

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

APPLYING IOT TECHNOLOGY TO MONITOR THE DISPLACEMENT OF HYDROPOWER DAM BODIES: INTERNATIONAL EXPERIENCE AND DEVELOPMENT DIRECTIONS IN VIETNAM

➤ **TS. Nguyễn Duyên Phong** - Khoa Xây dựng, Trường Đại học Mở - Địa chất - Nhóm nghiên cứu mạnh

Xây dựng hầm và không gian ngầm (TUS) - Trường Đại học Mở - Địa chất - ĐT: 0967318556 -

Email: nguyenduyenphong@humg.edu.vn

➤ **Ths. Nông Thị Thanh Huyền** - Sở Khoa học và Công nghệ tỉnh Cao Bằng

➤ **Ths. Ông Quang Tuyến** - Khoa Cơ điện, Trường Đại học Mở - Địa chất

Tóm tắt: Giám sát chuyển vị thân đập là nhiệm vụ then chốt để đảm bảo an toàn cho công trình thủy điện trước các tác động của thủy văn, thời tiết và quá trình lão hóa vật liệu. Bài báo này trình bày một nghiên cứu tổng quan và chuyên sâu về ứng dụng công nghệ Internet vạn vật (IoT) trong giám sát chuyển vị đập thủy điện. Nội dung phân tích kiến trúc hệ thống IoT điển hình, các loại cảm biến chuyên dụng, đồng thời tập trung đánh giá kinh nghiệm triển khai thành công tại các quốc gia như Brazil, Hoa Kỳ, Trung Quốc và Colombia. Trên cơ sở đó, bài báo phân tích thực trạng ứng dụng công nghệ số trong quản lý hồ chứa tại Việt Nam, chỉ ra những thành tựu bước đầu, các thách thức hiện hữu và đề xuất định hướng phát triển trong tương lai như tích hợp trí tuệ nhân tạo (AI), mô hình số hóa song sinh (Digital Twin) và xây dựng khung tiêu chuẩn thống nhất. Các hình vẽ sơ đồ và đồ thị được bổ sung nhằm minh họa trực quan kiến trúc hệ thống, so sánh hiệu quả và xu hướng phát triển. Kết quả nghiên cứu cho thấy IoT đã và đang tạo ra bước chuyển mạnh mẽ từ quan trắc định kỳ sang giám sát liên tục, thời gian thực, nâng cao đáng kể năng lực đánh giá an toàn công trình và cần được đẩy mạnh ứng dụng tại Việt Nam.

Từ khóa: IoT, Giám sát chuyển vị, Đập thủy điện, Cảm biến không dây, Digital Twin.

1. Giới thiệu

Các nhà máy thủy điện là công trình trọng điểm quốc gia, có vai trò chiến lược trong phát triển kinh tế - xã hội. Theo thống kê, Việt Nam hiện có 7.315 đập và hồ chứa với tổng dung tích khoảng 15 tỷ m³, đảm bảo tưới tiêu cho 1,1 triệu ha và cung cấp 1,5 tỷ m³ nước cho sinh hoạt và công nghiệp [2]. Tuy nhiên, thân đập thủy điện phải đối mặt với nhiều nguy cơ tiềm ẩn như biến dạng nền, chuyển vị kết cấu do áp lực nước, biến đổi nhiệt độ và các tác động bất thường từ thiên tai như lũ lụt, động đất. Các sự cố liên quan đến chuyển vị quá mức hoặc biến dạng bất thường của thân đập có thể dẫn đến hậu quả nghiêm trọng về người và tài sản.

Abstract: Monitoring dam displacement is a crucial task in ensuring the safety of hydropower projects against the impacts of hydrology, weather, and material aging. This paper presents a comprehensive and in-depth study on the application of Internet of Things (IoT) technology in monitoring hydropower dam displacement. It analyzes typical IoT system architectures and specialized sensors, while also evaluating successful implementation experiences in countries such as Brazil, the United States, China, and Colombia. Based on this, the paper analyzes the current state of digital technology application in reservoir management in Vietnam, highlighting initial achievements, existing challenges, and proposing future development directions such as integrating artificial intelligence (AI), digital twin models, and establishing a unified standards framework. Diagrams and graphs are included to visually illustrate the system architecture, compare effectiveness, and outline development trends. Research results show that IoT has been creating a strong shift from periodic monitoring to continuous, real-time monitoring, significantly improving the capacity for assessing the safety of structures and should be promoted for application in Vietnam.

Keywords: IoT, Displacement Monitoring, Hydroelectric dam, Wireless Sensor, Digital Twin.

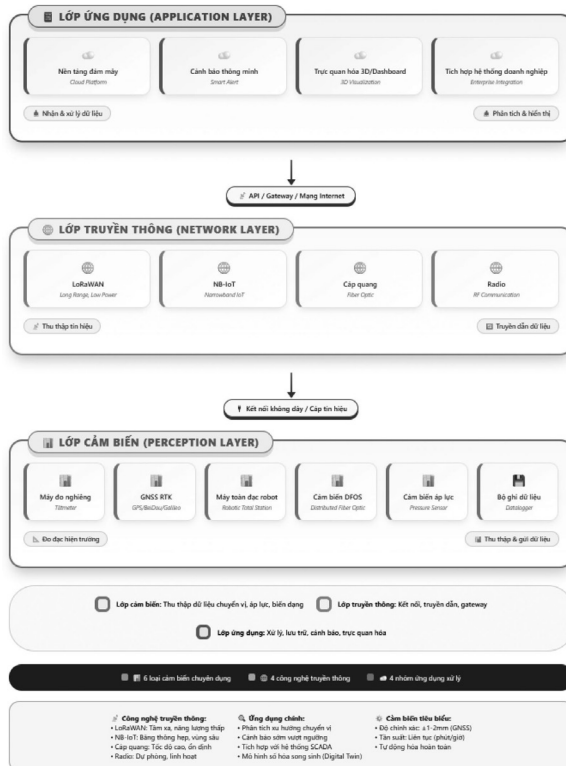
Phương pháp quan trắc truyền thống chủ yếu dựa vào đo đạc thủ công bằng máy toàn đạc và thu thập số liệu định kỳ từ các thiết bị cơ học. Cách tiếp cận này có nhiều hạn chế như tần suất đo thấp, độ chính xác phụ thuộc vào thao tác của con người, khó tiếp cận các khu vực nguy hiểm và thiếu khả năng cảnh báo sớm [3]. Trong bối cảnh cách mạng công nghiệp 4.0, công nghệ IoT với các cảm biến thông minh, kết nối không dây và khả năng xử lý dữ liệu tập trung đã mở ra hướng phát triển mới cho lĩnh vực giám sát an toàn đập trên phạm vi toàn cầu [4].

Bài báo này tổng hợp và phân tích các kinh nghiệm quốc tế trong ứng dụng IoT giám sát chuyển vị đập thủy điện, đồng thời đánh giá thực

tiền bước đầu áp dụng công nghệ này tại Việt Nam, từ đó đề xuất các định hướng phát triển phù hợp với điều kiện trong nước. Các hình vẽ sơ đồ và đồ thị được bổ sung nhằm minh họa trực quan các nội dung nghiên cứu.

2. Tổng quan về công nghệ IoT trong giám sát chuyển vị đập thủy điện

2.1. Khái niệm và vai trò của giám sát chuyển vị



Hình 1. Kiến trúc tổng thể hệ thống IoT giám sát chuyển vị đập thủy điện

Chuyển vị của thân đập là sự thay đổi vị trí tương đối hoặc tuyệt đối của các điểm trên kết cấu theo thời gian, bao gồm chuyển vị ngang, chuyển vị đứng và chuyển vị xoay. Đây là chỉ tiêu quan trọng phản ánh trạng thái làm việc của đập dưới tác động của các tải trọng khác nhau như áp lực nước, thay đổi nhiệt độ, lún nền và các tác động động đất. Dữ liệu chuyển vị cung cấp thông tin quan trọng về phản ứng của kết cấu đối với các điều kiện vận hành và môi trường, cho phép phát hiện sớm các dấu hiệu bất thường trước khi chúng phát triển thành sự cố nghiêm trọng.

Giám sát chuyển vị thường xuyên giúp các kỹ sư và nhà quản lý đánh giá mức độ an toàn của công trình, xác định các xu hướng biến dạng bất thường, và đưa ra các quyết định vận hành, sửa chữa kịp thời. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu làm gia tăng tần suất và cường độ của các hiện tượng thời tiết cực đoan như lũ lụt và hạn hán, vai trò của giám sát

chuyển vị liên tục càng trở nên quan trọng [5].

Hệ thống IoT trong giám sát chuyển vị thân đập thường bao gồm ba lớp chính, được tổ chức theo mô hình phân tầng chuẩn hóa như minh họa trong Hình 1 [1], [4], [5].

2.1.1. Lớp cảm biến (Perception Layer)

Lớp cảm biến bao gồm các thiết bị đo lường được lắp đặt trực tiếp trên thân đập để thu thập dữ liệu chuyển vị. Các loại cảm biến chính bao gồm:

- Máy đo nghiêng (Tiltmeter): Thiết bị đo sự thay đổi góc nghiêng của kết cấu, từ đó tính toán chuyển vị ngang. Các máy đo nghiêng hiện đại được tích hợp khả năng ghi nhận tự động và truyền dữ liệu không dây.

- Hệ thống định vị vệ tinh GNSS: Các trạm GNSS đặt trên thân đập đo chuyển vị tuyệt đối với độ chính xác milimet, cho phép giám sát chuyển vị 3D theo thời gian thực. Công nghệ GNSS chi phí thấp đang được phát triển để ứng dụng rộng rãi trong giám sát đập [3].

- Máy toàn đạc điện tử tự động (Robotic Total Station): Hệ thống robot kinh vĩ được lập trình tự động đo các điểm phản xạ (prism) trên thân đập, cung cấp dữ liệu chuyển vị với độ chính xác cao và tần suất lớn.

- Cảm biến quang - sợi phân tán (DFOS): Công nghệ này cho phép đo biến dạng dọc theo toàn bộ chiều dài cáp quang gắn trên thân đập, cung cấp dữ liệu biến dạng liên tục với độ phân giải không gian cao.

- Cảm biến áp lực và thấm: Các cảm biến đo áp lực nước lỗ rỗng và lưu lượng thấm, cung cấp thông tin bổ sung để đánh giá tổng thể an toàn đập.

2.1.2. Lớp truyền thông (Network Layer)

Dữ liệu từ các cảm biến được thu thập thông qua các bộ ghi dữ liệu (Datalogger) và truyền về trung tâm bằng nhiều giao thức khác nhau. Các công nghệ truyền thông phổ biến bao gồm [1]:

- LoRaWAN: Công nghệ truyền thông tầm xa, năng lượng thấp, phù hợp cho các khu vực địa hình phức tạp, nhiều vật cản. Dự án tại Brazil đã ứng dụng thành công LoRaWAN để giảm hơn 12 km cáp tín hiệu.

- NB-IoT: Công nghệ IoT băng thông hẹp, tận dụng hạ tầng mạng di động hiện có, phù hợp cho truyền dữ liệu nhỏ, tần suất thấp.

- Truyền thông kết hợp: Nhiều dự án sử dụng kết hợp cáp quang và radio để đảm bảo độ tin cậy và dự phòng. Tại Brazil, hệ thống sử dụng sáu trạm tích hợp cáp quang và radio để kết nối cuối cùng với hệ thống doanh nghiệp.

2.1.3. Lớp ứng dụng (Application Layer)

Dữ liệu sau khi thu thập được lưu trữ trên nền tảng điện toán đám mây và được xử lý, phân tích phục vụ các mục đích khác nhau:

Nền tảng quản lý dữ liệu tập trung: Tích hợp dữ liệu từ nhiều nguồn cảm biến, cho phép lưu trữ, truy xuất và quản lý dữ liệu lịch sử. Hệ thống tại Brazil được tích hợp trực tiếp với nền tảng phần mềm quản lý qua API an toàn [1].

Công cụ phân tích và cảnh báo: Sử dụng các thuật toán để phát hiện bất thường, so sánh với ngưỡng cảnh báo và tự động gửi thông báo đến cán bộ quản lý.

Giao diện trực quan hóa: Hiển thị dữ liệu dưới dạng bảng biểu, đồ thị và mô hình 3D, giúp người dùng dễ dàng theo dõi và đánh giá tình trạng công trình.

2.2. Kiến trúc hệ thống IoT trong giám sát đập

Hệ thống IoT trong giám sát chuyển vị thân đập thường bao gồm ba lớp chính, được tổ chức theo mô hình phân tầng chuẩn hóa như minh họa trong Hình 1.

2.2.1. Lớp cảm biến (Perception Layer)

Lớp cảm biến bao gồm các thiết bị đo lường được lắp đặt trực tiếp trên thân đập để thu thập dữ liệu chuyển vị. Các loại cảm biến chính bao gồm:

- Máy đo nghiêng (Tiltmeter): Thiết bị đo sự thay đổi góc nghiêng của kết cấu, từ đó tính toán chuyển vị ngang. Các máy đo nghiêng hiện đại được tích hợp khả năng ghi nhận tự động và truyền dữ liệu không dây.

- Hệ thống định vị vệ tinh GNSS: Các trạm GNSS đặt trên thân đập đo chuyển vị tuyệt đối với độ chính xác milimet, cho phép giám sát chuyển vị 3D theo thời gian thực. Công nghệ GNSS chi phí thấp đang được phát triển để ứng dụng rộng rãi trong giám sát đập [3].

- Máy toàn đạc điện tử tự động (Robotic Total Station): Hệ thống robot kinh vĩ được lập trình tự động đo các điểm phản xạ (Prism) trên thân đập, cung cấp dữ liệu chuyển vị với độ chính xác cao và tần suất lớn.

- Cảm biến quang - sợi phân tán (DFOS): Công nghệ này cho phép đo biến dạng dọc theo toàn bộ chiều dài cáp quang gắn trên thân đập, cung cấp dữ liệu biến dạng liên tục với độ phân giải không gian cao.

- Cảm biến áp lực và thấm: Các cảm biến đo áp lực nước lỗ rỗng và lưu lượng thấm, cung cấp thông tin bổ sung để đánh giá tổng thể an toàn đập.

2.2.2. Lớp truyền thông (Network Layer)

Dữ liệu từ các cảm biến được thu thập thông qua các bộ ghi dữ liệu (Datalogger) và truyền về trung tâm bằng nhiều giao thức khác nhau. Các công nghệ truyền thông phổ biến bao gồm [1]:

- LoRaWAN: Công nghệ truyền thông tầm xa, năng lượng thấp, phù hợp cho các khu vực địa hình phức tạp, nhiều vật cản. Dự án tại Brazil đã ứng

dụng thành công LoRaWAN để giảm hơn 12 km cáp tín hiệu.

- NB-IoT: Công nghệ IoT băng thông hẹp, tận dụng hạ tầng mạng di động hiện có, phù hợp cho truyền dữ liệu nhỏ, tần suất thấp.

- Truyền thông kết hợp: Nhiều dự án sử dụng kết hợp cáp quang và radio để đảm bảo độ tin cậy và dự phòng. Tại Brazil, hệ thống sử dụng sáu trạm tích hợp cáp quang và radio để kết nối cuối cùng với hệ thống doanh nghiệp.

2.2.3. Lớp ứng dụng (Application Layer)

Dữ liệu sau khi thu thập được lưu trữ trên nền tảng điện toán đám mây và được xử lý, phân tích phục vụ các mục đích khác nhau [1]:

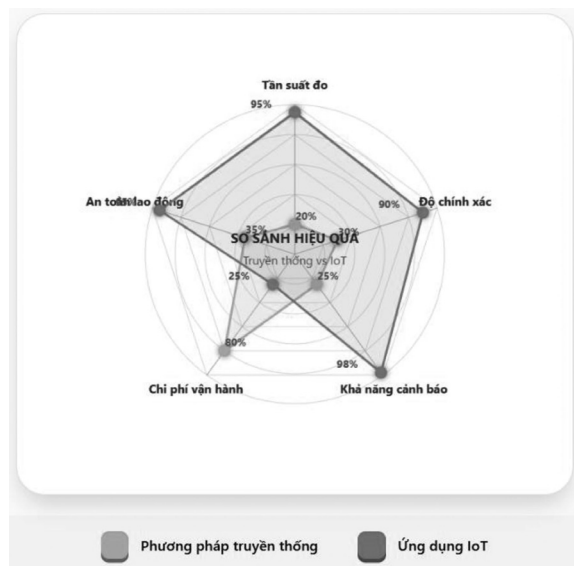
- Nền tảng quản lý dữ liệu tập trung: Tích hợp dữ liệu từ nhiều nguồn cảm biến, cho phép lưu trữ, truy xuất và quản lý dữ liệu lịch sử. Hệ thống tại Brazil được tích hợp trực tiếp với nền tảng phần mềm quản lý qua API an toàn.

- Công cụ phân tích và cảnh báo: Sử dụng các thuật toán để phát hiện bất thường, so sánh với ngưỡng cảnh báo và tự động gửi thông báo đến cán bộ quản lý.

- Giao diện trực quan hóa: Hiển thị dữ liệu dưới dạng bảng biểu, đồ thị và mô hình 3D, giúp người dùng dễ dàng theo dõi và đánh giá tình trạng công trình.

2.3. So sánh phương pháp giám sát truyền thống và ứng dụng IoT

Biểu đồ radar so sánh 5 chỉ tiêu chính giữa phương pháp truyền thống và ứng dụng IoT Hình 2 [1], [3], [7].



Hình 2. So sánh hiệu quả giữa phương pháp truyền thống và ứng dụng IoT

Bảng 1. So sánh chi tiết phương pháp giám sát truyền thống và ứng dụng IoT

Tiêu chí	Phương pháp truyền thống	Ứng dụng IoT
Tần suất đo	Định kỳ (tháng/quý)	Liên tục (theo giờ/phút)
Phương thức thu thập	Thủ công, ghi chép sổ sách	Tự động, lưu trữ đám mây
Độ chính xác	Phụ thuộc kỹ thuật viên, sai số ±5-10 mm	Ổn định, độ chính xác ±1-2 mm
Thời gian xử lý dữ liệu	Nhiều ngày đến nhiều tuần	Thời gian thực (vài giây)
Khả năng cảnh báo	Sau khi phân tích số liệu	Thời gian thực, tự động
Chi phí vận hành	Cao (nhân công, đi lại)	Thấp (tự động hóa)
An toàn lao động	Rủi ro cao khu vực khó tiếp cận	Giảm thiểu rủi ro
Khả năng mở rộng	Hạn chế, tốn kém	Dễ dàng, linh hoạt

2.4. So sánh phương pháp giám sát truyền thống và ứng dụng IoT

Theo nghiên cứu của Mao và cộng sự (2026), dự án Digital Twin cho đập thủy điện thường bao gồm năm thành phần chính: hạ tầng thông tin, nền tảng Digital Twin, hệ thống an ninh mạng, mô-đun chức năng và hệ thống hỗ trợ [5].

Phương pháp này xây dựng hệ thống cảm nhận thông tin IoT tích hợp "trên không-không gian-mặt đất thủy lợi-công trình" để thu thập dữ liệu toàn diện về đập theo thời gian thực. Dựa trên công nghệ digital twin, mô hình song sinh của đập được xây dựng, giải quyết các khó khăn kỹ thuật như điều phối địa hình khối lượng lớn, ghép nối đập - địa hình, và biểu diễn thông tin an toàn trong không gian 3D[5].

Việc tích hợp này mang lại khả năng mô phỏng nhanh chóng, hiệu quả và trực quan về tình trạng an toàn của đập, cung cấp cho người quản lý phương tiện để nhanh chóng nắm bắt tình trạng an toàn của đập, nâng cao trình độ quản lý an toàn đập và hỗ trợ cho quản lý thông minh lưu vực.

Một trong những phát triển tiên tiến nhất trong lĩnh vực giám sát đập là tích hợp dữ liệu IoT với mô hình số hóa song sinh (Digital Twin). Minh họa kiến trúc tích hợp như Hình 3 [4], [5].



Hình 3. Kiến trúc tích hợp IoT và Digital Twin trong giám sát đập

3. Kinh nghiệm quốc tế trong ứng dụng IoT giám sát chuyển vị đập

3.1. Dự án tự động hóa quan trắc đập Ilha Solteira và Jupia (Brazil)

Một trong những dự án ứng dụng IoT quy mô lớn nhất Nam Mỹ đã được triển khai tại hai nhà máy thủy điện Ilha Solteira (công suất 3.444 MW) và Jupia (1.551 MW) do CTG Brasil vận hành. Dự án tập trung tự động hóa hệ thống cảm biến địa kỹ thuật bằng công nghệ Loadsensing của Worldsensing [1].

Bối cảnh: Giám sát địa kỹ thuật các công trình đập là trụ cột quan trọng trong quản lý an toàn tại các dự án thủy điện. Tại Brazil, dữ liệu này thường vẫn được thu thập thủ công tại nhiều công trình đang hoạt động. Các công trình được giám sát bao gồm đập đất và đập bê tông, bao gồm các khu vực có hành lang kỹ thuật khó tiếp cận.



Hình 4. Sơ đồ kiến trúc hệ thống giám sát tại dự án Brazil

Giải pháp: Kiến trúc Loadsensing được triển khai bao gồm các bộ ghi dữ liệu LS-G6-VW-1M (1 kênh cho cảm biến dây rung), Gateway LS-G6 với kết nối LoRa và NB-IoT để thu thập và lưu trữ dữ liệu thực địa, tích hợp trực tiếp với nền tảng quản lý qua API an toàn với đồng bộ định kỳ. Ngoài ra, hệ thống còn sử dụng các bộ ghi dữ liệu truyền thống với bộ ghép kênh nối dây trong đập bê tông. Hệ thống cho phép đọc dữ liệu liên tục và tự động gửi lên đám mây, đồng thời tương thích với hệ thống doanh nghiệp của CTG Brasil, cho phép phân tích thời gian thực, truy xuất nguồn gốc các lần đọc và phản ứng nhanh với bất kỳ bất thường nào.

Kết quả: Dự án đã đạt được những kết quả ấn tượng:

- Giảm hơn 12km cáp tín hiệu trong các kết cấu được giám sát;
 - Giảm 30% tổng thời gian lắp đặt và vận hành thủ;
 - Giảm thiểu rủi ro vận hành trong các khu vực hạn chế và trên cao;
 - Độ tin cậy truyền thông cao hơn trong khu vực ngầm;
 - Khả năng mở rộng và cấu hình lại khoảng cách đọc từ xa;
 - Tỷ lệ đọc hiệu quả đạt trên 90% với chế độ bảo trì phòng ngừa bán niên;
- Cấu trúc truyền dẫn dữ liệu bao gồm sáu trạm

tích hợp cáp quang và radio, với kết nối cuối cùng đến switch nội bộ của CTG Brasil. Hệ thống được tích hợp vào nền tảng doanh nghiệp về an toàn đập, cho phép xác thực chéo giữa các kết quả đo tự động và hồ sơ thủ công lịch sử.

3.2. Dự án hiện đại hóa giám sát đập tại Colombia

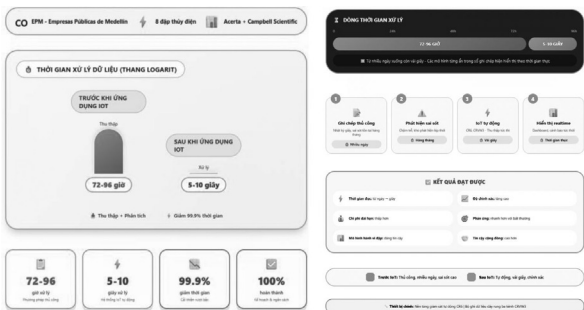
Tại vùng núi Antioquia, Colombia, tám đập quan trọng nhất của khu vực đã được chuyển đổi từ giám sát thủ công sang tự động hóa, đánh dấu một bước ngoặt trong quản lý an toàn đập tại quốc gia này[7].

Bối cảnh: Công ty Empresas Públicas de Medellín (EPM) quản lý các đập quan trọng không chỉ cho sản xuất năng lượng mà còn cho an toàn của cộng đồng lân cận. Trước đây, hầu hết thông tin được thu thập bằng tay, dẫn đến việc ra quyết định chậm hơn, khả năng xảy ra sai sót do con người và khoảng trống dữ liệu trong các thời điểm quan trọng. Trong một số trường hợp, sai sót trong nhật ký thủ công tồn tại hàng tháng trước khi được phát hiện.

Giải pháp: Từ tháng 7/2022 đến tháng 6/2024, EPM hợp tác với Acerta và Campbell Scientific để tự động hóa tám đập: Troneras, Quebradona, Porce II, Riogrande II, Playas, El Buey, Santa Rita và La Fé. Mỗi đập được trang bị thiết bị đo phù hợp và kết nối thành một mạng lưới thống nhất. Các thiết bị chính bao gồm nền tảng giám sát tự động CR6 và bộ ghi dữ liệu dây rung ba kênh CRVW3. Kết quả:

- Thời gian đọc dữ liệu giảm từ nhiều ngày xuống còn vài giây;
- Các mô hình từng ẩn trong sổ ghi chép hiện hiển thị theo thời gian thực;
- Thời gian phản ứng nhanh hơn trong các sự kiện bất thường;
- Độ chính xác tăng cao so với ghi chép thủ công;
- Chi phí giám sát dài hạn thấp hơn;
- Mô hình hành vi đập đáng tin cậy hơn;
- Mức độ tin cậy cao hơn từ cộng đồng và các bên liên quan.

Dự án đã hoàn thành 100% hoạt động theo



Hình 5. Biểu đồ so sánh thời gian xử lý dữ liệu trước và sau khi ứng dụng IoT tại Colombia

ke hoạch và giải ngân ngân sách đạt 98%, được coi là cột mốc cho chương trình an toàn đập của Colombia.

3.3. Nghiên cứu và phát triển nền tảng Digital Twin tại Trung Quốc

Nghiên cứu của Mao và cộng sự (2026) đã phát triển một nền tảng Digital Twin để quản lý, phân tích và đánh giá thông tin giám sát đập, áp dụng cho một đập vòm thực tế tại Trung Quốc [5].



Hình 6. Quy trình đánh giá an toàn đập dựa trên phân tích tương quan không gian

Thách thức: Phân tích dữ liệu giám sát thường bao gồm ba giai đoạn: kiểm tra thông tin điểm quan trắc, phân tích và cảnh báo đơn điểm, và tổng hợp đánh giá đa điểm. Thách thức chính trong giai đoạn đánh giá đa điểm là thiết lập một tiêu chuẩn khách quan và có thể tái tạo để liên kết hiệu quả thông tin đa điểm với hành vi kết cấu của đập.

Giải pháp: Nghiên cứu đề xuất một hệ thống đánh giá sử dụng ba tham số: mức cảnh báo của các điểm được cảnh báo, tương quan không gian của các điểm được cảnh báo, và tỷ lệ bất thường trên tất cả các điểm. Một sự tương ứng xác định được thiết lập giữa các tham số này và điểm số cuối cùng, loại bỏ đánh giá chủ quan. Độ tin cậy của kết quả đánh giá đã được xác minh bằng dữ liệu đo thực tế và một nghiên cứu điển hình.

Nền tảng Digital Twin được phát triển cho phép trực quan hóa cả dữ liệu giám sát và hành vi suy luận của đập. Kết quả vận hành cho thấy khả năng phân tích và trình bày tích hợp thời gian thực, tăng cường đáng kể tính trực quan của giám sát an toàn đập và hiệu quả ra quyết định.

3.4. Dự án nghiên cứu ứng dụng IoT tại Hoa Kỳ

Một dự án nghiên cứu do Bộ Giao thông Vận tải Hoa Kỳ tài trợ đang phát triển giải pháp giám sát dựa trên IoT và cảm biến IMU để theo dõi chuyển vị đa hướng cho đập và đê [3].

Mục tiêu: Nghiên cứu nhằm nâng cao quản lý tài sản địa kỹ thuật (GAM) bằng cách sử dụng cảm biến đơn vị đo lường quán tính (IMU) dựa trên IoT



Hình 7. Kiến trúc tích hợp cảm biến IMU, LiDAR và điện toán đám mây

tiên tiến lắp đặt tại hiện trường kết hợp với kỹ thuật thu thập dữ liệu điểm đám mây LiDAR định kỳ từ trên không. Cảm biến IMU dựa trên IoT sẽ theo dõi chuyển vị đa hướng, trong khi gia tốc kế và cảm biến rung động thu thập dữ liệu hiệu suất trong các điều kiện khác nhau.

Địa điểm thử nghiệm: Một đập đất và một đoạn đê tại Jackson, Mississippi, cùng một đoạn đê thuộc sở hữu của Quân đoàn Công binh Hoa Kỳ (USACE) được chọn làm địa điểm thử nghiệm. Mô hình không gian 3D kết hợp LiDAR gắn trên drone sẽ theo dõi ổn định kết cấu và tác động môi trường.

Công nghệ: Dữ liệu thu thập được truyền lên đám mây Amazon Web Services (AWS) để giám sát từ xa. Các công cụ phân tích trên nền tảng đám mây được sử dụng để phân tích dữ liệu và xác định ngưỡng dựa trên tiêu chí hiệu suất, tạo ra hệ thống phát hiện sớm sự cố trong điều kiện cực đoan.

3.5. Tổng hợp bài học kinh nghiệm từ quốc tế

Từ các dự án quốc tế tiêu biểu, có thể rút ra một số bài học quan trọng cho việc ứng dụng IoT trong giám sát chuyển vị đập thủy điện. Các bài học chung bao gồm:

- Ưu tiên giải pháp không dây: Giảm chi phí hạ tầng, tăng tính linh hoạt và khả năng mở rộng, đặc biệt tại các khu vực khó tiếp cận [1].
- Tích hợp với hệ thống doanh nghiệp: Xây dựng API và nền tảng tích hợp để kết nối dữ liệu giám sát với hệ thống quản lý hiện có, cho phép phân tích

thời gian thực và truy xuất nguồn gốc [1].

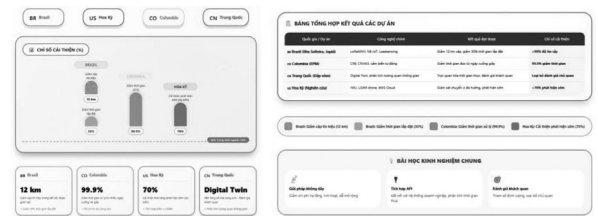
- Phát triển tiêu chuẩn đánh giá khách quan: Xây dựng các tham số định lượng và quy trình đánh giá để loại bỏ chủ quan trong đánh giá an toàn đập [5].

- Kết hợp đa công nghệ: Sử dụng kết hợp cảm biến mặt đất và dữ liệu viễn thám (drone, LiDAR) để có cái nhìn toàn diện về công trình [3].

- Đảm bảo độ tin cậy và dự phòng: Xây dựng cơ chế dự phòng (đo thủ công định kỳ) và bảo trì phòng ngừa để đảm bảo hệ thống hoạt động liên tục [7].

- Hợp tác chặt chẽ giữa các bên: Sự thành công của dự án phụ thuộc vào sự phối hợp hiệu quả giữa đơn vị vận hành, nhà cung cấp giải pháp và tư vấn kỹ thuật [7].

So sánh hiệu quả các chỉ số chính của dự án IoT quốc tế Hình 8 [1], [3], [7].



Hình 8. Biểu đồ so sánh hiệu quả các dự án IoT quốc tế

4. Thực tiễn ứng dụng IoT trong giám sát đập thủy điện tại Việt Nam

4.1. Hiện trạng công tác quan trắc đập thủy điện

Việt Nam có tiềm năng thủy điện lớn với hệ thống sông ngòi dày đặc và địa hình đồi núi, khí hậu nhiệt đới với mùa mưa và mùa khô rõ rệt ảnh hưởng đáng kể đến sản xuất thủy điện. Theo đánh giá của Ngân hàng Thế giới, thủy điện đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo an ninh năng lượng và giảm phát thải, với cam kết của Việt Nam đạt mức phát thải ròng bằng 0 vào năm 2050 [2], [8], [11].

Theo ông Phan Tiến An - Trưởng phòng An toàn đập và hồ chứa (Cục Quản lý xây dựng công

Bảng 2. Tổng hợp kinh nghiệm quốc tế

Quốc gia/Dự án	Công nghệ chính	Kết quả đạt được	Bài học kinh nghiệm
Brazil (Ilha Solteira, Jupia) [1]	LoRaWAN, NB-IoT, Loadsensing, cảm biến dây rung	Giảm 12 km cáp, giảm 30% thời gian lắp đặt, độ tin cậy > 90%	Giải pháp không dây phù hợp cho vùng khó tiếp cận; tích hợp API với hệ thống doanh nghiệp; khả năng mở rộng cao
Colombia (EPM) [7]	Nền tảng CR6, CRVW3, cảm biến tự động	Giảm thời gian đọc từ ngày xuống giây, độ chính xác cao, chi phí dài hạn thấp	Chuyển đổi toàn diện từ thủ công sang tự động; hợp tác chặt chẽ giữa các bên; bảo trì phòng ngừa định kỳ
Trung Quốc (Đập vòm) [5]	Digital twin, cảm biến đa điểm, phân tích tương quan không gian	Thực quan hóa dữ liệu thời gian thực, đánh giá khách quan dựa trên tham số định lượng	Phát triển tiêu chuẩn đánh giá khách quan; tích hợp BIM và IoT; phân tích tương quan không gian giữa các điểm đo
Hoa Kỳ (Nghiên cứu) [3]	Cảm biến IMU, LiDAR drone, điện toán đám mây AWS	Giám sát chuyển vị đa hướng, phát hiện sớm dựa trên ngưỡng	Kết hợp cảm biến mặt đất và dữ liệu từ trên không; sử dụng nền tảng đám mây thương mại; phát triển giải pháp có khả năng mở rộng



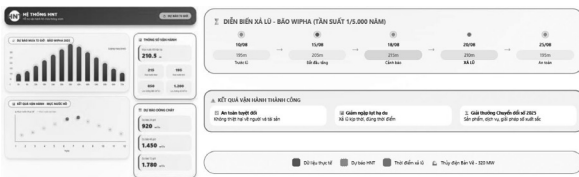
Hình 9. Thống kê hiện trạng ứng dụng công nghệ trong quản lý đập tại Việt Nam

trình), mức độ ứng dụng công nghệ trong quản lý còn thấp, đặc biệt ở nhóm đập trung bình và nhỏ do địa phương quản lý. Nhiều yêu cầu bắt buộc chưa được thực hiện đầy đủ: chỉ 30% số hồ có phương án ứng phó khẩn cấp, 9% được kiểm định an toàn, 31% có quy trình vận hành và chỉ 11% có cấm mốc chỉ giới vùng bảo vệ. Dữ liệu kỹ thuật của hầu hết các hồ chứa chưa đầy đủ và còn phân tán; quy định về phối hợp vận hành liên hồ còn thiếu thống nhất [2].

Một số địa phương đã xây dựng phần mềm quản lý dữ liệu phòng chống thiên tai hồ chứa tích hợp nhưng chưa kết nối với cơ sở dữ liệu của Bộ Nông nghiệp và Môi trường, chưa cập nhật thông tin vùng hạ du. Khoảng 100 hồ chứa lớn có cửa van đã lắp đặt thiết bị quan trắc mưa tự động, nhưng hệ thống chưa được chuẩn hóa, thiếu bảo trì, thường xuyên sai số [8].

4.2. Các dự án ứng dụng công nghệ tiêu biểu
4.2.1. Hệ thống hỗ trợ vận hành hồ chứa HNT

Hệ thống HNT do WeatherPlus hợp tác với Công ty Điện lực Kyushu (Nhật Bản) phát triển là một trong số ít nền tảng tại Việt Nam tích hợp AI, dữ liệu lớn, mô phỏng và công nghệ tính toán thời gian thực trong quản lý hồ chứa [6].



Hình 10. Giao diện hệ thống HNT và kết quả dự báo tại thủy điện Bản Vẽ

Đặc điểm: Hệ thống thu thập dữ liệu đầu vào từ mạng lưới giám sát mưa, dòng chảy và mực nước, kết hợp mô hình số và công nghệ tiên tiến để tạo ra dự báo thời gian thực đáng tin cậy. Điểm mạnh là khả năng dự báo mưa và lưu lượng nước đến hồ chứa trước 72 giờ, đồng thời mô phỏng nhiều kịch bản vận hành giúp đánh giá rủi ro lũ lụt và kế hoạch

vận hành an toàn. Toàn bộ quá trình phân tích và đề xuất được xử lý và hiển thị theo thời gian thực, cho phép người vận hành đưa ra quyết định nhanh chóng trước biến động dòng chảy.

Kết quả: Hệ thống đã được triển khai tại hơn 50 nhà máy thủy điện ở Việt Nam và dự kiến mở rộng sang Lào, Campuchia, Indonesia. Trong mùa bão năm 2025, khi các cơn bão mạnh như Wipha, Kajiki, Bualoi, Matmo đổ bộ gây mưa lớn diện rộng, hệ thống HNT đã thể hiện khả năng vượt trội khi cung cấp dự báo và khuyến nghị vận hành kịp thời tại những "thời điểm vàng", giúp các nhà máy thủy điện xả lũ an toàn.

Nhà máy thủy điện Bản Vẽ (công suất 320 MW) đã vận hành an toàn tuyệt đối trong trận lũ lịch sử do bão Wipha gây ra - trận lũ được đánh giá có tần suất 1/5.000 năm. Hệ thống HNT đã cung cấp dự báo mưa 72 giờ và dự báo dòng chảy 24 giờ, giúp nhà máy chủ động xây dựng kịch bản ứng phó và hạ mực nước hồ kịp thời để tăng dung tích phòng lũ, không chỉ đảm bảo an toàn công trình mà còn giảm đáng kể ngập lụt hạ du.

Năm 2025, hệ thống HNT đã được vinh danh tại Giải thưởng Chuyển đổi số Việt Nam ở hạng mục "Sản phẩm, dịch vụ, giải pháp số xuất sắc", đánh dấu bước đột phá của ngành thủy điện trong kỷ nguyên dữ liệu và AI.

4.2.2. Hệ thống quản lý thông tin tích hợp lưu vực sông Mã

Dự án "Xây dựng hệ thống quản lý thông tin tích hợp lưu vực sông Mã" do Cục Quản lý xây dựng công trình (Bộ Nông nghiệp và Môi trường) phối hợp với Cơ quan Hợp tác quốc tế Hàn Quốc (KOICA) thực hiện tại tỉnh Thanh Hóa [2].

Quy mô: Dự án đã hoàn thành nhiều hạng mục quan trọng, đặt nền móng cho hệ thống quản lý thông tin thủy lợi hiện đại và đồng bộ. Hệ thống tích hợp các thiết bị đo tiên tiến, bao gồm 37 trạm đo mực nước tự động bằng radar, 21 trạm đo mưa tự động, 7 trạm đo độ mặn tự động và 17 camera giám sát.



Hình 11. Kiến trúc hệ thống quản lý thông tin lưu vực sông Mã

Đặc biệt, dự án đã đưa vào vận hành hai phòng điều khiển tại Cục Quản lý xây dựng công trình (Hà Nội) và Sở Nông nghiệp và Môi trường tỉnh Thanh Hóa. Hệ thống thu thập dữ liệu thời gian thực, lưu trữ an toàn và hỗ trợ hiệu quả cho việc giám sát, vận hành và quản lý tài nguyên nước tại Thanh Hóa và khu vực miền Trung.

Nền tảng: Trung tâm của hệ thống là Hệ thống quản lý công trình thủy lợi Thanh Hóa (HMIS) và Hệ thống hỗ trợ ra quyết định (DSS), được thiết kế để tích hợp dữ liệu về thủy văn, công trình thủy lợi, sử dụng nước và xâm nhập mặn. Theo đánh giá của Công ty TNHH một thành viên Sông Chu, hệ thống quản lý thông tin thủy lợi được phát triển trong dự án có ý nghĩa đặc biệt quan trọng, góp phần nâng cao hiệu quả vận hành trong bối cảnh biến đổi khí hậu ngày càng phức tạp.

4.2.3. Hệ thống ra quyết định dựa trên dữ liệu cho nhà máy thủy điện

Một dự án hợp tác giữa Trường Đại học Khoa học Ứng dụng Oulu (Phần Lan) và đối tác Việt Nam đã phát triển hệ thống phân tích thời gian thực cho nhà máy thủy điện tại Việt Nam [9].



Hình 12. Giao diện hệ thống ra quyết định và kết quả tối ưu hóa vận hành

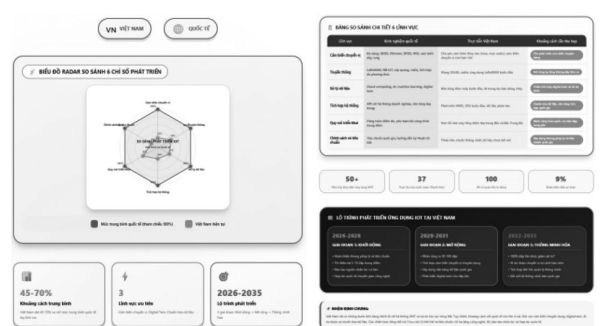
Ứng dụng web: Hệ thống bao gồm ứng dụng web truy cập dữ liệu thời gian thực từ API đám mây Weather Plus, cung cấp thông tin chi tiết về hiệu suất vận hành và hiệu quả hoạt động. Giao diện

trực quan hóa dữ liệu cung cấp các thông số thiết yếu như tổng công suất, lưu lượng xả, lưu lượng hồi lưu, dung tích hữu ích và tổng công suất ngày.

Thuật toán: Một thuật toán được phát triển để tự động hóa quá trình tính toán, tích hợp dữ liệu về sản lượng điện theo kế hoạch và thực tế, tạo báo cáo sản lượng và doanh thu hàng tháng chi tiết. Kết quả thử nghiệm trong một tháng cho thấy khả năng tiết kiệm chi phí đáng kể, với dự báo tiết kiệm ít nhất 180.000 euro mỗi năm và tăng doanh thu ít nhất 15% thông qua tối ưu hóa thời gian vận hành.

4.3. Đánh giá chung về thực tiễn tại Việt Nam

Thực tiễn tại Việt Nam cho thấy những bước tiến đáng khích lệ trong ứng dụng công nghệ số vào quản lý, vận hành hồ chứa thủy điện. Các dự án tiêu biểu như HNT, hệ thống lưu vực sông Mã đã chứng minh hiệu quả trong dự báo, cảnh báo sớm và hỗ trợ quyết định vận hành. Tuy nhiên, so với kinh nghiệm quốc tế, Việt Nam còn khoảng cách trong phát triển cảm biến chuyên dụng cho chuyển vị, tích hợp mô hình số hóa song sinh, ứng dụng AI dự đoán biến dạng, và chuẩn hóa dữ liệu toàn hệ thống.



Hình 13. Biểu đồ đánh giá mức độ phát triển IoT Việt Nam so với quốc tế

Bảng 3. Phân tích khoảng cách giữa Việt Nam và kinh nghiệm quốc tế [1-9]

Lĩnh vực	Kinh nghiệm quốc tế	Thực tiễn Việt Nam	Khoảng cách cần thu hẹp
Cảm biến chuyển vị	Đa dạng: GNSS, tiltmeter, DFOS, IMU, cảm biến dây rung [1], [3], [5]	Chủ yếu cảm biến thủy văn (mưa, mực nước); cảm biến chuyển vị còn hạn chế [2], [8]	Cần phát triển và lắp đặt hệ thống cảm biến chuyên dụng cho chuyển vị
Truyền thông	LoRaWAN, NB-IoT, cáp quang, radio, tích hợp đa phương thức [1]	Mạng 3G/4G, radio; ứng dụng LoRaWAN bước đầu	Mở rộng hạ tầng truyền thông không dây tầm xa, đặc biệt vùng sâu vùng xa
Xử lý dữ liệu	Cloud computing, AI, machine learning, digital twin [3], [4], [5]	Nền tảng đám mây bước đầu; AI trong dự báo dòng chảy [6], [9]	Thiếu tích hợp Digital Twin và AI dự đoán chuyển vị
Tích hợp hệ thống	API với hệ thống doanh nghiệp, nền tảng tập trung, chia sẻ dữ liệu [1]	Phát triển HMIS, DSS bước đầu; dữ liệu còn phân tán [2]	Chuẩn hóa dữ liệu và xây dựng nền tảng tích hợp toàn quốc
Quy mô triển khai	Hàng trăm điểm đo, phủ toàn bộ công trình trọng điểm [7]	Hơn 50 nhà máy thủy điện ứng dụng HNT; tập trung Bắc và Bắc Trung Bộ [6]	Nhân rộng ra toàn quốc, ưu tiên đập xung yếu
Chính sách và tiêu chuẩn	Tiêu chuẩn quốc gia, hướng dẫn kỹ thuật chi tiết [5]	Thiếu tiêu chuẩn thống nhất; dữ liệu chưa kết nối giữa các hệ thống [2], [8]	Xây dựng khung pháp lý và tiêu chuẩn kỹ thuật quốc gia

5. Thách thức và định hướng phát triển tại Việt Nam

5.1. Thách thức chính



Hình 14. Sơ đồ phân tích các thách thức chính theo ba nhóm ứng dụng IoT tại Việt Nam

5.1.1. Về hạ tầng và công nghệ

Hạ tầng truyền thông: Nhiều đập thủy điện nằm ở vùng sâu, vùng xa, khó khăn về sóng di động và Internet. Khu vực ngầm, hầm trong thân đập gây nhiễu tín hiệu không dây, đòi hỏi giải pháp truyền thông đặc thù [1].

Chi phí đầu tư: Chi phí cảm biến chuyên dụng (GNSS, Tiltmeter, DFOS), Gateway, nền tảng đám mây còn cao so với ngân sách nhiều đơn vị quản lý, đặc biệt là các đập vừa và nhỏ do địa phương quản lý.

Tích hợp dữ liệu: Các hệ thống hiện tại chưa được kết nối với cơ sở dữ liệu của Bộ Nông nghiệp và Môi trường, thiếu đồng bộ trong thu thập và xử lý thông tin [2].

5.1.2. Về thể chế và tiêu chuẩn

Thiếu tiêu chuẩn thống nhất: Hiện chưa có tiêu chuẩn quốc gia về định dạng dữ liệu, giao thức truyền thông cho hệ thống IoT trong giám sát đập. Các hệ thống chưa được chuẩn hóa, thiếu bảo trì, thường xuyên sai số [8].

Quy định phối hợp: Chưa có quy chế phối hợp thống nhất giữa các địa phương trong cùng lưu vực. Mỗi hồ chứa vận hành theo quy trình riêng, thiếu đầu mối chịu trách nhiệm điều phối chung khi xảy ra tình huống khẩn cấp. Phối hợp giữa các tổ vận hành liên hồ (hồ thủy điện và hồ thủy lợi) chưa thực sự đồng bộ, chia sẻ dữ liệu còn hạn chế [2].

5.1.3. Về nhân lực và quản lý

Nguồn nhân lực: Thiếu cán bộ kỹ thuật được đào tạo bài bản về IoT, xử lý dữ liệu lớn và AI trong lĩnh vực quan trắc đập. Cần đào tạo đội ngũ cán bộ có năng lực số [8].

An ninh mạng: Hệ thống kết nối Internet tiềm ẩn nguy cơ tấn công mạng, có thể ảnh hưởng đến an toàn vận hành công trình.

5.2. Định hướng phát triển



Hình 15. Lộ trình phát triển ứng dụng IoT trong giám sát đập tại Việt Nam

Lộ trình 3 giai đoạn phát triển ứng dụng IoT trong giám sát đập tại Việt Nam Hình 15.

5.2.1. Hoàn thiện thể chế và tiêu chuẩn

- Xây dựng khung pháp lý: Ban hành tiêu chuẩn kỹ thuật quốc gia về ứng dụng IoT trong quan trắc đập thủy điện, tham khảo kinh nghiệm từ Trung Quốc về xây dựng hệ thống chỉ tiêu đánh giá an toàn đập [5].

- Lộ trình chuyển đổi số: Xây dựng lộ trình chuyển đổi số cho ngành thủy điện, ưu tiên tự động hóa quan trắc an toàn đập. Theo các chuyên gia, để chuyển sang quản lý thông minh, cần hoàn thiện thể chế, chuẩn hóa dữ liệu và giám sát thời gian thực [8].

- Cơ chế phối hợp liên hồ: Xây dựng quy chế phối hợp thống nhất giữa các địa phương trong cùng lưu vực, tăng cường chia sẻ dữ liệu giữa hồ thủy điện và hồ thủy lợi, hướng tới nền tảng vận hành và giám sát tập trung cho toàn lưu vực [2].

5.2.2. Phát triển công nghệ và hạ tầng

- Phát triển cảm biến chuyên dụng: Đầu tư phát triển và ứng dụng các cảm biến chuyên dụng cho chuyển vị: máy đo nghiêng tự động, hệ thống GNSS chi phí thấp như mô hình nghiên cứu tại Hoa Kỳ [3], cảm biến quang - sợi phân tán cho phép đo biến dạng liên tục.

- Mở rộng hạ tầng truyền thông: Ưu tiên triển khai mạng LoRaWAN và NB-IoT cho các khu vực vùng sâu, vùng xa, kết hợp cáp quang cho các khu vực trọng yếu như mô hình Brazil [1].

- Xây dựng nền tảng dữ liệu tập trung: Phát triển nền tảng dữ liệu quốc gia về an toàn đập, tích hợp đa nguồn (chuyển vị, thấm, áp lực, thủy văn) với API mở, cho phép kết nối với hệ thống doanh nghiệp của các đơn vị vận hành [1].

- Ứng dụng mô hình số hóa song sinh: Phát triển digital twin cho các đập trọng điểm, tích hợp dữ liệu thời gian thực từ cảm biến và mô hình 3D từ drone/LiDAR, cho phép trực quan hóa biến dạng và mô phỏng các kịch bản vận hành [4], [5].

- AI và học máy: Ứng dụng AI và học máy để phân tích dữ liệu chuyển vị, phát hiện sớm bất thường dựa trên phân tích tương quan không gian giữa các điểm đo [5]. Nâng cấp các mô hình dự báo hiện có vẫn phụ thuộc vào dữ liệu mưa và công nghệ lạc hậu [8].

5.2.3. Đào tạo và hợp tác quốc tế

- Đào tạo nguồn nhân lực liên ngành: Xây dựng chương trình đào tạo kết hợp giữa địa kỹ thuật, IoT và khoa học dữ liệu. Đào tạo đội ngũ cán bộ có năng lực số để vận hành và khai thác hiệu quả hệ thống [8].

- Hợp tác quốc tế: Tăng cường hợp tác với các tổ chức quốc tế, tiếp thu chuyển giao công nghệ từ các dự án thành công tại Brazil [1], Colombia [7], Trung Quốc [5] và Hoa Kỳ [3].

- Chương trình thí điểm: Xây dựng chương trình thí điểm tại một số đập trọng điểm, đánh giá toàn diện và nhân rộng mô hình ra toàn quốc.

Kết luận

- Ứng dụng công nghệ IoT trong giám sát chuyển vị thân đập thủy điện đã được triển khai thành công tại nhiều quốc gia trên thế giới, mang lại hiệu quả vượt trội về tần suất, độ chính xác và khả năng cảnh báo sớm so với phương pháp truyền thống. Kinh nghiệm từ Brazil, Colombia, Trung Quốc và Hoa Kỳ cho thấy vai trò then chốt của giải pháp không dây, tích hợp mô hình số hóa song sinh, ứng dụng AI và chuẩn hóa dữ liệu.

- Tại Việt Nam, những bước đi đầu tiên trong ứng dụng công nghệ số vào quản lý hồ chứa thủy điện đã đạt được kết quả đáng khích lệ, đặc biệt là hệ thống HNT được vinh danh tại Giải thưởng Chuyển đổi số Việt Nam 2025 [6] và dự án tích hợp lưu vực sông Mã [2]. Tuy nhiên, thách thức còn lớn về hạ tầng, thể chế, tiêu chuẩn và nguồn nhân lực.

- Để phát triển đồng bộ và hiệu quả, cần có chiến lược tổng thể với ba trụ cột chính: (i) Hoàn thiện thể chế và tiêu chuẩn kỹ thuật; (ii) Phát triển hạ tầng công nghệ và tích hợp hệ thống; (iii) Đào tạo nguồn nhân lực và tăng cường hợp tác quốc tế. Với tiềm năng và nhu cầu thực tiễn, việc đẩy mạnh ứng dụng IoT trong giám sát chuyển vị đập thủy điện là hướng đi đúng đắn, góp phần đảm bảo an toàn công trình, phát triển bền vững ngành năng lượng và thích ứng với biến đổi khí hậu. □

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Đề tài Khoa học và Công nghệ cấp Cơ sở của Trường Đại học Mở - Địa chất, mã số T26-43. Nhóm nghiên cứu xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Mở - Địa chất.

Tài liệu tham khảo:

- [1]. WorldSensing, 2025. Modernisation and geotechnical automation of the Ilha Solteira and Jupia hydroelectric power plants. WorldSensing Success Story. Available: <https://www.worldsensing.com/success-story/modernisation-and-geotechnical-automation-of-the-ilha-solteira-and-jupia-hydroelectric-power-plants/>
- [2]. Vietnam.vn, 2025. 'Live' data helpt de veiligheid van dammen in het stroomgebied van de Ma-rivier te waarborgen. Available: <https://www.vietnam.vn/nl/du-lieu-song-giup-bao-dam-an-toan-ho-dap-luu-vuc-song-ma>
- [3]. National Academies, 2025. IoT Sensor Fusion for Low-Cost Cloud Based Monitoring for Resilient Levees and Embankments. Transportation Research Board. Available: <https://rip.trb.org/View/2536170>
- [4]. Rui Ma, Feng Zhang, Binbin Hu, 2025. Research and Practice of Dam Safety Management Platform Based on Internet of Things and Twin Simulation Technology. Conference: 2025 4th International Symposium on Computer Applications and Information Technology (ISCAIT).
- [5]. Mao Y., Hu L., Qi Z., Tang Z., Yuan J., Du X., Dong Z., and Fang H., 2026. Spatial dependency enhanced dam safety evaluation: a digital-twin based monitoring platform integrating multisensor correlation analytics. Front. Mech. Eng. 11:1712960.
- [6]. Vietnam Agriculture News, 2025. Safe reservoir operation solution honored at Viet Nam Digital Awards 2025. Available: <https://van.nongnghiepmoitrung.vn/safe-reservoir-operation-solution-honored-at-viet-nam-digital-awards-2025-d777864.html>
- [7]. Campbell Scientific, 2025. Colombia: Transformation of Dam Safety through Real-Time Monitoring. Available: <https://www.campbellsci.com.cn/colombia-transformation-dam-safety-real-time-monitoring>
- [8]. Vietnam.vn, 2025. Digitalization enables reservoirs to proactively respond to unusual rainfall and flooding. Available: <https://www.vietnam.vn/en/so-hoa-de-ho-chua-nuoc-chu-dong-ung-pho-mua-lu-bat-thuong>
- [9]. Virtanen Ilpo, Pham Minh Phuong, Pham Trieu Duong, (2024). Data-driven decision-making system for hydropower plant in Vietnam. Oulu University of Applied Sciences. Available: <https://oamkjournal.oamk.fi/2024/data-driven-decision-making-system-for-hydropower-plant-in-vietnam/>
- [10]. 杜德进, 龚士林, 孙辅庭, 于占海, 2025. 水电站大坝运行安全智能监控技术综述. 大坝与安全, (6).
- [11]. Ông Quang Tuyền, Hoàng Quốc Hùng, Nguyễn Duyên Phong, 2025. Giám sát rủi ro, sự cố độ bền của bê tông bằng công nghệ IoT - Kinh nghiệm quốc tế và định hướng phát triển tại Việt Nam. Tạp chí Người Xây dựng, số 401 tháng 8/2025, tr. 42-44.