

# CÁC NHÂN TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN CÔNG TÁC BẢO TRÌ CÔNG TRÌNH HỒ CHỨA THỦY LỢI VỪA VÀ NHỎ: TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU VÀ ĐỀ XUẤT MÔ HÌNH

FACTORS AFFECTING THE EFFECTIVENESS OF IRRIGATION RESERVOIR MAINTENANCE: A LITERATURE REVIEW AND PROPOSED RESEARCH MODEL

Trần Văn Khiêm - Trường Đại học Thủy lợi. Điện thoại: 0972448429 - Email: khiemtv@tlu.edu.vn

**Tóm tắt:** Công tác bảo trì giữ vai trò quan trọng trong việc đảm bảo an toàn và hiệu quả vận hành của các công trình hồ chứa thủy lợi, đặc biệt đối với các hồ chứa vừa và nhỏ đã được xây dựng từ lâu và đang có dấu hiệu xuống cấp. Hiệu quả bảo trì chịu tác động của nhiều yếu tố liên quan đến điều kiện kỹ thuật, nguồn lực tài chính, năng lực quản lý và môi trường tự nhiên. Bài báo sử dụng phương pháp tổng hợp và phân tích tài liệu nhằm xác định và phân loại các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả bảo trì công trình hồ chứa thủy lợi. Kết quả nghiên cứu đã xác định bảy nhóm yếu tố chính, bao gồm kỹ thuật - công nghệ, tài chính, tổ chức - quản lý, con người, môi trường - khí hậu - địa hình, pháp lý - chính sách và dữ liệu - chuyển đổi số. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất mô hình lý thuyết tích hợp phản ánh mối quan hệ giữa các nhóm yếu tố và hiệu quả bảo trì công trình hồ chứa, làm cơ sở cho các nghiên cứu định lượng tiếp theo.

**Từ khóa:** Bảo trì công trình; hồ chứa thủy lợi; hiệu quả bảo trì; yếu tố ảnh hưởng; mô hình nghiên cứu.

## 1. Giới thiệu chung

Hệ thống hồ chứa thủy lợi vừa và nhỏ giữ vai trò quan trọng trong điều tiết nguồn nước, cấp nước tưới và bảo đảm an toàn vùng hạ du, đặc biệt tại khu vực miền Bắc Việt Nam với địa hình đồi núi phức tạp và chế độ thủy văn biến động mạnh. Phần lớn các công trình này được xây dựng từ nhiều thập kỷ trước và đang xuất hiện tình trạng xuống cấp về kết cấu cũng như thiết bị vận hành. Theo các hướng dẫn về quản lý an toàn đập, công tác kiểm tra định kỳ, quan trắc và bảo trì thường xuyên có vai trò quan trọng trong việc duy trì trạng thái làm việc ổn định và nâng cao mức độ an toàn công trình (ICOLD, 2017).

Trong bối cảnh biến đổi khí hậu, các hiện tượng mưa cực đoan và lũ bất thường có xu hướng gia tăng, làm tăng áp lực lên kết cấu đập và hệ thống xả lũ. Báo cáo phát triển tài nguyên nước thế giới của UNESCO nhấn mạnh rằng biến đổi khí hậu đang làm gia tăng rủi ro đối với an toàn hạ tầng nước, đặc biệt tại các khu vực có mức độ tổn thương cao

**Abstract:** Maintenance plays a critical role in ensuring the safety and operational performance of irrigation reservoirs, particularly small and medium systems that have been in long-term service and are increasingly deteriorating. Maintenance effectiveness is influenced by multiple factors related to technical conditions, financial resources, management capacity, and environmental characteristics. This study employs a literature synthesis approach to identify and classify key factors affecting maintenance effectiveness of irrigation reservoirs. The results identify seven major groups of influencing factors, including technical-technological aspects, financial resources, organizational management, human resources, environmental conditions, legal frameworks, and data management and digital transformation. Based on these findings, an integrated conceptual framework is proposed to illustrate the relationships between influencing factors and maintenance effectiveness, providing a foundation for future empirical studies.

**Keywords:** Infrastructure maintenance; irrigation reservoirs; maintenance effectiveness; influencing factors; conceptual framework.

(UNESCO, 2024). Điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết phải nâng cao hiệu quả công tác bảo trì nhằm bảo đảm an toàn công trình và duy trì khả năng vận hành ổn định.

Hiệu quả công tác bảo trì được hiểu là mức độ đạt được các mục tiêu kỹ thuật, kinh tế và vận hành của hoạt động bảo trì công trình trong suốt quá trình khai thác sử dụng. Theo quan điểm quản lý tài sản, hiệu quả bảo trì không chỉ phản ánh khả năng duy trì trạng thái kỹ thuật và an toàn công trình mà còn liên quan đến việc tối ưu chi phí, kéo dài tuổi thọ công trình và nâng cao hiệu quả vận hành hệ thống (ISO 55000, 2014).

Đối với công trình hồ chứa thủy lợi, hiệu quả bảo trì còn gắn liền với yêu cầu bảo đảm an toàn đập, duy trì khả năng điều tiết nước và hạn chế rủi ro sự cố trong điều kiện biến đổi khí hậu và công trình ngày càng xuống cấp. Vì vậy, việc nghiên cứu các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả bảo trì có ý nghĩa quan trọng trong nâng cao hiệu quả quản lý và khai thác công trình hồ chứa thủy lợi.

## 2. Phương Pháp nghiên cứu

Nghiên cứu được thực hiện theo cách tiếp cận tổng quan tài liệu có hệ thống nhằm xác định và phân tích các nhân tố ảnh hưởng đến hiệu quả bảo trì công trình hồ chứa thủy lợi. Phương pháp này được lựa chọn do phù hợp với mục tiêu hệ thống hóa cơ sở lý luận và tổng hợp kết quả nghiên cứu trước đây trong lĩnh vực quản lý bảo trì hạ tầng.

Quá trình thu thập tài liệu được thực hiện thông qua việc tìm kiếm và lựa chọn các nguồn dữ liệu thứ cấp bao gồm tiêu chuẩn quốc tế về quản lý tài sản và an toàn đập, báo cáo của các tổ chức quốc tế về quản lý hạ tầng, cùng các công trình nghiên cứu khoa học liên quan đến bảo trì và quản lý rủi ro trong công trình thủy lợi. Các tài liệu được lựa chọn chủ yếu trong giai đoạn từ năm 2000 đến nay nhằm đảm bảo tính cập nhật và phù hợp với bối cảnh quản lý hiện đại.

Tiêu chí lựa chọn tài liệu bao gồm tính học thuật, mức độ liên quan trực tiếp đến chủ đề nghiên cứu và khả năng cung cấp cơ sở lý luận về các nhân tố ảnh hưởng đến hiệu quả bảo trì. Các tài liệu được phân tích tập trung vào các nội dung như khái niệm bảo trì trong quản lý tài sản, phương pháp đo lường hiệu quả bảo trì, cách tiếp cận bảo trì dựa trên rủi ro và các yếu tố tác động đến công tác bảo trì công trình hạ tầng.

Sau khi thu thập, các tài liệu được xử lý bằng phương pháp phân tích – tổng hợp định tính nhằm xác định các nhóm nhân tố có ảnh hưởng đến hiệu quả bảo trì. Việc phân nhóm nhân tố được thực hiện dựa trên bản chất tác động và vai trò của từng yếu tố trong hệ thống quản lý bảo trì, bao gồm các khía cạnh kỹ thuật, kinh tế, tổ chức và môi trường. Cách tiếp cận này cho phép xây dựng một khung phân tích tổng thể phản ánh mối quan hệ giữa các yếu tố ảnh hưởng trong một hệ thống quản lý tích hợp.

Trên cơ sở kết quả phân tích, nghiên cứu đề xuất mô hình lý thuyết về các nhân tố ảnh hưởng đến hiệu quả bảo trì công trình hồ chứa thủy lợi. Mô hình được xây dựng theo tiếp cận hệ thống trong quản lý tài sản hạ tầng, trong đó hiệu quả bảo trì được xem là biến kết quả chịu tác động tổng hợp của các nhóm nhân tố liên quan. Khung mô hình này là nền tảng cho các nghiên cứu định lượng tiếp theo nhằm kiểm định mức độ ảnh hưởng của từng nhân tố trong điều kiện thực tiễn.

## 3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

Hiệu quả bảo trì công trình hồ chứa thủy lợi chịu tác động tổng hợp của nhiều nhóm nhân tố có mối quan hệ tương tác lẫn nhau. Theo cách tiếp cận quản lý tài sản hạ tầng, các nhân tố này không tồn

tại độc lập mà tạo thành một hệ thống ảnh hưởng đồng thời đến hiệu quả kỹ thuật, kinh tế và an toàn của công trình. Trên cơ sở tổng hợp các nghiên cứu trước đây, các nhân tố ảnh hưởng đến hiệu quả bảo trì có thể được phân loại thành bảy nhóm chính.

### 3.1. Nhân tố kỹ thuật - công nghệ

Nhóm nhân tố kỹ thuật - công nghệ có ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả bảo trì công trình hồ chứa thủy lợi, bao gồm đặc điểm thiết kế kết cấu, chất lượng vật liệu – thiết bị và công nghệ giám sát công trình. Thiết kế hợp lý, thuận lợi cho kiểm tra và sửa chữa sẽ giúp giảm sự cố, kéo dài tuổi thọ và tối ưu chi phí bảo trì. Đồng thời, việc sử dụng vật liệu đạt chuẩn và thiết bị đáp ứng tiêu chuẩn kỹ thuật giúp hạn chế xuống cấp, ăn mòn và nâng cao độ tin cậy vận hành. ICOLD (2017) và USACE (2014) đều nhấn mạnh cần xem xét yêu cầu bảo trì và kiểm soát chất lượng vật liệu, thiết bị ngay từ giai đoạn thiết kế và lắp đặt.

Bên cạnh đó, việc ứng dụng công nghệ quan trắc tự động, IoT và các cảm biến giám sát giúp phát hiện sớm các dấu hiệu bất thường như nứt, lún, thấm hoặc xói lở, qua đó hỗ trợ bảo trì chủ động và giảm rủi ro công trình. Ngoài ra, các phần mềm quản lý bảo trì như CMMS, Asset Management Systems hay digital twin góp phần nâng cao hiệu quả quản lý dữ liệu, dự báo sự cố và hỗ trợ ra quyết định bảo trì.

Như vậy, nhân tố kỹ thuật - công nghệ không chỉ quyết định mức độ phát sinh hư hỏng mà còn ảnh hưởng đến khả năng phát hiện và xử lý kịp thời các rủi ro trong quá trình khai thác công trình.

### 3.2. Nhân tố tài chính

Nguồn lực tài chính là điều kiện tiên quyết để thực hiện các hoạt động kiểm tra định kỳ, bảo dưỡng thường xuyên và sửa chữa công trình khi phát sinh hư hỏng. Việc thiếu hụt kinh phí hoặc phân bổ ngân sách không ổn định thường dẫn đến trì hoãn bảo trì, làm gia tăng mức độ xuống cấp và tăng chi phí xử lý trong dài hạn. Theo quan điểm quản lý tài sản hạ tầng, bảo trì cần được xem như một khoản đầu tư nhằm duy trì giá trị sử dụng của công trình, thay vì chỉ là chi phí vận hành ngắn hạn (ISO, 2014).

Các nghiên cứu về bảo trì tập trung vào độ tin cậy cũng cho thấy việc thực hiện bảo trì phòng ngừa đúng thời điểm giúp giảm đáng kể chi phí sửa chữa lớn và hạn chế tổn thất do gián đoạn vận hành (Moubray, 2001). Đối với các hồ chứa vừa và nhỏ tại Việt Nam, nguồn kinh phí bảo trì chủ yếu phụ thuộc vào ngân sách nhà nước nên tính chủ động trong lập kế hoạch bảo trì dài hạn còn hạn chế. Vì vậy, cơ chế

phân bổ tài chính hợp lý và ổn định là yếu tố quan trọng nâng cao hiệu quả bảo trì công trình.

### 3.3. Nhân tố tổ chức - quản lý

Hiệu quả bảo trì phụ thuộc lớn vào năng lực tổ chức và quản lý của đơn vị vận hành công trình. Cơ cấu tổ chức rõ ràng, phân công trách nhiệm cụ thể và cơ chế phối hợp hiệu quả giữa các bộ phận kỹ thuật, tài chính và vận hành giúp nâng cao chất lượng thực hiện bảo trì.

Parida và Kumar (2006) cho rằng hiệu suất bảo trì không chỉ phụ thuộc vào nguồn lực đầu vào mà còn phụ thuộc vào khả năng tổ chức, giám sát và đánh giá kết quả thực hiện trong toàn bộ hệ thống quản lý. Nếu hệ thống quản lý thiếu đồng bộ, công tác bảo trì dễ rơi vào tình trạng xử lý sự cố mang tính bị động thay vì phòng ngừa chủ động.

Do đó, việc chuẩn hóa quy trình quản lý bảo trì, xây dựng hệ thống đánh giá hiệu quả và nâng cao năng lực quản trị là điều kiện cần thiết để cải thiện hiệu quả bảo trì công trình hồ chứa.

### 3.4. Nhân tố nhân lực

Nguồn nhân lực là yếu tố trực tiếp thực hiện các hoạt động vận hành, kiểm tra và bảo trì công trình. Trình độ chuyên môn, kinh nghiệm thực tế và nhận thức về vai trò của công tác bảo trì ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng thực thi trong thực tế.

Gouws và Trevelyan (2006) chỉ ra rằng hiệu quả quản lý bảo trì chịu tác động rõ rệt từ năng lực của đội ngũ quản lý và nhân viên kỹ thuật, đặc biệt trong các tổ chức có hệ thống tài sản phức tạp. Việc thiếu đào tạo chuyên môn hoặc thiếu cập nhật kiến thức kỹ thuật có thể làm giảm khả năng phát hiện sớm các dấu hiệu xuống cấp của công trình và ảnh hưởng đến chất lượng quyết định bảo trì.

Vì vậy, đào tạo thường xuyên và nâng cao năng lực đội ngũ vận hành – bảo trì là giải pháp quan trọng nhằm nâng cao hiệu quả quản lý công trình hồ chứa thủy lợi.

### 3.5. Nhân tố môi trường - khí hậu

Điều kiện môi trường tự nhiên có ảnh hưởng trực tiếp đến tốc độ xuống cấp của công trình hồ chứa. Các hồ chứa tại miền Bắc Việt Nam thường phân bố ở khu vực đồi núi với địa hình phức tạp và chịu tác động mạnh của mưa lũ, làm gia tăng nguy cơ xói lở và thấm qua thân đập.

Báo cáo phát triển tài nguyên nước thế giới năm 2024 của UNESCO cho thấy biến đổi khí hậu đang làm gia tăng tần suất và cường độ của các hiện tượng khí hậu cực đoan, đặc biệt là mưa lớn bất thường và lũ đột biến, từ đó làm tăng rủi ro đối với an toàn đập và hồ chứa (UNESCO, 2024).

Do đó, môi trường tự nhiên là nhân tố điều kiện quan trọng cần được xem xét trong hoạch định chiến lược bảo trì công trình hồ chứa.

### 3.6. Nhân tố pháp lý - chính sách

Khung pháp lý và các quy định kỹ thuật đóng vai trò định hướng và ràng buộc trong việc thực hiện bảo trì công trình hồ chứa. Tại Việt Nam, các quy định về quản lý chất lượng công trình xây dựng, bảo trì công trình và an toàn đập đã được quy định trong Nghị định số 06/2021/NĐ-CP, Nghị định số 114/2018/NĐ-CP và Thông tư số 05/2019/TT-BNNPTNT.

Các văn bản này quy định trách nhiệm của chủ sở hữu công trình, chế độ kiểm tra định kỳ, quy trình bảo trì và yêu cầu bảo đảm an toàn công trình trong quá trình khai thác. Tuy nhiên, hiệu quả bảo trì không chỉ phụ thuộc vào sự đầy đủ của hệ thống văn bản mà còn phụ thuộc vào năng lực tổ chức thực hiện và mức độ tuân thủ trong thực tế.

Do đó, việc hoàn thiện cơ chế thực thi và tăng cường giám sát thực hiện có ý nghĩa quan trọng trong nâng cao hiệu quả bảo trì công trình hồ chứa.

### 3.7. Nhân tố dữ liệu và hệ thống

Dữ liệu kỹ thuật là nền tảng của quản lý bảo trì hiện đại. Hồ sơ thiết kế, nhật ký vận hành, kết quả kiểm tra định kỳ và dữ liệu quan trắc là cơ sở quan trọng để đánh giá tình trạng công trình và xây dựng kế hoạch bảo trì phù hợp.

Theo tiếp cận quản lý tài sản, việc ra quyết định bảo trì cần dựa trên thông tin đầy đủ về hiện trạng tài sản và mức độ rủi ro của từng hạng mục công trình (ISO 55000, 2014). Trong bối cảnh chuyển đổi số, việc ứng dụng hệ thống quản lý dữ liệu và công nghệ quan trắc tự động giúp nâng cao tính chính xác và kịp thời của các quyết định quản lý.

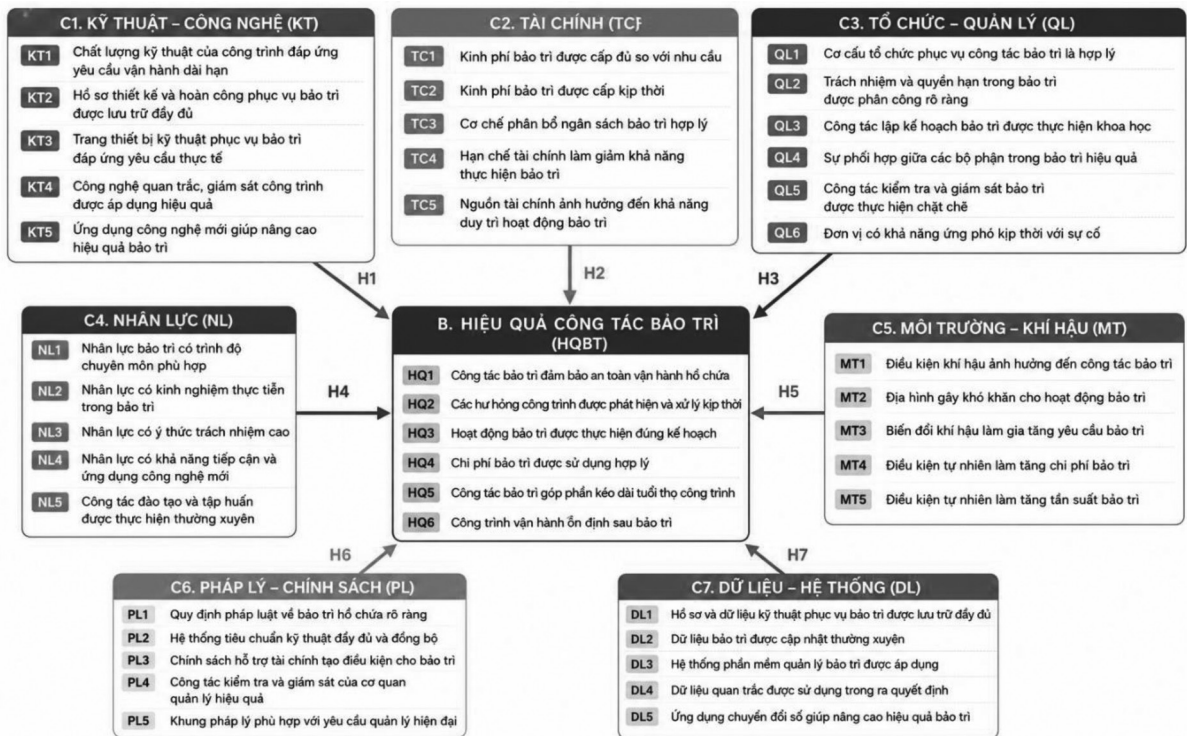
Do đó, chất lượng dữ liệu và năng lực khai thác dữ liệu ngày càng trở thành yếu tố quan trọng trong nâng cao hiệu quả bảo trì công trình hồ chứa thủy lợi.

Trên cơ sở tổng hợp các nghiên cứu trong và ngoài nước, nghiên cứu tiến hành hệ thống hóa các nhóm nhân tố ảnh hưởng đến hiệu quả bảo trì công trình hồ chứa thủy lợi theo hướng tiếp cận quản lý tài sản và bảo trì dựa trên rủi ro. Các nhóm nhân tố được phân loại thành bảy nhóm chính cùng với hệ thống các biến quan sát để xuất, làm cơ sở cho mô hình nghiên cứu trong các nghiên cứu định lượng tiếp theo. Kết quả tổng hợp được trình bày tại Bảng 1.

Kết quả tổng hợp cho thấy hiệu quả công tác bảo trì công trình hồ chứa thủy lợi chịu tác động đồng thời của nhiều nhóm nhân tố khác nhau.

**Bảng 1. Các nhóm nhân tố và biến quan sát để xuất**

Nhóm nhân tố	Mã biến	Nội dung biến quan sát	Nguồn tổng hợp
Kỹ thuật - công nghệ	KT1–KT5	Chất lượng kỹ thuật, hồ sơ thiết kế, thiết bị kỹ thuật, công nghệ giám sát, công nghệ mới	ICOLD (2017); ISO 31000 (2018)
Tài chính	TCF1–TCF5	Kinh phí bảo trì, phân bổ ngân sách, nguồn lực tài chính	ISO 55000 (2014); Moubray (1997)
Tổ chức - quản lý	QL1–QL6	Cơ cấu tổ chức, lập kế hoạch, kiểm tra giám sát, ứng phó sự cố	Parida & Kumar (2006)
Nhân lực	NL1–NL5	Trình độ, kinh nghiệm, đào tạo, ứng dụng công nghệ	Gouws & Trevelyan (2006)
Môi trường - khí hậu	MT1-MT5	Khí hậu, địa hình, biến đổi khí hậu, điều kiện tự nhiên	UNESCO (2024); ICOLD (2017)
Pháp lý - chính sách	PL1-PL5	Quy định pháp luật, tiêu chuẩn kỹ thuật, giám sát	NĐ 06/2021; NĐ 114/2018; TT 05/2019
Dữ liệu - hệ thống	DL1-DL5	Hồ sơ kỹ thuật, dữ liệu bảo trì, phần mềm quản lý, chuyển đổi số	ISO 55000 (2014)



(Ghi chú: Các mũi tên H1–H7 thể hiện giả thuyết về tác động của các nhóm nhân tố đến hiệu quả công tác bảo trì)

**Hình 1. Mô hình nghiên cứu các nhân tố ảnh hưởng đến hiệu quả công tác bảo trì công trình hồ chứa thủy lợi vừa và nhỏ**

Trong đó, các yếu tố kỹ thuật, tài chính, tổ chức quản lý và nhân lực đóng vai trò nền tảng trong quá trình thực hiện bảo trì, trong khi các yếu tố môi trường, pháp lý và dữ liệu có vai trò hỗ trợ và tác động đến quá trình quản lý, giám sát và ra quyết định bảo trì công trình.

Trên cơ sở các nhóm nhân tố và hệ thống biến quan sát đã đề xuất, nghiên cứu xây dựng mô hình lý thuyết phản ánh mối quan hệ giữa các nhóm nhân tố và hiệu quả công tác bảo trì công trình hồ chứa thủy lợi, được thể hiện tại Hình 1. Mô hình nghiên cứu đề xuất là cơ sở cho việc xây dựng thang đo và triển khai các nghiên cứu định lượng tiếp theo nhằm đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng nhóm nhân tố trong điều kiện thực tiễn tại Việt Nam.

Mô hình nghiên cứu đề xuất cho thấy hiệu quả

công tác bảo trì công trình hồ chứa thủy lợi chịu tác động tổng hợp của nhiều nhóm nhân tố có mối quan hệ tương tác lẫn nhau. Trong đó, các yếu tố kỹ thuật, tài chính và tổ chức quản lý giữ vai trò nền tảng, trong khi các yếu tố môi trường, pháp lý và dữ liệu hỗ trợ quá trình quản lý và ra quyết định bảo trì công trình. Đây là cơ sở cho các nghiên cứu định lượng tiếp theo nhằm kiểm định mức độ ảnh hưởng của từng nhóm nhân tố trong điều kiện thực tiễn.

**4. Kết luận**

Bài báo đã tổng hợp và hệ thống hóa các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu quả bảo trì công trình hồ chứa thủy lợi trên cơ sở phân tích các nghiên cứu trong và ngoài nước kết hợp với đặc thù điều kiện quản

lý công trình tại Việt Nam. Kết quả nghiên cứu cho thấy hiệu quả bảo trì là một vấn đề mang tính tổng hợp, chịu tác động đồng thời của nhiều nhóm nhân tố khác nhau liên quan đến kỹ thuật, tài chính, tổ chức quản lý, nhân lực, điều kiện môi trường và hệ thống dữ liệu phục vụ quản lý bảo trì.

Trên cơ sở tổng hợp tài liệu, nghiên cứu đã xác định bảy nhóm nhân tố chính ảnh hưởng đến hiệu quả bảo trì công trình hồ chứa thủy lợi, bao gồm: kỹ thuật – công nghệ, tài chính, tổ chức – quản lý, nhân lực, môi trường – khí hậu, pháp lý – chính sách và dữ liệu – hệ thống. Đồng thời, nghiên cứu cũng đề xuất hệ thống các biến quan sát tương ứng nhằm làm cơ sở cho việc xây dựng mô hình nghiên cứu và triển khai các nghiên cứu định lượng trong giai đoạn tiếp theo.

Kết quả nghiên cứu góp phần bổ sung cơ sở lý luận cho nghiên cứu về quản lý bảo trì công trình thủy lợi theo hướng tiếp cận quản lý tài sản và bảo trì dựa trên rủi ro. Bên cạnh đó, hệ thống các nhóm nhân tố và biến quan sát đề xuất có thể được sử dụng làm cơ sở cho việc xây dựng bảng hỏi khảo sát, phân tích các nhân tố ảnh hưởng và đánh giá mức độ tác động của từng nhóm yếu tố trong điều kiện thực tiễn tại Việt Nam.

Trong thời gian tới, cần tiếp tục thực hiện các nghiên cứu định lượng nhằm kiểm định mô hình nghiên cứu để xuất thông qua các phương pháp như Cronbach's Alpha, EFA, CFA và SEM để đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng nhóm nhân tố đến hiệu quả bảo trì công trình hồ chứa thủy lợi. □

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Bộ Xây dựng (2021), Nghị định số 06/2021/NĐ-CP ngày 26/01/2021 của Chính phủ về quản lý chất lượng, thi công xây dựng và bảo trì công trình xây dựng.
- [2] Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (2019), Thông tư số 05/2019/TT-BNNPTNT quy định chế độ, quy trình bảo trì tài sản kết cấu hạ tầng thủy lợi.
- [3] Chính phủ (2018), Nghị định số 114/2018/NĐ-CP ngày 04/9/2018 về quản lý an toàn đập, hồ chứa nước.
- [4] Ding, Shao-Lin, et al. "Developing a digital twin for dam safety management." *Computers and Geotechnics* 180 (2025): 107120.
- [5] Gouws, Leonie, and James Trevelyan. "Research on influences on maintenance management effectiveness." *Engineering Asset Management: Proceedings of the 1st World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM)*, 11-14 July 2006. London: Springer London, 2006. DOI: 10.1007/978-1-84628-814-2\_6.
- ICOLD, CIGB. "Dam safety management: Operational phase of the dam life cycle." *Bulletin* 154 (2017).
- [6] International Organization for Standardization (ISO). ISO 55000:2014 - Asset management - Overview, principles and terminology. Geneva: ISO, 2014.
- [7] Li, Yanan, et al. "Research and Application of Dam Safety

- Monitoring Information Management System Based on GIS Platform." *Conference on Sustainable Traffic and Transportation Engineering*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023.
- [8] Moubray, John. *Reliability-centered maintenance*. Industrial Press Inc., 2001.
- [9] Parida, Aditya, and Uday Kumar. "Maintenance performance measurement (MPM): issues and challenges." *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 12(3) (2006): 239–251.
- [10] Poukhonto, L. M. *Durability of concrete structures and constructions: silos, bunkers, reservoirs, water towers, retaining walls*. CRC Press, 2003.
- [11] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. *The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace*. UNESCO Publishing, Paris, 2024.
- [12] U.S. Army Corps of Engineers (USACE). *Engineering and Design: Safety of Dams – Policy and Procedures*. Engineer Regulation ER 1110-2-1156, 2014. [Online]. Available: [https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerRegulations/ER\\_1110-2-1156.pdf](https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerRegulations/ER_1110-2-1156.pdf)
- [13] Wang, Ligang, Xiaocong Yang, and Manchao He. "Research on safety monitoring system of tailings dam based on internet of things." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 322. No. 5. IOP Publishing, 2018.