

ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ GIÁM SÁT SỐ TRONG QUẢN LÝ AN TOÀN ĐƯỜNG HẦM: BÀI HỌC QUỐC TẾ VÀ TRIỂN VỌNG TẠI VIỆT NAM

DIGITAL TRANSFORMATION IN TUNNEL STRUCTURAL HEALTH MONITORING:
INTERNATIONAL BEST PRACTICES AND STRATEGIC ROADMAP FOR VIETNAM

Phạm Tiến Dũng - Cục đường bộ Việt Nam

Nguyễn Duyên Phong* - Trường Đại học Mở - Địa chỉ: *nguyenduyenphong@humg.edu.vn

Tóm tắt: An toàn kết cấu đường hầm chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố bất định bao gồm tải trọng động, điều kiện thủy văn thay đổi, tác động của biến đổi khí hậu và sự suy giảm tính năng vật liệu theo thời gian. Bài viết này tiến hành khảo cứu toàn diện về các giải pháp giám sát hiện đại áp dụng cho công trình ngầm, tập trung làm rõ bốn trụ cột công nghệ chính: hệ thống cảm biến phân bố trên nền sợi quang (DFOS), bản sao số (Digital Twin), nền tảng kết nối vạn vật (IoT) và các thuật toán thông minh (AI). Nghiên cứu phân tích cấu trúc vận hành của hệ thống giám sát điển hình, khảo sát các chủng loại đầu đo chuyên dụng, đồng thời đánh giá có đối chiếu các mô hình ứng dụng thực tế tại Hà Lan, Trung Quốc, Vương quốc Anh và Thụy Sĩ. Trên cơ sở đó, bài báo khảo sát bức tranh hiện trạng áp dụng công nghệ tại các công trình hầm ở Việt Nam, luận giải các thành tựu bước đầu cùng những rào cản về định chế, hạ tầng kỹ thuật và chất lượng nguồn nhân lực, đồng thời kiến nghị lộ trình phát triển với các trọng tâm: tích hợp hệ thống dự báo thông minh, xây dựng bộ tiêu chuẩn kỹ thuật thống nhất, và đào tạo nhân sự liên ngành. Bằng chứng nghiên cứu chỉ ra rằng giám sát số hóa đã tạo nên bước dịch chuyển mang tính cách mạng từ quan trắc gián đoạn sang theo dõi trực tuyến liên tục, góp phần nâng cao hiệu quả đánh giá rủi ro và cần được thúc đẩy triển khai tại Việt Nam.

Từ khóa: Giám sát số, Đường hầm, Cảm biến quang học phân bố, Bản sao số, IoT, Trí tuệ nhân tạo.

Abstract: The structural integrity and operational safety of tunnel infrastructure are increasingly threatened by complex loading conditions, hydrological fluctuations, climate change impacts, and progressive material deterioration throughout their service life. This paper presents a comprehensive review of contemporary digital monitoring technologies applied to tunnel engineering, systematically examining four foundational technological pillars: Distributed Fiber Optic Sensing (DFOS), Digital Twin modeling, Internet of Things (IoT) connectivity, and Artificial Intelligence (AI)-driven analytics. The study dissects the layered architecture of intelligent monitoring systems, surveys the spectrum of specialized sensor technologies, and critically evaluates successful implementation case studies from the Netherlands, China, the United Kingdom, and Switzerland. Building upon this international foundation, the paper investigates the current state of monitoring practices in Vietnamese tunnel infrastructure, identifying both notable initial progress and persistent barriers related to institutional frameworks, technological infrastructure, and workforce capacity. The analysis culminates in proposing a strategic development framework encompassing the integration of predictive AI models and Digital Twin platforms, the establishment of unified national technical standards, and the cultivation of interdisciplinary human capital through international cooperation. The findings demonstrate that digital monitoring has fundamentally transformed conventional periodic inspection into continuous, real-time condition assessment, substantially enhancing structural safety evaluation capabilities—a transformation that warrants accelerated adoption within Vietnam's infrastructure development agenda.

Keywords: Digital Transformation, Structural Health Monitoring, Tunnel Engineering, Distributed Fiber Optic Sensing, Digital Twin, Internet of Things, Artificial Intelligence.

1. Đặt vấn đề

Các công trình hầm thuộc nhóm cơ sở hạ tầng có tầm quan trọng đặc biệt đối với sự phát triển kinh tế-xã hội của mỗi quốc gia, nhất là ở những vùng lãnh thổ có đặc trưng địa hình hiểm trở và mật độ dân cư cao. Ở Việt Nam, hệ thống hầm giao thông đang gia tăng nhanh chóng về quy mô và số lượng,

điển hình như hầm Hải Vân, hầm Đèo Ngang, hầm Cù Mông cùng các tuyến hầm đô thị tại Thủ đô Hà Nội và Thành phố Hồ Chí Minh. Song, trong suốt vòng đời khai thác, các kết cấu này phải chịu đựng đồng thời nhiều tác nhân gây hại: Áp lực từ khối đất đá xung quanh, tải trọng phương tiện lưu thông, biến thiên nhiệt độ môi trường, cũng như các hiện

tượng cực đoan như động đất hay ngập lụt. Hậu quả từ các biến dạng vượt ngưỡng cho phép có thể gây tổn thất nghiêm trọng về tính mạng và tài sản [1].

Những phương pháp giám sát cổ điển phần lớn dựa vào các phép đo thủ công qua máy toàn đạc cùng việc ghi chép số liệu theo chu kỳ từ các thiết bị cơ khí. Cách làm này bộc lộ nhiều bất cập: khoảng cách giữa các lần đo kéo dài, sai số phụ thuộc nhiều vào kỹ năng của người thực hiện, hạn chế trong tiếp cận những khu vực nguy hiểm và không có khả năng đưa ra cảnh báo kịp thời [2]. Thực tế tại Việt Nam cho thấy, một số đường hầm đang hoạt động đã xuất hiện vết nứt, thấm nước và biến dạng song không được phát hiện sớm do hệ thống giám sát còn lạc hậu.

Thời đại số hóa và cuộc cách mạng công nghiệp 4.0 đã tạo ra những đột phá công nghệ mới cho lĩnh vực giám sát an toàn hầm thông qua hệ thống đầu đo thông minh, liên kết không dây và năng lực xử lý dữ liệu lớn [3]. Cụ thể, các giải pháp như cảm biến sợi quang phân bố cho phép thu nhận biến dạng liên tục suốt chiều dài hầm với độ phân giải cao, mô phỏng song sinh tạo ra bản thể số của công trình phục vụ dự báo ứng xử, IoT đóng vai trò cầu nối giữa các thiết bị đo đạc và trung tâm xử lý, trong khi AI khai thác các bộ dữ liệu khổng lồ để nhận dạng bất thường và đưa ra cảnh báo [4].

Mục tiêu của nghiên cứu này là tổng hợp các kinh nghiệm thực tiễn từ cộng đồng quốc tế trong việc ứng dụng giám sát số vào đường hầm, phân tích thực trạng áp dụng các giải pháp tương tự ở Việt Nam, và từ đó đề xuất những định hướng chiến lược phù hợp với bối cảnh địa phương.

2. Cơ sở lý thuyết và công nghệ nền tảng

2.1. Bản chất và chức năng của giám sát số công trình hầm

Giám sát số đường hầm có thể hiểu là chu trình khép kín bao gồm các hoạt động cảm nhận, truyền tải, phân tích và giải đoán dữ liệu từ mạng lưới đầu đo nhằm mục đích mô tả trạng thái làm việc thực tế của kết cấu và môi trường xung quanh. Khác với cách tiếp cận truyền thống vốn dựa trên các phép đo đạc thủ công rời rạc, mô hình số hóa sử dụng các đầu đo hoạt động liên tục, kết nối thông tin qua các giao thức mạng và tích hợp các mô hình phân tích tiên tiến [2].

Theo quan điểm cơ học công trình, các thông số chuyển vị và biến dạng của hầm phản ánh sự dịch chuyển vị trí của các điểm trên kết cấu trong trường thời gian, thể hiện qua nhiều hình thức như dịch chuyển ngang, dịch chuyển đứng, góc xoay hay biến dạng co cụm ở các vùng nối tiếp. Đây là nhóm chỉ tiêu then chốt biểu lộ đáp ứng của công trình

đối với các tổ hợp tải trọng bao gồm áp lực đất đá, biến thiên nhiệt độ, lún nền và các kích động động học [1]. Các số liệu thu thập được sẽ cung cấp cơ sở định lượng cho việc nhận diện các dấu hiệu bất thường từ giai đoạn đầu, nhờ đó có thể tiến hành các biện pháp can thiệp trước khi sự cố xảy ra.

Nhờ có hệ thống giám sát vận hành liên tục, các kỹ sư cùng nhà quản lý có thể đánh giá được mức tin cậy của công trình, nhận biết các xu thế biến dạng có khả năng nguy hiểm, từ đó đưa ra các phương án vận hành và bảo trì thích đáng. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu cùng quá trình đô thị hóa đang diễn ra mạnh mẽ, tầm quan trọng của giám sát chuyển vị thường trực càng được khẳng định [5].

2.2. Mô hình kiến trúc tổng quát của hệ thống giám sát số

Một hệ thống giám sát thông minh đường hầm được tổ chức theo nguyên lý phân lớp ba tầng kinh điển [2, 3].

2.2.1. Tầng nhận thức (Perception Layer)

Đây là nơi tập trung các thiết bị đo đạc trực tiếp lên bề mặt kết cấu hầm, đảm nhiệm vai trò thu thập dữ liệu sơ cấp. Các loại đầu đo tiêu biểu được sử dụng:

(a) Máy đo độ nghiêng: Dụng cụ này ghi nhận sự thay đổi góc nghiêng của bộ phận kết cấu, từ đó xác định thành phần dịch chuyển ngang. Các dòng máy đo thế hệ mới có khả năng ghi nhận tự động và truyền dữ liệu theo phương thức không dây. Tại Hà Lan, loại thiết bị này được ứng dụng để kiểm soát góc xoay của các phân đoạn hầm dạng chìm [2].

(b) Cảm biến quang học phân bố (DFOS): Nhờ công nghệ này, có thể đo đạc biến dạng trên toàn bộ chiều dài sợi cáp quang được gắn dọc theo kết cấu, mang lại dữ liệu biến dạng phân bố liên tục [3]. Hoạt động dựa trên hiệu ứng tán xạ Brillouin và Rayleigh, cảm biến DFOS có thể ghi nhận đồng thời biến dạng và nhiệt độ. Đặc điểm này giúp nó đặc biệt thích hợp cho giám sát các mối nối và phát hiện vết nứt [1].

(c) Trạm định vị GNSS: Hệ thống các trạm đặt tại vị trí cố định trên hầm cho phép đo chuyển vị tuyệt đối ba chiều với độ chính xác cấp milimet. Các nghiên cứu gần đây đang phát triển phiên bản GNSS giá rẻ nhằm phổ cập ứng dụng trong công trình ngầm [2].

(d) Máy toàn đạc robot (Robotic Total Station): Thiết bị trắc địa được lập trình để tự động ngắm các điểm mốc phản xạ lắp trên kết cấu, từ đó thu thập số liệu chuyển vị với sai số nhỏ và tần suất cao.

(e) Đầu đo chuyển vị cục bộ: Nhóm cảm biến như LVDT, FBG hay dây rung được dùng để đo dịch chuyển tương đối giữa các điểm neo, nhất là ở vị trí các mối nối hoặc khe nứt [6].

(f) Đầu đo môi trường: Để bổ sung thông tin

phục vụ đánh giá tổng hợp, các cảm biến nhiệt độ, ẩm độ, áp lực nước lỗ rỗng và gia tốc (MEMS, IMU) được bố trí thêm [2].

2.2.2. Tầng truyền dẫn (Network Layer)

Dữ liệu từ các đầu đo được thu thập nhờ thiết bị ghi nhận (datalogger) và chuyển đến trung tâm xử lý thông qua các giao thức khác nhau. Một số công nghệ truyền thông phổ biến bao gồm:

- LoRaWAN: Giải pháp tiết kiệm năng lượng cho truyền tải tầm xa, thích ứng với khu vực địa hình đồi núi hoặc nhiều chướng ngại vật [7].

- NB-IoT: Dùng băng tần hẹp, khai thác hạ tầng viễn thông sẵn có, thích hợp với dữ liệu dung lượng nhỏ.

- Truyền thông lai ghép: Một số dự án kết hợp sử dụng cáp quang và sóng vô tuyến nhằm tăng cường độ tin cậy.

2.2.3. Tầng ứng dụng (Application Layer)

Sau giai đoạn thu thập, dữ liệu được đưa lên hệ thống tính toán đám mây và xử lý phục vụ các mục đích [3]:

- Xây dựng kho dữ liệu tập trung
- Phân tích phát hiện bất thường sử dụng AI [8]
- Trực quan hóa kết quả dưới dạng bảng, đồ thị, mô hình 3D

2.3. Phân tích so sánh giữa phương pháp đo truyền thống và hiện đại

Bảng 1 tổng hợp các tiêu chí đánh giá giữa hai phương pháp giám sát [2, 3, 7].

Bảng 1. So sánh giám sát truyền thống và giám sát thông minh

Tiêu chí	Đo truyền thống	Giám sát thông minh
Tần suất thu thập	Theo chu kỳ tháng/năm	Liên tục theo phút/giờ
Cách thức vận hành	Đo đạc thủ công, ghi sổ	Tự động, lưu trữ đám mây
Độ chính xác	Phụ thuộc kỹ năng, $\pm 5-10$ mm	Ổn định, $\pm 0,1-2$ mm
Thời gian xử lý	Nhiều ngày/tuần	Vài giây
Cảnh báo	Sau phân tích	Thời gian thực
Nhân công vận hành	Chi phí cao	Chi phí thấp
Mức độ an toàn khi đo	Nguy cơ cao tại vùng nguy hiểm	Rủi ro được giảm thiểu
Khả năng mở rộng	Hạn chế	Dễ dàng
Vùng phủ sóng	Điểm rời rạc	Liên tục dọc tuyến

2.4. Vai trò của Digital Twin và AI trong hệ thống giám sát

Công nghệ mô phỏng bản sao số (Digital Twin) kết hợp với học máy (Machine Learning) được xem là bước phát triển đột phá nhất hiện nay [3, 8]. Theo các nghiên cứu của Zhang cùng cộng sự [3], nền

tảng giám sát tích hợp Digital Twin bao hàm bốn khối chức năng: khối cảm biến thu thập dữ liệu, khối truyền thông IoT, khối xử lý bằng trí tuệ nhân tạo, và khối mô phỏng song sinh. Phương pháp tiếp cận này hướng đến xây dựng một hệ thống cảm nhận thông tin tổng thể, có khả năng nắm bắt toàn diện trạng thái đường hầm. Trên nền tảng Digital Twin, bản thể số của công trình được thiết lập, giải quyết các bài toán về phối hợp khối lượng dữ liệu địa hình lớn và hiển thị không gian [5].

Sự tích hợp nói trên cho phép mô phỏng trực quan, nhanh chóng tình trạng làm việc của hầm, cung cấp cho nhà quản lý công cụ hỗ trợ ra quyết định nhằm nâng cao hiệu quả giám sát và vận hành công trình ngầm.

3. Kinh nghiệm thực tiễn từ các quốc gia tiên tiến

3.1. Dự án Heinenoordtunnel, Hà Lan

Đường hầm Heinenoordtunnel tại Hà Lan được coi là một trong các dự án tiên phong trong việc áp dụng công nghệ giám sát số vào công trình hầm. Công trình này được khánh thành từ năm 1969 và đã vận hành trên 50 năm, vì vậy cần triển khai các giải pháp quan trắc hiện đại để phục vụ công tác duy tu, bảo dưỡng [1].

Bối cảnh: Các vấn đề về an toàn kết cấu của đường hầm Heinenoordtunnel trở nên rõ rệt sau hơn nửa thế kỷ hoạt động. Hiện tượng thấm qua khe nối đã được phát hiện, đặt ra nghi vấn về khả năng các khe nối bị mở rộng quá mức gây suy giảm khả năng chống thấm. Thêm vào đó, tình trạng lún lệch giữa các phân đoạn có thể dẫn đến biến dạng cắt tập trung và tiềm ẩn rủi ro nứt. Do đó, việc theo dõi độ mở khe nối và chênh lún có ý nghĩa sống còn [1]. Broere [2] cũng nhấn mạnh rằng các hầm chìm ở Hà Lan đang đến giai đoạn cần đại tu và việc thiếu số liệu giám sát đã gây trở ngại cho quá trình đánh giá.

Giải pháp: Hệ cảm biến quang học phân bố (DFOS) được nghiên cứu thiết kế và lắp đặt nhằm kiểm soát biến dạng tại toàn bộ vị trí khe nối. Sợi quang D-2 mm có vỏ bọc polyurethane được cố định vào ba điểm neo P1, P2, P3 tạo thành khối đầu đo, bao gồm hai chiều dài đo (gauge length) GL1 và GL2 [1]. Trong đó GL1 đo theo phương ngang để xác định độ mở khe nối (Δy), còn GL2 nghiêng một góc để kết hợp tính toán chênh lún (Δz).

Các công thức hình học mô tả mối quan hệ giữa biến dạng cáp quang và chuyển vị khe nối [1]:

- Với FL1 (sợi quang nằm ngang):

$$\epsilon_1 = (\Delta f_1) / C\epsilon$$

$$l_1 = L_1(1 + \epsilon_1)$$

$$\Delta y = l_1 - L_1$$

- Với FL2 (sợi quang nghiêng):

$$\begin{aligned}\varepsilon_2 &= (\Delta f_2) / C\varepsilon \\ l_2 &= L_2 (1 + \varepsilon_2) \\ \Delta z &= \sqrt{(l_2^2 - l_1^2)} - L_3\end{aligned}$$

Trong đó: $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ là biến dạng của các sợi quang; $\Delta f_1, \Delta f_2$ là độ dịch tần Brillouin; $C\varepsilon$ là hằng số cảm biến; L_1, L_2 là chiều dài đo ban đầu; Δy là độ mở mỗi nối theo phương ngang; Δz là độ lún không đều; L_3 là chiều cao ban đầu giữa các điểm cố định.

Kết quả: Hệ thống đã đạt được những kết quả ấn tượng [1, 5]:

- Phát hiện chuyển vị mỗi nối với độ chính xác dưới milimet (0.1 mm)
- Tần suất đo cao (dưới 1 giờ, thậm chí 5 phút)
- Ghi nhận chu kỳ biến dạng hàng ngày (12.5 giờ) phù hợp với chu kỳ thủy triều
- Ghi nhận biến dạng theo mùa (mùa đông mỗi nối mở rộng, mùa hè mỗi nối thu hẹp)
- Hệ số tương quan Pearson giữa độ mở mỗi nối và nhiệt độ đạt -0.94, thể hiện mối tương quan nghịch rất chặt chẽ
- Giảm thiểu rủi ro vận hành tại các khu vực khó tiếp cận

Dự án Heinenoordtunnel đã chứng minh tính khả thi và hiệu quả của công nghệ DFOS trong giám sát biến dạng đường hầm chìm lâu đời, đồng thời khẳng định sự cần thiết của giám sát tần suất cao để phát hiện các tác động thủy triều và biến đổi theo mùa [2].

3.2. Nghiên cứu tại Luân Đôn, Vương quốc Anh

Nghiên cứu do Gue và các cộng sự [9] thực hiện tại đường hầm gang đúc ở Luân Đôn là một trong các công trình đầu tiên ứng dụng DFOS cho mục đích này.

Bối cảnh: Các đoạn hầm hiện hữu đúc bằng gang cần được quan trắc khi quá trình xây dựng tuyến hầm mới phía dưới diễn ra trong khoảng cách gần [9]. Các mối nối giữa các vòng và giữa các đốt có độ cứng chịu uốn thấp hơn so với thân đốt, do đó dễ bị biến dạng khi xuất hiện mô men uốn.

Giải pháp: Sợi quang D-0,9 mm được bố trí liên tục theo chu vi trên mặt trong hầm để đo biến dạng phân bố, và điểm cố định (point-fixing) để hoạt động như extensometer đo chuyển vị khe nối [9]. Phương pháp "hook và pulley" với các móc gắn vào lỗ khoan trên mặt trong hầm được sử dụng. Bộ phân tích BOTDR có độ phân giải 1 m và sai số biến dạng 30 $\mu\epsilon$ dùng để ghi nhận dữ liệu.

Kết quả: Giá trị biến dạng lớn nhất lên đến 0,067% (nén) và 0,055% (kéo) đã được phát hiện [9]. Nghiên cứu khẳng định DFOS có khả năng phân loại được các dạng biến dạng khác nhau của tiết diện hầm, bao gồm hiệu ứng oval hóa và biến dạng uốn dọc.

3.3. Công trình tại Trung Quốc

Các nhà nghiên cứu Trung Quốc đã sử dụng công nghệ DFOS để theo dõi một hầm TBM dạng cong trong lúc thi công hố đào bên cạnh [10].

Bối cảnh: Hầm TBM nằm tại khu đô thị đông dân của Trung Quốc được giám sát để đảm bảo an toàn trong quá trình thi công hố móng lân cận [10].

Giải pháp: Sợi quang D-2 mm được định vị tại các móc rời rạc ở mặt trong hầm thông qua kẹp bằng thép không gỉ. Sợi được căng sơ bộ 0,5% và đóng vai trò extensometer tại các vị trí thành bên [10]. Bộ phân tích BOFDA với độ phân giải 0,2 m và sai số 2 $\mu\epsilon$ được sử dụng.

Kết quả: Số liệu theo dõi trong thời gian dài cho thấy độ tin cậy và chính xác trong việc xác định biến dạng của hầm cong [10]. Hệ thống DFOS đã tỏ ra bền vững trong điều kiện phức tạp.

3.4. Học máy trong ước lượng thông số vận hành TBM

Glab và cộng sự [8] đã đề xuất sử dụng các mô hình học máy để dự báo mô-men xoắn chính của TBM trong thi công hầm.

Bối cảnh: Dự báo mô-men xoắn có vai trò then chốt để kiểm soát quá trình đào và đảm bảo an toàn thi công. Các mô hình cơ học truyền thống gặp khó khăn do tính chất phi tuyến của tương tác đất-máy [8].

Giải pháp: Nghiên cứu ứng dụng thuật toán Random Forest và Gradient Boosting xây dựng mô hình dự báo mô-men dựa trên số liệu vận hành thực tế.

Kết quả: Mô hình học máy cho phép dự đoán với độ chính xác cao, góp phần tối ưu vận hành và giảm rủi ro [8].

3.5. Ứng dụng tại CERN, Thụy Sĩ

Một nghiên cứu quan trọng của Di Murro và các cộng sự [11] đã áp dụng DFOS để theo dõi biến dạng dài hạn của hầm bê tông trong môi trường bức xạ cao tại CERN.

Bối cảnh: Các hầm của CERN làm việc trong vùng phóng xạ mạnh, nơi các thiết bị điện tử thường bị ảnh hưởng [11].

Giải pháp: Hệ DFOS cùng sợi quang được bố trí dọc theo hầm để ghi nhận biến dạng dài hạn. Bộ phân tích BOFDA được dùng để lấy số liệu biến dạng và nhiệt độ [11].

Kết quả: Nghiên cứu khẳng định DFOS có khả năng kháng bức xạ và nhiễu điện từ, thích ứng với môi trường khắc nghiệt. Hệ thống đã hoạt động bền bỉ và cung cấp số liệu có giá trị đánh giá an toàn.

3.6. Các bài học tổng hợp

Dưới đây là các kinh nghiệm rút ra từ phân tích các dự án quốc tế:

- Công nghệ DFOS được ưu tiên hàng đầu: Khả năng ghi nhận biến dạng suốt chiều dài đã chứng tỏ

ưu thế vượt trội [2, 3].

- Cần tần suất đo cao: Nhờ tần suất dưới 1 giờ, mới có thể phát hiện các chu kỳ ngắn hạn (triều, nhiệt độ) [1, 2, 5].

+ Kết nối API với hệ thống doanh nghiệp: Điều này giúp tích hợp thông tin giám sát vào nền tảng quản lý hiện hữu [2].

+ Kết hợp đa loại đầu đo: Sử dụng song song DFOS, tiltmeter, GNSS, v.v. để bao phủ toàn diện [3].

+ Đảm bảo độ tin cậy và dự phòng: Thiết kế dư thừa để tránh gián đoạn vận hành.

+ Khai thác AI và học máy: Phục vụ phân tích dữ liệu khối lượng lớn và dự báo [8].

Bảng 2. Tổng hợp các dự án tiêu biểu trên thế giới

Quốc gia	Công nghệ nổi bật	Thành tựu	Điểm rút kinh nghiệm
Hà Lan	DFOS + BOFDA	Độ chính xác 0,1 mm, đo mỗi 5 phút	Tần suất cao để phát hiện ảnh hưởng môi trường
Anh	DFOS + BOTDR	Phát hiện biến dạng 0,067%	Dạng cố định điểm phù hợp hẻm đang khai thác
Trung Quốc	DFOS + BOFDA + kẹp thép	Độ chính xác dưới mm, ổn định lâu dài	Phụ kiện chuyên dụng tăng độ tin cậy
Hà Lan	Random Forest, Gradient Boosting	Dự báo mô-men TBM chính xác	Mô hình AI giúp tối ưu hóa vận hành
Thụy Sĩ	DFOS + BOFDA	Vận hành trong môi trường bức xạ	DFOS chịu được bức xạ và nhiễu

4. Thực trạng tại Việt Nam

4.1. Đánh giá tổng quan về hệ thống giám sát

Hiện tại Việt Nam đang khai thác một số hầm giao thông quan trọng như hầm Hải Vân, Đèo Ngang, Cù Mông, cùng các hầm đô thị ở các thành phố lớn và hầm trong các công trình thủy lợi, thủy điện.

Khảo sát thực tế cho thấy mức độ số hóa trong giám sát và quản lý chưa cao, nhất là đối với hạng mục công trình quy mô trung bình và nhỏ. Các nhiệm vụ đo đạc định kỳ chủ yếu được thực hiện theo yêu cầu quy phạm song chưa đáp ứng được đầy đủ các tiêu chí kỹ thuật [12]:

- Phần lớn hầm giao thông sử dụng máy toàn đạc thủ công với tần suất 6 tháng đến 1 năm

- Chưa tồn tại các hệ thống giám sát biến dạng liên tục, tự động

- Số liệu đo đạc phân tán, chưa được chuẩn hóa số hóa và lưu trữ tập trung

- Vắng bóng các tiêu chuẩn kỹ thuật thống nhất cho giám sát số

- Chất lượng nhân lực còn nhiều hạn chế trong vận hành công nghệ mới

Bảng 3. So sánh trình độ công nghệ giám sát tại Việt Nam

Tiêu chí	Hầm giao thông	Hầm thủy điện/thủy lợi
Công nghệ đo	Toàn đạc thủ công	Cảm biến cơ học định kỳ
Chu kỳ đo	6-12 tháng	1-3 tháng
Sai số	$\pm 5-10$ mm	$\pm 3-5$ mm
Mức tự động hóa	Thấp	Trung bình
Xử lý số	Hạn chế	Bước đầu
Cảnh báo sớm	Không có	Hạn chế

4.2. Những thí điểm công nghệ tiêu biểu

4.2.1. Dự án giám sát hầm giao thông bằng IoT

Một số nghiên cứu tại Trường Đại học Giao thông Vận tải [7] đã thử nghiệm ứng dụng IoT giám sát đường hầm thông qua kiến trúc hybrid kết hợp điện toán biên và đám mây. Hệ thống dùng các đầu đo nút và nhiệt độ với giao thức LoRa/MQTT, kết hợp bộ lọc Kalman-Wavelet trên thiết bị ESP32. Kết quả thử nghiệm đã khẳng định khả năng triển khai hệ thống chi phí thấp, tin cậy trong điều kiện mạng và điện không ổn định [7].

4.2.2. Hệ thống quản lý hồ chứa và hầm thủy điện

Trong lĩnh vực thủy điện, nền tảng HNT (WeatherPlus kết hợp Kyushu Electric, Nhật Bản) đã tích hợp AI và dữ liệu lớn nhằm quản lý hồ chứa và hầm thủy điện [12]. Hệ thống thu thập dữ liệu mưa, dòng chảy, mực nước để tạo ra dự báo thời gian thực. Đã triển khai tại hơn 50 nhà máy thủy điện trên toàn quốc. Điển hình như nhà máy Bản Vẽ đã vận hành an toàn trong trận lũ tần suất 1/5000 năm nhờ các khuyến nghị kịp thời từ hệ thống [12].

4.2.3. Khoảng cách so với trình độ khu vực và thế giới

Mặc dù có những bước đầu đáng ghi nhận, sự cách biệt về năng lực công nghệ giữa Việt Nam và các nước phát triển vẫn còn tương đối lớn [7, 12].

Bảng 4. Phân tích khoảng cách về công nghệ

Lĩnh vực	Mức tiên tiến quốc tế	Thực tế tại Việt Nam	Mục tiêu thu hẹp
Đo chuyển vị	DFOS, GNSS, tiltmeter, IMU [1-3]	Chủ yếu cơ học, DFOS bước đầu [7]	Xây dựng hệ thống DFOS chuyên dụng
Mạng truyền thông	LoRaWAN, NB-IoT, cáp quang [2]	3G/4G, radio; LoRa thử nghiệm [7]	Mở rộng vùng phủ sóng
Xử lý số liệu	Đám mây, AI, học máy, Digital Twin [3, 8]	Đám mây bước đầu, AI dự báo dòng chảy [12]	Tích hợp mô hình song sinh, AI
Tích hợp tổng thể	API, nền tảng đồng bộ [2]	DSS thí điểm, dữ liệu phân tán [12]	Chuẩn hóa và xây dựng kho dữ liệu quốc gia
Mức độ phủ sóng	Hàng trăm điểm, toàn tuyến [1]	Một số điểm thí điểm [7]	Nhân rộng ra các hầm trọng yếu

Hành lang pháp lý	Tiêu chuẩn quốc gia [2]	Thiếu tiêu chuẩn [12]	Xây dựng khung pháp lý
-------------------	-------------------------	-----------------------	------------------------

5. Những rào cản và giải pháp chiến lược

5.1. Rào cản chính

5.1.1. Hạ tầng và công nghệ

Hạ tầng viễn thông: Nhiều đường hầm nằm tại các vùng sâu, xa, khó tiếp cận Internet. Bản thân không gian ngầm cũng gây suy hao tín hiệu không dây [2].

Chi phí: Đầu tư cho các loại cảm biến chuyên dụng (DFOS, tiltmeter, GNSS) và hạ tầng đám mây khá tốn kém.

Tích hợp: Các hệ thống hiện tại chưa được kết nối với kho dữ liệu quốc gia [12].

5.1.2. Thể chế và quy phạm

Thiếu tiêu chuẩn: Chưa có tiêu chuẩn quốc gia thống nhất về định dạng dữ liệu, giao thức mạng cho giám sát số [12].

Phối hợp liên vùng: Thiếu cơ chế phối hợp giữa các địa phương trong vận hành hầm.

5.1.3. Nguồn nhân lực

Kỹ năng số: Cán bộ kỹ thuật còn hạn chế về IoT, dữ liệu lớn và AI trong quan trắc [12].

An ninh mạng: Hệ thống kết nối mạng tiềm ẩn nguy cơ bị tấn công.

5.2. Lộ trình chiến lược

5.2.1. Hoàn thiện khung pháp lý và tiêu chuẩn

- Xây dựng tiêu chuẩn kỹ thuật quốc gia về giám sát thông minh hầm, tham khảo kinh nghiệm quốc tế [2, 10, 11]

- Xây dựng lộ trình chuyển đổi số cho ngành quản lý hầm

- Thiết lập cơ chế hợp tác giữa các bên liên quan [12]

5.2.2. Đầu tư công nghệ và hạ tầng

- Phát triển các đầu đo chuyên dụng như DFOS [3], tiltmeter tự động, GNSS [2], FBG [10]

- Phủ sóng mạng LoRaWAN, NB-IoT; kết hợp cáp quang [2]

- Xây dựng nền tảng dữ liệu quốc gia về an toàn hầm với API mở [1]

- Triển khai mô hình Digital Twin cho các hầm trọng yếu [3]

- Ứng dụng AI và học máy trong dự báo biến dạng [8]

5.2.3. Phát triển nhân lực và hợp tác quốc tế

- Xây dựng chương trình đào tạo liên ngành giữa địa kỹ thuật và công nghệ số [12]

- Đẩy mạnh hợp tác với các tổ chức quốc tế và tiếp nhận chuyển giao công nghệ [1, 5, 9, 10, 11]

- Thực hiện các dự án thí điểm tại các hầm trọng điểm (Hải Vân, Đèo Ngang) làm cơ sở nhân rộng

Bảng 5. Đề xuất các nhiệm vụ cụ thể

Nhiệm vụ	Cơ quan chủ trì	Đối tác hỗ trợ	Thời hạn
Xây dựng tiêu chuẩn quốc gia	Bộ Xây dựng, Bộ GTVT	Viện, trường đại học	2025-2026
Thí điểm DFOS tại Hải Vân	VEC	HUMG, ĐH Bách khoa HN	2025-2027
Đào tạo nhân lực	Bộ GD&ĐT	HUMG, TU Delft	2025-2030
Xây dựng kho dữ liệu quốc gia	Bộ Xây dựng, Cục Đường bộ	Công ty công nghệ	2026-2028
Chuyển giao công nghệ	Bộ KH&CN	Các tổ chức quốc tế	2025-2030

6. Kết luận và kiến nghị

(1) Giám sát số đã được áp dụng thành công ở nhiều quốc gia, vượt trội so với đo đạc truyền thống về cả tần suất, sai số lẫn khả năng cảnh báo sớm. Những bài học từ Hà Lan, Trung Quốc, Vương quốc Anh và Thụy Sĩ cho thấy vai trò then chốt của các giải pháp DFOS, Digital Twin, IoT và AI trong vấn đề này.

(2) DFOS tỏ ra hiệu quả đặc biệt trong việc theo dõi biến dạng tập trung tại các mối nối với sai số dưới mm [1, 5]. Trong khi đó, Digital Twin và AI giúp nâng cao khả năng dự báo cũng như hỗ trợ ra quyết định [3, 8].

(3) Ở Việt Nam, các bước khởi đầu đã đạt được một số kết quả tích cực như thí điểm IoT [7] và hệ thống quản lý thủy điện [12]. Tuy nhiên, thách thức về hạ tầng, thể chế, tiêu chuẩn và nhân lực vẫn còn rất lớn.

(4) Chiến lược phát triển cần tập trung vào ba trụ cột: (i) Hoàn thiện thể chế và tiêu chuẩn kỹ thuật; (ii) Xây dựng hạ tầng công nghệ và tích hợp hệ thống; (iii) Đào tạo nhân sự và hợp tác quốc tế. Đẩy mạnh triển khai hệ thống giám sát số là hướng đi đúng đắn nhằm bảo vệ công trình hạ tầng, đảm bảo phát triển bền vững và thích ứng với biến đổi khí hậu. □

Tài liệu tham khảo

- [1] X. Zhang và W. Broere, 2023. Design of a distributed optical fiber sensor system for measuring immersed tunnel joint deformations. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 131, p. 104770.
- [2] W. Broere, 2024. Smart monitoring of tunnels. In *Proceedings of the International Conference on Tunnelling and Underground Space Technology*, Taylor & Francis, pp. 1-31.
- [3] X. Zhang, H. Zhu, X. Jiang và W. Broere, 2024. Distributed fiber optic sensors for tunnel monitoring: A state-of-the-art review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 16, no. 9, pp. 3841-3863.

- [4] H.H. Zhu, D.Y. Wang, B. Shi, X. Wang và G.Q. Wei, 2022. Performance monitoring of a curved shield tunnel during adjacent excavations using a fiber optic nervous sensing system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 124, p. 104483.
- [5] X. Zhang và W. Broere, 2023. Monitoring of Tidal Variation and Temperature Change-Induced Movements of an Immersed Tunnel Using Distributed Optical Fiber Sensors (DOFSs)," *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 2023, p. 2419495.
- [6] X. Zhang và W. Broere, 2022. Sensing Fiber Selection for Point Displacement Measuring with Distributed Optic Fiber Sensor. *Measurement*, vol. 197, p. 111275.
- [7] Đại học Giao thông Vận tải, 2026. Trustworthy Cyber-Physical Edge-SHM Architecture for Operational Underground Tunnel Crack Monitoring Under Resource-Constrained Conditions. *Journal of Visualized Experiments*.
- [8] K. Glab, G. Wehmeyer, M. Thewes và W. Broere, 2024. Predictive Machine Learning in Earth Pressure Balanced Tunnelling for Main Drive Torque Estimation of Tunnel Boring Machines. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 146.
- [9] C.Y. Gue, M. Wilcock, M.M. Alhaddad, M.Z.E.B. Elshafie, K. Soga và R.J. Mair, 2015. The monitoring of an existing cast iron tunnel with distributed fibre optic sensing (DFOS)," *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 5, pp. 573-586, 2015.
- [10] H.H. Zhu, D.Y. Wang, B. Shi, X. Wang và G.Q. Wei, 2022. Performance monitoring of a curved shield tunnel during adjacent excavations using a fiber optic nervous sensing system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 124, p. 104483.
- [11] V. Di Murro, L. Pelecanos, K. Soga, C. Kechavarzi, R.F. Morton và L. Scibile, 2019. Long-term deformation monitoring of CERN concrete-lined tunnels using distributed fibre-optic sensing. *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, vol. 50, no. 2, pp. 1-7.
- [12] Nguyễn Duyên Phong, Nông Thị Thanh Huyền và Uông Quang Tuyến, 2025. Ứng dụng công nghệ IoT để giám sát chuyển vị của thân đập nhà máy thủy điện: kinh nghiệm quốc tế và định hướng phát triển tại Việt Nam", *Tạp chí Người Xây dựng*, số 408, tr. 40-54.

XÁC ĐỊNH HÀNH LANG THOÁT LŨ HỢP LÝ CHO HẠ DU SÔNG EA H'LEO...

Tiếp theo trang 80

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] UNISDR. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. Geneva, United Nations Office for Disaster Risk Reduction, 2015.
- [2] P. J. Ward, B. Jongman, J. C. J. H. Aerts, P. D. Bates, W. J. W. Botzen, A. Diaz Loaiza, S. Hallegatte, J. M. Kind, J. Kwadijk, P. Scussolini, and H. C. Winsemius. A global framework for future costs and benefits of river-flood protection in urban areas. *Nature Climate Change*, vol. 7, no. 9, pp. 642-646, Sep. 2017. doi: 10.1038/nclimate3350.
- [3] FEMA. Flood Insurance Study Guidelines and Specifications for Study Contractors. Federal Emergency Management Agency, 2021.
- [4] US Army. HEC-RAS User's Manual. US Army Corps of Engineers, 2023. Accessed: Oct. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest>
- [5] F. Klijn, K. M. de Bruijn, J. Knoop, and J. Kwadijk. Assessment of the Netherlands' Flood Risk Management Policy Under Global Change. *Ambio*, vol. 41, no. 2, pp. 180-192, Mar. 2012. doi: 10.1007/s13280-011-0193-x.
- [6] M. S. Tehrany, B. Pradhan, and M. N. Jebur. Flood susceptibility analysis and its verification using a novel ensemble support vector machine and frequency ratio method. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 29, no. 4, pp. 1149-1165, May 2015. doi: 10.1007/s00477-015-1021-9.
- [7] H. D. Nguyen, D. Fox, D. K. Dang, L. T. Pham, Q. V. Viet Du, T. H. T. Nguyen, T. N. Dang, V. T. Tran, P. L. Vu, Q.-H. Nguyen, T. G. Nguyen, Q.-T. Bui, and A.-I. Petrisor. Predicting Future Urban Flood Risk Using Land Change and Hydraulic Modeling in a River Watershed in the Central Province of Vietnam. *Remote Sensing*, vol. 13, no. 2, p. 262, Jan. 2021. doi: 10.3390/rs13020262.
- [8] L. A. Tuan, C. T. Van, D. V. Binh, S. A. Kantoush, T. Sumi, L. V. Quyen, and T. T. Huong. Flood modeling in the Ba River basin using a coupled hydrodynamic model - MIKE FLOOD. *River*, vol. 3, no. 2, pp. 199-207, 2024. doi: 10.1002/rvr2.82.
- [9] Hoàng Thái Bình. Xác định hành lang thoát lũ trên sông vùng hạ du Vu Gia - Thu Bồn (thuộc thành phố Đà Nẵng) khi hệ thống công trình thủy điện ở thượng du đi vào vận hành trong bối cảnh BĐKH. Báo cáo tổng kết đề tài VAST. NĐP.12/15-16, 2017.
- [10] Trần Hữu Tuyên. Nghiên cứu đánh giá diễn biến lũ và tính toán xác định hành lang thoát lũ hạ lưu trên hệ thống các sông chính thuộc địa bàn tỉnh Thừa Thiên Huế. Thừa Thiên Huế, Báo cáo tổng kết đề tài, 2023.
- [11] T. N. D. Tran, B. Nguyen, M. Grodzka-Lukaszewska, G. Sinicyn, and V. Lakshmi. The role of reservoirs under the impacts of climate change on the Srepok River basin, Central Highlands of Vietnam. *Frontiers in Environmental Science*, vol. 11, Nov. 2023. doi: 10.3389/fenvs.2023.1304845.
- [12] S. Shrestha, Tran Viet Bach, and V. P. Pandey. Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. *Environmental Science & Policy*, vol. 61, no. C, pp. 1-13, 2016.
- [13] Nguyen Quang Binh, S. A. Kantoush, M. Saber, Doan Van Binh, Vo Ngoc Duong, and T. Sumi. Quantifying the impacts of hydraulic infrastructure on tropical streamflows. *Hydrological Processes*, vol. 37, no. 3, p. e14834, 2023. doi: 10.1002/hyp.14834.
- [14] Thủ tướng Chính phủ. Quy hoạch tỉnh Đắk Lắk thời kỳ 2021 - 2030, tầm nhìn đến năm 2050. Quyết định số 72/QĐ-TTg ngày 17/01/2023.