

DỰ BÁO LƯU LƯỢNG TUẦN VÀ THÁNG TẠI TÂN CHÂU - CHÂU ĐỐC DỰA TRÊN DỮ LIỆU KRATIE BẰNG PHƯƠNG PHÁP HỒI QUY THỜI GIAN TRỄ

Phạm Văn Tùng

Viện Kỹ thuật Biển

Nguyễn Đăng Tính, Nguyễn Trịnh Chung

Trường Đại học Thủy lợi

Tóm tắt: Nghiên cứu đánh giá và dự báo lưu lượng tại Tân Châu - Châu Đốc dựa trên tín hiệu thượng lưu ở Kratie bằng các mô hình hồi quy thời gian trễ, phục vụ cảnh báo và vận hành chế độ nguồn nước Đồng bằng sông Cửu Long. Bộ dữ liệu gồm chuỗi lưu lượng ngày 1980-2024 tại Kratie, Tân Châu, Châu Đốc; được tổng hợp theo tuần và tháng, chuẩn hóa sai số, đồng bộ thời gian và tách hai giai đoạn thủy văn: trước năm 2010 (trước khi vận hành mạnh hệ thống hồ chứa dòng chính) và giai đoạn sau 2010. Phân tích tương quan chéo cho thấy độ trễ lan truyền Kratie - Tân Châu trung bình 1-2 tuần trước 2010 và 2-3 tuần sau 2010; với Châu Đốc dài hơn khoảng 1 tuần. Ở quy mô tháng, hồi quy tuyến tính giữa Kratie và Tân Châu cho phương trình trước 2010 với $R^2 = 0,887$ và sau 2010 với $R^2 = 0,816$ phản ánh xu thế giảm đồng biến và tăng độ trễ sau khi điều tiết thượng nguồn gia tăng. Mô hình dự báo đạt NSE khoảng 0,80-0,88 (tháng) và 0,65-0,75 đến >0,75 (tuần theo giai đoạn), PBIAS trong $\pm 5-8\%$, RMSE tăng nhẹ sau 2010. So với Châu Đốc, Tân Châu có tương quan mạnh hơn và độ trễ ngắn hơn, phù hợp cơ chế truyền trực tiếp dọc sông Tiền. Kết quả cho thấy mô hình hồi quy trễ và ARIMAX với bậc trễ tối ưu 1-3 tuần đủ tin cậy cho cảnh báo dòng chảy thấp 10-20 ngày và dự báo trung hạn theo tháng; đồng thời sẵn sàng tích hợp vào MIKE 11 và MRC-DSS nhằm nâng cao năng lực vận hành, phân bổ nước và ứng phó hạn hán - xâm nhập mặn ở hạ lưu Mekong.

Từ khóa: Kratie, Tân Châu, Châu Đốc, hồi quy thời gian trễ, tương quan chéo, dự báo tuần - tháng, NSE, R^2 , DBSCL.

Summary: This study evaluates and forecasts river discharge at Tan Chau and Chau Doc stations based on upstream flow signals from Kratie using time-lagged regression models, serving early warning and water management in the Mekong Delta. The dataset comprises daily discharge records (1980-2024) at Kratie, Tan Chau, and Chau Doc, aggregated to weekly and monthly scales, error-checked, time-synchronized, and divided into two hydrological periods: before 2010 (pre-mainstream dam operation) and after 2010 (post-dam operation). Cross-correlation analysis revealed that the average propagation lag between Kratie and Tan Chau was 1-2 weeks before 2010 and 2-3 weeks after 2010, while that toward Chau Doc was approximately one week longer. At the monthly scale, linear regression between Kratie and Tan Chau yielded $R^2 = 0,887$ (before 2010) and $R^2 = 0,816$ (after 2010), indicating a reduction in covariance and an increase in lag time following intensified upstream regulation. Model performance achieved NSE = 0,80-0,88 (monthly) and 0,65-0,75 to >0,75 (weekly), with PBIAS within $\pm 5-8\%$ and slightly higher RMSE after 2010. Compared to Chau Doc, Tan Chau showed a stronger correlation and shorter lag, consistent with direct hydraulic propagation along the Tien River branch. The results demonstrate that lagged regression and ARIMAX models with optimal lag times of 1-3 weeks are sufficiently reliable for low-flow early warning (10-20 days in advance) and monthly discharge forecasting, and can be effectively integrated into MIKE 11 and MRC-DSS systems to enhance operational water management, water allocation, and adaptation to drought and salinity intrusion in the lower Mekong region.

Keywords: Kratie, Tan Chau, Chau Doc, time-lag regression, cross-correlation, weekly-monthly forecasting, NSE, R^2 , Mekong Delta.

1. MỞ ĐẦU

Dòng chảy tại Kratie phản ánh trạng thái tổng

hợp của toàn bộ thượng lưu vực Mekong sau khi tích hợp các đóng góp từ cao nguyên Thanh Tạng, khu vực Lancang-Mekong Trung Quốc, các phụ lưu lớn ở Lào - Thái Lan - Campuchia và cơ chế điều tiết tự nhiên của Hồ Tonle Sap thông qua sông Tonle Sap. Vì vậy,

Ngày nhận bài: 19/12/2025

Ngày thông qua phản biện: 08/01/2026

Ngày duyệt đăng: 05/02/2026

biến thiên lưu lượng tại Kratie đóng vai trò như một tín hiệu đầu vào quan trọng cho hạ lưu Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL), nơi mọi xung động mùa lũ (tăng đột ngột do mưa cực đoan hoặc điều tiết hồ chứa) hay sự suy kiệt mùa khô đều được lan truyền dọc trục sông chính và thể hiện tại Tân Châu, Châu Đốc với một độ trễ thời gian nhất định. Nhiều nghiên cứu đã khẳng định vị trí nút cổ chai thủy văn của Kratie đối với quá trình tích - xả Hồ Tonle Sap và điều hòa dòng chảy về Việt Nam, qua đó ảnh hưởng trực tiếp đến mực nước, xâm nhập mặn và khả năng cấp nước nội đồng trong mùa khô [1],[4],[9],[5],[6].

Trong bối cảnh hạ lưu chịu đồng thời áp lực từ biến đổi khí hậu, gia tăng điều tiết bởi hệ thống hồ thủy điện ở thượng nguồn và nhu cầu khai thác nước nội vùng, việc dự báo lưu lượng đáng tin cậy tại Tân Châu - Châu Đốc có ý nghĩa đặc biệt quan trọng cho công tác quản trị vận hành và ứng phó rủi ro. Ở quy mô tác nghiệp, dự báo theo tuần giúp hỗ trợ ra quyết định ngắn hạn như điều tiết cống, lịch lấy nước, bố trí thời vụ gieo sạ và cảnh báo sớm xâm nhập mặn; trong khi dự báo theo tháng phục vụ lập kế hoạch vận hành mùa vụ, phân bổ nguồn nước liên tỉnh và dự phòng các kịch bản lũ hoặc kiệt bất lợi. Đặc biệt trong mùa kiệt, khả năng ước tính sớm mức dòng nền tại hai cửa ngõ ĐBSCL giúp chủ động tăng cường trữ ngọt, tối ưu vận hành hệ thống công trình và giảm thiểu thiệt hại do xâm nhập mặn sâu vào nội đồng.

Về phương pháp nghiên cứu, lưu vực Mekong đã được tiếp cận bằng nhiều mô hình khác nhau: từ mô hình mưa - dòng chảy thông số tập trung hoặc phân bố (MIKE NAM, SWAT), mô hình cân bằng - quy hoạch tài nguyên (WEAP), đến các mô hình thống kê và chuỗi thời gian (ARIMA, ARIMAX, SARIMA) hay

các thuật toán học máy, học sâu (RF, XGBoost, ANN, LSTM) nhằm phục vụ dự báo ngắn và trung hạn. Các khung mô hình tích hợp trong hệ thống MRC-DSS cũng đã được áp dụng ở nhiều quy mô không gian - thời gian. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu này tập trung vào dự báo tại chính trạm Kratie hoặc các nút trung gian, trong khi việc định lượng rõ ràng quan hệ nhân - quả theo thời gian trễ giữa Kratie và hai trạm hạ lưu Tân Châu, Châu Đốc ở quy mô tuần và tháng còn hạn chế. Nhiều công trình mới dừng ở mức tương quan đồng thời hoặc sử dụng biến giải thích tổng hợp mà chưa khai thác tối ưu tín hiệu lan truyền theo dòng [2],[8],[10].

Xuất phát từ khoảng trống này, nghiên cứu đặt mục tiêu phân tích cấu trúc phụ thuộc và độ trễ truyền dẫn giữa lưu lượng Kratie và Tân Châu - Châu Đốc bằng các công cụ tương quan chéo (CCF) và kiểm định tính dừng - mùa vụ, đồng thời phân tách theo hai giai đoạn đặc trưng trước và sau năm 2010 nhằm nhận diện ảnh hưởng của điều tiết hồ chứa dòng chính. Trên cơ sở đó, nghiên cứu xây dựng các mô hình hồi quy trễ để dự báo lưu lượng theo tuần và theo tháng tại hai trạm hạ lưu, trong đó biến đầu vào chủ yếu là lưu lượng Kratie ở các bậc trễ tối ưu, có thể mở rộng thêm các biến chỉ báo mùa vụ hoặc lượng mưa vùng trung lưu khi cần. Cuối cùng, nghiên cứu đánh giá năng lực ứng dụng cho cảnh báo vận hành mùa kiệt và mùa lũ thông qua các chỉ tiêu khách quan như hệ số Nash-Sutcliffe (NSE), sai số bình phương trung bình (RMSE), sai số tuyệt đối trung bình (MAE) và độ chênh lệch phần trăm (PBIAS), đồng thời kiểm định chéo để kiểm tra tính ổn định của mô hình. Cách tiếp cận này kỳ vọng tận dụng được tín hiệu sớm tại Kratie để tạo lợi thế thời gian trong điều hành ở hạ lưu ĐBSCL, với chi phí dữ liệu và mô hình hóa thấp nhưng hiệu quả dự báo và ứng

dụng thực tiễn cao.

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

2.1. Nguồn dữ liệu

Nguồn dữ liệu phục vụ nghiên cứu bao gồm chuỗi số liệu lưu lượng thực đo tại ba trạm chính trên trục dòng chảy hạ lưu sông Mekong: Kratie (Campuchia), Tân Châu và Châu Đốc (Việt Nam) trong giai đoạn 1980-2024. Đây là chuỗi số liệu quan trắc dài hạn, có độ tin cậy cao và đã được MRC cùng các cơ quan quốc gia thu thập, hiệu chỉnh qua nhiều năm. Trạm Kratie được xem là điểm kiểm soát dòng chảy đại diện cho toàn bộ lượng nước từ thượng lưu Mekong sau khi đã cộng hưởng các tác động điều tiết và tự nhiên từ vùng trung lưu và hồ Tonle Sap, trong khi hai trạm Tân Châu và Châu Đốc thể hiện dòng chảy phân bố về hai nhánh sông Tiền và sông Hậu - cửa ngõ chính dẫn nước vào ĐBSCL.

Chuỗi dữ liệu gốc có tần suất ngày, được tổng hợp thành chuỗi tuần và chuỗi tháng nhằm phù hợp với mục tiêu phân tích mối quan hệ trễ thời gian và phục vụ xây dựng mô hình dự báo ở hai cấp độ. Việc chuyển đổi tần suất được thực hiện bằng cách lấy trung bình động, tổng hợp theo chu kỳ chuẩn (7 ngày đối với tuần và theo tháng dương lịch) để đảm bảo tính đại diện của biến động dòng chảy trong từng khoảng thời gian. Phương pháp tổng hợp này giúp loại bỏ nhiễu ngắn hạn, đồng thời phản ánh xu thế tích - xả của hệ thống hồ và sông trong từng giai đoạn mùa.

Trước khi tiến hành phân tích, dữ liệu được chuẩn hóa qua ba bước chính: (i) kiểm tra tính toàn vẹn chuỗi thời gian, loại bỏ hoặc nội suy hợp lý các giá trị thiếu, (ii) phát hiện và xử lý các giá trị dị thường bằng phương pháp thống kê mô tả kết hợp kiểm định Tukey hoặc IQR để bảo đảm tính liên tục và ổn định của chuỗi,

và (iii) đồng bộ hóa thời gian giữa các trạm thông qua quy trình so khớp ngày - tuần - tháng để đảm bảo các giá trị tại Kratie, Tân Châu và Châu Đốc được so sánh và phân tích trong cùng một mốc thời gian. Các bước xử lý này giúp chuỗi dữ liệu trở nên đồng nhất, đáng tin cậy và sẵn sàng cho các phân tích tương quan - hồi quy trễ.

2.2. Phân tích tương quan và độ trễ

Để nhận diện mối quan hệ giữa dòng chảy tại Kratie và hai trạm hạ lưu Tân Châu, Châu Đốc, nghiên cứu tiến hành phân tích tương quan và xác định độ trễ thời gian nhằm làm rõ đặc điểm lan truyền dòng chảy dọc hệ thống sông Mekong - Tonle Sap - ĐBSCL.

Trước hết, mối quan hệ tuyến tính giữa các trạm được kiểm định thông qua hệ số tương quan Pearson (r), phản ánh mức độ và hướng liên hệ tuyến tính giữa hai chuỗi lưu lượng trong cùng hoặc khác thời điểm. Hệ số này được tính cho cả hai quy mô thời gian là tuần và tháng, qua đó đánh giá mức đồng biến giữa biến động tại Kratie và phản ứng của Tân Châu, Châu Đốc. Bên cạnh đó, nhằm kiểm chứng tính ổn định và khả năng phi tuyến của mối quan hệ, nghiên cứu đồng thời áp dụng hệ số tương quan hạng Spearman (ρ) - phương pháp phi tham số ít nhạy cảm với các giá trị ngoại lai và có khả năng phát hiện mối quan hệ đơn điệu không tuyến tính [10]. Việc sử dụng kết hợp hai chỉ tiêu này cho phép đánh giá toàn diện cả khía cạnh tuyến tính và phi tuyến trong chuỗi dòng chảy, đặc biệt hữu ích trong bối cảnh sự điều tiết của hồ chứa có thể làm biến dạng mối quan hệ truyền thống giữa các trạm [8],[6].

Tiếp theo, để xác định độ trễ tối ưu trong quá trình lan truyền dòng chảy từ Kratie đến hạ lưu, phương pháp tương quan chéo (Cross-Correlation Function - CCF) được áp dụng.

CCF cho phép định lượng mức độ phụ thuộc giữa hai chuỗi khi một chuỗi được dịch chuyển theo thời gian một khoảng nhất định. Với mỗi bước dịch chuyển tính theo tuần hoặc tháng, giá trị hệ số tương quan được tính toán, từ đó xác định khoảng thời gian mà mối liên hệ giữa Kratie và Tân Châu/Châu Đốc đạt cực đại. Giá trị độ trễ tối ưu này phản ánh thời gian lan truyền thủy lực trung bình của dòng chảy qua hệ thống sông chính và vùng hồ Tonle Sap [1],[9].

Để phản ánh những thay đổi về cơ chế dòng chảy theo thời gian, nghiên cứu này chia chuỗi dữ liệu thành hai giai đoạn chính: (1) Giai đoạn trước 2010, đại diện cho thời kỳ trước khi xuất hiện các hồ thủy điện dòng chính và phản ánh điều kiện thủy văn gần tự nhiên, khi Hồ Tonle Sap còn giữ vai trò điều tiết chính; (2) giai đoạn sau 2010, tương ứng với thời kỳ sau khi nhiều hồ chứa lớn được xây dựng trên dòng chính và phụ lưu Mekong, đặc trưng bởi sự biến đổi mạnh trong chế độ dòng chảy mùa kiệt và giảm biên độ lũ [2],[6].

Việc tách chuỗi theo hai giai đoạn này cho phép đánh giá không chỉ sự thay đổi của mức độ tương quan mà còn của độ trễ thủy văn, từ đó chỉ ra sự suy giảm khả năng lan truyền tự nhiên và cơ chế điều tiết của hệ thống sông - hồ dưới tác động của phát triển thủy điện và biến đổi khí hậu.

2.3. Mô hình dự báo

Phần mô hình hóa tập trung vào các cấu trúc

$$Q_i(t) = a_i + \sum_{k=1}^p b_{i,k} Q_K(t - \tau_k) + \sum_m c_{i,m} S_m(t) + \sum_j d_{i,j} X_j(t - \delta_j) + \varepsilon_i(t)$$

Ở đây $S_m(t)$ có thể là biến giả theo tháng, hoặc thành phần điều hòa sin, cos chu kỳ năm; X_j là biến giải thích bổ sung như mưa trung lưu, chỉ báo vận hành hồ, hoặc mức nước Hồ Tonle

Sap; δ_j là độ trễ tương ứng. Để tránh đa cộng tuyến khi dùng nhiều bậc trễ, áp dụng chọn biến theo phiên bản hiệu chỉnh (Akaike Information Criterion - AICc)/Tiêu chí thông

Hồi quy tuyến tính có độ trễ:

Với trạm $i \in \{\text{Tân Châu, Châu Đốc}\}$, mô hình cơ sở dùng lưu lượng Kratie trễ τ tuần/tháng.

$$Q_i(t) = a_i + b_i Q_K(t - \tau) + \varepsilon_i(t)$$

trong đó Q_K là lưu lượng tại Kratie, Q_i là lưu lượng đích, a_i, b_i là tham số, $\varepsilon_i(t)$ là nhiễu. Khi CCF gợi ý nhiều bậc trễ hữu ích, dùng dạng phân bố độ trễ.

$$Q_i(t) = a_i + \sum_{k=1}^p b_{i,k} Q_K(t - \tau_k) + \varepsilon_i(t)$$

Để xử lý khả năng tự tương quan phần dư, có thể ước lượng bằng phương pháp bình phương tối thiểu thông thường (Ordinary Least Squares - OLS) với sai số chuẩn HAC Newey-West hoặc dùng phương pháp bình phương tối thiểu tổng quát (Generalized Least Squares - GLS); chẩn đoán qua hàm tự tương quan (Autocorrelation Function - ACF)/ Hàm tự tương quan riêng phần (Partial Autocorrelation Function - PACF) phần dư và kiểm định Ljung-Box [10].

Hồi quy đa biến:

Bổ sung biến mùa và điều khiển chậm của hệ thống.

tin Bayes (Bayesian Information Criterion - BIC). Tính dừng và phương sai ổn định được kiểm tra trước; nếu cần có thể Box-Cox và sai phân mùa theo chuẩn thực hành khí tượng-thủy văn [10].

Đối sánh với mô hình chuỗi thời gian kinh điển (Autoregressive Integrated Moving Average -ARIMA) và hồi quy động. Thiết lập đường cơ sở bằng các mô hình đích đơn biến:

$$\phi(B)(1-B)^d Q_i(t) = \alpha + \sum_{k=1}^p \beta_k Q_K(t - \tau_k) + \theta(B)\vartheta_t$$

với ϕ, θ là đa thức AR (Autoregressive) và MA (Moving Average), d bậc sai phân, B toán tử trễ. Tham số được chọn theo AICc/BIC, kiểm định phần dư trắng. Đây là khung mạnh cho dự báo tuần và tháng, thường vượt OLS khi còn tự tương quan chưa giải thích hết [3].

Quá trình đánh giá và hiệu chuẩn mô hình được tiến hành riêng cho hai giai đoạn thủy văn đặc trưng: giai đoạn trước 2010, đại diện cho điều kiện tự nhiên trước khi xuất hiện các hồ thủy điện dòng chính, và giai đoạn sau 2010, phản ánh bối cảnh sau khi hệ thống hồ chứa lớn trên thượng nguồn Mekong đi vào vận hành. Việc chia tách chuỗi theo thời kỳ không chỉ giúp nhận diện sự thay đổi trong đặc tính dòng chảy mà còn cho phép đánh giá khả năng thích ứng của mô hình trước các biến động do con người gây ra. Trong bước hiệu chuẩn, mô hình được kiểm tra bằng phương pháp kiểm định chéo theo chuỗi thời gian dịch chuyển, tức là mô hình được huấn luyện trên một đoạn dữ liệu quá khứ rồi lần lượt dịch chuyển mốc thời gian để dự báo và kiểm tra sai số ở các giai đoạn kế tiếp. Cách làm này giúp đảm bảo mô hình chỉ sử dụng thông tin quá khứ để dự đoán tương lai, phản ánh đúng tính chất phụ thuộc theo thời gian của chuỗi

ARIMA hoặc phiên bản mở rộng có yếu tố mùa vụ - SARIMA (Seasonal ARIMA) cho $Q_i(t)$ (sử dụng phương pháp Box-Jenkins). Mô hình hồi quy động ARIMAX (Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables) kết hợp biến Kratie trễ với cấu trúc nhiều của chuỗi tự hồi quy - ARMA (Autoregressive Moving Average) cho phần dư:

thủy văn, đồng thời cho phép đánh giá độ ổn định và khả năng khái quát hóa của mô hình trong nhiều bối cảnh khác nhau [10].

Hiệu quả mô phỏng và dự báo của mô hình được đánh giá thông qua các chỉ tiêu thống kê phổ biến gồm NSE (hệ số Nash-Sutcliffe) nhằm đo mức độ phù hợp giữa giá trị mô phỏng và thực đo, RMSE (sai số bình phương trung bình căn) và MAE (sai số tuyệt đối trung bình) phản ánh độ lệch trung bình của mô hình so với thực tế, cùng với PBIAS (sai lệch phần trăm) nhằm kiểm tra xu hướng mô hình đánh giá cao hoặc thấp hơn so với quan trắc. Ngoài ra, kiểm định Diebold-Mariano được sử dụng để so sánh độ chính xác dự báo giữa các mô hình và xác định sự khác biệt này có ý nghĩa thống kê hay không. Kết quả được tổng hợp cho cả hai mùa kiệt và lũ, nhằm làm rõ sự khác biệt trong cơ chế lan truyền và phản ứng dòng chảy của từng mùa. Trong việc lựa chọn mô hình cuối cùng, các cấu trúc hồi quy đơn giản, ổn định và dễ diễn giải được ưu tiên sử dụng cho ứng dụng vận hành thực tế, trong khi các mô hình phi tuyến như hồi quy tổng quát dạng trơn (GAM) hoặc thuật toán học máy (như cây tăng cường) chỉ được dùng ở giai đoạn kiểm chứng độ nhạy, khi phát hiện mối quan hệ phi

tuyến rõ rệt giữa lưu lượng Kratie và hai trạm Tân Châu - Châu Đốc [8],[6].

Tất cả mô hình được xây cho hai thang thời gian tuần và tháng; τ được chọn riêng cho từng thang và từng trạm. Thời gian huấn luyện tối thiểu 10-15 năm cho từng giai đoạn để đảm bảo độ tin cậy tham số; kết quả hiển thị đầy đủ ma trận tương quan, hệ số, sai số chuẩn, VIF (Variance Inflation Factor), đồ thị chẩn đoán và biểu đồ dự báo ngoài mẫu.

2.4. Đánh giá hiệu quả mô hình

Hiệu quả mô phỏng và độ tin cậy của mô hình được đánh giá thông qua bốn chỉ tiêu thống kê phổ biến trong phân tích thủy văn, bao gồm hệ số xác định (R^2), hệ số hiệu quả Nash-Sutcliffe (NSE), sai số bình phương trung bình căn (RMSE) và sai lệch phần trăm (PBIAS). Trong đó, R^2 thể hiện mức độ tương quan giữa giá trị mô phỏng và quan trắc, phản ánh khả năng giải thích phương sai của mô hình; NSE đánh giá mức độ phù hợp của mô hình trong việc tái hiện biến động dòng chảy thực tế, với giá trị càng gần 1 cho thấy mô hình càng chính xác; RMSE đo độ lệch trung bình giữa giá trị mô phỏng và quan trắc, nhấn mạnh sai số lớn; còn PBIAS cho biết xu hướng mô hình đánh giá cao hoặc thấp hơn thực tế, với giá trị gần 0

biểu thị sai lệch hệ thống nhỏ nhất [7].

Bên cạnh việc sử dụng các chỉ tiêu thống kê, nghiên cứu còn tiến hành kiểm định độ tin cậy mô hình bằng phương pháp kiểm định chéo phân đoạn (K-fold cross-validation). Phương pháp này chia chuỗi dữ liệu thành K phần gần bằng nhau, lần lượt sử dụng K-1 phần để hiệu chỉnh mô hình và phần còn lại để kiểm tra khả năng dự báo. Quá trình này được lặp lại K lần, đảm bảo rằng mọi phần dữ liệu đều được dùng cả trong huấn luyện và kiểm định. Cách tiếp cận này giúp đánh giá được tính ổn định, khả năng khái quát hóa và độ tin cậy của mô hình, đồng thời hạn chế sai lệch do đặc thù dữ liệu từng giai đoạn. Kết quả tổng hợp từ các vòng kiểm định cung cấp cơ sở khách quan để lựa chọn cấu hình mô hình có hiệu suất cao và ổn định nhất cho dự báo dòng chảy tại Tân Châu và Châu Đốc [10].

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Tương quan và độ trễ giữa các trạm

Kết quả phân tích cho thấy mối liên hệ thủy văn giữa các trạm Kratie - Tân Châu - Châu Đốc thể hiện rõ nét qua tương quan chéo và biểu đồ phân tán ở hai quy mô thời gian là tuần và tháng.

Bảng 1: Kết quả phân tích tương quan và hồi quy giữa Kratie - Tân Châu - Châu Đốc

Cặp trạm	Quy mô thời gian	Độ trễ trung bình (tuần)	r (Pearson)	R^2 (hồi quy tháng)	Hệ số dốc (b)	Nhận xét chính
Kratie - Tân Châu (trước 2010)	Tuần	1-2	0,91-0,94	0,887	0,665	Quan hệ chặt chẽ, phản ánh cơ chế lan truyền tự nhiên ổn định.
Kratie - Tân Châu (sau 2010)	Tuần	2-3	0,83-0,90	0,816	0,604	Độ trễ tăng và tương quan giảm do tác động điều tiết hồ chứa dòng

Cấp trạm	Quy mô thời gian	Độ trễ trung bình (tuần)	r (Pearson)	R ² (hồi quy tháng)	Hệ số dốc (b)	Nhận xét chính
						chính.
Kratie - Châu Đốc (trước 2010)	Tuần	2-3	0,85-0,88	-	-	Ảnh hưởng lan truyền gián tiếp qua vùng Hồ Tonle Sap - sông Hậu, độ trễ cao hơn Tân Châu.
Kratie - Châu Đốc (sau 2010)	Tuần	3-4	0,75-0,80	-	-	Mối liên kết suy yếu, đặc biệt trong mùa kiệt; phản ánh thay đổi điều tiết Hồ Tonle Sap.

Kết quả phân tích cho thấy mối liên hệ thủy văn giữa các trạm Kratie - Tân Châu - Châu Đốc thể hiện rõ rệt ở cả hai quy mô thời gian tuần và tháng, qua kết quả tương quan chéo và độ phân tán (Bảng 1). Ở quy mô tuần, hàm tương quan chéo (CCF) chỉ ra rằng tín hiệu dòng chảy từ Kratie lan truyền xuống hạ lưu với độ trễ trung bình 1-2 tuần trong giai đoạn trước 2010, và tăng lên 2-3 tuần trong giai đoạn sau 2010. Sự khác biệt này phản ánh rõ rệt ảnh hưởng của hệ thống hồ chứa dòng chính được đưa vào vận hành sau năm 2010, làm giảm biên độ dao động và kéo dài thời gian lan truyền thủy lực dọc sông Mekong [2],[8].

Mối quan hệ giữa Kratie và Tân Châu được đánh giá có tương quan cao, với hệ số Pearson r đạt 0,91-0,94 trong giai đoạn trước 2010 và 0,83-0,90 sau 2010. Tương tự, cặp Kratie - Châu Đốc thể hiện mức tương quan thấp hơn ($r = 0,85-0,88$ trước 2010 và $r = 0,75-0,80$ sau 2010), do ảnh hưởng trung gian của hồ Tonle Sap và mạng sông - kênh phân lưu ở khu vực Campuchia và An Giang, vốn làm chậm và khuếch tán tín hiệu dòng chảy.

Kết quả này thống nhất với nhận định của Kummu và các cộng sự [4], Räsänen và các cộng sự [9] rằng Hồ Tonle Sap đóng vai trò bộ điều tiết tự nhiên, làm giảm biến động đột ngột trong mùa lũ và bổ sung dòng chảy cho hạ lưu vào mùa kiệt.

Phân tích hồi quy tuyến tính giữa lưu lượng trung bình tháng tại Kratie và Tân Châu cho thấy mối quan hệ gần tuyến tính hoàn hảo trong giai đoạn trước 2010 với phương trình dưới đây.

$$Q_{\text{Tân Châu}} = 2203 + 0,665Q_{\text{Kratie}}, \text{ với } R^2 = 0,887$$

Trong khi đó, giai đoạn sau 2010 có phương trình có dạng.

$$Q_{\text{Tân Châu}} = 2680 + 0,604Q_{\text{Kratie}}, \text{ với } R^2 = 0,816$$

Sự giảm của hệ số dốc (b) từ 0,665 xuống 0,604 cùng với R^2 giảm từ 0,887 xuống 0,816 cho thấy độ đồng biến giữa hai trạm suy yếu rõ rệt. Điều này có thể được lý giải bởi quá trình điều tiết hồ chứa thượng nguồn, làm giảm lượng nước đỉnh lũ và duy trì dòng chảy nền ổn định hơn, từ đó làm mờ mối tương quan trực tiếp giữa thượng và hạ lưu [10],[6].

Nhìn chung, các chỉ tiêu thống kê cho thấy liên

kết thủy văn trong hệ thống Mekong - Tonle Sap - ĐBSCL vẫn được duy trì nhưng đang yếu dần theo thời gian. Mức giảm đồng biến này, kết hợp với sự tăng độ trễ, là minh chứng định lượng rõ ràng cho sự thay đổi cơ chế điều tiết tự nhiên của Hồ Tonle Sap, cũng như tác động tổng hợp của hệ thống hồ chứa và biến đổi khí hậu lên chế độ dòng chảy mùa của hạ lưu Mekong.

So với Tân Châu, mối quan hệ giữa lưu lượng Kratie và Châu Đốc thể hiện độ trễ lớn hơn và hệ số tương quan thấp hơn, phản ánh đặc điểm lan truyền dòng chảy gián tiếp qua vùng trũng Hồ - sông Tonle Sap và sông Hậu. Kết quả phân tích tương quan chéo cho thấy, trong giai đoạn trước 2010, tín hiệu dòng chảy từ Kratie lan truyền đến Châu Đốc với độ trễ trung bình 2-3 tuần, trong khi hệ số tương quan r đạt 0,85-0,88. Ở giai đoạn sau 2010, độ trễ này tăng lên 3-4 tuần, đồng thời r giảm xuống còn 0,75-0,80, phản ánh rõ ảnh hưởng của hồ chứa dòng chính và sự thay đổi điều tiết của Hồ Tonle Sap sau khi quá trình tích - xả tự nhiên bị can thiệp [2],[8].

Phân tích hồi quy giữa lưu lượng trung bình tháng của hai trạm cũng cho thấy xu thế tương tự: hệ số dốc b giảm nhẹ, còn R^2 chỉ đạt mức trung bình khá (0,70-0,75) cho thấy Châu Đốc chịu tác động lan truyền dòng chảy yếu hơn so với Tân Châu. Điều này có thể lý giải bởi cấu trúc thủy lực của vùng trung lưu, nơi dòng chính sông Mekong phân thành hai nhánh qua sông Tiền - sông Hậu trước khi vào ĐBSCL. Nhánh sông Hậu nhận nước chủ yếu thông qua sông Bassac và kênh nối Tonle Sap, có quãng đường và thời gian lan truyền dài hơn [4],[9]. Ngoài ra, đặc điểm địa hình bằng phẳng và hệ thống kênh rạch dày đặc vùng biên giới Việt Nam - Campuchia cũng góp phần làm chậm phản ứng dòng chảy tại Châu Đốc so với Tân Châu.

Mức suy giảm tương quan trong giai đoạn sau 2010 phản ánh hai yếu tố chính. Thứ nhất là tác động điều tiết hồ chứa thượng nguồn, đặc biệt tại khu vực Bắc Lào và Nam Trung Quốc, làm thay đổi chu kỳ dòng chảy tự nhiên và làm mờ tín hiệu lan truyền mùa vụ [2],[10]. Thứ hai là vai trò giảm dần của cơ chế tích - xả của Hồ Tonle Sap, khi hồ này ngày càng chịu tác động mạnh bởi điều tiết nhân tạo và biến đổi khí hậu [4],[6]. Hệ quả là tín hiệu dòng chảy đến Châu Đốc không còn phụ thuộc tuyến tính vào biến động tại Kratie, mà chịu ảnh hưởng tổng hợp từ nhiều nguồn điều tiết khác nhau, bao gồm cả xả hồ, mưa địa phương và nước bốc hơi tại vùng Tonle Sap.

Như vậy, so sánh giữa hai cặp trạm cho thấy: (1) Kratie - Tân Châu phản ánh trực tiếp hơn sự lan truyền dòng chảy từ thượng lưu, có tương quan mạnh và độ trễ ngắn; (2) Kratie - Châu Đốc biểu hiện tác động gián tiếp qua hệ thống điều tiết tự nhiên và nhân tạo, với độ trễ dài hơn và tương quan yếu hơn.

Sự khác biệt này minh chứng cho việc chế độ thủy văn của ĐBSCL hiện nay không chỉ phụ thuộc vào dòng chảy từ Kratie, mà còn bị chi phối mạnh bởi diễn biến tại vùng hồ Tonle Sap và chính sách vận hành hồ chứa thượng lưu - hai yếu tố quyết định cơ chế tích - xả mùa vụ của toàn lưu vực Mekong.

3.2. Kết quả mô hình dự báo

Kết quả mô hình dự báo cho thấy, mối quan hệ giữa lưu lượng Kratie và các trạm hạ lưu (Tân Châu, Châu Đốc) có thể được mô tả tương đối tốt bằng các mô hình hồi quy tuyến tính có độ trễ, với độ chính xác cao và tính ổn định qua thời gian. Ở quy mô tháng, mô hình đạt hệ số xác định R^2 từ 0,82 đến 0,89, hệ số hiệu quả Nash-Sutcliffe (NSE) dao động 0,80-0,88 và sai lệch phần trăm (PBIAS) nằm trong khoảng

$\pm 5-8\%$ trong giai đoạn trước 2010, phản ánh khả năng tái hiện tốt biến động dòng chảy theo mùa. Sang giai đoạn sau 2010, các chỉ tiêu thống kê giảm nhẹ (R^2 giảm 0,05-0,1 và

RMSE tăng 10-20%), cho thấy tác động của việc điều tiết dòng chảy bởi hệ thống hồ chứa dòng chính và thay đổi chế độ tích - xả của Hồ Tonle Sap [2],[8],[6].

Bảng 2: Kết quả mô hình dự báo lưu lượng theo trạm, giai đoạn và quy mô thời gian dựa theo lưu lượng tại Kratie

Trạm	Quy mô thời gian	Độ trễ tối ưu (tuần)	a (m^3/s)	b (hệ số dốc)	NSE	R^2	RMSE (m^3/s)	MAE (m^3/s)	PBIAS (%)	Đánh giá mô hình
Tân Châu-trước 2010	Tuần	2	-	-	0,88	0,91	650	480	+3,2	Dự báo rất tốt, độ trễ tự nhiên, phản ánh cơ chế tích - xả Hồ Tonle Sap ổn định.
Tân Châu - sau 2010	Tuần	3	-	-	0,78	0,85	810	610	-5,4	Độ trễ tăng, tương quan yếu hơn do điều tiết hồ chứa dòng chính.
Tân Châu - trước 2010	Tháng	-	2203	0,665	0,87	0,89	580	410	+2,1	Mối quan hệ tuyến tính mạnh, phản ánh dòng chảy tự nhiên ổn định.
Tân Châu - sau 2010	Tháng	-	2680	0,604	0,79	0,82	720	540	-4,3	Dòng chảy mùa lũ bị giảm biên độ, cơ chế điều tiết nhân tạo rõ rệt.
Châu Đốc-trước	Tuần	3	-	-	0,81	0,86	770	560	+4,8	Quan hệ gián tiếp qua sông Hậu, độ trễ dài hơn Tân

Trạm	Quy mô thời gian	Độ trễ tối ưu (tuần)	a (m ³ /s)	b (hệ số dốc)	NSE	R ²	RMSE (m ³ /s)	MAE (m ³ /s)	PBIAS (%)	Đánh giá mô hình
2010										Châu.
Châu Đốc - sau 2010	Tuần	4	-	-	0,70	0,78	890	680	-6,7	Liên kết yếu, phản ứng chậm do ảnh hưởng điều tiết Hồ Tonle Sap.
Châu Đốc - trước 2010	Tháng	-	2350	0,612	0,82	0,84	690	520	+3,5	Phù hợp cho dự báo trung hạn, R ² cao, thiên lệch nhỏ.
Châu Đốc - sau 2010	Tháng	-	2910	0,557	0,74	0,79	850	650	-7,1	Dòng chảy bị điều tiết mạnh, tín hiệu lan truyền yếu.

Ở quy mô tuần, mô hình hồi quy trễ cho thấy khả năng nắm bắt tín hiệu lan truyền dòng chảy ngắn hạn rất tốt, với hệ số tương quan r thường $> 0,9$ trước năm 2010. Tuy nhiên, trong giai đoạn sau 2010, mô hình trở nên nhạy cảm hơn với các biến động nhân tạo do vận hành hồ chứa và xả cục bộ, khiến NSE giảm còn 0,65-0,75 và sai số RMSE tăng đáng kể. Độ trễ tối ưu được xác định thông qua phân tích CCF là 1-2 tuần trong giai đoạn trước 2010, và 2-3 tuần trong giai đoạn sau 2010 đối với Tân Châu; riêng tại Châu Đốc, độ trễ trung bình dài hơn khoảng 1 tuần, phù hợp với đặc điểm lan truyền gián tiếp qua sông Hậu và vùng Tonle Sap. Khi đưa các giá trị trễ tối ưu vào mô hình, sai số giảm rõ rệt so với trường hợp sử dụng trễ cố định, đặc biệt trong mùa kiệt - khi tín hiệu dòng chảy lan truyền chậm hơn do Hồ

Tonle Sap xả nước kéo dài [4],[9].

Kết quả so sánh giữa các cấu trúc mô hình cho thấy hồi quy tuyến tính trễ tối ưu vẫn là phương án có độ tin cậy và khả năng diễn giải cao nhất. Việc mở rộng mô hình sang ARIMAX (thêm thành phần tự hồi quy - trung bình trượt) giúp giảm sai số ngắn hạn ở quy mô tuần khoảng 5-8%, song không cải thiện đáng kể đối với mô hình tháng. Các mô hình đa biến (thêm thành phần mùa vụ hoặc lượng mưa trung lưu) cho thấy lợi ích vừa phải trong giảm thiên lệch mùa kiệt, nhưng chỉ số NSE, R² cải thiện không đáng kể. Trong khi đó, các mô hình phi tuyến như cây tăng cường (XGBoost) hoặc hàm trơn tổng quát (GAM) có thể mô phỏng tốt hơn ở các pha cực trị, song mất tính đơn

giảm và khả năng giải thích vật lý, do đó không phù hợp cho mục tiêu vận hành [10],[3].

Khi so sánh theo không gian, mô hình tại Tân Châu đạt hiệu năng cao hơn Châu Đốc (R^2 lớn hơn khoảng 0,05-0,10) phản ánh đặc trưng lan truyền trực tiếp của dòng chính sông Tiền. Ngược lại, mô hình Châu Đốc chịu ảnh hưởng khuếch tán và chậm pha do dòng chảy qua sông Hậu và vùng Hồ Tonle Sap, khiến độ trễ dài hơn và hệ số dốc thấp hơn. Theo MRC[6], đặc trưng này phù hợp với cấu trúc điều tiết tự nhiên của hệ thống Tonle Sap, nơi phần lớn dòng lũ được giữ lại vào mùa mưa và xả ra hạ lưu vào cuối mùa khô.

Nhìn chung, mô hình theo tháng tỏ ra ổn định và phù hợp cho dự báo trung hạn phục vụ lập kế hoạch vận hành nguồn nước và mùa vụ, trong khi mô hình theo tuần có ưu thế trong cảnh báo sớm các biến động dòng chảy ngắn hạn. Việc áp dụng đúng độ trễ thủy văn tối ưu (1-3 tuần) giúp mô hình duy trì độ tin cậy cao với sai số trung bình nhỏ, qua đó cung cấp công cụ hữu ích cho công tác quản lý, vận hành và dự báo nguồn nước hạ lưu sông Mekong, đặc biệt trong bối cảnh cơ chế điều tiết tự nhiên của Hồ Tonle Sap đang suy giảm và dòng chảy ngày càng phụ thuộc vào điều tiết nhân tạo ở thượng nguồn [2],[8],[10],[6].

3.3. Ứng dụng thực tiễn

Kết quả nghiên cứu chứng minh rằng, mối liên hệ thủy văn giữa Kratie - Tân Châu - Châu Đốc có thể được khai thác hiệu quả để xây dựng hệ thống cảnh báo sớm dòng chảy hạ lưu, phục vụ công tác vận hành công trình và quản lý tài nguyên nước vùng ĐBSCL. Với độ trễ lan truyền dòng chảy trung bình 1-3 tuần, tùy theo mùa và giai đoạn, các mô hình hồi quy trễ và ARIMAX được hiệu chỉnh trong nghiên cứu này có khả năng dự báo sớm các

đợt giảm lưu lượng tại Tân Châu và Châu Đốc - hai cửa ngõ quan trọng phản ánh nguồn nước đầu vào của toàn vùng. Khi lưu lượng tại Kratie giảm liên tục trong 2-3 tuần, mô hình có thể ước tính xác suất cao về sự suy giảm dòng chảy hạ lưu trong tuần kế tiếp, từ đó hỗ trợ ra quyết định điều hành công, đập và công trình lấy nước ở các tiểu vùng hạ lưu sông Tiền và sông Hậu.

Cụ thể, trong mùa kiệt, mô hình cho phép cảnh báo sớm 10-20 ngày trước khi dòng chảy tại Tân Châu và Châu Đốc giảm xuống dưới ngưỡng trung bình nhiều năm. Đây là khoảng thời gian đủ để điều chỉnh vận hành công ven sông, dự trữ nước trong nội đồng và bố trí lịch lấy nước hợp lý, giúp hạn chế rủi ro xâm nhập mặn, thiếu nước và sụt giảm mực nước kênh nội đồng. Trong mùa lũ, mô hình có thể dự báo sớm xu thế đỉnh lũ hoặc kết thúc mùa lũ, hỗ trợ công tác điều tiết hồ chứa, bảo đảm an toàn công trình và vận hành vùng ngập kiểm soát. Những ứng dụng này đặc biệt hữu ích khi hệ thống quan trắc tự động và dự báo khí tượng ở thượng nguồn còn hạn chế hoặc thiếu liên tục.

Ngoài khả năng cảnh báo độc lập, mô hình hồi quy trễ giữa Kratie - Tân Châu - Châu Đốc có thể tích hợp trực tiếp vào các nền tảng mô hình hiện có của Việt Nam và Ủy hội sông Mekong. Trong hệ thống MIKE 11 hoặc MIKE NAM - MIKE 11, mô hình này có thể đóng vai trò mô-đun ranh giới thượng lưu, cung cấp dòng chảy đầu vào cập nhật theo thời gian thực cho các mô phỏng lan truyền mực nước và độ mặn tại ĐBSCL. Khi kết hợp với mô hình thủy lực - thủy triều (MIKE 21FM hoặc MIKE 21C), kết quả dự báo từ Kratie có thể được lan truyền tới các khu vực trọng điểm như Cao Lãnh, Cần Thơ, Trần Đề và Gò Công, giúp đánh giá nguy cơ xâm nhập mặn và thiếu hụt nước ngọt theo thời gian.

Đồng thời, mô hình có thể được tích hợp vào Hệ thống Hỗ trợ Quyết định (Decision Support System - DSS) do MRC và Việt Nam phát triển (MRC-DSS). Trong cấu trúc DSS này, mô hình hồi quy trễ có thể đảm nhiệm mô-đun dự báo nhanh dòng chảy đầu vào cho các tiểu lưu vực, cập nhật tự động từ chuỗi dữ liệu Kratie - Prek Kdam - Phnom Penh, giúp cảnh báo sớm các biến động bất thường (ví dụ: dòng chảy thấp kéo dài, giảm đột ngột hoặc tăng bất thường do xả hồ). Khi được kết hợp với mô hình WEAP hoặc MIKE Hydro Basin, chuỗi dự báo này có thể phục vụ phân bổ nước đa mục tiêu (tưới, sinh hoạt, môi trường) ở hạ lưu, nâng cao khả năng ứng phó chủ động của các tỉnh vùng ĐBSCL.

Như vậy, ứng dụng thực tiễn lớn nhất của mô hình nằm ở khả năng cung cấp công cụ cảnh báo sớm, đơn giản nhưng hiệu quả, dựa trên tín hiệu lưu lượng tại Kratie - trạm đại diện cho dòng chảy tổng hợp toàn lưu vực Mekong. Việc triển khai mô hình này dưới dạng mô-đun phụ trợ cho các hệ thống hiện có như MIKE 11 hoặc MRC-DSS không chỉ tăng độ tin cậy cho công tác dự báo, mà còn tạo nền tảng cho một hệ thống giám sát - cảnh báo nguồn nước theo thời gian thực, phục vụ chiến lược an ninh nguồn nước và phát triển bền vững vùng ĐBSCL trong bối cảnh biến đổi khí hậu và tác động thượng nguồn ngày càng rõ rệt.

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết luận

Kết quả nghiên cứu cho thấy mối liên hệ thủy văn giữa Kratie - Tân Châu - Châu Đốc thể hiện rõ rệt ở cả quy mô tuần và tháng, phản ánh vai trò chi phối của dòng chảy thượng lưu Mekong và cơ chế điều tiết tự nhiên của Hồ Tonle Sap đối với chế độ thủy văn vùng hạ lưu ĐBSCL. Trong giai đoạn trước 2010, khi hệ thống hồ chứa dòng chính chưa phát triển, tín

hiệu dòng chảy lan truyền từ Kratie đến hạ lưu với độ trễ trung bình 1-2 tuần, hệ số tương quan đạt $r > 0,9$ và mô hình hồi quy tuyến tính có $R^2 = 0,88-0,89$ phản ánh mối liên kết thủy văn mạnh mẽ và ổn định giữa thượng và hạ lưu.

Tuy nhiên, sang giai đoạn sau 2010, kết quả phân tích CCF và hồi quy cho thấy độ trễ lan truyền tăng lên 2-3 tuần, trong khi hệ số tương quan và R^2 giảm lần lượt khoảng 10-15%, cùng với RMSE tăng 150-200 m³/s. Hệ số dốc trong mô hình hồi quy giảm từ 0,665 xuống 0,604 cho thấy vai trò điều tiết của Hồ Tonle Sap và sự đồng biến giữa Kratie và Tân Châu - Châu Đốc đang suy giảm rõ rệt. Đây là biểu hiện định lượng của sự chuyển đổi cơ chế điều tiết dòng chảy tự nhiên sang điều tiết nhân tạo, chủ yếu do vận hành hồ thủy điện dòng chính Mekong, kết hợp với biến đổi khí hậu làm thay đổi chu kỳ mùa kiệt - mùa lũ.

Ở quy mô không gian, Tân Châu thể hiện mối quan hệ trực tiếp và tuyến tính hơn với Kratie so với Châu Đốc, nơi dòng chảy bị khuếch tán và trễ pha do ảnh hưởng của sông Hậu và vùng Hồ Tonle Sap - Bassac. Độ trễ trung bình tại Châu Đốc dài hơn 1 tuần và hệ số tương quan thấp hơn 0,05-0,1 so với Tân Châu, phản ánh đặc trưng lan truyền gián tiếp của hệ thống hạ lưu. Tuy vậy, cả hai trạm vẫn duy trì tính tuyến tính tổng thể, cho phép ứng dụng các mô hình hồi quy trễ và ARIMAX trong dự báo dòng chảy.

Kết quả hiệu chuẩn và kiểm định mô hình cho thấy, các mô hình hồi quy theo độ trễ đạt NSE 0,80-0,88, RMSE < 800 m³/s và PBIAS trong $\pm 8\%$, chứng minh độ tin cậy cao và khả năng ứng dụng thực tiễn cho dự báo ngắn hạn (theo tuần) và trung hạn (theo tháng). Mô hình tuần thích hợp cho cảnh báo sớm dòng chảy, hạn hán - xâm nhập mặn, trong khi mô hình tháng

phù hợp cho vận hành nguồn nước, lập kế hoạch mùa vụ và đánh giá xu thế dòng nền.

Những kết quả này góp phần khẳng định tầm quan trọng của Kratie như một điểm đại diện đầu vào thủy văn cho toàn bộ hạ lưu Mekong. Việc định lượng mối quan hệ theo độ trễ giữa Kratie - Tân Châu - Châu Đốc giúp nâng cao hiểu biết về cơ chế lan truyền dòng chảy và biến đổi thủy văn xuyên biên giới, đồng thời tạo cơ sở khoa học cho việc xây dựng hệ thống dự báo và quản lý tài nguyên nước liên quốc gia trong bối cảnh biến đổi khí hậu và thay đổi dòng chảy thượng nguồn.

Kiến nghị

Từ các kết quả đạt được, nghiên cứu này kiến nghị một số định hướng khoa học và quản lý nhằm nâng cao hiệu quả dự báo và điều hành nguồn nước hạ lưu sông Mekong trong giai đoạn tới. Trước hết, cần mở rộng các mô hình hồi quy hiện tại theo hướng đa biến, tích hợp thêm các yếu tố như mưa trung lưu, mực nước Hồ Tonle Sap và thông tin vận hành hồ chứa thượng nguồn, nhằm phản ánh đầy đủ hơn cơ chế lan truyền dòng chảy và cải thiện độ chính xác trong mùa kiệt - giai đoạn vốn chịu ảnh hưởng mạnh nhất của điều tiết nhân tạo. Bên cạnh đó, việc kết hợp mô hình thống kê (hồi quy trễ, ARIMAX) với mô hình thủy văn - thủy lực (MIKE 11, WEAP, SWAT) sẽ cho phép mô phỏng đồng thời cả tín hiệu dòng chảy và các quá trình điều tiết tự nhiên - nhân tạo, từ đó nâng cao khả năng dự báo ngắn hạn và trung hạn phục vụ quản lý tổng hợp lưu vực.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Arias, M. E., Cochrane, T. A., Norton, D., Killeen, T. J., & Khon, P. (2014). The flood pulse as the underlying driver of vegetation in the Tonle Sap floodplain. *Hydrobiologia*, 755(1), 35-47.

Về phương diện vận hành thực tiễn, kết quả nghiên cứu có thể được ứng dụng trực tiếp trong hệ thống cảnh báo sớm dòng chảy hạ lưu, đặc biệt tại hai trạm chủ chốt Tân Châu và Châu Đốc, với thời gian dự báo trước từ 1 đến 3 tuần. Việc triển khai mô hình này sẽ hỗ trợ hiệu quả cho công tác điều hành hồ chứa, vận hành cống đập, bố trí thời vụ và phòng chống xâm nhập mặn trong vùng ĐBSCL. Để nâng cao độ tin cậy, cần thiết lập cơ chế chia sẻ dữ liệu lưu lượng, mực nước và vận hành hồ chứa theo thời gian thực giữa các quốc gia trong lưu vực, đặc biệt giữa Campuchia và Việt Nam, nhằm đảm bảo dữ liệu đầu vào đồng nhất và kịp thời cho hệ thống dự báo.

Ở tầm chính sách và hợp tác vùng, nghiên cứu đề xuất Ủy hội sông Mekong cùng các quốc gia thành viên xây dựng bộ chỉ số cảnh báo sớm liên quốc gia, dựa trên quan hệ thủy văn Kratie - Tân Châu - Châu Đốc, để theo dõi biến động dòng chảy, phát hiện sớm xu thế suy giảm dòng nền và tăng xâm nhập mặn trong mùa khô. Đồng thời, cần tăng cường hợp tác nghiên cứu và chia sẻ dữ liệu vận hành hồ chứa dòng chính, nhằm bảo tồn và phát huy vai trò điều tiết tự nhiên của Hồ Tonle Sap - một trong những yếu tố quyết định an ninh nguồn nước, năng suất sinh thái và sinh kế vùng hạ lưu Mekong. Việc duy trì cơ chế hợp tác dữ liệu, kết hợp với mô hình dự báo định lượng như nghiên cứu này, sẽ góp phần xây dựng nền tảng quản lý nước chủ động, thích ứng và bền vững hơn cho toàn vùng châu thổ.

- [2] Arias, M. E., Holtgrieve, G. W., Piman, T., et al. (2020). Impacts of mainstream hydropower on Tonle Sap and the Mekong Delta. *Scientific Reports*, 10, 11923.
- [3] Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2021). *Forecasting: Principles and practice* (3rd ed.). OTexts.
- [4] Kummu, M., Lu, X. X., Rasphone, S. A., Sarkkula, J., & Koponen, J. (2014). River flow changes in the Mekong Basin. *Journal of Hydrology*, 519, 268-281.
- [5] Mekong River Commission (MRC). (2021). *State of the Basin Report 2021*. Vientiane, Lao PDR.
- [6] Mekong River Commission (MRC). (2024). *Hydrological Yearbook and Data Portal*. Vientiane, Lao PDR.
- [7] Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.
- [8] Piman, T., Cochrane, T. A., Arias, M. E., et al. (2020). Future hydrological alterations in the Mekong River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(6), 3317-3330.
- [9] Räsänen, T. A., Someth, P., Lauri, H., Koponen, J., Sarkkula, J., & Kummu, M. (2017). Observed river discharge changes due to hydropower operations in the upper Mekong. *Journal of Hydrology*, 545, 28-41.
- [10] Sabo, J. L., Ruhi, A., Holtgrieve, G. W., et al. (2021). Designing river flows to improve food security futures in the Lower Mekong Basin. *Science*, 372(6542), 1226-1230.
- [11] Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences* (3rd ed.). Academic Press.