



Original Article

Developing Operation Rules for Reservoirs in the Upper Da River Basin Using Multi-source Remote Sensing Data

Khuong Van Hai^{1,2}, Dao Ba Huy², Nguyen Tien Giang^{2,*}

¹*Vietnam Institute of Water Resources, 171 Tay Son, Trung Liet, Hanoi, Vietnam*

²*Faculty of Hydrometeorology and Oceanography,*

VNU University of Science, 334 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi, Vietnam

Received 25th August 2025

Revised 15th October 2025; Accepted 30th October 2025

Abstract: In transnational river basins, upstream hydropower projects and multipurpose reservoirs have a strong impact on downstream flow regimes, directly affecting agricultural production, fisheries, waterway transport, water security, and environmental and ecological issues. The challenge is that most upstream countries do not fully disclose reservoir operation data. This paper presents the method and results of applying multi-source remote sensing data (Sentinel-1, Sentinel-2, DEM) to restore and update reservoir parameters as well as reservoir operation parameters in the upper Da River basin. Integrating the parameters into the VIC-RES model has significantly improved the quality of simulated streamflow to Lai Chau Reservoir in Vietnam. Specifically, the NSE evaluation indicators increased from 0.59 to 0.83–0.84; Pbias decreased from 40% to 15–19%; KGE increased from 0.54 to 0.72–0.73. The proposed method not only improves the performance of the simulation model but also provides a feasible approach for transboundary water resources management and can be extended to many other basins.

Keywords: Reservoir operating rule curves, Da River basin, data-scarce river basin.

* Corresponding author.

E-mail address: giangnt@vnu.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5389>

Xây dựng quy trình vận hành các hồ chứa vùng thượng lưu vực sông Đà sử dụng dữ liệu ảnh viễn thám đa nguồn

Khương Văn Hải^{1,2}, Đào Bá Huy², Nguyễn Tiền Giang^{2,*}

¹*Viện Khoa học Thủy lợi Việt Nam, 171 Tây Sơn, Trung Liệt, Hà Nội, Việt Nam*

²*Khoa Khí tượng Thủy văn và Hải dương học, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội, 334 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 25 tháng 8 năm 2025

Chỉnh sửa ngày 15 tháng 10 năm 2025; Chấp nhận đăng ngày 30 tháng 10 năm 2025

Tóm tắt: Trên các lưu vực sông liên quốc gia, các công trình thủy điện và hồ chứa đa mục tiêu phía thượng lưu có tác động mạnh mẽ chế độ dòng chảy hạ lưu, ảnh hưởng trực tiếp đến sản xuất nông nghiệp, thủy sản, giao thông thủy, an ninh nguồn nước và cả các vấn đề môi trường – sinh thái. Tuy nhiên, khó khăn lớn nhất hiện nay là hầu hết các quốc gia thượng nguồn không công khai đầy đủ dữ liệu vận hành hồ chứa. Bài báo này trình bày phương pháp và kết quả ứng dụng dữ liệu viễn thám đa nguồn (Sentinel-1, Sentinel-2, DEM) để khôi phục và cập nhật các thông số hồ chứa cũng như các thông số vận hành hồ chứa trong bối cảnh thiếu thông tin, số liệu ở thượng lưu vực sông Đà. Việc tích hợp các thông số vào mô hình VIC-RES đã giúp cải thiện rõ rệt chất lượng mô phỏng dòng chảy đến hồ Lai Châu ở Việt Nam. Cụ thể, các chỉ tiêu đánh giá NSE tăng từ 0,59 lên 0,83–0,84; Pbias giảm từ 40% xuống 15–19%; KGE tăng từ 0,54 lên 0,72–0,73. Phương pháp đề xuất không chỉ nâng cao hiệu suất mô hình mô phỏng mà còn cung cấp hướng tiếp cận khả thi cho quản lý nguồn nước xuyên biên giới và có thể mở rộng áp dụng cho nhiều lưu vực khác.

Từ khóa: Quy trình vận hành hồ chứa, thượng lưu vực sông Đà, lưu vực thiếu dữ liệu.

1. Giới thiệu

Quản lý tài nguyên nước xuyên biên giới là một trong những thách thức lớn mà các quốc gia có chung lưu vực sông phải đối mặt, đặc biệt trong bối cảnh biến đổi khí hậu, gia tăng dân số và nhu cầu sử dụng nước ngày càng cao [1, 2]. Trên các lưu vực sông liên quốc gia, các công trình thủy điện và hồ chứa đa mục tiêu phía thượng lưu có tác động mạnh mẽ chế độ dòng chảy hạ lưu, ảnh hưởng trực tiếp đến sản xuất nông nghiệp, thủy sản, giao thông thủy, an ninh nguồn nước và cả các vấn đề môi trường – sinh thái [3]. Thông tin về quy trình vận hành hồ chứa thượng nguồn đóng vai trò hết sức quan

trọng trong quản lý tài nguyên nước xuyên biên giới, liên quan trực tiếp đến quyền lợi và trách nhiệm của các bên liên quan trong sử dụng, phân bổ và bảo vệ nguồn nước chung. Quy trình vận hành hồ chứa bao gồm các nguyên tắc, quy trình và thông số điều tiết mực nước, dung tích trữ và lưu lượng xả nhằm đáp ứng các mục tiêu như phát điện, cấp nước, phòng chống lũ, bảo đảm dòng chảy môi trường hoặc các yêu cầu đa mục tiêu khác [4]. Trong điều kiện một lưu vực sông có nhiều quốc gia cùng chia sẻ, nắm được các quy trình vận hành của các hồ chứa phía thượng lưu giúp quốc gia nằm ở hạ lưu dự báo chính xác hơn dòng chảy, chủ động điều tiết hồ chứa nội địa, lập kế hoạch sản xuất và ứng phó với thiên tai.

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: giangnt@vnu.edu.vn

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5389>

Tuy nhiên, khó khăn lớn nhất hiện nay là hầu hết các quốc gia thượng nguồn không công khai đầy đủ dữ liệu vận hành hồ chứa. Điều này bắt nguồn từ nhiều nguyên nhân, bao gồm yếu tố an ninh nguồn nước, lợi ích kinh tế, thiếu cơ chế chia sẻ dữ liệu quốc tế hoặc đơn giản là không có quy định bắt buộc [1, 2]. Trong nhiều trường hợp, dữ liệu mực nước, lưu lượng xả và kế hoạch điều tiết được coi là thông tin nhạy cảm, chỉ lưu hành nội bộ. Điều này khiến các quốc gia hạ lưu gặp khó khăn nghiêm trọng trong dự báo và quản lý nguồn nước. Ngay cả khi có các thỏa thuận chia sẻ thông tin, việc dữ liệu đến chậm hoặc thiếu độ tin cậy vẫn là vấn đề thường xuyên xảy ra. Trong bối cảnh đó, viễn thám nổi lên như một công cụ quan trọng, mở ra khả năng giám sát mực nước và dung tích hồ chứa từ xa [5, 6] mà không phụ thuộc vào dữ liệu thực đo ở phía thượng nguồn. Công nghệ viễn thám quang học và radar hiện nay cho phép đo đặc diện tích mặt nước hồ chứa theo thời gian thực hoặc gần thời gian gần thực, với tần suất cao và phạm vi rộng. Kết hợp với dữ liệu độ cao địa hình đáy hồ (bathymetry) hoặc quan hệ dung tích – diện tích, có thể ước tính được dung tích chứa của hồ tại từng thời điểm. Ngoài ra, các cảm biến radar xuyên mây và đo cao vệ tinh (altimetry) còn cung cấp thông tin mực nước mặt hồ ngay cả trong điều kiện thời tiết xấu. Đây là bước tiến lớn trong giám sát hồ chứa xuyên biên giới, đặc biệt tại các khu vực có xung đột lợi ích hoặc hạn chế hợp tác về dữ liệu. Ở Việt Nam những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã ứng dụng công nghệ viễn thám để giám sát hoạt động của các hồ chứa thượng nguồn trên các lưu vực sông xuyên biên giới. Các công trình của Trần Mạnh Cường (2025) [7] và Trần Anh Phương (2020) [8] đã chứng minh tiềm năng lớn của dữ liệu vệ tinh trong việc theo dõi biến động diện tích mặt nước, qua đó suy luận mực nước và thể tích hồ chứa tại các khu vực thiếu dữ liệu quan trắc. Các nghiên cứu này sử dụng ảnh vệ tinh trên nền tảng Google Earth Engine (GEE) để xây dựng chuỗi thời gian biến động diện tích mặt nước, góp phần cung cấp thông tin hữu ích cho công tác dự báo dòng chảy về Việt Nam. Tuy nhiên, các nghiên cứu chủ yếu tập trung vào việc nhận diện chu kỳ

tích và xả nước của từng hồ riêng lẻ, mà chưa làm rõ mức độ đóng góp cụ thể của kết quả giám sát này đối với bài toán tính toán mô phỏng dòng chảy xuyên biên giới.

Một câu hỏi nghiên cứu quan trọng đặt ra là: Liệu có thể suy ra quy trình vận hành hồ chứa chỉ từ dữ liệu viễn thám hay không? Đây là vấn đề vừa mang tính khoa học vừa mang ý nghĩa thực tiễn cao. Về nguyên tắc, dữ liệu viễn thám cung cấp chuỗi thời gian về mực nước và dung tích, qua đó phản ánh gián tiếp các quyết định điều tiết của chủ hồ chứa. Nếu phân tích các chuỗi dữ liệu đủ dài và kết hợp với thông tin khí tượng - thủy văn (lượng mưa, dòng chảy vào hồ, nhu cầu điện,...), có thể nhận diện được các mô hình xả - tích đặc trưng theo mùa hoặc theo sự kiện. Từ đó, một dạng “quy tắc vận hành” có thể được suy luận và mô hình hóa. Tuy nhiên, quá trình này đối mặt với một số thách thức lớn. Thứ nhất, dữ liệu viễn thám, dù ngày càng chính xác, vẫn có sai số do ảnh hưởng của mây, độ phân giải không gian – thời gian lớn, và các yếu tố kỹ thuật khác. Thứ hai, quy trình vận hành hồ chứa thực tế thường không hoàn toàn cố định, mà thay đổi linh hoạt tùy theo điều kiện thời tiết, tình hình nhu cầu điện, hoặc yêu cầu phòng lũ, cấp nước. Thứ ba, việc suy luận quy tắc vận hành cần kết hợp nhiều nguồn dữ liệu bổ trợ và các phương pháp phân tích thống kê và mô hình thủy văn để giảm bất định.

Một hướng nghiên cứu mới đang thu hút sự quan tâm của các nhà thủy văn học là xây dựng quy trình vận hành hồ chứa dựa trên dữ liệu viễn thám. Quy trình vận hành là yếu tố then chốt trong việc tích hợp hồ chứa vào các mô hình thủy văn bề mặt, quyết định cách điều tiết dòng chảy giữa các mùa và trong các tình huống cực đoan. Từ góc độ quản lý tài nguyên nước, phương pháp này đặc biệt hữu ích cho các quốc gia ở hạ lưu, nơi việc tiếp cận dữ liệu vận hành từ thượng nguồn thường bị hạn chế. Bằng cách khai thác các dữ liệu, thông tin viễn thám như mực nước, diện tích mặt hồ hoặc dòng xả, các quốc gia hạ lưu có thể chủ động hơn trong việc điều hành các công trình thủy lợi nội địa, nâng cao độ chính xác của dự báo lũ, hạn và các rủi ro liên quan. Ngoài ra, các kết quả thu được còn có thể đóng vai trò là bằng chứng khoa học trong các cuộc đàm phán

quốc tế, thúc đẩy minh bạch thông tin và tăng cường hợp tác quản lý tài nguyên nước xuyên biên giới.

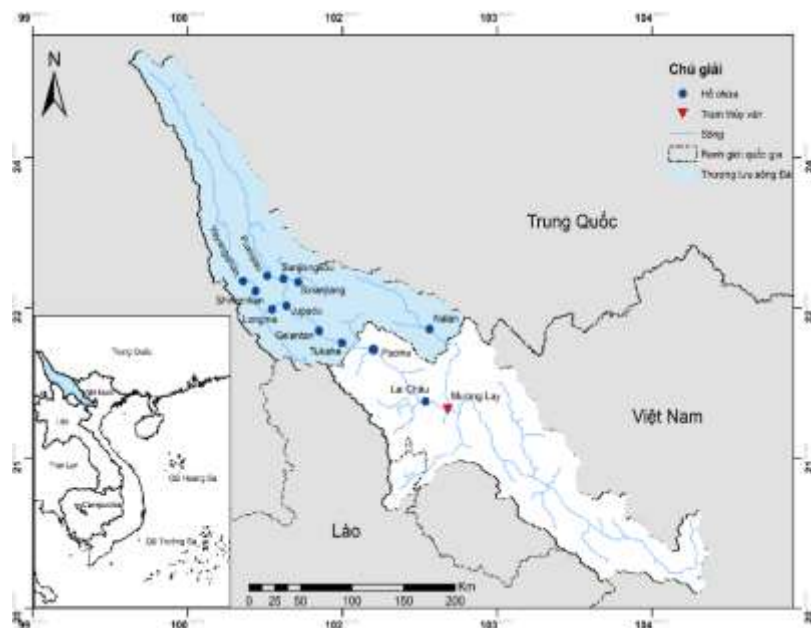
Do đó, mục tiêu của nghiên cứu này gồm: i) Phát triển phương pháp xây dựng quy trình vận hành từ các chuỗi dữ liệu viễn thám; và ii) Đánh giá độ tin cậy của quy trình vận hành tìm được thông qua so sánh với dữ liệu công bố và thông qua kết quả mô phỏng dòng chảy hạ lưu bằng một mô hình thủy văn bề mặt.

2. Khu vực nghiên cứu và dữ liệu sử dụng

2.1. Khu vực nghiên cứu

Khu vực nghiên cứu là phân thượng lưu vực sông Đà (Lý Tiên Giang), có tọa độ từ

$100^{\circ}23'45,6'' \sim 102^{\circ}36'E$ và $22^{\circ}23'52,8'' \sim 24^{\circ}56'2,4''N$ (Hình 1). Sau khi chảy ra khỏi Trung Quốc, sông chảy qua Lào và Việt Nam. Chiều dài của sông Đà bên ngoài lãnh thổ Việt Nam khoảng 470 km, với độ chênh lệch cao độ tự nhiên khoảng 1.790 m và diện tích lưu vực khoảng 19,000 km², bắt đầu từ núi Thạch Nha Khẩu xã Bảo Hoa, Châu Đại Lý ở phía bắc và kết thúc tại Khúc Thủy, Phố Nhi ở phía nam. Phía đông lấy núi Ailao làm ranh giới với lưu vực sông Nguyên, còn phía tây lấy núi Vô Lượng làm ranh giới với lưu vực sông Lan Thương. Chiều rộng của lưu vực tăng dần từ tây bắc xuống đông nam, với độ cao giảm dần từ bắc xuống nam, độ rộng của thung lũng sông cũng tăng dần từ bắc xuống nam.



Hình 1. Lưu vực sông Đà bao gồm phần diện tích ở Trung Quốc và các hồ chứa chính.

2.2. Dữ liệu sử dụng

Trong nghiên cứu này, dữ liệu viễn thám được sử dụng nhằm giám sát biến động diện tích mặt nước và mực nước của các hồ chứa thượng nguồn sông Đà, với hai nguồn ảnh chính thu từ vệ tinh Sentinel-1, Sentinel-2 [9] và mô hình số độ cao SRTM [10]. Ảnh viễn thám được thu thập

trong giai đoạn 2016–2023, với 5.620 ảnh Sentinel-1 và 333 ảnh Sentinel-2 để giải đoán diện tích mặt nước của 10 hồ chứa chính (dung tích tổng cộng lớn hơn 50 triệu m³) thuộc lãnh thổ Trung Quốc. Ngoài ra, nghiên cứu sử dụng chuỗi dòng chảy trạm thủy văn Mường Lay (1981–2021), Lai Châu (2016–2021), mưa lưới VnGP [11] và CHM [12], gió và nhiệt độ từ

ECMWF [12], DEM SRTMS30 [13], bản đồ đất FAO [14] và bản đồ sử dụng đất [15] (1992–2020, Land Cover CCI) làm đầu vào và thiết lập mô hình VIC-RES.

3. Phương pháp

3.1. Phương pháp xây dựng đường đặc tính hồ từ dữ liệu vệ tinh

3.1.1. Xác định quan hệ mực nước - diện tích mặt nước hồ chứa ($Z - F$)

Mô hình số độ cao (DEM) được sử dụng như nguồn dữ liệu nền để tái hiện không gian ba chiều của lòng hồ, phản ánh chi tiết cao độ địa hình tại từng vị trí trong phạm vi nghiên cứu. Trên cơ sở này, việc xây dựng các quan hệ $Z - F$ (mực nước – diện tích mặt nước) hoặc $Z - W$ (mực nước – dung tích) được thực hiện bằng cách xác định diện tích mặt nước ứng với từng cao trình Z cụ thể. Quy trình tính toán bao gồm phân tích lớp DEM và xác định phần diện tích bị ngập nước thông qua việc thống kê các pixel tương ứng.

3.1.2. Xác định quan hệ mực nước - dung tích hồ chứa ($Z - W$)

Dung tích hồ chứa V_h tại một mực nước ($Z_{min}+h$) được xác định bằng tổng thể tích nước tích lũy trong toàn bộ vùng ngập tính từ đáy hồ đến cao trình đó. Khi sử dụng dữ liệu mô hình số độ cao (DEM), quá trình tính toán được thực hiện theo nguyên lý tích phân thể tích rời rạc, trong đó mỗi ô raster được xem như một phần tử thể tích nhỏ có diện tích đáy cố định và chiều cao bằng chênh lệch giữa mực nước và cao độ địa hình tại ô đó. Tại một mực nước $Z_{min}+h$, thể tích nước trong hồ được xác định theo công thức [16]:

$$V_h = A_{pix} \sum_{pix \in A_h} (Z_{min} + h - Z_{pix})$$

trong đó: A_{pix} là diện tích của một ô raster; A_h là tập hợp các ô có cao độ $Z_{pix} \leq h$; Z_{min} là cao độ của ô DEM thứ pix ; z_{min} là cao độ thấp nhất trong phạm vi hồ (đáy hồ hoặc mực nước chết); $Z_{min}+h$ là mực nước đang xét;

($Z_{min}+h-Z_{pix}$) là chiều cao cột nước tại mỗi ô; h là mực nước hồ dao động từ 0 đến h_{max} (so với gốc Z_{min}).

3.2. Xây dựng quy trình vận hành của các hồ chứa từ dữ liệu viễn thám

Trong điều kiện không thể tiếp cận quy trình vận hành của các hồ chứa phía Trung Quốc trên sông Đà, nghiên cứu sử dụng dữ liệu viễn thám, cụ thể là sự kết hợp giữa Sentinel-1 (radar quan sát liên tục, xuyên mây) và Sentinel-2 (quang học độ phân giải cao, xác định ranh giới mặt nước chính xác). Chuỗi diện tích mặt nước giai đoạn 2016–2023 được xây dựng và chuyển đổi thành mực nước, từ đó tái dựng biểu đồ điều phối bằng cách xác định đường bao trên (đường phòng phá hoại) và đường bao dưới (đường hạn chế cấp nước). Đường phòng phá hoại được xác định bằng cách nối các mực nước lớn nhất của các tháng trong giai đoạn 2016–2023. Tương tự, đường hạn chế cấp nước được xác định bằng cách nối các mực nước nhỏ nhất của các tháng trong giai đoạn 2016–2023. Kết hợp với các thông số các hồ chứa thu thập được và kinh nghiệm chuyên gia để loại bỏ các điểm không phù hợp. Để tận dụng các ưu điểm và hạn chế nhược điểm của từng loại dữ liệu vệ tinh, nghiên cứu áp dụng phương pháp kết hợp dữ liệu (Data Fusion) từ 2 nguồn. Sentinel-1 cung cấp dữ liệu liên tục, còn Sentinel-2 đóng vai trò hiệu chỉnh, đảm bảo độ chính xác. Cách tiếp cận này cho phép tích lũy dữ liệu dài hạn, phản ánh ngày càng đầy đủ chiến lược điều tiết trong các điều kiện thủy văn khác nhau. Kết quả không chỉ làm rõ thực tiễn vận hành hồ thượng lưu, mà còn cung cấp cơ sở khoa học tin cậy cho mô phỏng dòng chảy, đánh giá tác động hạ lưu và hỗ trợ quản lý nguồn nước xuyên biên giới minh bạch, khách quan.

3.3. Phương pháp diễn toán hồ chứa trong mô hình VIC-RES

Các quyết định xả nước từ các hồ chứa nước thường được hỗ trợ bởi các đường cong quy trình vận hành như minh họa trong Hình 2 và được mô hình hóa với 5 phương án/chiến lược vận hành

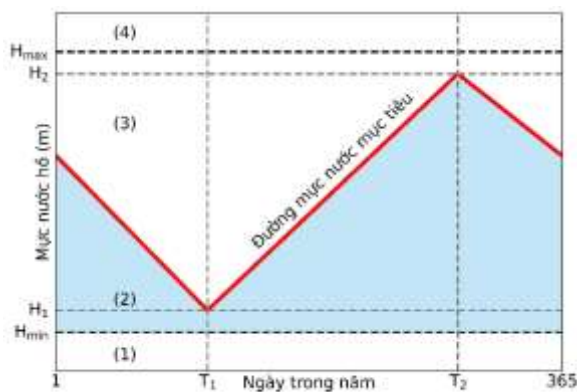
trong mô đun định tuyến ROUTING của mô hình VIC-RES [17], cụ thể như sau:

+ Trong phương án vận hành đơn giản (OP1), vận hành theo bốn tham số: mực nước tối thiểu (H_1), tối đa (H_2) và thời điểm đạt được các mực nước này (T_1 , T_2), với điều kiện không vượt quá mực nước chết và mực nước lớn nhất (H_{min} , H_{max}) (Hình 2a). Phương án này thường cho sai số lớn;

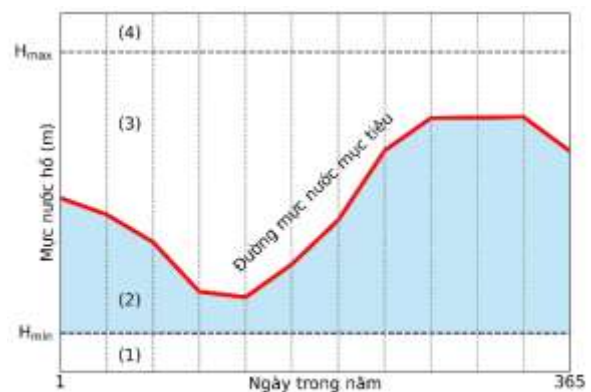
+ Vận hành theo đường mực nước mục tiêu (OP2), 12 tham số: mực nước từ H_1 đến H_{12} ,

tương ứng với T_1 đến T_{12} (Hình 2b), phù hợp cho hồ điều tiết mùa hoặc năm;

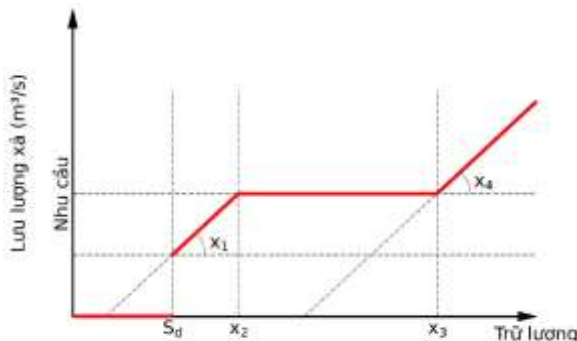
+ Quy trình vận hành được biểu diễn thông qua hàm tuyến tính từng phần (OP3), phụ thuộc vào các tham số x_1 , x_2 , x_3 và x_4 . Giá trị của các tham số này biểu thị ba giai đoạn, cụ thể là điều kiện vận hành phòng ngừa rủi ro, bình thường và lũ lụt (Hình 2c). Cấu hình 4 tham số thích hợp với hồ điều tiết ngày hoặc tuần.



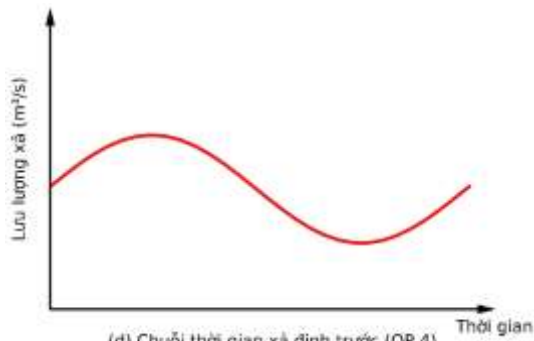
(a) Đường quy tắc (OP 1)



(b) Đường quy tắc (OP 2)



(c) Đường quy tắc (OP 3)



(d) Chuỗi thời gian xả định trước (OP 4)

Hình 2. Các đường cong vận hành lý thuyết trong VIC-RES [17]. Vùng (1): vùng hạn chế cấp nước; Vùng (2): vùng cấp nước bình thường; Vùng (3): vùng cấp nước gia tăng; Vùng (4): vùng xả tràn.

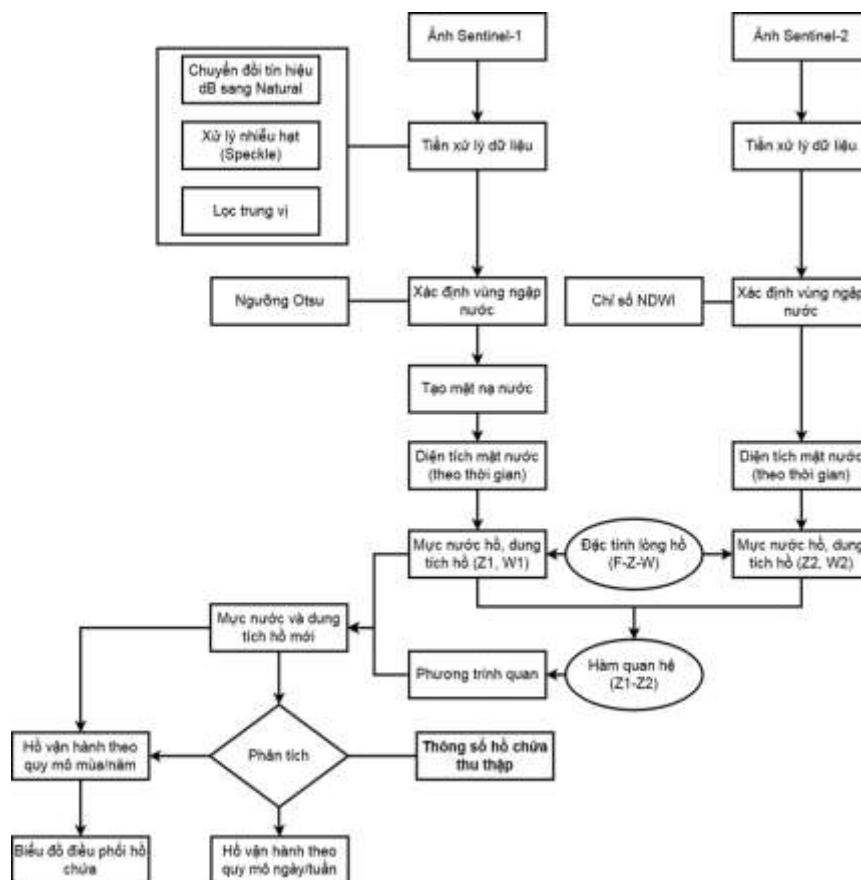
+ Quy trình vận hành tuyến tính từng phần, nhưng ở mức độ linh hoạt hơn bằng cách để 4 tham số x_1 , x_2 , x_3 và x_4 thay đổi theo thời gian hàng tháng với 48 tham số, phù hợp cho hồ điều tiết mùa hoặc năm (OP5);

+ Quy trình vận hành linh hoạt, có thể xây dựng từ chuỗi lưu lượng xả lịch sử (Hình 2d). Phương án này (OP4) không được áp dụng trong nghiên cứu này vì không thể xác định được các dòng xả từ các hồ chứa phía Trung Quốc.

3.4. Quy trình suy luận quy tắc vận hành hồ chứa từ dữ liệu viễn thám

Quy trình tổng hợp được trình bày trong Hình 3 minh họa các bước chính trong việc suy luận quy tắc vận hành hồ chứa từ dữ liệu viễn thám. Dữ liệu ảnh Sentinel-1 (SAR) và Sentinel-2 (quang học) được tiền xử lý, phân tách vùng ngập nước bằng các phương pháp ngưỡng Otsu và chỉ số NDWI để xác định diện tích mặt nước theo thời gian. Từ chuỗi diện tích mặt nước, các

đặc tính hình học của lòng hồ (mối quan hệ giữa cao trình – diện tích – dung tích) được xây dựng, qua đó xác định chuỗi biến đổi mực nước và dung tích hồ theo thời gian. Các chuỗi này tiếp tục được phân tích để thiết lập các hàm quan hệ và suy luận quy tắc vận hành hồ chứa (theo ngày, tuần hoặc mùa), đồng thời kiểm chứng với các thông số và dữ liệu quan trắc hiện có nhằm đảm bảo độ tin cậy và khả năng ứng dụng trong mô hình thủy văn – thủy lực.



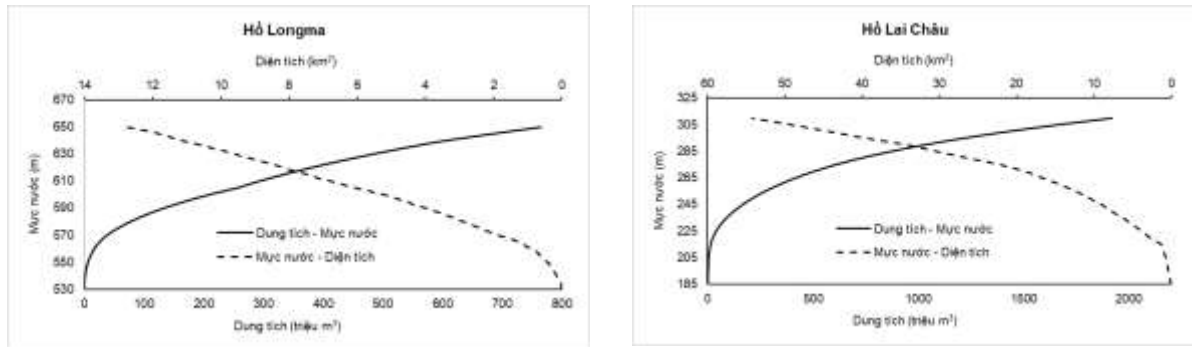
Hình 3. Quy trình các bước tính toán xây dựng quy tắc vận hành hồ chứa.

4. Kết quả

4.1. Các đường đặc tính lòng hồ

Các đường đặc tính lòng hồ (quan hệ mực nước – diện tích – dung tích) của 10 hồ chứa phía Trung Quốc được xác định từ các ảnh viễn thám

và DEM như đã trình bày ở trên. Hai hồ chứa là Pắc Ma và Lai Châu được tham khảo theo quy trình vận hành thực tế của từng hồ [18, 19]. Hình 4 thể hiện các đường đặc tính lòng hồ của hồ Longma ở Trung Quốc và Hồ Lai Châu ở Việt Nam.



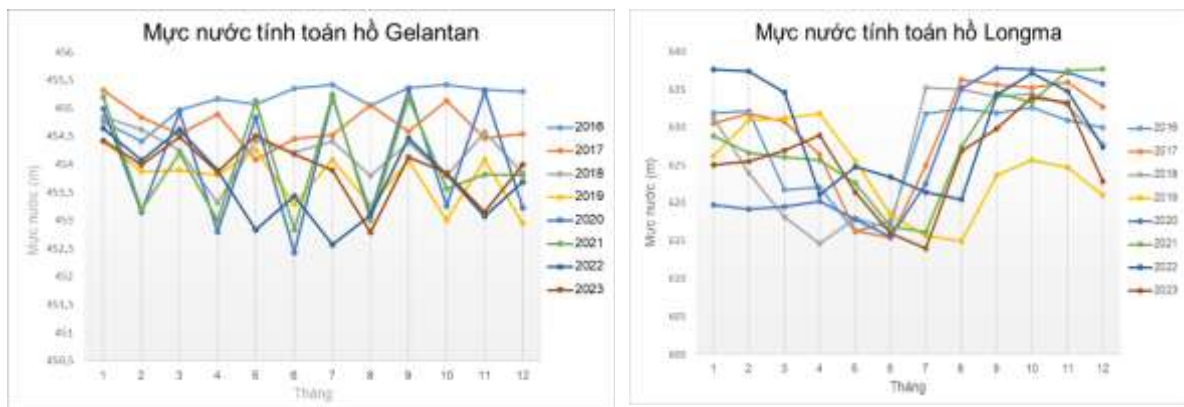
Hình 4. Đường đặc tính lòng hồ của hồ Longma (trái) và Lai Châu (phải).

4.2. Quy trình vận hành của các hồ chứa

4.2.1. Nhóm hồ vận hành điều tiết ngày/tuần

Biểu đồ biến động mực nước hồ Gelantan (Hình 5, trái) đại diện cho nhóm 4 hồ (Jupudu, Gelantan, Sanjiangkou và Tukahe) trong giai đoạn 2016–2023 cho thấy dao động mực nước theo tháng trong năm tương đối nhỏ, phản ánh chế độ vận hành ổn định và không có sự thay đổi

mạnh theo mùa. Đặc điểm này khác biệt rõ rệt so với các hồ chứa điều tiết theo mùa – vốn thường có biên độ dao động lớn giữa mùa mưa và mùa khô nhằm tích nước hoặc xả lũ theo chu kỳ dài. Đặc điểm dao động mực nước hẹp, ổn định quanh năm của cả bốn hồ (Jupudu, Gelantan, Sanjiangkou và Tukahe) cho thấy chúng đều được vận hành theo chế độ điều tiết ngày hoặc tuần. Kết quả này phù hợp với thông tin thu thập được trình bày trong Bảng 1.



Hình 5. Mực nước hồ Gelantan – điều tiết ngày/tuần (trái) và hồ Longma - điều tiết năm/mùa (phải) giai đoạn 2016-2023.

4.2.2. Nhóm hồ vận hành điều tiết theo mùa/năm

Hình 5 (phải) thể hiện diễn biến mực nước hồ Longma đại diện nhóm 6 hồ (Yayangshan, Shimenkan, Longma, Puxiqiao, Sinanjiang và Nalan) trong giai đoạn 2016–2023. Có thể thấy xu hướng dao động mực nước theo tháng tương đối lớn, phản ánh chế độ vận hành điều tiết mạnh

theo mùa/năm. Đặc điểm này phù hợp với các hồ chứa được thiết kế để tích nước trong mùa mưa và xả vào mùa khô, nhằm phục vụ các mục tiêu như phát điện, cấp nước hoặc cắt lũ. Các hồ trong nhóm này đều cho thấy chu trình điều tiết nước mang tính chu kỳ dài theo mùa hoặc năm, với biên độ dao động mực nước lớn giữa các giai đoạn trong năm. Việc hiểu rõ đặc điểm vận hành

thực tế của từng hồ là cơ sở quan trọng để xây dựng các chiến lược quản lý, dự báo và điều hành nguồn nước hiệu quả.

4.2.3 Xác định các thông số hồ chứa và các biểu đồ điều phối

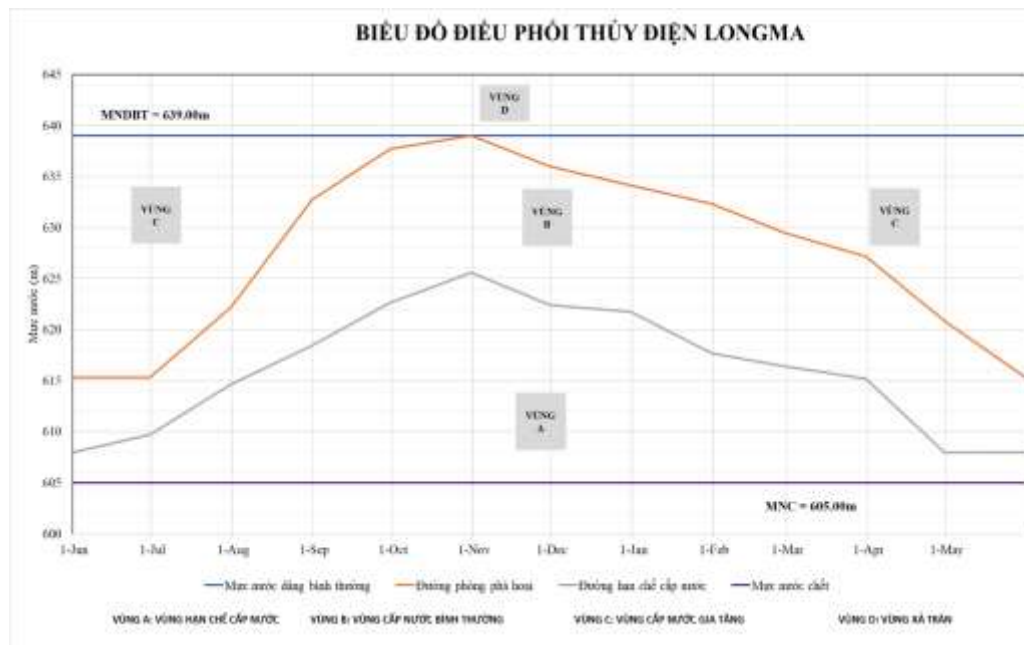
Như đã trình bày ở mục phương pháp, từ diễn biến mực nước và dung tích các hồ chứa bằng ảnh viễn thám, các tham số của các hồ chứa

này có thể được ước tính. Bảng 1 trình bày giá trị các thông số hồ chứa liên quan đến mực nước và dung tích thu thập từ các dữ liệu được công bố và các giá trị xác định từ các dữ liệu viễn thám. Ngoài ra, cũng từ dữ liệu này, các biểu đồ điều phối của 6 hồ điều tiết mùa/năm phía Trung Quốc được xây dựng. Hình 6 trình bày biểu đồ điều phối của hồ Longma như một ví dụ.

Bảng 1. Bảng tổng hợp các thông số hồ chứa phía Trung Quốc [20, 21]

TT	Tên hồ	Năm vận hành	Chế độ điều tiết	Mực nước dâng bình thường (m)	Mực nước chết (m)	Dung tích tổng (triệu m ³)	Dung tích hữu ích (triệu m ³)
1	Yayangshan	2006	Mùa/năm*	835	805*	247	212.6*
2	Shimenkan	2010	Tuần	756,0	740,0	197	80.7
		2010	Mùa/năm*	756,0	740,0	197	80.7
3	Longma	2007	Mùa	639	605	590	334
4	Jufudu	2007	Tuần/Ngày*	522,0	514	174	48
5	Gelantan	2009	Tuần/Ngày*	456	446	409	125.3*
6	PuxiQiao	2013	Mùa/năm*	735	705	504	314.4*
7	SanJiangKou	2007	Tuần/Ngày*	614	605*	84.52	31.8*
8	Sinanjiang	2008	Mùa/năm*	900	860	271	228.8*
9	Tukahe	2008	Ngày	368	365	78	12
10	Nalan	2005	Năm	434.1*	420.4*	286	186

* Được xác định từ kết quả phân tích, tính toán dựa trên ảnh vệ tinh.



Hình 6. Biểu đồ điều phối hồ chứa Longma, điều tiết mùa/năm được xây dựng.

4.3. Tham số hoá quy trình vận hành hồ chứa cho mô hình VIC-RES

4.3.1. Tham số hoá quy trình vận hành điều tiết mùa/năm các hồ phía Trung Quốc

Trong bối cảnh vận hành liên hồ chứa trên hệ thống sông xuyên biên giới, việc xác định được chiến lược hay phương án điều tiết dòng chảy tại các hồ phía thượng lưu Trung Quốc là yếu tố then chốt nhằm dự báo chính xác dòng chảy về hạ lưu. Để phục vụ cho mục tiêu này, nghiên cứu đã xây dựng tập tham số điều tiết mùa/năm cho các hồ chứa chính phía Trung Quốc theo hai phương án: i) Phương án điều tiết theo mực nước mục tiêu (OP2); và ii) Phương án điều tiết theo quy trình vận hành từng tháng với 48 tham số (OP5).

Phương án điều tiết theo mực nước mục tiêu

Đối với phương án điều tiết theo mực nước mục tiêu, mực nước vận hành của các hồ chứa được giả định duy trì ổn định tại một số mức cụ thể theo mùa (mùa lũ – mùa cạn), dựa trên kết quả giải đoán ảnh viễn thám trong giai đoạn

2016–2023 (Hình 6). Phương pháp này được xây dựng trong bối cảnh thiếu dữ liệu quan trắc và quy trình vận hành công khai từ phía Trung Quốc, cho phép tái hiện tương đối chính xác đặc điểm vận hành thực tế trong quá khứ của các hồ chứa thượng nguồn. Việc sử dụng chuỗi mực nước mục tiêu được xác định từ ảnh vệ tinh không chỉ phản ánh xu thế điều tiết lưu lượng trong điều kiện thực tiễn, mà còn góp phần cải thiện độ tin cậy trong mô phỏng dòng chảy về hạ lưu.

Phương án điều tiết theo quy trình vận hành từng tháng (48 tham số)

Các biểu đồ quy trình vận hành của các hồ chứa được trình bày trong Mục 0 đã được số hoá và chuyển đổi thành chuỗi quy trình vận hành theo từng tháng trong năm. Cụ thể, mỗi hồ được mô tả bởi 48 tham số, đại diện cho các mức dung tích giới hạn và dung tích mục tiêu trong chu kỳ 12 tháng, phản ánh quy luật vận hành theo mùa và khả năng điều tiết theo thời gian. Kết quả số hoá 48 tham số cho hồ Longma được trình bày trong Bảng 2.

Bảng 2. Tham số vận hành hồ Longma theo quy trình vận hành 48 tham số. Cột 1 là lưu lượng đảm bảo, các cột 2 đến 4 tương ứng là tham số x1 đến x4. Mỗi cột có 12 hàng, ứng với 12 tháng trong năm.

OPERATION STRATEGY (OP5)				
5				
96	0,631846	357887,2	508921	0,137267
96	0,631846	346734,9	477087,6	0,137267
96	0,631846	335855,7	451855,5	0,137267
96	0,631846	277381,6	387700,5	0,137267
96	0,631846	256000	302317,1	0,137267
96	0,631846	290614,4	336976,8	0,137267
96	0,631846	331379,9	400966	0,137267
96	0,631846	365043,5	513659,7	0,137267
96	0,631846	405367,5	573721	0,137267
96	0,631846	435305,4	590000	0,137267
96	0,631846	402901,7	552305,2	0,137267
96	0,631846	396239,8	530278,3	0,137267

4.3.2. Tham số hoá hồ quy trình vận hành điều tiết ngày/tuần

Các thông số đặc trưng của từng hồ chứa được trình bày trong Bảng 1 đã được số hoá và chuyển đổi thành bộ quy trình vận hành OP3 theo ngày

hoặc tuần, nhằm mô phỏng sát hơn với thực tiễn điều hành hồ chứa. Mỗi hồ được mô tả bởi 4 thông số chính (x1 đến x4), đại diện cho các mức dung tích điều tiết đặc trưng trong chu kỳ ngắn hạn (Bảng 3).

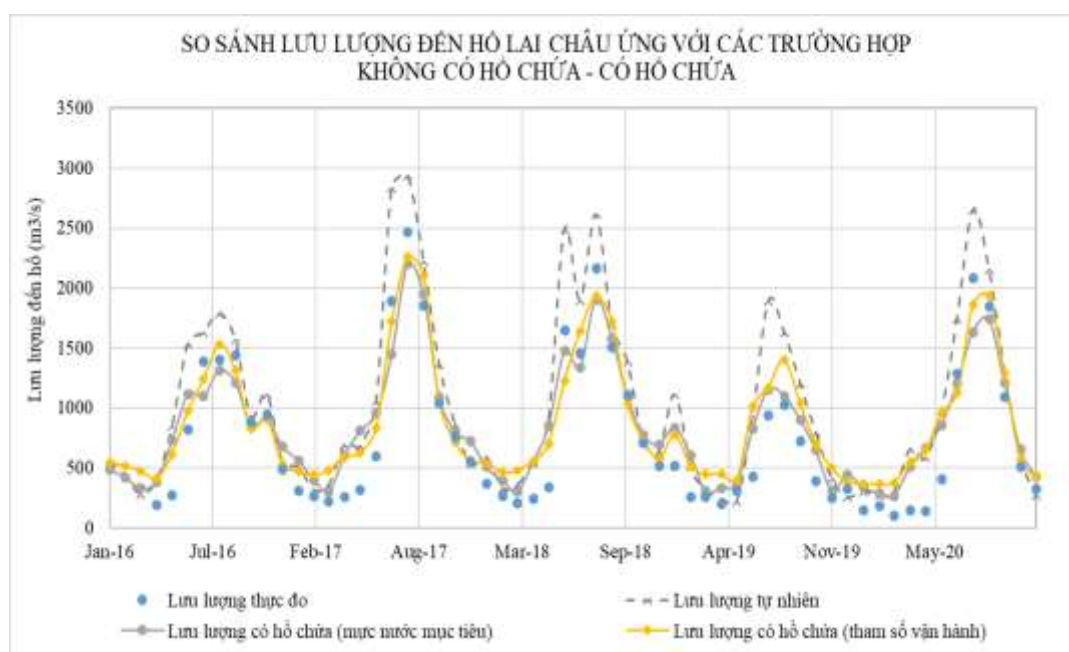
Bảng 3. Tham số vận hành hồ Tukahe theo quy trình vận hành 4 tham số điều tiết ngày/tuần.
Cột 1 là lưu lượng đảm bảo, các cột 2 đến 4 tương ứng là tham số x1 đến x4

OPERATION STRATEGY (OP3)				
3				
400	0,196	69721,73336	78000	0,196

4.4. Kết quả mô phỏng mô hình VIC-RES với bộ tham số hồ chứa

Trong nghiên cứu này, để đánh giá vai trò của các tham số của 10 hồ chứa thượng nguồn sông Đà (thuộc Trung Quốc), nhóm tác giả đã tích hợp bộ tham số hồ chứa này vào mô hình VIC-RES được thiết lập cho lưu vực sông Đà. Bộ tham số của mô hình VIC đã được hiệu chỉnh và kiểm định tại trạm Mường Lay trong giai đoạn 1981–2008, đảm bảo tính tin cậy của mô hình

[22]. Trên cơ sở đó, các tham số vận hành hồ chứa được sử dụng để mô phỏng dòng chảy về hồ Lai Châu trong giai đoạn 2016–2021 theo ba phương án: i) Không xét đến các hồ chứa, ii) ở hồ chứa vận hành theo mực nước mục tiêu (phương án OP2), và iii) Có hồ chứa vận hành theo quy trình vận hành OP3 và OP5. Các tham số vận hành hồ chứa (x1 và x4) theo hai phương án OP3 và OP5 được hiệu chỉnh bằng phương pháp SCE-UA[23].



Hình 7. Lưu lượng trung bình tháng về hồ Lai Châu theo 3 phương án tính toán 2016–2021.

Hình 7 cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa các phương án mô phỏng. Khi không xét hồ chứa, kết quả mô phỏng từ mô hình chỉ đạt $NSE = 0,59$, $RMSE = 392 \text{ m}^3/\text{s}$, $Pbias = 40,85\%$ và $KGE = 0,54$, phản ánh sai số lớn và xu hướng thiên cao. Khi tích hợp tham số hồ chứa, hiệu quả được cải thiện rõ rệt: NSE tăng lên $0,83–0,84$, $RMSE$

giảm còn $\sim 247–248 \text{ m}^3/\text{s}$, $Pbias$ giảm xuống $15–19\%$, KGE tăng lên $0,72–0,73$, trong khi R^2 vẫn duy trì ở mức cao ($0,91$). Các kết quả này cho thấy vai trò ngày càng quan trọng của hồ chứa trong lưu vực, và các tính toán mô phỏng không thể bỏ qua yếu tố này nếu muốn đạt được kết quả chính xác và đáng tin cậy.

5. Thảo luận

5.1 Độ tin cậy của các thông số hồ chứa ở thượng lưu vực sông Đà

Khi đối chiếu kết quả phân tích ảnh viễn thám với các thông tin công bố chính thức từ Bộ Thủy lợi Trung Quốc và các bài báo nghiên cứu về hồ chứa của tỉnh Vân Nam (Bảng 1) [4, 21–24–26], sai số giữa mực nước dâng bình thường và dung tích hữu ích được xác định từ viễn thám so với hồ sơ công bố nằm trong phạm vi cho phép (5 đến 15% đối với các hồ điều tiết mùa/năm). Hơn nữa, theo tác giả Huy [27] và Teunissen [25] sai số giữa giá trị mực nước/dung tích hồ thực đo và các giá trị tương ứng xác định từ ảnh vệ tinh tính cho hai hồ Bán Chát và Sơn La ở Việt Nam có chỉ số NSE lần lượt là 0,96 và 0,88. Điều này khẳng định độ tin cậy của phương pháp tính toán bằng ảnh viễn thám, đồng thời cho phép bổ sung các tham số hồ chứa còn thiếu hoặc chưa được công bố, ví dụ như mực nước chết và quy luật biến động mực nước theo mùa.

Một điểm nổi bật khác là khả năng của dữ liệu viễn thám trong việc cập nhật và làm rõ sự thay đổi thực tiễn vận hành so với hồ sơ công bố. Điển hình là hồ Shimenkan: theo tài liệu chính thức của Bộ Thủy lợi Trung Quốc và các bài báo nghiên cứu về hồ chứa của tỉnh Vân Nam, hồ này được thiết kế và công bố vận hành theo chế độ tuần [26]. Tuy nhiên, phân tích chuỗi ảnh Sentinel-1 và Sentinel-2 giai đoạn 2016–2023 cho thấy đặc trưng biến động mực nước phù hợp với chế độ điều tiết mùa/năm, phản ánh khả năng hồ đã được điều chỉnh hoặc nâng cấp để đáp ứng nhu cầu khai thác mới. Phát hiện này khẳng định rằng dữ liệu viễn thám không chỉ có giá trị kiểm chứng, mà còn đóng vai trò công cụ cập nhật kịp thời, giúp nhận diện những thay đổi trong quy luật vận hành hồ chứa mà các tài liệu công bố chưa phản ánh hoặc chưa được cập nhật. Như vậy, kết quả nghiên cứu đã chứng minh rằng việc kết hợp ảnh Sentinel-1 và Sentinel-2 không chỉ nâng cao độ chính xác trong tính toán tham số hồ chứa mà còn đảm bảo khả năng kiểm chứng với dữ liệu công bố chính thống, tạo ra bộ tham số có độ tin cậy cao để tích hợp vào mô hình thủy văn. Tuy nhiên, phương pháp này vẫn tồn tại một

số hạn chế nhất định, như không loại trừ hoàn toàn được ảnh hưởng của mây che phủ đối với ảnh quang học, sự khác biệt về độ phân giải không gian – thời gian giữa các loại ảnh, và sai số phát sinh do thời điểm quan trắc của hai ảnh không trùng khớp hoàn toàn. Mặc dù vậy, hướng tiếp cận này vẫn mang ý nghĩa thực tiễn và học thuật sâu sắc trong nghiên cứu và quản lý nguồn nước xuyên biên giới, bởi nó vừa khắc phục được hạn chế thiếu hụt dữ liệu, vừa đảm bảo tính khoa học và minh bạch khi so sánh với các nguồn dữ liệu chính thức.

5.2. Cải thiện chất lượng mô phỏng dòng chảy thượng nguồn sông Đà vào Việt Nam

Trong bối cảnh hiện nay, quy trình vận hành hệ thống hồ chứa đã trở thành nhân tố chi phối mạnh mẽ chế độ thủy văn, làm thay đổi căn bản lượng, nhịp điệu và tính mùa vụ của dòng chảy tự nhiên. Đối với các lưu vực sông xuyên biên giới như sông Đà, việc thiếu hụt hoặc không được chia sẻ dữ liệu quan trắc và quy trình vận hành từ thượng nguồn Trung Quốc khiến công tác dự báo, mô phỏng và quản lý nguồn nước ở hạ lưu gặp nhiều thách thức.

Kết quả nghiên cứu khẳng định rằng bỏ qua hồ chứa dẫn đến chất lượng mô phỏng suy giảm nghiêm trọng (NSE chỉ đạt 0,59, KGE = 0,54, Pbias tới 40%), khiến mô hình không đủ tin cậy. Ngược lại, khi khôi phục quy luật vận hành bằng dữ liệu viễn thám đa nguồn, hiệu suất mô hình được cải thiện đáng kể. Cụ thể, NSE tăng lên 0,83–0,84, KGE đạt 0,72–0,73, và Pbias còn 15–19%. Điều này chứng minh rằng thông tin hồ chứa và quy luật vận hành là biến số quyết định để mô hình phản ánh đúng thực tiễn dòng chảy. Quan trọng hơn, dữ liệu viễn thám đa nguồn có thể thay thế khoảng trống dữ liệu truyền thống, đồng thời cung cấp bằng chứng khoa học đáng tin cậy cho đối thoại và đàm phán. Đây không chỉ là giải pháp kỹ thuật nâng cao độ tin cậy của mô hình thủy văn, mà còn là công cụ tốt giúp phá vỡ “khoảng trống dữ liệu”, hỗ trợ quản lý công bằng và bền vững tài nguyên nước xuyên biên giới trong bối cảnh biến đổi khí hậu và cạnh tranh nguồn nước ngày càng gay gắt.

6. Kết luận

Nghiên cứu đã chứng minh rằng việc kết hợp dữ liệu viễn thám đa nguồn, cụ thể là ảnh radar Sentinel-1 và ảnh quang học Sentinel-2, cùng với mô hình số độ cao (DEM), để xác định, kiểm chứng và cập nhật các tham số hồ chứa trong bối cảnh thiếu hụt dữ liệu quan trắc và xây dựng các quy trình vận hành là khá hiệu quả. Ảnh Sentinel-1 đảm bảo quan sát liên tục, không phụ thuộc điều kiện mây và thời tiết, trong khi ảnh Sentinel-2 bổ sung chi tiết biên dạng mặt hồ, từ đó nâng cao độ chính xác trong việc thiết lập quan hệ mực nước – diện tích – dung tích.

Thông qua việc hiệu chỉnh và đối chiếu với các số liệu công bố từ các website chính thống của các cơ quan quản lý hồ phía Trung Quốc, sai số trong xác định mực nước dâng bình thường và dung tích hữu ích nằm trong khoảng 5–15%, chứng minh độ tin cậy cao của phương pháp. Đặc biệt, phân tích chuỗi ảnh 2016–2023 đã phát hiện những thay đổi trong thực tiễn vận hành hồ chứa (ví dụ hồ Shimenkan), qua đó cho thấy ưu thế nổi bật của phương pháp trong việc không chỉ khôi phục mà còn cập nhật động quy luật vận hành.

Việc tích hợp các tham số hồ chứa từ viễn thám vào mô hình VIC-RES đã cải thiện rõ rệt chất lượng mô phỏng dòng chảy về hạ lưu: NSE tăng từ 0,59 lên 0,83–0,84, Pbias giảm từ 40% xuống 15–19%, và KGE tăng từ 0,54 lên 0,72–0,73. Điều này khẳng định rằng phương pháp đề xuất vừa mang giá trị học thuật trong phát triển công cụ mô phỏng và vừa có ý nghĩa thực tiễn trong quản lý nguồn nước xuyên biên giới, khi giúp thu hẹp khoảng trống dữ liệu và cung cấp bằng chứng khoa học đáng tin cậy cho đối thoại, đàm phán quốc tế.

Nghiên cứu không chỉ nâng cao hiệu suất mô phỏng mà còn đề xuất một hướng tiếp cận mới: kết hợp dữ liệu viễn thám đa nguồn với mô hình thủy văn để suy luận và tham số hóa vận hành hồ chứa trong điều kiện thiếu hụt dữ liệu quan trắc. Cách tiếp cận này giúp thu hẹp “khoảng trống dữ liệu”, làm rõ cơ chế điều tiết dòng chảy và tác động nhân sinh trên các lưu vực lớn như sông Đà, đồng thời cung cấp bằng chứng khoa học

đáng tin cậy phục vụ đối thoại và đàm phán quốc tế về quản lý tài nguyên nước xuyên biên giới trong bối cảnh biến đổi khí hậu và gia tăng cạnh tranh nguồn nước.

Lời cảm ơn

Các tác giả xin cảm ơn đề tài mã số ĐTĐL.CN-06/23 thuộc chương trình 562 do Bộ Khoa học và Công nghệ Việt Nam tài trợ.

Tài liệu tham khảo

- [1] A. T. Wolf, J. A. Natharius, J. J. Danielson, B. S. Ward, J. K. Pender, International River Basins of the World, *Int. J. Water Resour. Dev.*, Vol. 15, No. 4, 1999, pp. 387–427, <https://doi.org/10.1080/07900629948682>.
- [2] M. McCracken, A. T. Wolf, Updating the Register of International River Basins of the World, *Int. J. Water Resour. Dev.*, Vol. 35, No. 5, 2019, pp. 732–782, <https://doi.org/10.1080/07900627.2019.1572497>.
- [3] A. Soukhaphon, I. G. Baird, Z. S. Hogan, The Impacts of Hydropower Dams in the Mekong River Basin: A Review, *Water*, Vol. 13, No. 3, 2021, pp. 265, <https://doi.org/10.3390/w13030265>.
- [4] I. Yoosefdoost, M. Basirifard, and J. Álvarez-García, Reservoir Operation Management with New Multi-Objective (MOEPO) and Metaheuristic (EPO) Algorithms, *Water*, Vol. 14, 2022, pp. 2329, <https://doi.org/10.3390/w14152329>.
- [5] H. Gao, C. Birkett, D. P. Lettenmaier, Global Monitoring of Large Reservoir Storage from Satellite Remote Sensing, *Water Resour. Res.*, Vol. 48, No. 9, 2012, <https://doi.org/10.1029/2012WR012063>.
- [6] F. Papa, F. Frappart, Surface Water Storage in Rivers and Wetlands Derived from Satellite Observations: A Review of Current Advances and Future Opportunities for Hydrological Sciences, *Remote Sens.* Vol. 13, No. 20, 2021, pp. 4162, <https://doi.org/10.3390/rs13204162>.
- [7] T. M. Cuong, N. T. Giang, T. A. Phuong, N. A. Duc, Research on Monitoring the Operation of Reservoirs in the Da River Basin Outside Vietnam Territory from Satellite and Topographic Data on Google Earth Engine Platform, *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 770, No. 2, 2025, pp. 84–96, [Online]. Available: <https://vjol.info.vn/index.php/TCKHTV/article/vi>

- e-w/108154 (accessed on: July 5th, 2025) (in Vietnamese).
- [8] T. A. Phuong, T. M. Cuong, N. V. Hoang, P. N. Anh, N. A. Duc, and D. H. Son, Application of Remote Sensing Techniques for Analyzing Operation of Upstream Reservoirs in Transboundary River Basins of Vietnam, *Vietnam J. Hydrometeorol.*, Vol. 5, No. 5, 2020, pp. 101-111, [https://doi.org/10.36335/VNJHM.2020\(5\).101-111](https://doi.org/10.36335/VNJHM.2020(5).101-111).
 - [9] ESA - Sentinel-1 Operations. https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Sentinel-1_operations (accessed on: July 5th, 2025).
 - [10] T. G. Farr et al., The Shuttle Radar Topography Mission, *Rev. Geophys.*, Vol. 45, No. 2, 2007, <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>.
 - [11] N. X. Thanh et al., The Vietnam Gridded Precipitation (VnGP) Dataset: Construction and Validation, *SOLA*, Vol. 12, No. 0, 2016, pp. 291-296, <https://doi.org/10.2151/sola.2016-057>.
 - [12] J. Han, C. Miao, J. Gou, H. Zheng, Q. Zhang, X. Guo, A New Daily Gridded Precipitation Dataset for the Chinese Mainland Based on Gauge Observations, *Earth Syst. Sci. Data*, Vol. 15, No. 7, Jul. 2023, pp. 3147–3161, <https://doi.org/10.5194/essd-15-3147-2023>.
 - [13] Jaxa Eorc, Alos Global Digital Surface Model, ALOS World 3D - 30m (AW3D30) Version 4.0, 2023.
 - [14] Fao, Fao/Unesco Soil Map of the World | Fao Soils Portal | Food and Agriculture Organization of the United Nations, <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/faounesco-soil-map-of-the-world/en/> (accessed on: July 5th, 2025).
 - [15] ESA, Land Cover Cci Product User Guide Version 2.0, 2017, [Online]. Available: https://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-Ph2-PUGv2_2.0.pdf (accessed on: July 5th, 2025).
 - [16] C. Pascal et al., Monitoring Indian Ungauged Small Reservoirs Volume from Remote Sensing: Feasibility, Bias and Perspectives, *PLOS Water* Vol. 3, No. 12, 2024, pp. e0000260, <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000260>.
 - [17] D. D. Thanh et al., A software Package for the Representation and Optimization of Water Reservoir Operations in the VIC Hydrologic Model, *Environ. Model. Softw.*, Vol. 126, 2020, pp. 104673, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104673>.
 - [18] Prime Minister Decision No. 740/QĐ-TTg, QTVH Lien Ho Song Hong, 2019 (in Vietnamese).
 - [19] Minister of Industry and Trade Decision No. 2156/QĐ-BCT, On Approving the Operation Procedure of Lai Chau Hydropower Reservoir, 2018 (in Vietnamese).
 - [20] S. Feng, H. Chen, Y. Wang, C. Chen, J. Wang, Duality and Economic Methods to Reveal and Interpret Marginal Market Values Based on a Weekly Scheduling Model of Cascaded Hydropower Reservoirs, 2023, <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4388413>.
 - [21] Hydro Power Plants Across the Globe (World Map) | Database.earth, <https://database.earth/energy/power-plants/hydro-power> (accessed on: July 5th, 2025).
 - [22] K. V. Hai, N. T. Giang, D. T. N. Bich, Applying the Variable Infiltration Capacity (VIC) Model to Reconstructing Streamflow Data in the Da River Basin at Muong Te Hydrological Station, *J. Hydro-meteorology*, Vol. 09, No. 20, 2024, pp. 52-65, [https://doi.org/10.36335/VNJHM.2024\(20\)](https://doi.org/10.36335/VNJHM.2024(20)) (in Vietnamese).
 - [23] Q. Duan, S. Sorooshian, V. K. Gupta, Optimal Use of the SCE-UA Global Optimization Method for Calibrating Watershed Models, *J. Hydrol.*, Vol. 158, No. 3–4, 1994, pp. 265-284, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90057-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90057-4).
 - [24] N. Hanasaki, S. Kanae, T. Oki, A Reservoir Operation Scheme for Global River Routing Models, *J. Hydrol.*, Vol. 327, No. 1-2, 2006, pp. 22–41, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.011>.
 - [25] C. T. E. Teunissen, An Satellite-Guided Derivation of Reservoir Dam... - Google Scholar, University of Twente, 2024, [Online]. Available: https://scholar.google.com/scholar?hl=en&as_sdt=0%2C5&q=An+satellite-guided+derivation+of++reservoir+dam+operation+rules+in++ungauged+locations.++A+Case+study+in+Vietnam&btnG= (accessed on: July 5th, 2025).
 - [26] S. Feng, H. Chen, Y. Wang et al., Duality and Economic Methods to Reveal and Interpret Marginal Market Values Based on a Weekly Scheduling Model of Cascaded Hydropower Reservoirs, *papers.ssrn.com*, [Online]. Available: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4388413 (accessed on: July 5th, 2025).
 - [27] D. B. Huy, Developing Methods and Tools for Monitoring and Simulating Reservoir Operation Processes in Data-Deficient River Basins Using Remote Sensing Technology and Artificial Intelligence, Graduation Thesis, VNU University of Science - Hanoi, 2025 (in Vietnamese).