

ĐÁNH GIÁ AN TOÀN ĐẦU MỐI HỒ ĐẬP THỦY LỢI THEO PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG NGẪU NHIÊN VÀ LÝ THUYẾT ĐỘ TIN CẬY

Nguyễn Lan Hương¹

Tóm tắt: Năm 2025, tỉnh Bình Thuận cũ (hiện nay là vùng phía đông của tỉnh Lâm Đồng) có 40 hồ chứa thủy lợi đang khai thác sử dụng trong đó có nhiều hồ được xây dựng ở thập niên 90 trong điều kiện về nguồn vốn, kỹ thuật thi công, năng lực thiết kế, tài liệu phục vụ tính toán còn nhiều hạn chế. Trong quá trình vận hành các hồ đập này đã gặp một số vấn đề ảnh hưởng đến an toàn hệ thống như: nhiều hồ chưa được bố trí kinh phí để đầu tư sửa chữa nâng cấp nên bị hư hỏng xuống cấp và tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn cao khi tích nước, khó khăn khi dự báo và cảnh báo lũ cho vùng hạ du khi hồ xả lũ chưa vì thiếu các trạm đo mưa đầu nguồn và hệ thống cảnh báo lũ hạ du, hành lang bảo vệ công trình bị lấn chiếm và xả rác vào hệ thống kênh, tùy tiện lấy nước tưới không xin phép. Do vậy, cần thiết phải đánh giá lại mức an toàn của các hồ đập hiện trạng. Nghiên cứu đã ứng dụng phương pháp mô phỏng ngẫu nhiên Monte carlo và lý thuyết độ tin cậy để xây dựng bài toán đánh giá an toàn cho hồ đập thủy lợi, các đánh giá định lượng về độ tin cậy của hệ thống được áp dụng cho hệ thống hồ chứa thủy lợi Đá Bạc tỉnh Bình Thuận cũ.

Từ khóa: Hàm tin cậy, độ tin cậy, mô phỏng ngẫu nhiên, biến ngẫu nhiên, xác suất sự cố.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các hồ chứa nước thủy lợi là công trình lợi dụng tổng hợp nguồn nước để cung cấp nước cho các ngành kinh tế quốc dân, cất giảm lũ, phát điện và cải thiện môi trường. Năm 2025, tỉnh Bình Thuận cũ (hiện nay là địa phận phía đông của tỉnh Lâm Đồng) có 40 hồ chứa thủy lợi đang khai thác sử dụng với dung tích toàn bộ 441.33 triệu m³ và tổng năng lực thiết kế 60.367 ha, trong đó có 18 hồ lớn, 10 hồ vừa và 12 hồ nhỏ; đã kiểm tra đánh giá an toàn 24 hồ trong đó có 8 hồ có nguy cơ mất an toàn cao; 5/40 đập cần có phương án ứng phó tình huống khẩn cấp (đập hồ: Đá Bạc, Sông Lũy, Sông Quao, Tân Lập và Trà Tân) và 19/40 hồ cần có phương án ứng phó thiên tai. Đặc điểm chung về hiện trạng các hồ chứa tại tỉnh Bình Thuận cũ: Phần lớn các hồ chứa thủy lợi đang khai thác được xây dựng ở thập niên 90 trong điều kiện về nguồn vốn, kỹ thuật thi công, năng lực thiết kế, tài liệu phục vụ tính toán còn nhiều hạn chế; Thời gian khai thác sử dụng qua nhiều năm nhưng nhiều hồ chưa được bố trí kinh phí để đầu tư sửa chữa, nâng cấp, có nhiều hồ chứa bị hư hỏng, xuống cấp, luôn tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn cao khi tích nước; Nhiều hồ chưa có trạm đo mưa đầu nguồn và hệ thống cảnh báo lũ hạ du nên khó khăn trong việc dự báo và cảnh báo lũ cho vùng hạ du khi hồ xả lũ; Lấn chiếm hành lang bảo vệ công trình, xả rác và nước thải ô nhiễm vào hệ thống kênh, tùy tiện lấy nước tưới không xin phép cũng là những nguyên nhân gây mất an toàn hệ thống hồ đập (Báo điện tử tỉnh Bình Thuận, 2025). Cần thiết phải đánh giá lại mức an toàn của các hồ đập theo các

tiêu chuẩn hiện tại và có các giải pháp phù hợp để nâng cao độ tin cậy cho hệ thống hồ đập tại đây.

Đa số các hồ đập ở nước ta được thiết kế theo phương pháp tất định, đánh giá ổn định bằng các hệ số an toàn, tuy nhiên khi áp dụng phương pháp này đã gặp một số hạn chế chính như: chưa xét đến yếu tố thời gian khi đánh giá an toàn hay chưa đánh giá được mức tin cậy của công trình trong tương lai, và chưa xem xét được đầy đủ mức ảnh hưởng của các biến ngẫu nhiên tác động lên hệ thống. Những năm gần đây, thế giới đã hình thành một hệ thống các phương pháp tính toán theo quan điểm mới là tính kết cấu xây dựng theo lý thuyết xác suất và lý thuyết độ tin cậy, như vậy những các hạn chế và tồn tại chính của của mô hình thiết kế tất định sẽ được làm rõ khi thiết kế theo mô hình ngẫu nhiên. Hiện nay đã có nhiều nước sử dụng phương pháp thiết kế ngẫu nhiên (cấp 1, cấp 2, cấp 3 và phương pháp Monte carlo) và các tiêu chuẩn về độ tin cậy để đánh giá an toàn cho công trình thủy lợi. Để tiếp cận với phương pháp thiết kế hiện đại và sử dụng hiệu quả các số liệu thí nghiệm, số liệu quan trắc về công trình, nghiên cứu đã xây dựng sơ bộ một quy trình đánh giá an toàn hệ thống hồ đập theo phương pháp mô phỏng ngẫu nhiên Monte carlo và lý thuyết độ tin cậy, ứng dụng bài toán để đánh giá an toàn cho hệ thống hồ chứa thủy lợi Đá Bạc tỉnh Bình Thuận cũ.

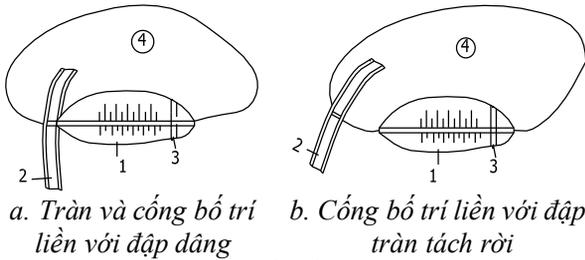
2. QUY TRÌNH ĐÁNH GIÁ AN TOÀN HỒ ĐẬP THEO PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG NGẪU NHIÊN VÀ LÝ THUYẾT ĐỘ TIN CẬY

Bài toán: Phân tích độ tin cậy một đầu mối hồ chứa thủy lợi gồm 3 hạng mục công trình: đập đất, tràn xả lũ và công ngầm được kết cấu theo sơ đồ nối tiếp theo phương pháp mô phỏng ngẫu nhiên.

¹Trường Đại học Thủy lợi

2.1. Phân tích hiện trạng hệ thống

Hình 1 là một trong nhiều cách bố trí mặt bằng cho các công trình trong hệ thống thủy lợi gồm: đập dâng, tràn xả lũ và cống ngầm, 3 công trình có thể được bố trí liền nhau hoặc tách rời tùy theo các điều kiện về thiết kế và thi công. Khi phân tích mối liên kết của các công trình theo các sơ đồ toán học, các công trình như trong hình 1 được liên kết với nhau theo hình thức ghép nối tiếp vì chỉ một công trình bị sự cố sẽ làm cho hệ thống bị sự cố.



a. Tràn và cống bố trí liền với đập dâng
b. Cống bố trí liền với đập, tràn tách rời
Hình 1. Bố trí đầu mối hồ chứa có 3 công trình:
1. Đập dâng; 2. Tràn xả lũ; 3. Cống ngầm; 4. Hồ chứa nước.

Trong quá trình làm việc khi các tải trọng và tác động vượt quá giới hạn chịu tải của công trình sẽ hình thành một cơ chế phá hoại dẫn đến công trình bị mất ổn định. Từ việc phân tích các hư hỏng sự cố có khả năng xảy ra với từng loại công trình, xây dựng các hàm tin cậy cho từng cơ chế sự cố.

2.2. Xây dựng hàm tin cậy cho từng cơ chế sự cố

Xác định các hàm sức chịu tải (R) và hàm tải trọng (S) tác dụng lên công trình từ các mô hình kết cấu của các công trình thủy lợi, các thuật toán tất định, các tiêu chuẩn và quy chuẩn thiết kế. Hàm trạng thái giới hạn hay gọi là hàm tin cậy Z của cơ chế sự cố như sau (Nguyễn Văn Mạo, 2014): $Z = R(X_i) - S(Y_j)$ (1)

$$\text{Hàm sức chịu tải: } R(X_i) = R(X_1, X_2, \dots, X_t) \quad (2);$$

$$\text{Hàm tải trọng: } S(Y_j) = S(Y_1, Y_2, \dots, Y_m) \quad (3)$$

Trong đó: X_i, Y_j là các biến ngẫu nhiên, các ảnh hưởng phát sinh từ môi trường nước, môi trường đất đá, môi trường nền và công trình, các tính chất của vật liệu xây dựng.

Trong các bài toán về an toàn hồ đập, các biến ngẫu nhiên X_i, Y_j thường gặp là: các mực nước hồ; kích thước công trình và thiết bị cơ khí; các chỉ tiêu cơ lý lực học của đất đá, vật liệu xây dựng công trình; các thông số về khí tượng thủy văn. Các biến này có thể là các biến xuất phát được tính toán từ n quan trắc, đo đạc thống kê, các thí nghiệm hiện trường và thí nghiệm trong phòng hoặc các BNN X_i, Y_j sẽ là hàm của nhiều biến ngẫu nhiên xuất phát (Nguyễn Văn Mạo, 2014).

$$X_i = f_i(X_i^1, X_i^2, \dots, X_i^n) \quad (4);$$

$$Y_j = f_j(Y_j^1, Y_j^2, \dots, Y_j^m) \quad (5)$$

2.3. Phân tích thống kê các biến ngẫu nhiên trong các hàm R, S

2.3.1. Kiểm định luật phân bố của các BNN X_i

Sử dụng tiêu chuẩn chuẩn khi bình phương để kiểm định luật phân bố xác suất của BNN X_i có n giá trị quan trắc, thí nghiệm. Các bước thực hiện như sau (Nguyễn Quý Hỷ, 2002).

(1) Giả thiết (H_0) luật phân bố xác suất $F(x)$ của BNN.

(2) Xác định các tham số trong hàm mật độ xác suất bằng phương pháp mô men hoặc phương pháp ước lượng hợp lý cực đại, số lượng tham số là s.

(3) Phân chia số khoảng: k ($6 \leq K \leq 20$), chiều rộng của mỗi khoảng d. $d = \frac{(X_{\max} - X_{\min})}{k}$ (6)

Trong đó: $X_{\max}; X_{\min}$: Giá trị lớn nhất và nhỏ nhất của chuỗi n số liệu quan sát về BNN;

(4) Đếm số quan sát rơi vào từng khoảng H và tính xác suất p_j trong khoảng j là:

$$(a_{j-1}, a_j), j = 1 \rightarrow k;$$

$$p_j = F(x = a_j) - F(x = a_{j-1}) \quad (7)$$

$$(5) \text{ Tính giá trị của } U \quad U = \sum_{j=1}^k \frac{(H_j - n \cdot p_j)^2}{n \cdot p_j} \quad (8)$$

(6) Tra bảng của phân bố (χ^2) xác định được giá trị: $\chi_{f,q}^2$;

Trong đó: $f = k - s - 1; q = 1 - \alpha$ với α : Xác suất nhầm, q: Mức đảm bảo.

$$(7) \text{ Kiểm tra điều kiện: } U \geq \chi_{f,q}^2 \quad (9)$$

- Nếu điều kiện (9) được thỏa mãn: Giả thiết H_0 bị từ chối tức là BNN đó không thỏa mãn luật phân bố xác suất lựa chọn ban đầu;

- Nếu điều kiện (9) không thỏa mãn: BNN có luật phân bố xác suất lý thuyết là $F(x)$ với xác suất nhầm α hay mức đảm bảo q.

2.3.2. Các đặc trưng thống kê của BNN X_i

TH1: Các biến ngẫu nhiên có dạng phân bố chuẩn $N(\mu_{X_i}, \sigma_{X_i}^2)$ (Nguyễn Quý Hỷ, 2002):

Kỳ vọng (μ_{X_i}) và độ lệch chuẩn (σ_{X_i}) của biến ngẫu nhiên X_i tính theo (10) và (11):

$$\mu_{X_i} = \bar{X}_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i \quad (10);$$

$$\sigma_{X_i} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_{X_i})^2} \quad (11);$$

Hàm mật độ xác suất $f(x)$ và hàm phân bố xác suất $F(x)$ của BNN X_i có dạng như (12) và (13):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}} \quad (12);$$

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) \cdot dx \quad (13)$$

TH2: Các BNN có luật phân bố xác suất bất kỳ

(1) Biến đổi các BNN có luật phân bố xác suất bất kỳ về luật phân bố chuẩn sao cho các giá trị của hàm mật độ f_{X_i} và hàm phân bố xác suất F_{X_i} ban đầu khác phân bố chuẩn bằng các giá trị tương ứng của một BNN có phân bố chuẩn tại điểm thiết kế $X^* (X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ (Mai Văn Công, 2019).

$$f_{X_i}(X_i^*) = \frac{1}{\sigma_{X_i}} \cdot \varphi\left(\frac{X_i^* - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}}\right) \quad (14);$$

$$F_{X_i}(X_i^*) = \Phi\left(\frac{X_i^* - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}}\right) \quad (15)$$

+ Tính các đặc trưng thống kê mới: $(\mu'_{X_i}; \sigma'_{X_i})$:

$$\mu'_{X_i} = X_i^* - \Phi^{-1}(F_{X_i}(X_i^*)) \cdot \sigma_{X_i} \quad (16);$$

$$\sigma'_{X_i} = \frac{\varphi(\Phi^{-1}(F_{X_i}(X_i^*)))}{f_{X_i}(X_i^*)} \quad (17);$$

Trong đó: Φ^{-1} : Là hàm ngược của hàm phân bố chuẩn.

(2) Giữ nguyên luật phân bố xác suất của BNN đó và mô phỏng ngẫu nhiên theo đúng luật phân bố xác suất đã được kiểm định trong mục 2.3.1.

Tuy nhiên, nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng: đa số các luật phân bố xác suất của các biến ngẫu nhiên, các hàm độ bền và hàm tải trọng tác động lên công trình xây dựng có dạng phân bố chuẩn hoặc gần với phân bố chuẩn (Nguyễn Văn Vi, 2018). Trong mục 2.3.2 nghiên cứu sẽ tập trung vào mô phỏng cho các biến và hàm ngẫu nhiên có dạng phân bố chuẩn.

2.4. Mô phỏng ngẫu nhiên các biến ngẫu nhiên trong hàm tin cậy Z

Sử dụng phương pháp Monte Carlo để mô phỏng hay tạo lập ra N biến ngẫu nhiên khi đã biết luật phân bố xác suất của BNN đó và X_i được mô phỏng theo hàm ngược của hàm phân bố xác suất $F(x)$:

$X_i = F^{-1}(R)$ (10), với R là số ngẫu nhiên có phân bố đều trong khoảng (0,1) (Nguyễn Quý Hỷ, 2002).

(1) Tạo các số ngẫu nhiên $(R_1, R_2, \dots, R_{12})$ có phân bố đều R (0,1)

(2) Mô phỏng các BNN

$(X_i^1, X_i^2, \dots, X_i^n); (Y_j^1, Y_j^2, \dots, Y_j^m)$ theo (18):

$$X_i^n = \sigma_{X_i^n} \cdot \left(\sum_{r=1}^{12} R_r - 6 \right) + \overline{X_i^n}; Y_j^m = \sigma_{Y_j^m} \cdot \left(\sum_{r=1}^{12} R_r - 6 \right) + \overline{Y_j^m} \quad (19)$$

(3) Tính các giá trị X_i, Y_j theo (4) và (5);

(4) Tính giá trị các hàm $R(X_i), S(Y_j)$ và Z theo (2), (3) và (1); được giá trị R_1, S_1 và Z_1

(5) Các tính toán từ (1) đến (4) được lặp lại N lần và nhận được N giá trị của các hàm R, S và Z.

Để kết quả tính độ tin cậy ổn định và hội tụ thì số lần mô phỏng (N) về biến ngẫu nhiên và hàm tin cậy tính theo (20) và N phụ thuộc vào sai số tương đối của kỳ vọng và độ lệch chuẩn cho trước $(\alpha_\mu, \alpha_{\sigma^2})$:

$$N = \frac{1}{\alpha_\mu^2}; N = \frac{2 + \alpha_{\sigma^2}^2}{\alpha_{\sigma^2}^2} \quad (20)$$

2.5. Độ tin cậy hệ thống

- Xác suất an toàn Pat và xuất sự cố Psc của mỗi cơ chế sự cố (Nguyễn Văn Vi, 2018).

$$P_{at} = \frac{m}{N} \quad (21);$$

$$P_{at} = P(Z > 0) = \phi(\beta) \quad (22);$$

$$P_{sc} = 1 - P_{at} \quad (23);$$

Trong đó: m là số lần $R > S$ hay số lần hàm tin cậy $Z > 0$; N là tổng số lần mô phỏng về hàm tin cậy Z; ϕ : hàm phân bố chuẩn; β : Chỉ số độ tin cậy.

- Độ tin cậy của phân tử công trình và hệ thống:

+ Xây dựng ma trận xác suất làm việc an toàn của các công trình như bảng 1, với giả thiết có n công trình trong hệ thống và m cơ chế sự cố xảy ra với từng công trình đó.

Bảng 1. Ma trận xác suất làm việc an toàn của các công trình

Sự cố	CT1	CT2	CT3	....	CTn
Sự cố 1	P_{11}	P_{21}	P_{31}	....	P_{n1}
Sự cố 2	P_{12}	P_{22}	P_{32}	....	P_{n2}
Sự cố 3	P_{13}	P_{23}	P_{33}	....	P_{n3}
Sự cố 4	P_{14}	P_{24}	P_{34}	....	P_{n4}
....
Sự cố m	P_{1m}	P_{2m}	P_{3m}	....	P_{nm}
ĐTC	P_{at}^{CT1}	P_{at}^{CT2}	P_{at}^{CT3}	....	P_{at}^{CTn}

+ Độ tin cậy của công trình i ($i=1, n$): P_{at}^{CTi} tính theo tập hợp các sự cố j có thể xảy ra với công trình, được xác định như xác suất của các biến ngẫu nhiên xung khắc và phù hợp với định lý cộng xác suất:

$$P_{at}^{CTi} = 1 - \sum_{j=1}^m (1 - P_{ij}) \quad (24);$$

Trong đó: P_{ij} là xác suất an toàn của từng cơ chế sự cố (sự cố j của công trình i) và được tính theo (18); m: số các sự cố có thể xảy ra với công trình i (Nguyễn Văn Vi, 2018).

+ Độ tin cậy của hệ thống làm việc theo sơ đồ ghép nối tiếp P_{at}^{HT} được xác định theo định lý nhân xác suất:

$$P_{at}^{HT} = \prod_{i=1}^n P_{at}^{CTi} \quad (25).$$

+ Hệ thống làm việc an toàn khi: $P_{at}^{HT} \geq [P_{at}^{HT}]$ (26);
trong đó: $[P_{at}^{HT}]$ là độ tin cậy cho phép của hệ thống.

3. PHÂN TÍCH ĐỘ TIN CẬY CỦA ĐÀU MỐI HỒ CHỨA THỦY LỢI ĐÁ BẠC

3.1. Hiện trạng hồ chứa thủy lợi Đá Bạc

Hồ chứa nước Đá Bạc là công trình cấp III được xây dựng hoàn thành năm 1998 tại xã Vĩnh Hảo, huyện Tuy Phong, tỉnh Bình Thuận cũ (hiện nay là phía đông tỉnh Lâm Đồng). Hồ chứa có dung tích 8.9 triệu m³ với nhiệm vụ: cung cấp nước tưới cho 394 ha đất canh tác, cấp nước sinh hoạt và công nghiệp cho xã Vĩnh Hảo 1.700m³/ng.đêm và giảm lũ cho vùng hạ du. Các công trình đầu mối hồ chứa gồm: đập đất, tràn xả lũ và cống lấy nước dưới đập (Công ty TNHH Tư vấn Trường Đại học Thủy lợi, 2019).

Sau một thời gian vận hành khai thác một số hạng mục công trình đã xuất hiện những hư hỏng, xuống cấp đe dọa đến sự an toàn của hồ đập: một số bộ phận của cụm đầu mối đã bị hư hỏng xuống cấp và cần có các đánh giá định lượng về mức an toàn của các công trình

này, cụ thể như sau:

- Với đập đất: kiểm tra nước tràn đỉnh đập; tính ổn định trượt mái thượng lưu và trượt mái hạ lưu; Xói mái hạ lưu và lượng mất nước của hồ chứa.

- Với tràn xả lũ: kiểm tra khả năng tháo lũ của tràn.

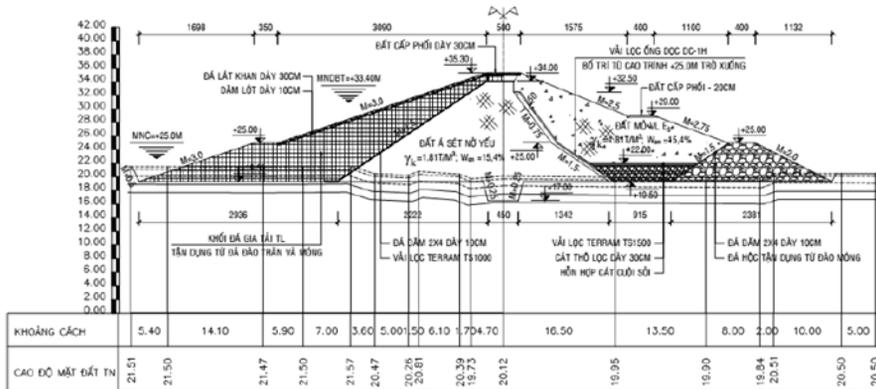
- Với cống ngầm: kiểm tra thấm dọc theo mang cống.

3.2. Phân tích an toàn đầu mối hồ chứa Đá Bạc

3.2.1. Số liệu tính toán

- Với các số liệu thu thập được từ hồ Đá Bạc: các số liệu quan trắc, số liệu từ hồ sơ thiết kế, hồ sơ thi công, hoàn công, các đánh giá hiện trạng và sửa chữa nâng cấp công trình đầu mối trong các thời kỳ. Để mô phỏng phương pháp tính nghiên cứu đã giả định các BNN có luật phân bố chuẩn và xác định các đặc trưng thống kê về kỳ vọng (μ), độ lệch chuẩn (σ) như các bảng 2, 3, 4, 5.

- Các tính toán mô phỏng cho 2 trường hợp mực nước hồ: MNDBT + 33.4 và MNLTk + 35.01.



Hình 2. Mặt cắt ngang đập đất Đá Bạc (Công ty TNHH Tư vấn Trường Đại học Thủy lợi, 2019)

Bảng 2. Các BNN có phân bố chuẩn để tính ĐTC của sự cố nước tràn đỉnh

Tên BNN	BNN	μ	σ
Cao độ đỉnh đập	Z_{dd} (m)	35.30	0.2
Cao độ mực nước hồ	Z_{m1} (m)	33.4	0.3
	Z_{m2} (m)	35.01	0.3
Cao độ đáy đập	Z_o (m)	19.5	-
Vận tốc gió	V_1 (m/s)	19,90	2
	V_2 (m/s)	13,80	2
Chiều dài đà sóng	D2 (m)	1300	20
	D2 (m)	1500	25
Góc của hướng gió so với phương vuông góc với tuyến đập.	α	0	-
Chiều cao sóng leo	h_{s11} (m)	0.82	0.2
	h_{s12} (m)	0.66	0.15
Gia tốc trọng trường	g (m ² /s)	9.81	-

Bảng 3. Các BNN có phân bố chuẩn để tính ĐTC của sự cố xói mái và chân khay đập

Tên BNN	BNN	μ	σ
Chiều dài trung bình đáy đập	L_d (m)	100	5
Hệ số trung bình mái thượng lưu	m_1	3.0	0.25
Hệ số trung bình mái hạ lưu	m_2	2.63	0.25
Chiều dày trung bình của tầng thấm lớp 1	T1 (m)	4	0.4
Chiều dày trung bình của tầng thấm lớp 2	T2 (m)	5	0.5
$Z_{mn1} = 33.4$	J_{ra}^{max}	0.35	0.03
	$J_{chânkhay}^{max}$	0.16	0.01
$Z_{mn2} = 35.01$	J_{ra}^{max}	0.47	0.04
	$J_{chânkhay}^{max}$	0.18	0.02
Gradient thấm cho phép tại cửa ra	$[J]^{ra}$	0.8	-
Gradient thấm cho phép của vật liệu làm chân khay	$[J]_{chânkhay}$	0.85	-

Bảng 4. Các BNN có phân bố chuẩn để tính ĐTC của sự cố trượt mái thượng lưu, hạ lưu

Góc ma sát trong của các khối đất đắp, lăng trụ và nền			Lực dính đơn vị của các khối đất đắp và nền			Dung trọng của lớp đất đắp, lăng trụ và nền			Hệ số thấm đập, lăng trụ và nền	
BNN	μ	σ	BNN	μ	σ	BNN	μ	σ	BNN	μ
φ_I (độ)	25.26	3	$C_I(KN/m^2)$	14.9	2.235	$\gamma_I(KN/m^3)$	17.8	1.7	$K_I(m/s)$	1.10×10^{-6}
φ_{II} (độ)	25.26	3	$C_{II}(KN/m^2)$	12.5	0.975	$\gamma_{II}(KN/m^3)$	15.1	1.5	$K_{II}(m/s)$	1.5×10^{-7}
φ_{III} (độ)	21.26	2	$C_{III}(KN/m^2)$	11.5	0.975	$\gamma_{III}(KN/m^3)$	16.4	1.6	$K_{III}(m/s)$	1.1×10^{-7}
φ_{da} (độ)	38	4	$C_{nen1}(KN/m^2)$	13.32	1.998	$\gamma_{da}(KN/m^3)$	22	2.2	$K_{da}(m/s)$	2.0×10^{-2}
φ_{nen1} (độ)	19.6	2	$C_{nen2}(KN/m^2)$	15.73	2.3595	$\gamma_{nen1}(KN/m^3)$	19.8	1.9	$K_{nen1}(m/s)$	1×10^{-6}
φ_{nen2} (độ)	19.4	2				$\gamma_{nen2}(KN/m^3)$	19.6	1.9	$K_{nen2}(m/s)$	8×10^{-7}

3.2.2. Độ tin cậy của hệ thống

(1) Kết quả tính toán độ tin cậy hồ đập Đá Bạc

- Hiện nay nước ta chưa có tiêu chuẩn thiết kế công trình thủy lợi theo lý thuyết độ tin cậy, do vậy nghiên cứu sẽ lấy xác suất sự cố cho phép của hệ thống theo mức bảo đảm phòng lũ thiết kế với công trình hồ đập cấp III là $P = 1.5\%$, tức là

$[P_f^{HT}] = 0.015$ và độ tin cậy cho phép của hệ thống $[P_{at}^{HT}] = 0.985; [\beta] = 2.17$

- Giả thiết n công trình trong hệ thống (đập, tràn, cống) đều đóng vai trò quan trọng như nhau và làm việc theo sơ đồ ghép nối tiếp, độ tin cậy cho phép của mỗi công trình (Nguyễn Văn Vi, 2018).

Bảng 5. Các biến ngẫu nhiên tính độ tin cậy của tràn và cống ngầm

Tên BNN	BNN	μ	σ
Cao độ ngưỡng tràn	Z_{dd}	30.9	0.25
Lưu lượng xả lũ thiết kế	$Q_{tk}(m^3)$	381.52	6.5
Cao độ mực nước hồ	Z_{mn1} (m)	33.4	0.3
	Z_{mn2} (m)	35.01	0.3
Số khoang tràn	n	16	-
Bề rộng 1 khoang tràn	b (m)	1.9	-
Hệ số lưu lượng của tràn	m	0.373	0.04
Hệ số co hẹp bên	ε	0.907	0.09
Chiều dài thân cống ngầm	L_c (m)	60.5	1
Gradient thấm cho phép của đất sét đắp xung quanh thân cống	$[J]_{cp}$	4	-
Cao độ MNN ở đỉnh cuối cống	Z_2 (m)	+25	0.3

$$[P_{at}^s] = \sqrt[n]{[P_{at}^{HT}]} = 0.99799; [\beta] = 2.57$$

- Các tính toán toán mô phỏng biến ngẫu nhiên và hàm tin cậy được thực hiện N = 65000 lần để kết quả tính độ tin cậy của các cơ chế sự cố hội tụ như bảng 6.

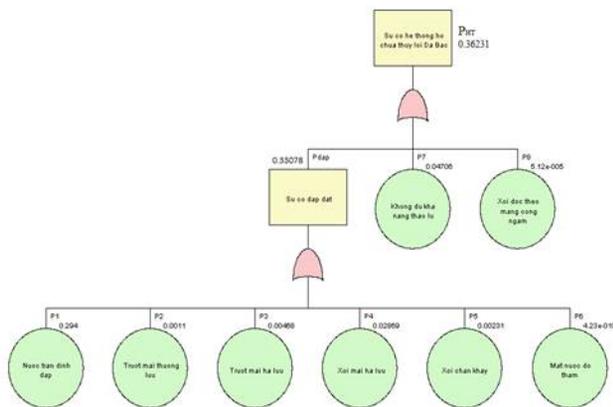
- Độ tin cậy của hệ thống được tính bằng phần mềm Open FTA như hình 6 và các kết quả được thống kê vào bảng 7.

Bảng 6. Hàm tin cậy và xác suất sự cố của các cơ chế sự cố
(Tên và ký hiệu của các BNN trong các hàm tin cậy Z bảng 6 như trong bảng 2, 3, 4, 5)

TT	Sự cố	Hàm tin cậy Z	Xác suất sự cố P _{sc}		Ảnh hưởng đến sự cố hệ thống %
			Z _{mn1} =33.4m	Z _{mn2} = 35.01m	
1	Nước tràn đỉnh đập	$Z_1 = Z_{dd} - \left(Z_{mn} + 2.10^{-6} \cdot \frac{V^2 \cdot D}{g \cdot (Z_{mn} - Z_o)} \cdot \cos\alpha + K \cdot h_{s1\%} \right)$	0.00022	0.29400	81.15%
2	Trượt mái thượng lưu	$Z_{2,3} = \frac{\sum_{i=1}^m (c \cdot b_n + (W_n - u_n \cdot b_n) \cdot \tan \varphi)}{\left(1 + \frac{\tan \alpha_n \cdot \tan \varphi}{K_{at}} \right) \cdot \cos \alpha_n}$ $-\left(\sum_{i=1}^m W_n \cdot \sin \alpha_n \right)$	0.00061	0.00110	0.30%
3	Trượt mái hạ lưu		0.00259	0.00468	1.29%
4	Xói mái hạ lưu	$Z_4 = [J]^{ra} - J_{ra}^{max}$	0.00191	0.02869	4.00%
5	Xói chân khay	$Z_5 = [J]^{ch\grave{a}n\grave{a}y} - J_{ch\grave{a}n\grave{a}y}^{max}$	9.25E-05	0.00231	0.64%
6	Hồ chứa bị thấm mất nước	$Z_6 = K \% \cdot V_h^{MNDBT} - Q_1 \cdot T$	5.38E-13	4.23E-10	0.005%
7	Khả năng tháo lũ của tràn	$Z_7 = Q_k - \sigma_n \cdot m \cdot \varepsilon \cdot \sum b \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{\frac{3}{2}}$	0.00342	0.04706	12.60%
8	Xói dọc theo mang cống ngầm	$Z_8 = [J]_{cp} - \frac{Z_{mn} - Z_2}{L_c}$	6.71E-06	5.12E-05	0.015%

Bảng 7. Độ tin cậy của hệ thống hồ đập Đá Bạc

Công trình	Z _{mn1} =33.4m			Z _{mn2} = 35.01m			Ảnh hưởng đến sự cố hệ thống %
	P _{sc}	P _{at}	β	P _{sc}	P _{at}	β	
Đập đất	0.00542	0.99458	2.55	0.66922	0.33078	0.44	90.10%
Tràn xả lũ	0.00342	0.99658	2.70	0.95294	0.04706	1.67	9.882%
Cống ngầm	0.00001	0.99999	4.35	0.99995	0.00005	3.88	0.018%
Hệ thống	0.00882	0.99118	2.37	0.36231	0.63769	0.35	



Hình 6. Xác suất sự cố hệ thống hồ thủy lợi Đá Bạc (OPEN FTA)

(2) Phân tích các kết quả tính độ tin cậy

- Khi cao độ mực nước hồ +33.4m (MNDBT), cụm đầu mỗi hồ Đá Bạc là một hệ thống nối tiếp và làm việc an toàn theo tiêu chuẩn về ĐTC với $P_{at}^{HT} = 0.98919 > [P_{at}^{HT}] = 0.985$ hay

$\beta^{HT} = 2.37 \geq [\beta] = 2.17$. Các công trình trong cụm đầu mỗi gồm: đập đất, tràn và cống có xác suất an toàn lần lượt là:

$P_{at}^{đập} = 0.99458; P_{at}^{tr\grave{a}n} = 0.99658; P_{at}^{cong} = 0.999993$ đều lớn hơn độ tin cậy cho phép $[P_{at}] = 0.99799$.

- Khi mực nước hồ +35.01m (MNLTk), hệ thống có khả năng bị sự cố và độ tin cậy của hệ thống thấp hơn nhiều so với ĐTC cho phép

$P_{at}^{HT} = 0.63769 < [P_{at}^{HT}] = 0.985$, lúc này chỉ số độ tin cậy của hệ thống là $\beta^{HT} = 0.35$. Nếu đập đất bị sự cố thì đây là công trình có ảnh hưởng nhiều nhất đến an toàn của hệ thống hồ đập (90.1%), 2 công trình còn lại là tràn xả lũ và cống ngầm có ảnh hưởng không đáng kể, lần lượt là 9.882% và 0.018%

+ Đập đất có chỉ số độ tin cậy nhỏ hơn nhiều so với chỉ số độ tin cậy cho phép xây đập $\beta_{dap} = 0.44 < [\beta_{dap}] = 2.57$ và đập có khả năng xảy ra sự cố do nguyên nhân chính là nước tràn đỉnh đập (81.15%), 5 cơ chế sự cố còn lại của đập đất có mức độ ảnh hưởng nhỏ không đáng kể ($\leq 4\%$) đến an toàn đập dâng.

+ Trong nghiên cứu này, coi độ tin cậy của tràn là độ tin cậy của cơ chế sự cố về khả năng tháo lũ, $\beta_{tran} = 1.67 < [\beta_{tran}] = 2.57$, đây là sự cố về khả năng tháo của tràn tính theo LTĐTC. Tuy nhiên, khi tính theo các tiêu chuẩn tắt định thì $Q_{tt} = 381.52$ cũng xấp xỉ lưu lượng cần xả lũ thiết kế $Q_{max} = 379.62$ nên có thể coi là tràn có đủ khả năng tháo được lũ thiết kế mặc dù chỉ số độ tin cậy không cao.

+ Cống ngầm có độ tin cậy cao khi $\beta_{van} = 3.88 > [\beta_{cong}] = 2.57$ và làm việc an toàn trong các trường hợp tính toán, sự cố thấm dọc theo mang cống có ảnh hưởng không đáng kể đến ĐTC của hệ thống (0.015%).

3.3. Đề xuất phương án nâng cấp hệ thống hồ thủy lợi Đá Bạc

Từ các phân tích kết quả tính toán trong mục 3.2 và các kết quả tắt định trong hồ sơ nâng cấp hệ thống Đá Bạc, cần thiết phải nâng cấp hệ thống Đá Bạc để đảm bảo an toàn cho đập đất (Công ty TNHH Tư vấn Trường Đại học Thủy lợi, 2019).

- Phương án 1: Giữ nguyên cao trình đỉnh đập, nâng cấp mở rộng tràn xả lũ. Để hạ mực nước lũ xuống thấp sao cho nước không tràn đỉnh đập, thì phải mở rộng thêm tràn xả lũ tối thiểu là 35m nhưng đây là phương án không khả thi vì: toàn bộ địa chất tuyến tràn xả lũ là

đá cứng ít nứt nẻ, phía vai trái tràn là gò đồi đã xây dựng nhà quản lý hồ, phía vai phải tràn tựa vào vai núi nên nên mở rộng tràn hiện hữu sẽ rất khó khăn và tốn kém về kinh phí.

- Phương án 2: Giữ nguyên kích thước tràn, nâng cao trình đỉnh đập lên cao độ +37.21m và phải đắp đập với khối lượng đắp lớn, đập cao thêm 1.82m, hệ thống cửa van của tràn và thiết bị phải được thay thế, tốn kém về kinh phí nên phương án này không khả thi.

- Phương án 3: Giữ nguyên kích thước tràn và nâng cao trình đỉnh đập lên cao độ +36.2 (đắp đập cao thêm 0.9m) và kết hợp làm tường chắn sóng bằng BTCT cao 0.6m, điều chỉnh quy trình vận hành tạo dung tích phòng lũ của hồ chứa. Đây là phương án phù hợp với hiện trạng hồ Đá Bạc và có tính khả thi cao vì: Vật liệu đất sử dụng để đắp sẵn có, cự ly vận chuyển ngắn; Mái hạ lưu đập bị hư hỏng nghiêm trọng nên cần phải xử lý các hố xói cục bộ xong sẽ tiến hành đắp áp trực hạ lưu kết hợp nâng đập cao đập lên 0.90m, chiều cao nâng đập 0.9m không lớn nên thi công thuận lợi. Đây là phương án phù hợp để nâng cấp hồ đập Đá Bạc.

4. KẾT LUẬN

Từ việc giới thiệu hiện trạng hồ đập tỉnh Bình Thuận cũ (phía đông tỉnh Lâm Đồng) và sơ bộ phân tích các hạn chế của phương pháp tắt định khi thiết kế công trình thủy lợi, nghiên cứu đã xây dựng bài toán đánh giá an toàn hồ đập theo phương pháp mô phỏng ngẫu nhiên Monte carlo và đây có thể coi là một quy trình đơn giản tính độ tin cậy của hệ thống hồ đập thủy lợi theo lý thuyết độ tin cậy cấp độ III. Với các số liệu thu thập được, nghiên cứu đã ứng dụng quy trình đánh giá để phân tích an toàn cho đầu mối hồ thủy lợi Đá Bạc trong đó các mô phỏng ngẫu nhiên được thực hiện cho các biên và hàm ngẫu nhiên có phân bố chuẩn và đề xuất một số phương án nâng sửa chữa cho hệ thống. Các kết quả trong nghiên cứu là tài liệu tham khảo cho công tác xây dựng các tiêu chuẩn về độ tin cậy cho công trình thủy và các thiết kế, nâng cấp sửa chữa, quản lý vận hành an toàn công trình thủy lợi ở Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Báo điện tử tỉnh Bình Thuận (2025), *Đánh giá hiện trạng công trình thủy lợi mùa mưa lũ 2025*.
 Nguyễn Văn Mạo (chủ biên) và nnk (2014), *Cơ sở tính độ tin cậy an toàn đập*, Nhà xuất bản Xây Dựng.
 Nguyễn Quý Hỷ (2002), *Phương Pháp mô phỏng số Monte Carlo*, Nhà xuất bản Đại Học Quốc Gia Hà Nội.
 Nguyễn Văn Vi (2018), *Độ tin cậy của công trình xây dựng*, Nhà xuất bản Khoa học tự nhiên và công nghệ.
 Mai Văn Công và Lê Hải Trung (2019), *Phân tích độ tin cậy trong kỹ thuật công trình biển*, Nhà xuất bản Bách Khoa.
 Công ty TNHH Tư vấn Trường Đại học Thủy lợi (2019), *Báo cáo đánh giá an toàn đập: công trình hồ chứa nước Đá Bạc tỉnh Bình Thuận*.

Abstract:
**SAFETY ASSESSMENT OF IRRIGATION DAMS USING STANDARD
SIMULATION METHOD AND RELIABILITY THEORY**

In 2025, the old Binh Thuan province (now the eastern part of Lam Dong province) has 40 irrigation reservoirs in operation, many of which were built in the 90s under conditions of limited capital, construction techniques, design capacity, and calculation documents. During the operation of these dams, a number of problems have affected the safety of the system, such as: many reservoirs have not been allocated funds for investment in repair and upgrading, so they are damaged and have a high potential risk of insecurity when storing water; difficulties in forecasting and warning of floods for downstream areas when reservoirs have not yet discharged floodwaters due to the lack of upstream rain gauges and downstream flood warning systems; the protection corridor of the works is encroached upon and garbage is dumped into the canal system; irrigation water is arbitrarily taken without permission. Therefore, it is necessary to re-evaluate the safety level of the current dams. The study applied Monte Carlo stochastic simulation method and reliability theory to build the safety assessment problem for irrigation dams, quantitative assessments of system reliability were applied to the Da Bac irrigation reservoir system in old Binh Thuan province.

Keywords: Confidence function, confidence, random simulation, random variables, probability of failure.

Ngày nhận bài: 17/9/2025

Ngày chấp nhận đăng: 27/11/2025