

# Tối ưu hóa hiệu quả kinh tế công tác bảo trì công trình ven biển: Đề xuất mô hình tích hợp LCC, CBA và công nghệ số trong bối cảnh biến đổi khí hậu

Bùi Thị Ngọc Lan<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội

## TỪ KHOÁ

Biến đổi khí hậu  
Công trình ven biển  
Phân tích chi phí vòng đời (LCC)  
Bảo trì dựa trên rủi ro  
Hạ tầng ven biển bền vững

## TÓM TẮT

Biến đổi khí hậu đang trở thành một trong những thách thức cấp bách trên toàn cầu, tác động mạnh mẽ đến mục tiêu phát triển bền vững, đặc biệt tại các khu vực ven biển. Sự gia tăng của các hiện tượng cực đoan như nước biển dâng, xói lở bờ biển và thời tiết bất thường đã và đang làm suy thoái hệ sinh thái, môi trường tự nhiên cũng như hạ tầng ven biển. Việt Nam với đường bờ biển dài hơn 3.260 km, là một trong những quốc gia chịu ảnh hưởng nặng nề của biến đổi khí hậu nên gặp nhiều rủi ro trong quá trình phát triển kinh tế - xã hội. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu ngày càng gia tăng, hệ thống công trình ven biển chịu áp lực lớn như gia tăng chi phí đầu tư, vận hành và bảo trì, đồng thời đe dọa hiệu quả kinh tế dài hạn của các dự án. Bài báo tập trung phân tích các khó khăn và thách thức kinh tế trong công tác bảo trì công trình ven biển dưới tác động của biến đổi khí hậu. Trên cơ sở tổng quan các công cụ kinh tế công trình như phân tích chi phí vòng đời (Life Cycle Cost - LCC), phân tích lợi ích - chi phí (Cost-Benefit Analysis - CBA) và đánh giá rủi ro, nghiên cứu đề xuất một mô hình tích hợp kinh tế - kỹ thuật nhằm nâng cao hiệu quả đầu tư bảo trì. Mô hình bao gồm lập kế hoạch bảo trì dựa trên rủi ro, ứng dụng công nghệ số như mạng lưới vạn vật kết nối Internet (Internet of Things - IoT), trí tuệ nhân tạo (Artificial Intelligence - AI) và mô phỏng. Các công cụ này hỗ trợ ra quyết định tài chính và xây dựng cơ chế tài chính bền vững cùng bộ chỉ số đánh giá hiệu quả kinh tế, hướng tới bảo trì chủ động và tăng cường khả năng chống chịu của hạ tầng ven biển.

## KEYWORDS

Climate change  
Coastal structures  
Life cycle cost analysis (LCC)  
Risk-based maintenance  
Sustainable coastal infrastructure

## ABSTRACT

Climate change is becoming one of the most pressing global challenges, profoundly impacting sustainable development goals, especially in coastal areas. The increase in extreme phenomena such as rising sea levels, coastal erosion, and unusual weather patterns has been and is degrading ecosystems, the natural environment, and coastal infrastructure. Vietnam, with a coastline over 3,260 km long, is one of the most severely affected countries, leading to numerous risks for socio-economic development. In this context, climate change puts significant pressure on coastal infrastructure systems, increasing investment, operational, and maintenance costs, and threatening the long-term economic viability of projects. The article focuses on analyzing the economic challenges in coastal structure maintenance under the impact of climate change. Based on an overview of construction economic tools such as Life Cycle Cost (LCC) analysis, Cost-Benefit Analysis (CBA), and risk assessment, the study proposes an integrated economic-technical model to improve the efficiency of maintenance investment. The model includes risk-based maintenance planning, the application of digital technologies such as the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), and simulation. These tools support financial decision-making and the establishment of sustainable financial mechanisms along with a set of economic performance indicators, aiming for proactive maintenance and enhanced resilience of coastal infrastructure.

## 1. Giới thiệu chung

Việt Nam là quốc gia có đường bờ biển dài hơn 3.260 km, được coi là một trong những quốc gia dễ bị tổn thương nhất trước tác động của biến đổi khí hậu [1]. Các hiện tượng khí hậu cực đoan như nước biển dâng, bão mạnh và xói lở bờ biển đã gây những thiệt hại nghiêm

trọng về kinh tế và đời sống của người dân [2]. Đồng thời, đặt ra thách thức rất lớn cho công tác bảo trì hệ thống công trình bảo vệ ven biển như đê, kè, cảng biển. Trong bối cảnh này, công tác bảo trì cần chú trọng đến phạm vi kỹ thuật và cũng trở thành một bài toán kinh tế phức tạp. Các phương pháp bảo trì truyền thống chủ yếu là phản ứng thụ động trước những tác động của biến đổi khí hậu, phụ thuộc vào ngân

\*Liên hệ tác giả: ngooclan78dhkt@gmail.com

Nhận ngày 23/12/2025, sửa xong ngày 07/01/2026, chấp nhận đăng ngày 13/01/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2026.1211>

sách Nhà nước, hạn chế về nguồn vốn. Chính vì vậy, nhiều công trình xuống cấp nhanh chóng, đòi hỏi sửa chữa khẩn cấp với chi phí lớn, thậm chí gây ra sự cố vỡ đê và ngập lụt trên diện rộng [3] [4].

Do đó, với góc nhìn kinh tế thủy lợi, công tác bảo trì các công trình ven biển được coi là một nhiệm vụ cần được ưu tiên và chú trọng đầu tư dài hạn. Bài báo nhằm thực hiện mục tiêu: (i) Phân tích các thách thức kinh tế trong bảo trì công trình ven biển dưới tác động của biến đổi khí hậu; (ii) Đề xuất mô hình tích hợp các công cụ phân tích kinh tế (LCC, CBA) và kỹ thuật số để nâng cao hiệu quả ra quyết định đầu tư bảo trì; (iii) Đưa ra các kiến nghị chính sách nhằm thể chế hóa cách tiếp cận kinh tế trong quản lý bảo trì.

## 2. Tổng quan tài liệu

Biến đổi khí hậu đang gây ra những tác động ngày càng nghiêm trọng đến các khu vực ven biển, bao gồm hiện tượng nước biển dâng, xói mòn bờ biển và gia tăng cường độ của các sự kiện khí hậu cực đoan, đe dọa trực tiếp đến tính toàn vẹn của các công trình ven biển. Để ứng phó với những thách thức này, nhiều nghiên cứu về công tác bảo trì công trình ven biển đã được triển khai tại các quốc gia như Hà Lan, Anh và Nhật Bản. Mục tiêu chính của các nghiên cứu này là tìm kiếm các giải pháp hiệu quả nhằm bảo vệ, nâng cao chất lượng phục vụ và kéo dài tuổi thọ của công trình trong điều kiện biến đổi khí hậu. Các nghiên cứu tập trung vào hai nhóm vấn đề chính:

Thứ nhất, nghiên cứu tác động của biến đổi khí hậu đến công trình ven biển, bao gồm: (i) Nước biển dâng gây nguy cơ ngập lụt và hư hại các công trình phòng hộ như đê biển, kè và tường chắn sóng (IPCC, 2021); (ii) Xói mòn do tác động của sóng và dòng chảy biển ảnh hưởng đến hạ tầng giao thông và khu dân cư ven biển (IPCC, 2021); (iii) Gia tăng tần suất và cường độ của các hiện tượng thời tiết cực đoan như bão lớn và sóng mạnh gây xói mòn và phá hủy kết cấu công trình ven biển [5]; và (iv) Suy thoái hệ sinh thái ven biển như rạn san hô và thảm cỏ biển làm giảm khả năng tiêu tán năng lượng sóng, gia tăng áp lực lên các công trình nhân tạo [6] (xem hình 1).

Thứ hai, nghiên cứu về bảo trì công trình ven biển, nhằm phát triển các phương pháp bảo trì hiệu quả, bao gồm: (i) Ứng dụng các phương pháp phân tích cực trị và dự báo rủi ro để xác định khả năng chịu tải của công trình trước điều kiện sóng và mực nước cực đoan, từ đó đề xuất các biện pháp bảo trì phù hợp [7]; (ii) Sử dụng mô hình số và công nghệ tiên tiến như CFD (Computational Fluid Dynamics), IH2VOF (Iber Hydrodynamics 2D Volume of Fluid) trong mô phỏng sóng tràn và đánh giá tác động của sóng đến công trình [8] (xem hình 2); (iii) Ứng dụng vật liệu bền vững như bê tông tự phục hồi và vật liệu composite để nâng cao độ bền công trình [9]; và (iv) Phát triển thiết kế công trình đa chức năng kết hợp chức năng bảo vệ với tạo không gian sống, thân thiện môi trường và giảm chi phí bảo trì dài hạn [10].

Thứ ba, các nghiên cứu về kinh tế trong quản lý hạ tầng và công trình ven biển, tập trung vào: (i) *Phân tích chi phí vòng đời (LCC)* và *phân tích Chi phí - Lợi ích (CBA)*: Ứng dụng để so sánh hiệu quả kinh tế dài

hạn của các chiến lược bảo trì khác nhau (phòng ngừa so với khắc phục), lựa chọn thời điểm tối ưu để can thiệp, và đánh giá tính khả thi của các giải pháp thích ứng [9] [11]. Một nghiên cứu điển hình về cầu ở Florida, Mỹ, chỉ ra rằng ăn mòn thép trong môi trường biển là mối đe dọa nghiêm trọng nhất và là nguyên nhân của các chi phí sửa chữa tốn kém nhất, thúc đẩy việc tìm kiếm các giải pháp vật liệu có LCC thấp hơn [9]; (ii) *Quản lý Tài sản dựa trên rủi ro*: Phát triển các khung phân tích để ưu tiên phân bổ nguồn lực tài chính hạn chế cho các tài sản có mức độ rủi ro (kết hợp giữa xác suất xảy ra sự cố và hậu quả) cao nhất, nhằm tối đa hóa hiệu quả đầu tư và khả năng phục hồi của hệ thống; và (iii) *Đánh giá tác động kinh tế của biến đổi khí hậu*: Định lượng thiệt hại tiềm năng về kinh tế - xã hội do công trình hư hỏng dưới các kịch bản biến đổi khí hậu khác nhau, làm cơ sở cho việc hoạch định ngân sách bảo trì và đầu tư nâng cấp chủ động.

Tại Việt Nam, biến đổi khí hậu đang làm gia tăng tốc độ và mức độ phức tạp của xói lở - bồi tụ bờ biển tại Việt Nam, gây ra những thách thức lớn đối với bảo vệ đất đai, cơ sở hạ tầng và phát triển kinh tế - xã hội ven biển (xem bảng 1). Có thể thấy rằng, công tác bảo trì công trình ven biển đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo độ bền và an toàn của hạ tầng trong điều kiện môi trường ngày càng khắc nghiệt. Các nghiên cứu về bảo trì công trình ven biển Việt Nam trong bối cảnh biến đổi khí hậu chủ yếu tập trung vào hai nội dung chính sau đây:

(i) *Nhóm nghiên cứu về tác động của biến đổi khí hậu, bao gồm:*

Đánh giá tác động của sóng biển, bão, nước biển dâng và suy thoái vật liệu đến hạ tầng bảo vệ, đồng thời phát triển mô hình đánh giá mức độ dễ bị tổn thương và đề xuất giải pháp ứng phó [15];

Ứng dụng công nghệ hiện đại như Phát hiện và đo khoảng cách bằng ánh sáng (Light Detection and Ranging - LiDAR) và mô hình số độ cao (Digital Elevation Model - DEM) để thu thập dữ liệu địa hình phục vụ đánh giá tác động biến đổi khí hậu tại các tỉnh ven biển từ Quảng Ninh đến Nam Bộ [16];

Phân tích tác động của hiện tượng thời tiết cực đoan đến cơ sở hạ tầng, đề xuất giải pháp thiết kế và cải tiến công trình để tăng cường tính bền vững, bao gồm xây dựng công trình nổi và cải thiện hệ thống thoát nước [17].

(ii) *Nhóm nghiên cứu bảo trì công trình ven biển, bao gồm:*

Xây dựng quy trình bảo trì cho công trình kết cấu bê tông cốt thép, đánh giá tác động môi trường và ứng dụng công nghệ mới để đảm bảo ổn định và kéo dài tuổi thọ công trình, đồng thời nghiên cứu các phương pháp thi công phù hợp với chiến lược thích ứng biến đổi khí hậu [18] [19];

Điều tra hiện trạng ăn mòn và phá hủy bê tông cốt thép, xác định nguyên nhân và đề xuất biện pháp nâng cao độ bền cho công trình bảo vệ bờ biển [20];

Đánh giá hư hỏng cấu kiện bê tông cốt thép trong công trình cảng do tác động của môi trường biển và biến đổi khí hậu, đề xuất biện pháp xử lý nhằm cải thiện tuổi thọ công trình [21];

Ứng dụng giải pháp khoa học công nghệ trong khảo sát, đánh giá an toàn và bảo trì định kỳ công trình cảng biển, nâng cao hiệu quả và chất lượng công tác bảo trì [22].

Các nghiên cứu đã tạo nền tảng quan trọng về tác động của biến đổi khí hậu và bảo trì kỹ thuật, nhưng vẫn tồn tại khoảng trống đáng kể từ góc độ kinh tế thủy lợi. Trong bối cảnh nguồn lực tài chính hạn chế và áp lực từ biến đổi khí hậu tại Việt Nam, việc tối ưu hóa hiệu quả kinh tế công tác bảo trì trở thành yêu cầu cấp thiết nhưng chưa được nghiên cứu hệ thống. Các hạn chế chủ yếu bao gồm:

(1) Thiếu nghiên cứu về tối ưu hóa kinh tế trong chiến lược bảo trì, đặc biệt là so sánh hiệu quả giữa bảo trì phòng ngừa và khắc phục trong điều kiện biến đổi khí hậu.

(2) Thiếu công cụ hỗ trợ quyết định phân bổ vốn đầu tư bảo trì dựa trên các tiêu chí kinh tế như mức độ rủi ro và giá trị tài sản được bảo vệ.

(3) Chưa có đánh giá toàn diện về chi phí vòng đời (LCC) của công trình ven biển, bao gồm cả chi phí bảo trì, suy giảm chức năng và thiệt hại gián tiếp, gây khó khăn cho việc lựa chọn giải pháp tối ưu về kinh tế dài hạn.

(4) Thiếu nghiên cứu về cơ chế tài chính bền vững cho công tác bảo trì, vẫn phụ thuộc vào ngân sách cấp phát hàng năm.

(5) Chưa có mô hình đánh giá rủi ro kinh tế tích hợp các kịch bản biến đổi khí hậu (nước biển dâng, bão cực đoan) với phân tích chi phí-lợi ích của các chiến lược bảo trì thích ứng.

### 3. Phương pháp nghiên cứu

Bài báo áp dụng phương pháp mô hình hóa khung phân tích kết hợp với phân tích tài liệu để đề xuất một mô hình tích hợp nhằm nâng cao hiệu quả kinh tế công tác bảo trì (xem hình 3), cụ thể như sau:

*Bước 1: Tổng hợp và đánh giá cơ sở lý thuyết và thực tiễn.* Tiến hành thu thập và phân tích các nghiên cứu trong nước và quốc tế, xác định các công cụ phân tích kinh tế then chốt (LCC, CBA), các công nghệ giám sát số tiên tiến (IoT, AI, mô phỏng) và các mô hình tài chính bền vững có tiềm năng ứng dụng. Đồng thời, phân tích các báo cáo hiện trạng, sự cố từ cơ quan quản lý [3] [4] để làm rõ những hạn chế và nhu cầu cấp thiết trong thực tiễn.

*Bước 2: Xây dựng mô hình đề xuất.* Trên cơ sở kết quả tổng hợp, xây dựng một mô hình tích hợp gồm: Quy trình lập kế hoạch bảo trì dựa trên rủi ro và LCC; Kiến trúc hệ thống hỗ trợ quyết định bằng công nghệ số (MDSS); và cơ chế tài chính nhiều nguồn. Mô hình được thiết kế theo nguyên tắc lấy phân tích kinh tế (LCC/CBA) làm trung tâm cho mọi quyết định đầu tư bảo trì.

*Bước 3: Minh họa ứng dụng và đề xuất chính sách.* Để chứng minh tính khả thi, bài báo mô tả chi tiết cách thức vận hành của từng thành phần trong mô hình, bao gồm việc tích hợp dữ liệu đầu vào, các bước phân tích và đầu ra hỗ trợ ra quyết định. Từ đó, đề xuất các kiến nghị chính sách cụ thể nhằm thể chế hóa và triển khai mô hình trong điều kiện Việt Nam.

Do hạn chế về dữ liệu định lượng, Bước 3 được minh họa thông qua ví dụ giả định về một tuyến kè ven biển, trong đó so sánh hai kịch bản bảo trì (phản ứng và chủ động) dựa trên LCC và CBA nhằm chứng minh tính khả thi của mô hình. Các tính toán chi tiết và

nghiên cứu điển hình định lượng sẽ được thực hiện trong các nghiên cứu tiếp theo.

### 4. Đề xuất mô hình tích hợp nâng cao hiệu quả kinh tế công tác bảo trì công trình ven biển

Để nâng cao hiệu quả kinh tế công tác bảo trì công trình ven biển trong bối cảnh biến đổi khí hậu, bài báo đề xuất một Mô hình tích hợp kinh tế - kỹ thuật với ba trụ cột liên kết chặt chẽ, trong đó phân tích kinh tế (LCC/CBA) đóng vai trò trung tâm cho mọi quyết định bảo trì trong bối cảnh biến đổi khí hậu. Cụ thể như sau:

#### 4.1. Khung lập kế hoạch bảo trì dựa trên rủi ro và phân tích chi phí vòng đời (LCC)

Khung này chuyển hóa rủi ro kỹ thuật thành luận cứ kinh tế, bao gồm 5 bước sau:

(i) Đánh giá rủi ro và hiện trạng: Sử dụng viễn thám, Hệ thống thông tin địa lý (Geographic Information System – GIS) và khảo sát thực địa để xác định mối đe dọa từ biến đổi khí hậu và tình trạng công trình.

(ii) Phân loại ưu tiên và ước tính thiệt hại: Xây dựng ma trận rủi ro và định lượng bằng tiền các tổn thất tiềm năng (tài sản, kinh tế, xã hội) nếu công trình mất chức năng.

(iii) Phân tích LCC/CBA của các phương án: Đây là bước cốt lõi. Với mỗi công trình ưu tiên, tiến hành so sánh ít nhất hai phương án bảo trì (ví dụ: chủ động có giám sát so với phản ứng). Tính toán toàn bộ dòng tiền chiết khấu trong vòng đời (đầu tư, bảo trì, sửa chữa, thiệt hại rủi ro) để tìm ra phương án có tổng LCC thấp nhất và Tỷ số Lợi ích/Chi phí (Benefit/Cost - B/C) cao nhất. Ví dụ, việc sử dụng vật liệu composite cốt sợi polymer (Fiber Reinforced Polymer – FRP) có thể làm tăng chi phí đầu tư ban đầu nhưng giảm đáng kể chi phí bảo trì, dẫn đến LCC thấp hơn về dài hạn [9].

(iv) Lập kế hoạch và ngân sách dài hạn: Tổng hợp các phương án tối ưu thành một kế hoạch bảo trì dài hạn (5-10 năm) với dự toán ngân sách đã được chứng minh hiệu quả kinh tế, thay vì phân bổ ngân sách hàng năm theo thói quen.

(v) Giám sát, đánh giá và cập nhật: Hệ thống giám sát liên tục cung cấp dữ liệu thực tế để điều chỉnh kế hoạch, đánh giá hiệu quả đầu tư và cập nhật các tham số trong mô hình phân tích kinh tế.

#### 4.2. Hệ thống hỗ trợ ra quyết định bảo trì thông minh

Để hiện thực hóa khung trên một cách tự động và chính xác, cần phát triển một hệ thống số (Intelligent Maintenance Decision Support System - MDSS) với kiến trúc ba tầng như sau: (i) Tầng dữ liệu: Tích hợp dữ liệu nhiều nguồn từ cảm biến IoT (theo dõi biến dạng, ăn mòn), viễn thám, GIS, cơ sở dữ liệu giá cả và hồ sơ công trình; (ii) Tầng phân tích: Là cơ quan quan trọng của hệ thống, bao gồm các mô-đun Trí tuệ nhân tạo / Học máy (Artificial Intelligence /

Machine Learning – AI/ML) để dự báo hư hỏng, mô-đun tự động tính toán LCC/CBA, và mô hình mô phỏng để đánh giá tác động của các kịch bản biến đổi khí hậu và (iii) Tầng ứng dụng: Cung cấp giao diện trực quan cho nhà quản lý, tự động cảnh báo sớm, đề xuất phương án bảo trì tối ưu về chi phí và xuất báo cáo tài chính.

Để hệ thống MDSS trở thành một nền tảng quản lý tài sản số xuyên suốt vòng đời công trình, việc tích hợp các công nghệ mô hình hóa và quản lý dữ liệu công trình là yêu cầu tất yếu. Bên cạnh các nguồn dữ liệu truyền thống, công nghệ Mô hình thông tin công trình (Building Information Modeling – BIM) có vai trò then chốt trong việc lưu trữ và quản lý dữ liệu số của công trình ven biển sau khi hoàn thành. Mô hình BIM hoàn công cho phép tích hợp thông tin hình học, vật liệu, lịch sử bảo trì và chi phí vòng đời của công trình. Khi BIM được kết nối với dữ liệu thời gian thực từ cảm biến IoT, viễn thám và GIS, hệ thống MDSS có thể hình thành “bản sao số” (Digital Twin) của công trình ven biển. Digital Twin cho phép mô phỏng hành vi làm việc, mức độ suy giảm và hư hỏng của công trình dưới tác động của biến đổi khí hậu, từ đó nâng cao độ chính xác của dự báo rủi ro và đề xuất phương án bảo trì tối ưu.

MDSS thực chất là một công cụ quản trị tài chính thông minh, giúp tự động hóa phân tích phức tạp, cung cấp cơ sở khoa học để phân bổ vốn và đánh giá rủi ro kinh tế dưới tác động của biến đổi khí hậu. Tuy nhiên, hiệu quả của các quyết định bảo trì được đề xuất bởi hệ thống MDSS chỉ có thể được hiện thực hóa khi đi kèm với một cơ chế tài chính phù hợp, ổn định và có khả năng huy động nguồn lực dài hạn.

#### 4.3. Cơ chế tài chính bền vững và chỉ số đánh giá hiệu quả

Trong bối cảnh ngân sách nhà nước hạn chế và áp lực bảo trì ngày càng gia tăng do biến đổi khí hậu, việc xây dựng một cơ chế tài chính bền vững, nhiều nguồn và gắn với mức độ hưởng lợi từ công trình ven biển là điều kiện tiên quyết để triển khai hiệu quả mô hình đề xuất. Thực hiện cơ chế tài chính nhiều nguồn theo nguyên tắc đóng góp theo hưởng lợi: Thành lập Quỹ bảo trì ven biển cấp tỉnh/vùng với nguồn vốn từ: (i) Ngân sách nhà nước (cho lợi ích công cộng), (ii) Đóng góp của các tổ chức, doanh nghiệp hưởng lợi kinh tế trực tiếp (khu công nghiệp, cảng, du lịch) và (iii) Các nguồn hợp pháp khác. Cơ chế này tạo ra dòng tài chính ổn định, giảm sự phụ thuộc vào ngân sách ngắn hạn.

Trong đó, cơ chế đóng góp của các tổ chức, doanh nghiệp hưởng lợi kinh tế trực tiếp từ công trình ven biển được thực hiện theo nguyên tắc “người hưởng lợi – người chi trả”, thông qua các hình thức như: thu phí sử dụng hạ tầng (phí neo đậu, phí logistics, phí khai thác cảng, bãi du lịch); trích một tỷ lệ doanh thu từ hoạt động

sản xuất – kinh doanh gắn với công trình được bảo vệ; hoặc hợp đồng hợp tác công – tư (PPP) trong bảo trì và nâng cấp công trình. Các nguồn hợp pháp khác bao gồm viện trợ quốc tế, quỹ khí hậu, trái phiếu xanh, tín chỉ carbon và các chương trình hỗ trợ thích ứng biến đổi khí hậu.

Xây dựng và áp dụng bộ chỉ số đánh giá hiệu quả (Key Performance Indicators –KPI) đánh giá hiệu quả kinh tế: Để đo lường và giám sát hiệu quả đầu tư, cần áp dụng bộ KPI định lượng như: Tỷ lệ tiết kiệm LCC của phương án chủ động, Tỷ số B/C trung bình của các dự án, Tỷ lệ chi phí sửa chữa khẩn cấp trên tổng chi phí bảo trì (mục tiêu giảm), và Tỷ trọng nguồn thu nội sinh trong quỹ. Các KPI này phải được báo cáo minh bạch, là căn cứ để điều chỉnh chính sách và phân bổ vốn.

Để đảm bảo mô hình không chỉ dừng lại ở mức khung lý thuyết mà có thể được theo dõi, đánh giá và điều chỉnh trong thực tiễn quản lý, việc xây dựng và áp dụng một bộ chỉ số KPI là hết sức cần thiết (xem bảng 2).

Ba trụ cột trên tạo thành một vòng lặp khép kín và tự hoàn thiện: Cơ chế tài chính cung cấp vốn, hệ thống MDSS là công cụ phân tích để lập ra kế hoạch bảo trì tối ưu và hiệu quả của kế hoạch lại được phân hồi để tinh chỉnh cơ chế và hệ thống (xem hình 4). Mô hình này cung cấp một lộ trình thực tiễn để chuyển đổi sang cách tiếp cận bảo trì chủ động, dựa trên bằng chứng kinh tế vững chắc.

Các chỉ số KPI đóng vai trò công cụ đo lường, đồng thời là cầu nối phản hồi thông tin giữa các thành phần trong mô hình, góp phần hình thành một cơ chế vận hành khép kín và tự hoàn thiện (hình 4).

Mô hình tích hợp kinh tế - kỹ thuật tại hình 4 cho thấy hệ thống MDSS tương tác hai chiều với khung lập kế hoạch bảo trì. Cụ thể, MDSS sử dụng dữ liệu từ cảm biến IoT, viễn thám, GIS và mô hình BIM/Digital Twin kết hợp với thuật toán AI để dự báo xác suất hư hỏng và mức độ suy giảm công trình. Trên cơ sở đó, hệ thống tự động tính toán chi phí vòng đời (LCC) và tỷ số lợi ích – chi phí (B/C), từ đó đề xuất phương án bảo trì có tổng chi phí vòng đời thấp nhất và hiệu quả kinh tế cao nhất. Đồng thời, sau khi phương án bảo trì được thực hiện, các dữ liệu về chi phí sửa chữa thực tế và tình trạng công trình sau can thiệp được cập nhật ngược trở lại hệ thống MDSS, giúp hiệu chỉnh mô hình dự báo rủi ro và nâng cao độ chính xác trong các chu kỳ tiếp theo.

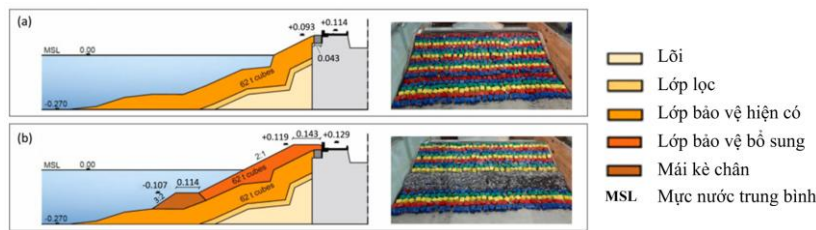
Bên cạnh đó, khung lập kế hoạch bảo trì cung cấp căn cứ kinh tế cho cơ chế tài chính trong việc phân bổ vốn, trong khi cơ chế tài chính quyết định khả năng hiện thực hóa các phương án bảo trì được đề xuất bởi MDSS.

Thông qua cấu trúc tích hợp và cơ chế phản hồi, mô hình đề xuất tạo nền tảng cho việc chuyển đổi từ bảo trì phản ứng sang bảo trì chủ động, dựa trên bằng chứng kinh tế và dữ liệu số.



**Hình 1.** Tác động của biến đổi khí hậu đến công trình ven biển.

(Nguồn: tác giả tổng hợp từ [5][6])

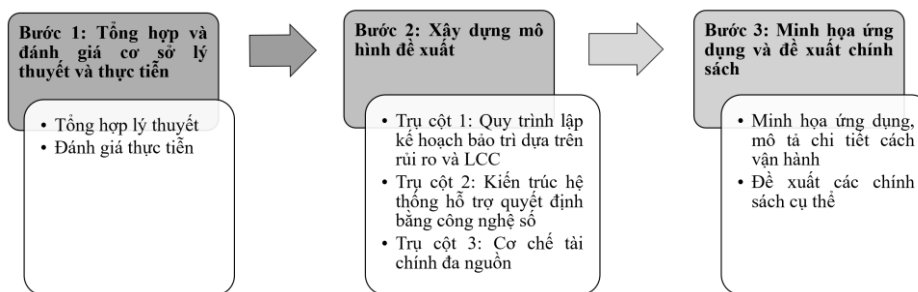


**Hình 2.** Bản phác thảo và mô hình vật lý khô của mặt cắt ngang đê chắn sóng cảng Catania: (a) cấu trúc hiện tại; (b) cấu trúc nâng cấp [8].

**Bảng 1.** Tốc độ xói lở bờ biển một số khu vực ven biển Việt Nam.

Khu vực	Đoạn / Vị trí	Tốc độ xói lở / bồi tụ (m/năm)	Đặc điểm chính
Hải Phòng	Toàn tuyến bờ biển	Trung bình 5,4 (1,2 – 9,6)	Xói lở mạnh, ảnh hưởng KT-XH
Thanh Hóa	Lạch Ghép – bờ Nam (Hải Ninh)	9,82	Bờ cát, xói lở mạnh
Quảng Trị	Cửa Tùng – bờ Bắc	1 – 2	Ổn định sau khi xây kè (2016)
Quảng Trị	Cửa Tùng – bờ Nam	Trung bình 3 – 5 (có lúc >10)	Bồi – xói mạnh, hình thành doi cát

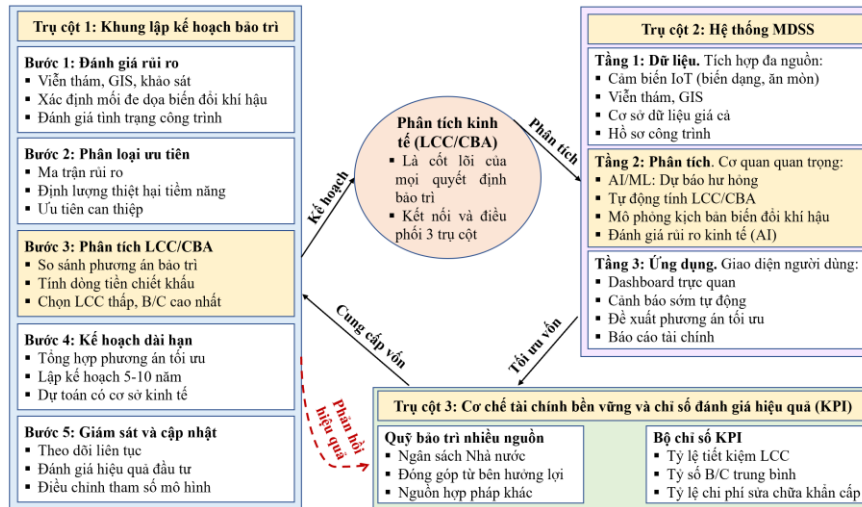
(Nguồn: tác giả tổng hợp từ [12] [13] [14])



**Hình 3.** Sơ đồ phương pháp nghiên cứu.

**Bảng 2.** Danh mục chỉ số KPI đánh giá hiệu quả mô hình bảo trì công trình ven biển.

Tên chỉ số KPI	Công thức/Phương pháp xác định	Ý nghĩa quản lý
Tỷ lệ tiết kiệm LCC	$LCC_{\text{truyền thống}} - LCC_{\text{chủ động}} / LCC_{\text{truyền thống}}$	Đánh giá hiệu quả kinh tế của bảo trì chủ động
Tỷ số B/C	Tổng lợi ích/Tổng chi phí	Lựa chọn phương án bảo trì tối ưu
Tỷ lệ chi phí sửa chữa khẩn cấp	Chi phí sửa chữa khẩn cấp/Tổng chi phí bảo trì	Phản ánh mức độ chủ động của hệ thống
Tỷ lệ công trình được giám sát số	Số công trình có IoT, BIM/Tổng số công trình	Đánh giá mức độ chuyển đổi số
Tỷ trọng nguồn thu nội sinh	Thu từ phí, doanh nghiệp/Tổng quỹ	Đánh giá tính bền vững tài chính



Hình 4. Mô hình tích hợp kinh tế - kỹ thuật nâng cao hiệu quả công tác bảo trì công trình ven biển trong bối cảnh biến đổi khí hậu.

5. Kết luận

Bài báo đã phân tích các khó khăn và thách thức về kinh tế trong công tác bảo trì công trình ven biển Việt Nam dưới áp lực ngày càng gia tăng của biến đổi khí hậu. Trên cơ sở chỉ ra những khoảng trống nghiên cứu từ góc độ kinh tế thủy lợi, nghiên cứu đề xuất một mô hình tích hợp nhằm chuyển đổi từ cách tiếp cận bảo trì phản ứng, ngắn hạn sang bảo trì chủ động và tối ưu hóa đầu tư dài hạn. Mô hình bao gồm: (i) Khung lập kế hoạch dựa trên rủi ro và phân tích chi phí vòng đời (LCC), lấy phân tích kinh tế làm trung tâm cho mọi quyết định; (ii) Hệ thống hỗ trợ ra quyết định thông minh (MDSS) như một công cụ số để tự động hóa việc thu thập dữ liệu, tính toán LCC và đề xuất phương án tối ưu; và (iii) Cơ chế tài chính bền vững nhiều nguồn cùng bộ chỉ số KPI để đảm bảo nguồn lực và đánh giá hiệu quả. Các giải pháp này cung cấp một khung khổ có tính hệ thống và khả thi, làm cơ sở khoa học để các nhà quản lý, hoạch định chính sách nâng cao hiệu quả đầu tư, tiết kiệm chi phí dài hạn và tăng cường khả năng chống chịu của hạ tầng ven biển trước biến đổi khí hậu.

Hạn chế chính của nghiên cứu là thiếu các số liệu định lượng đồng bộ (như chi phí bảo trì chi tiết, dữ liệu cảm biến, ước tính thiệt hại kinh tế-xã hội) để hiệu chuẩn và kiểm chứng mô hình trong thực tế. Do đó, các hướng nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào: (i) Xây dựng nghiên cứu điển hình định lượng để thu thập dữ liệu và cung cấp bằng chứng thuyết phục về hiệu quả kinh tế; (ii) Phát triển công cụ phần mềm đơn giản hỗ trợ tính toán LCC và phân tích rủi ro và (ii) Nghiên cứu sâu về cơ chế tài chính bền vững và mô hình PPP cho lĩnh vực này.

Tài liệu tham khảo

[1]. Báo điện tử Đảng Cộng sản Việt Nam (2023). *Tăng cường công tác ứng phó và bảo vệ vùng ven biển trước thiên tai, biến đổi khí hậu*. <https://dangcongsan.vn/>, truy cập ngày 09/08/2023.

[2]. Bùi Thị Ngọc Lan (2022). Biến đổi khí hậu và nước biển dâng đối với quản lý đô thị Việt Nam – Sự ảnh hưởng và nhiệm vụ đề ra. *Tạp chí Xây dựng*, (03/2022):115–119. ISSN 2734-9888.

[3]. Hà Minh (2024). *Xốt xa những công trình bảo vệ bờ biển*. Báo Đầu thầu điện tử. <https://baodauthau.vn/xot-xa-nhung-cong-trinh-bao-ve-bo-bien-post167885.html>, truy cập ngày 29/10/2024.

[4]. Đặng Văn Bường (2011). *Trà Vinh: Nhiều đoàn đê bị vỡ, gây ngập úng diện rộng*. Báo Nhân Dân điện tử. <https://nhandan.vn/tra-vinh-nhieu-doan-de-bi-vo-gay-ngap-ung-dien-rong-post561887.html>, truy cập ngày 01/11/2011.

[5]. Gallien, T. W. (2014). Urban coastal flood prediction: Integrating wave overtopping, flood defenses and drainage. *Coastal Engineering*, 91:18–28. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.04.007>

[6]. Sanchez-Arcilla, A. và cộng sự (2016). *Managing coastal environments under climate change: Pathways to adaptation*. Science of the Total Environment. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.124>.

[7]. Tawn, J. A. (1988). Bivariate extreme value theory: Models and estimation. *Biometrika*, 75(3):397–415. <https://doi.org/10.1093/biomet/75.3.397>

[8]. Stagnitti, M., Lara, J. L., Musumeci, R. E., Foti, E. (2023). Numerical modeling of wave overtopping of damaged and upgraded rubble-mound breakwaters. *Ocean Engineering*, 280:114798. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114798>

[9]. Nolan, S., Rossini, M., Knight, C., Nanni, A. (2021). New directions for reinforced concrete coastal structures. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*. <https://doi.org/10.1186/s43065-021-00015-4>

[10]. Grobman, Y. J., Kozlovsky, R., Levy, H. (2017). A multifunctional computational approach to waterfront design. *Architectural Science Review*. ISSN 0003-8628; 1758-9622.

[11]. Coelho, C., Narra, P., Marinho, B., Lima, M. (2020). Coastal management software to support decision-makers to mitigate coastal erosion. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1):37. <https://doi.org/10.3390/jmse8010037>

[12]. Nguyễn Thị Thu Hà, Nguyễn Đắc Vệ, Nguyễn Mai Lựu (2021). Ứng dụng hệ thống phân tích đường bờ kỹ thuật số (DSAS) và tư liệu viễn thám nghiên cứu biến động đường bờ biển khu vực cửa sông Lạch Ghép – Thanh Hóa. Trong *Tuyển tập báo cáo khoa học nghiên cứu ứng dụng, phát*

triển hạ tầng dữ liệu không gian địa lý quốc gia. NXB Tài nguyên – Môi trường và Bản đồ Việt Nam:220–227.

- [13]. Trần Anh Tú và Trần Đức Thạnh (2008). Một số kết quả nghiên cứu xói lở, bồi tụ vùng ven bờ khu vực Hải Phòng. *Kỷ yếu Hội thảo Khoa học Kỷ niệm 5 năm thành lập Khoa Kỹ thuật Biển*, tháng 12/2008.
- [14]. Trần Thanh Tùng và Trần Đăng Hùng (2023). Ứng dụng công cụ Google Earth Engine và DSAS giám sát đường bờ biển tự động, áp dụng cho Cửa Tùng, tỉnh Quảng Trị. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, (80):59–68.
- [15]. Trần Duy Hiền (2016). *Nghiên cứu xây dựng mô hình đánh giá tác động của biến đổi khí hậu đến số lĩnh vực kinh tế – xã hội cho thành phố Đà Nẵng*. Luận án tiến sĩ. Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu.
- [16]. Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu (2016). *Dự án xây dựng mô hình số độ cao chính xác cao khu vực đồng bằng và ven biển phục vụ nghiên cứu, đánh giá tác động của biến đổi khí hậu và nước biển dâng (Giai đoạn 1)*.
- [17]. Hà Đào (2019). *Biến đổi khí hậu ảnh hưởng đến các công trình xây dựng*. Báo Xây dựng. <https://baoxaydung.vn/bien-doi-khi-hau-anh-huong-den-cac-cong-trinh-xay-dung-1926868257374.htm>, truy cập ngày 01/07/2019.
- [18]. Mai Sỹ Hùng (2023). Nghiên cứu xây dựng quy trình bảo trì công trình xây dựng dân dụng ven biển có kết cấu chịu lực bằng bê tông cốt thép. *Tạp chí Xây dựng và Đô thị*, (89):64–68.
- [19]. Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng (2018). *Nghiên cứu tổng quan và đề xuất nhiệm vụ xây dựng công trình dân dụng và hạ tầng kỹ thuật ven biển và trên đảo giai đoạn 2016–2025*. Đề tài KHCN cấp Bộ.
- [20]. Đinh Anh Tuấn và Nguyễn Mạnh Trường (2012). *Thực trạng ăn mòn và phá hủy các công trình bê tông cốt thép bảo vệ bờ biển nước ta*. Viện Bơm và Thiết bị Thủy lợi – Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam. <https://www.vienbom.org.vn/>, truy cập ngày 06/03/2012.
- [21]. Vũ Quốc Hưng (2020). Nghiên cứu nguyên nhân hư hỏng của các cấu kiện bê tông cốt thép trong công trình cảng dưới tác động của môi trường biển và các biện pháp xử lý. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (NUCE)*, 14(2V):107–121.
- [22]. Nguyễn Trọng Khuê (2019). Nghiên cứu ứng dụng các giải pháp khoa học công nghệ mới cho khảo sát, đánh giá an toàn hàng hải và bảo trì định kỳ công trình cảng biển trong điều kiện hiện tại ở Việt Nam. *Tạp chí Giao thông Vận tải*. ISSN 2615-9751.