa được đề cập nhiều đối với CTĐB ven biển. Trong bối cảnh đó, MPI_{Total} được đề xuất như một công cụ hỗ trợ bổ sung, góp phần liên kết kết quả đánh giá V, R với quá trình ra quyết định QLKT.

Mặc dù vậy, nghiên cứu vẫn còn một số hạn chế. Việc xác định trọng số của các H được thực hiện theo giả thiết trọng số bằng nhau nhằm bảo đảm tính đơn giản của mô hình trong điều kiện dữ liệu thực nghiệm còn hạn chế. Bên cạnh đó, bộ chỉ số được xây dựng và kiểm chứng trên 60 đoạn tuyến thuộc khu vực ven biển tỉnh An Giang, do đó cần được tiếp tục hiệu chỉnh và kiểm định khi áp dụng cho các khu vực có điều kiện tự nhiên và khai thác khác nhau.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã đề xuất bộ chỉ số thành phần phục vụ đánh giá V và R đối với CTĐB ven biển xét đến BĐKH. Bộ chỉ số được xây dựng trên cơ sở tích hợp bốn hợp phần gồm H, E, S và AC, đồng

thời chuẩn hóa các biến thành phần theo cùng một thang đo để bảo đảm khả năng so sánh giữa các đoạn tuyến.

Trên cơ sở bộ chỉ số H-E-S-AC, nghiên cứu đã đánh giá V và R của 60 đoạn tuyến đường bộ ven biển thuộc tỉnh An Giang đối với 03 loại H chính gồm nhiệt độ cực trị, mưa cực đoan và sạt lở bờ biển. Kết quả cho thấy mức độ R có sự khác biệt giữa các khu vực nghiên cứu, phản ánh ảnh hưởng đồng thời của điều kiện tự nhiên, đặc điểm công trình và AC.

Đóng góp chính của nghiên cứu là đề xuất chỉ số ưu tiên quản lý đa hiểm họa tổng hợp (MPI_{Total}), cho phép tích hợp kết quả đánh giá R của nhiều loại H và AC của công trình trong một chỉ số thống nhất. Chỉ số này hỗ trợ phân nhóm ưu tiên QLKT giữa các đoạn tuyến, góp phần chuyển kết quả đánh giá R thành thông tin phục vụ lập kế hoạch QLKT và phân bổ nguồn lực bảo trì trong điều kiện nguồn lực hạn chế.

Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở tham khảo cho việc áp dụng phương pháp đánh giá dựa trên R trong QLKT CTĐB ven biển. Trong các nghiên cứu tiếp theo, cần tiếp tục kiểm định bộ chỉ số trên các vùng ven biển khác, đồng thời xem xét xác định trọng số của các loại H bằng các phương pháp định lượng nhằm nâng cao khả năng ứng dụng của chỉ số MPI_{Total} trong thực tiễn quản lý.

Tuyên bố về việc sử dụng AI tạo sinh

Trong quá trình chuẩn bị bài báo này, các tác giả đã sử dụng ChatGPT nhằm cải thiện khả năng đọc hiểu và diễn đạt ngôn ngữ của bản thảo. Sau khi sử dụng công cụ này, các tác giả đã rà soát và chỉnh sửa nội dung khi cần thiết, đồng thời chịu hoàn toàn trách nhiệm về nội dung của bài báo được công bố.

Tài liệu tham khảo

- [1] Sở Giao thông vận tải Kiên Giang. (2024). Báo cáo hiện trạng và kế hoạch bảo trì hạ tầng giao thông giai đoạn 2021-2025. Kiên Giang
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). AR6 Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II and III to

- the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. *Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, Switzerland, pp. 35–115. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- [3] PIARC. (2023). PIARC International Climate Change Adaptation Framework: Technical Report. PIARC Ref. 2023R28EN. *World Road Association (PIARC)*. Paris, France, Paris, France, 391 pp. ISBN 978-2-84060-803-5
- [4] Bộ Giao thông vận tải. (2023). Báo cáo hiện trạng kết cấu hạ tầng giao thông khu vực Đồng bằng sông Cửu Long. Hà Nội.
- [5] Đ.H. Nam, N.H. Hải, N.T. Long, N.T.T. Hương, Đ.T. Nội, N.T.H. Sâm, N.T. Hằng, N.T.H. Hải. (2020). Đánh giá tính dễ bị tổn thương, lập bản đồ rủi ro, xác định giải pháp thích ứng và phân tích chi phí lợi ích cho hệ thống đường bộ Việt Nam. *Bộ Kế hoạch và Đầu tư*, Hà Nội.
- [6] Bộ Giao thông vận tải. (2023). Kế hoạch hành động ứng phó với biến đổi khí hậu và tăng trưởng xanh ngành giao thông vận tải giai đoạn 2021–2030. Hà Nội.
- [7] Bộ Tài nguyên và Môi trường. (2023). Báo cáo đánh giá tác động biến đổi khí hậu và nước biển dâng tại Việt Nam. Hà Nội.
- [8] J.E. Oh, X.E. Alegre, R. Pant, E.E Koks, T. Russell, R. Schoenmakers, J.W Hall. (2019), Addressing Climate Change in Transport (Vol. 2): Pathway to Resilient Transport. Vietnam Transport Knowledge Series. *World Bank*, Washington, DC, USA. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/438551568123119419/pdf/Volume-2-Pathway-to-Resilient-Transport.pdf>
- [9] Asian Development Bank. (2024). Toward Climate-Resilient Roads: Climate Change Adaptation Measures for the Road Sector in Timor-Leste. *Asian Development Bank*, Manila, Philippines. <https://doi.org/10.22617/TCS240349-2>
- [10] Sở Giao thông vận tải Kiên Giang. (2022). Báo cáo Kết quả thực hiện công tác quản lý, bảo trì kết cấu hạ tầng giao thông trên địa bàn tỉnh Kiên Giang giai đoạn từ năm 2017-2022. Kiên Giang.
- [11] L.H. Sơn, N.T.T. Hương, V.N. Luân. (2025). Nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ do biến đổi khí hậu đối với tuyến đường bộ ven biển tại tỉnh Kiên Giang. *Tạp chí Xây dựng*, 2, 68-73. <https://tapchixaydung.vn/nghien-cuu-anh-huong-cua-nhiệt-do-do-bien-doi-khi-hau-doi-voi-tuyen-duong-bo-ven-bien-tai-tinh-kien-giang-20201224000028726.html>
- [12] UBND tỉnh Kiên Giang. (2022). Phương án phát triển mạng lưới giao thông tỉnh Kiên Giang thời kỳ 2021-2030 tầm nhìn đến năm 2050. Kiên Giang.
- [13] T.T. Lượm và cộng sự. (2021). Đề tài cấp Bộ nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của rừng ngập mặn đến sự mất ổn định bờ biển và đề biển vùng ven biển tây hai tỉnh Kiên Giang và Cà Mau trong điều kiện biến đổi khí hậu và nước biển dâng. Trường Đại học Kiên Giang.
- [14] L. Rocchi, A.G. Rizzo, L. Paolotti, A. Boggia, M. Attard. (2024). Assessing climate change vulnerability of coastal roads. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 29, 43. <https://doi.org/10.1007/s11027-024-10140-6>.
- [15] PIARC. (2023). Uniform and Holistic Approaches to Resilience: Climate Change and Other Hazards - Technical Report. PIARC Ref. 2023R24EN. *World Road Association (PIARC)*, Paris, France. <https://www.piarc.org/en/order-library/42396-en-Uniform%20and%20Holistic%20Approaches%20to%20Resilience:Climate%20Change%20and%20Other%20Hazards%20-20Technical%20Report>
- [16] Bộ Giao thông vận tải. (2023). Văn bản số 13709/BGTVT-KHCN&MT ngày 30/11/2023 Thông báo, sử dụng hướng dẫn đánh giá tính dễ bị tổn thương, rủi ro do biến đổi khí hậu đến cơ sở hạ tầng giao thông vận tải. Hà Nội.

- [17] Bộ Tài nguyên và Môi trường. (2021). Kịch bản biến đổi khí hậu - Phiên bản cập nhật năm 2020. NXB Tài nguyên – Môi trường và Bản đồ Việt Nam, Hà Nội.
- [18] UBND tỉnh Kiên Giang. (2020). Quy hoạch tỉnh Kiên Giang thời kỳ 2021-2030, tầm nhìn đến năm 2050 - Phương án phòng chống thiên tai do biến đổi khí hậu. UBND tỉnh Kiên Giang (nay là An Giang).
- [19] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2024). Transportation Asset Management Guide: A Focus on Implementation, updated digital edition. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC. <https://www.tamguide.com/>
- [20] FHWA (2023). Transportation Asset Management for Long-Term Sustainability, Accountability and Performance, Washington, DC. https://www.fhwa.dot.gov/asset/10009/tam_topr806.pdf
- [21] UBND tỉnh Kiên Giang. (2020). Quyết định số 10/2020/QĐ-UBND ngày 22/05/2020 quy định về quản lý, vận hành khai thác và bảo trì công trình đường bộ trong phạm vi quản lý của tỉnh Kiên Giang.
- [22] Bộ Giao thông vận tải. (2024). Thông tư số 41/2024/TT-BGTVT ngày 15/11/2024 quy định về quản lý, vận hành, khai thác và bảo trì kết cấu hạ tầng đường bộ. Hà Nội. <https://congbao.chinhphu.vn/van-ban/thong-tu-so-41-2024-tt-bgtvt-43379/53135.htm>
- [23] International Organization for Standardization. (2024). ISO 55000: Asset management - Overview, principles and terminology. Geneva, Switzerland. <https://www.iso.org/standard/83053.html>
- [24] IPCC (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- [25] OECD. (2024). Infrastructure for a climate-resilient future. *OECD Publishing*, Paris. <https://doi.org/10.1787/a74a45b0-en>
- [26] C.A. Brewer. (2015). Designing Better Maps: A Guide for GIS Users (2nd edition). Esri Press.