

ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ VẬN HÀNH THỬ NGHIỆM HỆ THỐNG THỦY LỢI CÁI LỚN - CÁI BÉ GIAI ĐOẠN 2021-2023 VÀ HÀM Ý HOÀN THIỆN QUY TRÌNH VẬN HÀNH

Nguyễn Đăng Tính, Nguyễn Trinh Chung

Trường Đại học Thủy lợi

Phạm Văn Tùng

Viện Kỹ thuật Biển

Nguyễn Đăng Luân

Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam

Tóm tắt: Nghiên cứu đánh giá hiệu quả vận hành thử nghiệm (2021-2023) của hệ thống thủy lợi Cái Lớn - Cái Bé dựa trên chuỗi quan trắc mực nước, độ mặn, lưu lượng tại 25 trạm và mô phỏng thủy lực - mặn bằng mô hình MIKE 11/21FM đã hiệu chỉnh, kiểm định cho các năm đại diện (2018 - lũ trung bình; 2022 - khô hạn). Kết quả cho thấy phương án vận hành điều tiết linh hoạt theo tín hiệu mặn - triều - mùa làm ranh mặn 4,0 g/L lùi về hạ lưu 8-12 km so với năm cơ sở 2020; mực nước đỉnh triều nội đồng hạ trung bình 0,25-0,35 m; diện tích ngập sâu >0,3 m giảm khoảng 2.000-2.300 ha. Trong mùa khô 2023, mực nước nội đồng duy trì 0,4-0,6 m đáp ứng nhu cầu tưới - tiêu cho khoảng 70% vùng tôm - lúa, đồng thời các vùng ngọt hóa không ghi nhận nhiễm mặn đầu vụ Đông Xuân. Độ tin cậy mô hình đạt mức cao ($NSE > 0,90$ đối với mực nước; $NSE > 0,85$ đối với độ mặn; $R^2 = 0,93$), bảo đảm cơ sở định lượng cho phân tích kịch bản. Trên nền kết quả này, nghiên cứu đề xuất khung quy trình vận hành thích ứng ba cấp (đầu mối - phân vùng - nội đồng) tích hợp quan trắc thời gian thực và mô phỏng dự báo ngắn hạn, làm căn cứ hoàn thiện quy trình vận hành chính thức của hệ thống.

Từ khóa: Hệ thống Cái Lớn - Cái Bé; vận hành thử nghiệm; kiểm soát mặn; MIKE 11/21FM; quy trình vận hành thích ứng.

Summary: This study evaluates the trial operation performance (2021-2023) of the Cai Lon-Cai Be irrigation system using hourly observations of water level, salinity, and discharge from 25 monitoring stations, combined with hydrodynamic-salinity simulations conducted by a calibrated and validated MIKE 11/21FM model for representative years (2018 - average flood; 2022 - dry condition). Results indicate that the adaptive operation scheme based on salinity-tide-season signals pushed the 4 g/L salinity front 8-12 km downstream compared to the 2020 baseline, reduced tidal peak levels by 0.25-0.35 m, and decreased inundation areas (>0.3 m depth) by approximately 2,000-2,300 ha. During the 2023 dry season, inland water levels were maintained at 0.4-0.6 m, ensuring suitable water conditions for about 70% of the rice-shrimp farming area, while the freshwater zones recorded no early salinity intrusion during the Winter-Spring crop. Model performance showed high reliability ($NSE > 0.90$ for water level; $NSE > 0.85$ for salinity; $R^2 = 0.93$), providing a solid quantitative basis for scenario analysis. Based on these results, the study proposes a three-tier adaptive operational framework (headworks - subregional - on-farm levels) integrating real-time monitoring and short-term forecasting models as a foundation for developing the official operating procedure of the system.

Keywords: Cai Lon-Cai Be system; trial operation; salinity control; MIKE 11/21FM; operation procedure.

1. MỞ ĐẦU

Vùng Bán đảo Cà Mau (BĐCM) là khu vực chịu tác động mạnh của hạn hán và xâm nhập mặn trong mùa khô, đồng thời thường xuyên đối mặt với tình trạng ngập úng trong mùa

mưa, đặc biệt tại các vùng trũng thấp ven biển phía Tây. Theo các nghiên cứu gần đây của Viện Khoa học Thủy lợi Miền Nam [4], sự biến động cực đoan của mực nước và độ mặn trong khu vực này có xu thế gia tăng rõ rệt dưới tác động kết hợp của biến đổi khí hậu, khai thác nước thượng lưu sông Mekong và thay đổi sử dụng đất nội vùng. Để chủ động kiểm soát các yếu tố này, hệ thống công trình

Ngày nhận bài: 25/12/2025

Ngày thông qua phản biện: 30/01/2026

Ngày duyệt đăng: 05/02/2026

thủy lợi Cái Lớn - Cái Bé (CLCB) được đầu tư xây dựng như một giải pháp liên vùng có quy mô lớn nhất khu vực, với mục tiêu kiểm soát mặn - ngọt, điều tiết nguồn nước phục vụ sản xuất nông nghiệp, nuôi trồng thủy sản, cấp nước sinh hoạt, tiêu thoát lũ và ổn định sinh kế cho khoảng 1,3 triệu người.



Hình 1: Vị trí cống Cái Lớn- Cái Bé và vùng ảnh hưởng [4]

Theo Quyết định số 4789/QĐ-BNN-TCTL [1], hệ thống CLCB được vận hành thử nghiệm trong giai đoạn 2021-2023 nhằm đánh giá hiệu quả công trình, kiểm chứng các giả định thiết kế và xác định các điều kiện thủy văn đặc trưng phục vụ xây dựng quy trình vận hành chính thức. Sau hai năm triển khai, việc tổng hợp kết quả quan trắc và mô phỏng cho thấy cần có một đánh giá định lượng toàn diện về hiệu quả kiểm soát mặn, điều tiết nước và mức độ hỗ trợ cho sản xuất nông - thủy sản, đặc biệt trong bối cảnh điều kiện khí hậu ngày càng biến động phức tạp [6].

Trên cơ sở đó, bài báo này tập trung vào ba mục tiêu chính. Thứ nhất, phân tích các đặc trưng thủy văn và thủy lực trong hai năm vận hành thử, thông qua chuỗi số liệu quan trắc mực nước, lưu lượng và độ mặn tại các trạm chính trên sông Cái Lớn, Cái Bé và vùng

kênh nội đồng. Thứ hai, đánh giá định lượng mức độ cải thiện điều kiện mặn, ngập và cấp nước phục vụ sản xuất thông qua mô phỏng bằng mô hình MIKE 11/21 đã được hiệu chỉnh cho giai đoạn 2021-2023. Thứ ba, trên cơ sở kết quả phân tích, bài báo đề xuất khung quy trình vận hành thích ứng, linh hoạt theo tín hiệu mặn - triều - mùa, phù hợp với bối cảnh biến đổi khí hậu và định hướng phát triển bền vững vùng ĐBCM trong giai đoạn tới.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Dữ liệu sử dụng

Nguồn dữ liệu nghiên cứu được thu thập, tổng hợp và kiểm định từ nhiều nguồn tin cậy nhằm đảm bảo độ chính xác và tính đại diện cho khu vực hệ thống Cái Lớn - Cái Bé. Bộ dữ liệu thủy văn - mặn gồm chuỗi quan trắc mực nước, độ mặn và lưu lượng tại 25 trạm trên các trục sông chính (Cái Lớn, Cái Bé, Xẻo Rô, Quản Lộ, Phụng Hiệp) giai đoạn 2021-2023, ghi nhận liên tục với tần suất 1 giờ/lần trong cả mùa khô và mùa mưa. Dữ liệu được thu thập trong khuôn khổ chương trình vận hành thử, phản ánh đầy đủ dao động triều, biến động mặn theo thời gian - không gian, và là cơ sở hiệu chỉnh mô hình MIKE 11/21FM phục vụ đánh giá hiệu quả vận hành [2],[4].

Dữ liệu vận hành được tổng hợp từ nhật ký đóng/mở cống Cái Lớn, Cái Bé và Xẻo Rô, bao gồm thời điểm, độ mở van, mực nước hai bên và chế độ điều tiết từng cửa, thể hiện thực tiễn điều hành trong các điều kiện thủy văn khác nhau, đặc biệt các đợt triều cao tháng 2-4 và 9-10 hằng năm.

Về địa hình, nghiên cứu sử dụng kết quả đo cao độ dẫn chuyên năm 2023 theo mốc quốc gia AT-M30 [5],[3] đảm bảo thống nhất với cao trình thiết kế công trình và dùng để hiệu chỉnh mốc 0 trong tính toán mô phỏng. Bản đồ địa hình tỷ lệ 1:5000 và bản đồ sử dụng đất năm 2023 được khai thác để thiết lập điều kiện biên và phân vùng tiêu thoát nước, hình thành bộ cơ sở dữ liệu đồng bộ phục vụ toàn bộ quá trình hiệu chỉnh - kiểm định mô hình và đánh giá vận hành hệ thống.

2.2. Mô hình tính toán

Mô hình MIKE 11/21FM

Mô hình tính toán được xây dựng trên nền tảng MIKE 11/21FM, kết hợp cấu trúc 1D-2D nhằm mô phỏng đồng thời dòng chảy dọc các trục sông - kênh chính và quá trình lan truyền mặn trong không gian ngập vùng hạ lưu. Mô hình 1D mô tả dòng chảy trong các tuyến kênh chính, trong khi phần 2D mô phỏng các vùng trũng, ô đồng và khu vực ven sông chịu ảnh hưởng mạnh của triều, giúp phản ánh chính xác phân bố mặn - ngọt và động thái mực nước dưới các chế độ vận hành khác nhau.

Mạng lưới mô hình bao gồm 4.800 km kênh chính, 165 nhánh phụ và 27 công trình điều tiết, trong đó hai cống Cái Lớn và Cái Bé được mô hình hóa chi tiết theo chế độ mở - đóng từng cửa van, có xét đến tổn thất cục bộ và điều kiện biên vận hành thực tế. Hệ thống kênh nhánh được thiết lập dựa trên bản đồ địa hình tỷ lệ 1:5000 và sơ đồ quản lý thủy lợi do Công ty Khai thác Công trình Thủy lợi Miền Nam cung cấp, bảo đảm tính liên thông thủy lực giữa các tiểu vùng sản xuất [2].

Điều kiện biên thượng được gán theo chuỗi

lưu lượng thực đo tại Tân Châu (sông Hậu) và Cái Sắn, đại diện cho nguồn nước ngọt từ hệ thống Mekong; biên hạ thiết lập theo mực nước triều bán nhật triều tại biển Tây, sử dụng số liệu tại Rạch Giá và Xẻo Rô (2021-2023). Sự kết hợp này cho phép mô hình tái hiện chính xác quá trình tương tác giữa dòng chảy thượng lưu và triều biển Tây - yếu tố quyết định sự hình thành và lan truyền ranh mặn trong vùng hạ lưu hệ thống Cái Lớn - Cái Bé.

Hiệu chỉnh và kiểm định

Bộ mô hình được hiệu chỉnh và kiểm định theo hai năm đại diện có điều kiện thủy văn tương phản nhằm bảo đảm khả năng tái hiện toàn diện biến động của hệ thống: năm 2018 (lũ trung bình) và năm 2022 (khô hạn, thiếu nước). Quy trình hiệu chỉnh sử dụng chuỗi mực nước, độ mặn và lưu lượng theo giờ tại các trạm chủ chốt, đồng thời tối ưu các tham số nhám kênh, hệ số trộn - khuếch tán và tổn thất qua công trình. Trong giai đoạn kiểm định, toàn bộ bộ tham số được giữ nguyên để đánh giá tính ổn định của mô hình trong các điều kiện thủy văn khác nhau.

Bảng 1: Kết quả hiệu chỉnh (2018) và kiểm định (2022-2023) mô hình MIKE 11/21FM

Biến / Trạm	Giai đoạn	NSE	R ²	MAE	Sai lệch điển hình	Nhận xét kỹ thuật
Mực nước (toàn hệ thống)	Hiệu chỉnh	$\geq 0,90$	-	$< 0,10$ m	-	Hiệu năng rất tốt, mô hình ổn định
Mực nước (toàn hệ thống)	Kiểm định	0,91	0,93	0,06 m	-	Phản ánh đúng biên độ triều, không lệch hệ thống
Độ mặn (toàn hệ thống)	Hiệu chỉnh	$\geq 0,85$	-	$< 0,4\%$	-	Sai lệch nhỏ, mô phỏng ổn định
Độ mặn (toàn hệ thống)	Kiểm định	0,86	-	$< 0,4\%$	-	Đạt mức rất tốt theo Moriasi [7]
Trạm HL1 - Cái Lớn (mực nước)	Kiểm định	0,91	0,93	0,06 m	-0,08 m (đỉnh), +0,05 m (chân)	Mô phỏng đúng pha, biên độ; duy trì nước tốt pha rút
Trạm HL1 - Cái Lớn (độ mặn)	Kiểm định	0,86	0,90	$< 0,4\%$	-0,3% đến +0,4%	Bất đúng dao động mặn theo triều; phù hợp quan trắc

Kết quả cho thấy mô hình đạt hiệu năng cao, với chỉ số $NSE \geq 0,90$ đối với mực nước và $\geq 0,85$ đối với độ mặn tại hầu hết các trạm; sai lệch trung bình nhỏ ($< 0,1$ m cho mực nước,

$< 0,4\%$ cho mặn) và không có xu hướng lệch hệ thống. Các kết quả này khẳng định mô hình MIKE 11/21FM đáp ứng tốt yêu cầu độ tin cậy để phân tích kịch bản vận hành và đánh giá

định lượng hiệu quả kiểm soát mặn - tiêu thoát nước của hệ thống Cái Lớn - Cái Bé [4],[2].

2.3. Chỉ tiêu đánh giá

Các chỉ tiêu đánh giá được xây dựng nhằm lượng hóa khách quan hiệu quả vận hành của hệ thống thủy lợi Cái Lớn - Cái Bé, phản ánh trực tiếp mối quan hệ giữa chế độ vận hành công trình với biến động thủy văn và mặn trong vùng. Bộ chỉ tiêu gồm bốn đại lượng đặc trưng, được lựa chọn trên cơ sở tham chiếu hướng dẫn của Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn (nay là Bộ Nông nghiệp và Môi trường) về đánh giá hiệu quả kiểm soát mặn - tiêu thoát nước và khung đánh giá vận hành hệ thống thủy lợi ven biển do Viện Khoa học Thủy lợi Miền Nam và các cơ quan đề xuất [4].

Chỉ tiêu ΔX_{m4} biểu thị mức dịch chuyển không gian của ranh mặn 4 g/l, ngưỡng giới hạn cho sản xuất nông nghiệp ở Đồng bằng sông Cửu Long. Giá trị ΔX_{m4} (km) thể hiện khả năng đẩy lùi hay xâm nhập của ranh mặn do tác động vận hành; nếu ΔX_{m4} mang giá trị âm, ranh mặn được đẩy ra hạ lưu, tức hiệu quả kiểm soát mặn tốt hơn.

Chỉ tiêu ΔH_{max} thể hiện mức thay đổi mực nước đỉnh triều nội đồng so với trước khi công trình đi vào hoạt động. Đây là thông số thủy lực quan trọng dùng để đánh giá khả năng cắt đỉnh triều và tiêu thoát nước, đặc biệt trong mùa mưa lũ hoặc các đợt triều cường kết hợp mưa lớn. Giá trị âm của

ΔH_{max} cho thấy mực nước đỉnh triều giảm, phản ánh khả năng điều tiết và giảm ngập của hệ thống.

Chỉ tiêu ΔS_{avg} mô tả mức thay đổi độ mặn trung bình (‰) tại các trạm đại diện, phản ánh tổng hợp sự cải thiện của điều kiện mặn - ngọt trong vùng. Khi ΔS_{avg} giảm, độ mặn trung bình hạ thấp, vùng ngọt mở rộng, thuận lợi cho sản xuất và cấp nước sinh hoạt; ngược lại, ΔS_{avg} tăng ở vùng ven biển thể hiện khả năng cung cấp nước lợ ổn định cho nuôi trồng thủy sản.

Cuối cùng, A_{red} là diện tích ngập giảm (ha) so với giai đoạn chưa vận hành, được xác định từ mô phỏng thủy lực hai chiều và quan trắc thực tế. Đây là chỉ tiêu có ý nghĩa kinh tế - xã hội trực tiếp, phản ánh diện tích đất canh tác, khu dân cư hoặc hạ tầng được bảo vệ khỏi ngập sau khi hệ thống được điều tiết hợp lý.

Bốn chỉ tiêu ΔX_{m4} , ΔH_{max} , ΔS_{avg} và A_{red} tạo nên khung đánh giá định lượng, có thể so sánh giữa các giai đoạn hoặc kịch bản vận hành khác nhau. Trong nghiên cứu này, hai chỉ tiêu đầu phản ánh hiệu quả kiểm soát mặn và điều tiết nước ngọt, trong khi hai chỉ tiêu sau thể hiện khả năng giảm ngập - tiêu thoát nội đồng. Kết quả phân tích đồng thời các chỉ tiêu này là cơ sở khoa học để xác định ngưỡng vận hành thích ứng, hướng tới xây dựng quy trình vận hành chính thức của hệ thống Cái Lớn - Cái Bé trong bối cảnh biến đổi khí hậu ngày càng gia tăng.

Bảng 2: Các chỉ tiêu đánh giá hiệu quả vận hành hệ thống thủy lợi Cái Lớn - Cái Bé

Chỉ tiêu	Ý nghĩa	Đơn vị	Ký hiệu
ΔX_{m4}	Dịch chuyển ranh mặn 4 g/l	km	ΔX
ΔH_{max}	Giảm mực nước đỉnh triều	m	ΔH
ΔS_{avg}	Thay đổi độ mặn trung bình	‰	ΔS
A_{red}	Diện tích ngập giảm	ha	A_{red}

2.4. Phân tích số liệu

Phân tích dữ liệu được thực hiện theo quy trình thống nhất nhằm bảo đảm tính khách quan và độ tin cậy trong đánh giá hiệu quả vận hành của hệ thống thủy lợi Cái Lớn - Cái Bé. Trước hết, nghiên cứu tiến hành so sánh chuỗi số liệu trước

và sau khi công trình được đưa vào vận hành, trong đó giai đoạn 2018-2020 được chọn làm thời kỳ cơ sở, phản ánh điều kiện tự nhiên chưa có tác động điều tiết, còn giai đoạn 2021-2023 thể hiện đặc trưng thủy văn - mặn khi hệ thống được vận hành thử theo Quyết định 4789/QĐ-BNN-TCTL [1]. Cách chia này cho phép nhận

diện rõ sự thay đổi về mực nước, độ mặn và lưu lượng, qua đó lượng hóa được mức độ cải thiện do tác động của công trình.

Để giảm sai số do biến động ngắn hạn và khác biệt theo chu kỳ triều, toàn bộ chuỗi dữ liệu được chuẩn hóa theo pha triều, mùa và tháng. Các giá trị quan trắc được nhóm và xử lý theo từng giai đoạn đặc trưng: mùa khô (tháng 1-5), mùa mưa (tháng 6-11) và thời kỳ chuyển tiếp (tháng 12). Ngoài ra, mực nước và độ mặn trong ngày được phân tích riêng cho chu kỳ triều lên - triều xuống, giúp loại bỏ ảnh hưởng dao động ngắn hạn và phản ánh xu thế biến đổi mang tính đại diện. Phương pháp chuẩn hóa này cho phép so sánh dữ liệu giữa các năm có điều kiện thủy văn và triều khác nhau trên cùng một nền tảng thống nhất.

Về mặt thống kê, nghiên cứu áp dụng hai phép kiểm định phi tham số nhằm xác định sự khác biệt và xu thế biến đổi có ý nghĩa thống kê. Kiểm định Mann-Kendall (MK) được sử dụng để xác định hướng và mức độ xu thế (tăng hoặc giảm) của chuỗi thời gian mực nước và độ mặn, trong khi kiểm định Wilcoxon signed-rank được dùng để so sánh cặp giá trị giữa hai giai đoạn trước và sau vận hành, nhằm đánh giá mức độ khác biệt có ý nghĩa với độ tin cậy 95%. Phương pháp này được Ủy hội sông Mekong [6] khuyến nghị trong các nghiên cứu thủy văn - mặn có chuỗi thời gian ngắn nhưng biến động phức tạp, bảo đảm tính tin cậy cho các kết quả thống kê và phân tích xu thế.

3. KẾT QUẢ

3.1. Hiệu quả kiểm soát mặn

Kết quả phân tích và mô phỏng cho thấy, trong mùa khô năm 2023, khi hệ thống Cái Lớn - Cái Bé được vận hành theo cơ chế lấy mặn sớm - đóng linh hoạt theo chu kỳ triều, phạm vi xâm nhập mặn đã được kiểm soát hiệu quả

hơn rõ rệt so với giai đoạn trước vận hành. Ranh mặn 4 g/l, ngưỡng giới hạn cho sản xuất nông nghiệp, chỉ còn xâm nhập đến khu vực Gò Quao, tức lùi về hạ lưu ($\Delta X_{m4}=10-12$ km) so với vị trí trung bình mùa khô năm 2020 [4]. Sự thay đổi này phản ánh rõ tác động của việc đóng cống sớm trong pha triều lên và mở có kiểm soát trong pha triều xuống, giúp duy trì ổn định ranh giới giữa vùng ngọt - vùng lợ, giảm dao động độ mặn và hạn chế nguy cơ xâm nhập mặn đột ngột trong thời kỳ cao điểm.

Độ mặn trung bình tháng 3/2023 tại trạm HL2 - sông Cái Lớn (đoạn ngang phà Tắc Cậu qua), vị trí trung tâm vùng ảnh hưởng, giảm từ 7,1‰ (2020) xuống 5,4‰ (2023), tức là $\Delta s_{avg}=1,7‰$. Đây là giai đoạn mặn cực đại trong chu kỳ năm, thường quyết định đến năng suất vụ tôm - lúa và khả năng cấp nước sinh hoạt. Sự giảm mặn này cho thấy hiệu quả rõ rệt của việc vận hành phối hợp hai cống đầu mối, đồng thời thể hiện tính liên kết thủy lực của toàn hệ thống, khi dòng chảy từ thượng nguồn và triều biển Tây được điều hòa hợp lý qua các cửa Cái Lớn, Cái Bé và Xẻo Rô.

Nhờ kiểm soát tốt mặn xâm nhập, vùng ngọt ổn định (độ mặn < 1‰) đã mở rộng thêm khoảng 26.000 ha so với giai đoạn 2018-2020, chủ yếu tại An Biên và Vĩnh Thuận - hai khu vực chuyển tiếp thường bị mặn xâm nhập sâu trong các năm khô hạn. Việc mở rộng vùng ngọt giúp đảm bảo nguồn nước ổn định cho sản xuất vụ Đông Xuân, đồng thời duy trì hệ sinh thái nông nghiệp - thủy sản đa dạng, bền vững hơn. Kết quả này khẳng định vai trò điều tiết của hệ thống Cái Lớn - Cái Bé trong việc duy trì cân bằng mặn - ngọt, tăng khả năng chống chịu của sản xuất nông nghiệp trước biến động khí hậu và thủy văn vùng ven biển Tây Nam Bộ.

Bảng 3: Kết quả so sánh đặc trưng mặn trước vận hành và sau vận hành hệ thống CLCB

Chỉ tiêu	Đơn vị	Trước vận hành	Sau vận hành	Mức thay đổi	Ghi chú / nhận xét
Vị trí ranh mặn 4 g/l (tại sông Cái Lớn)- ΔX_{m4}	km tính từ cửa Xẻo Rô	42,0	30,5	↓ 11,5 km	Ranh mặn lùi sâu về hạ lưu, phản ánh hiệu quả kiểm soát cống Cái Lớn -

Chỉ tiêu	Đơn vị	Trước vận hành	Sau vận hành	Mức thay đổi	Ghi chú / nhận xét
					Cái Bè
Độ mặn trung bình tháng 3 tại HL2 - Cái Lớn- ΔSavg	‰	7,1	5,4	↓ 1,7‰ (-24%)	Giảm mặn ổn định trong giai đoạn đỉnh khô hạn
Số ngày có mặn >4 g/l tại HL2	ngày	45	26	↓ 19 ngày	Thời gian vượt ngưỡng mặn giảm đáng kể
Mức nước trung bình nội đồng mùa khô	m	0,31	0,47	↑ 0,16 m	Tăng trữ nước phục vụ vùng tôm - lúa
Diện tích vùng ngọt ổn định (<1‰)	ha	156.000	182.000	↑ 26.000 ha	Mở rộng vùng ngọt tại An Biên - Vĩnh Thuận
Độ mặn cực đại khu vực Gò Quao	‰	9,8	7,6	↓ 2,2‰	Mặn cực đại giảm, ranh 4‰ lùi ~10-12 km

3.2. Hiệu quả giảm ngập và điều tiết nước

Kết quả mô phỏng kịch bản tháng 9/2023 (OP2023-KST) cho thấy hiệu quả cắt đỉnh triều và tăng cường tiêu thoát nước của hệ thống được cải thiện rõ rệt khi vận hành phối hợp hai cống đầu mối theo nguyên tắc điều tiết đồng bộ theo pha triều. Mức nước đỉnh triều tại khu vực cống Cái Bè giảm trung bình khoảng (ΔH) 0,28 m so với chế độ không vận hành, nhờ đóng sớm trước pha triều lên và mở tăng lưu thoát trong pha triều xuống. Mức giảm này đủ để hạ bậc ngập đối với nhiều ô đồng trũng ven kênh chính, qua đó giảm đáng kể thời gian úng kéo dài và nguy cơ tràn bờ trong các đợt triều cao.

Trên phạm vi toàn hệ thống, diện tích ngập sâu >0,3 m giảm khoảng (Ared) 2.100 ha, tập trung chủ yếu tại các dải ven kênh và vùng giao thoa giữa Cái Lớn - Cái Bè - Xẻo Rô. Cơ chế này giúp cải thiện rõ rệt khả năng thoát nước mặt và giảm áp lực ngập cho các vùng

trũng thấp. Về mặt động học, thời gian hạ mực nước nội đồng sau đỉnh triều rút ngắn 6-8 giờ mỗi chu kỳ, nhờ duy trì chênh lệch mực nước hiệu dụng giữa trong và ngoài cống, giúp thu hẹp đáng kể thiệt hại do ngập trong ngày.

Các kết quả này hoàn toàn phù hợp với cơ chế kỹ thuật của phương án KST (theo quy trình vận hành), trong đó ưu tiên đóng ngăn hạn tại đỉnh triều để cắt đỉnh, sau đó mở tăng lưu ở chân triều nhằm trả lại dung tích và tránh hiện tượng khóa nước kéo dài gây dâng nội đồng. Tuy nhiên, hiệu quả cụ thể tại từng ô tiêu còn phụ thuộc vào lượng mưa cục bộ, điều kiện triều biển Tây và khả năng dẫn thoát của mạng kênh nội đồng. Do đó, khi vận hành thực tế, cần gắn các ngưỡng kích hoạt đóng/mở cống với số liệu quan trắc thời gian thực về mực nước và lượng mưa tại tiêu vùng, đồng thời cập nhật dự báo triều ngăn hạn (24-48 giờ) để chủ động duy trì hiệu quả cắt đỉnh, giảm ngập như đã được mô hình lượng hóa [2],[4].

Bảng 4: Tổng hợp thay đổi mực nước và diện tích ngập trong kịch bản vận hành OP2023-KST

Khu vực / Chỉ tiêu	Mức nước đỉnh triều (m)	Chênh lệch so với không vận hành (ΔH)	Diện tích ngập > 0,3 m (ha)	Giảm diện tích ngập-Ared (ha)	Thời gian thoát nước rút ngắn (giờ/chu kỳ)
Cống Cái Bè - vùng hạ	1,31	- 0,28	1.580	950	6 - 7
Cống Cái Lớn - vùng giữa	1,27	- 0,22	1.140	730	7 - 8
Xẻo Rô - vùng liên kết	1,24	- 0,18	980	420	6
Toàn hệ thống (bình quân)	-	- 0,23	3.700	2.100	6 - 8

Bảng 4 cho thấy vận hành theo phương án KST đã giúp giảm trung bình 0,23 m mực nước đỉnh triều và thu hẹp khoảng 2.100 ha diện tích ngập sâu > 0,3 m đồng thời rút ngắn 6 - 8 giờ thời gian thoát nước sau mỗi chu kỳ triều. Kết quả này khẳng định vai trò của vận hành chủ động theo chu kỳ triều trong việc cắt giảm đỉnh triều, hạn chế ngập úng và duy trì mực nước nội đồng ổn định, góp phần bảo đảm điều kiện sản xuất nông nghiệp bền vững cho vùng hạ lưu hệ thống Cái Lớn - Cái Bé.

3.3. Ảnh hưởng đến cấp nước và sản xuất

Kết quả phân tích mực nước nội đồng trong mùa khô năm 2023 cho thấy hệ thống thủy lợi Cái Lớn - Cái Bé đã phát huy rõ chức năng điều tiết và duy trì nguồn nước ổn định phục vụ sản xuất nông nghiệp - thủy sản. Dữ liệu tổng hợp từ các trạm đo mực nước nội đồng và mô phỏng MIKE 11/21FM cho thấy mực nước trung bình trong giai đoạn tháng 2-4/2023 được duy trì trong khoảng 0,4-0,6 m, dao động chỉ $\pm 0,05$ m so với mực nước thiết kế tiêu chuẩn cho mô hình tôm - lúa [4]. Mực nước này đáp ứng đồng thời hai yêu cầu kỹ thuật quan trọng: duy trì độ sâu ngập thích hợp cho lúa sinh trưởng và cung cấp độ ẩm nền ổn định cho môi trường nuôi tôm quảng canh cải tiến trong cùng ô đồng.

Kết quả mô phỏng không gian cho thấy khoảng 70% diện tích vùng tôm - lúa (tương đương trên 120.000 ha) đạt được ngưỡng mực nước tối ưu trong suốt mùa khô, tập trung tại An Biên, Vĩnh Thuận và phía Bắc An Minh - những khu vực chịu ảnh hưởng mạnh của triều biển Tây. Điều này khẳng định hiệu quả vận hành của hệ thống trong việc giữ nước nền hợp lý, đảm bảo cân bằng mặn - ngọt và duy trì sản xuất ổn định trong điều kiện khô hạn.

Đối với các vùng ngọt hóa ở phía Đông Bắc hệ thống (Hậu Giang, Phước Long), không ghi nhận hiện tượng xâm nhập mặn đầu vụ Đông

Xuân 2022-2023. Độ mặn tại các trạm Gò Quao, Vĩnh Phước và kênh Cái Sắn duy trì dưới 0,5‰ trong suốt tháng 12-1, thấp hơn nhiều so với các năm 2020-2021, khi mặn từng xâm nhập sớm và đạt 1,0-1,5‰ ngay từ cuối tháng 12 [2]. Sự ổn định này phản ánh hiệu quả điều tiết nguồn nước ngọt từ sông Hậu thông qua các tuyến Cái Sắn - Quản Lộ - Phụng Hiệp, kết hợp với vai trò ngăn triều của công Cái Bé. Nhờ đó, vùng ngọt hóa thượng hệ thống duy trì được chất lượng nước phù hợp cho sản xuất lúa và cây ăn trái vụ Đông Xuân, đồng thời giảm rõ rệt nguy cơ nhiễm mặn sớm - một rủi ro phổ biến trong các năm trước khi công trình đi vào vận hành.

3.4. Độ tin cậy mô hình

Kết quả kiểm định độ tin cậy của mô hình MIKE 11/21FM cho thấy mô hình tái hiện chính xác diễn biến mực nước và độ mặn trong khu vực nghiên cứu. Hệ số xác định $R^2 = 0,93$ phản ánh mối tương quan chặt chẽ giữa giá trị mô phỏng và quan trắc thực tế tại các trạm thủy văn chính, trong khi chỉ số hiệu năng Nash-Sutcliffe (NSE) đạt 0,91 đối với mực nước và 0,86 đối với độ mặn - vượt ngưỡng 0,8 được xếp loại rất tốt theo tiêu chuẩn đánh giá hiệu năng mô hình thủy lực của Moriasi và cộng sự [7].

Độ lệch trung bình tuyệt đối giữa giá trị mô phỏng và thực đo chỉ <0,1 m đối với mực nước và <0,4‰ đối với độ mặn, cho thấy mô hình đã được hiệu chỉnh ổn định, phản ánh chính xác dao động thủy động lực trong cả mùa khô và mùa mưa. Các kết quả này phù hợp với nghiên cứu kiểm định độc lập của Viện Khoa học Thủy lợi Miền Nam [4], qua đó xác nhận sai số mô hình trong giai đoạn 2022-2023 nằm trong giới hạn cho phép đối với các mô hình mô phỏng vùng ven biển có ảnh hưởng triều và công trình điều tiết lớn.

Bảng 5: So sánh mực nước mô phỏng và thực đo tại trạm HL1 - sông Cái Lớn

Thời điểm / Pha triều	Mực nước thực đo (m)	Mực nước mô phỏng (m)	Chênh lệch (m)	Nhận xét kỹ thuật
-----------------------	----------------------	-----------------------	----------------	-------------------

Thời điểm / Pha triều	Mức nước thực đo (m)	Mức nước mô phỏng (m)	Chênh lệch (m)	Nhận xét kỹ thuật
Đỉnh triều sáng (ngày 12/02/2023)	1,25	1,17	-0,08	Mô phỏng thấp hơn nhẹ, phản ánh đóng cống sớm trong pha triều lên
Chân triều (ngày 12/02/2023)	0,31	0,36	+0,05	Mô phỏng duy trì nước tốt hơn trong pha rút triều
Đỉnh triều chiều (ngày 13/02/2023)	1,23	1,16	-0,07	Độ lệch nhỏ, mô hình bắt đúng pha và biên độ triều
Chân triều (ngày 13/02/2023)	0,29	0,33	+0,04	Sai lệch dưới 0,05 m, chấp nhận được
Trung bình mùa khô (02-04/2023)	0,78	0,77	-0,01	Mô hình tái hiện trung bình rất tốt
Giá trị cực đại (Hmax)	1,27	1,22	-0,05	Sai lệch cực đại nhỏ hơn 5 cm
Sai số trung bình tuyệt đối (MAE)	-	-	0,06	Nằm trong giới hạn cho phép (<0,10 m)
Hệ số xác định R ²	-	-	0,93	Mối tương quan mô phỏng - thực đo rất chặt chẽ
Hiệu năng mô hình (NSE)	-	-	0,91	Mức mô phỏng rất tốt theo tiêu chuẩn Moriasi & cộng sự [7]

Bảng 5 cho thấy sai lệch giữa mức nước mô phỏng và thực đo tại HL1 chỉ dao động từ 0,04-0,08 m, nhỏ hơn nhiều so với giới hạn chấp nhận của mô hình thủy lực vùng triều (<0,10 m). Các chỉ tiêu định lượng $R^2 = 0,93$ và $NSE = 0,91$ khẳng định mô hình MIKE 11/21FM có khả năng phản ánh chính xác dao động mực nước thực tế, đặc biệt trong điều kiện vận hành đóng - mở linh hoạt của cống Cái Lớn, qua đó đảm bảo độ tin cậy cao cho các phân tích và đánh giá tiếp theo về hiệu quả vận hành hệ thống.

3.5. Đánh giá hiệu quả vận hành

Kết quả so sánh giữa hai giai đoạn trước và sau vận hành cho thấy hệ thống Cái Lớn - Cái Bé đã phát huy hiệu quả rõ rệt trong điều tiết nguồn nước và kiểm soát mặn - ngập. Ranh mặn 4 g/l - ngưỡng giới hạn cho sản xuất nông nghiệp - lùi trung bình 11 km về hạ lưu, phản ánh khả năng đẩy mặn chủ động nhờ cơ chế

đóng sớm - mở linh hoạt theo triều, qua đó mở rộng vùng nước ngọt ổn định và giảm nguy cơ nhiễm mặn sớm trong mùa khô. Mực nước đỉnh triều nội đồng giảm 0,28 m, giúp cắt đỉnh, giảm ngập và cải thiện khả năng tiêu thoát tại các vùng trũng ven kênh. Độ mặn trung bình mùa khô giảm 22% (từ 6,8‰ xuống 5,3‰), thể hiện hiệu quả điều tiết và ổn định chất lượng nước cho sản xuất nông - thủy sản. Đồng thời, diện tích ngập nội đồng giảm 30% (từ 7.300 ha xuống 5.100 ha), đặc biệt tại An Biên, An Minh và Bắc Vĩnh Thuận - các khu vực từng ngập sâu trong các năm triều cường kết hợp mưa lớn. Các kết quả này cho thấy hệ thống đã kiểm soát mặn hiệu quả, duy trì nguồn nước ngọt và giảm ngập úng nội đồng, góp phần ổn định sản xuất, sinh kế và khẳng định tính đúng đắn của hướng vận hành thích ứng linh hoạt theo tín hiệu mặn - triều - mùa trong bối cảnh biến đổi khí hậu.

Bảng 6: So sánh các chỉ tiêu thủy văn - mặn trước và sau vận hành hệ thống Cái Lớn - Cái Bé

Chỉ tiêu	Trước vận hành	Sau vận hành	Mức cải thiện
----------	----------------	--------------	---------------

Ranh mặn 4 g/l (km tính từ cửa Xẻo Rô)	42,5	31,5	Giảm 11,0 km
Mức nước đỉnh triều trung bình (m)	1,37	1,09	Giảm 0,28 m
Độ mặn trung bình mùa khô (‰)	6,8	5,3	Giảm 22%
Diện tích ngập nội đồng (ha)	7.300	5.100	Giảm 30%

4. THẢO LUẬN

4.1. Cơ chế điều tiết và hiệu quả kỹ thuật

Cơ chế vận hành phối hợp giữa hai cống đầu mối Cái Lớn và Cái Bé là yếu tố quyết định hiệu quả kiểm soát mặn và điều tiết nước trong toàn hệ thống. Kết quả quan trắc và mô phỏng thủy lực cho thấy, trong các pha triều lên, cống Cái Lớn thường được vận hành theo chế độ mở ngược pha so với cống Cái Bé, tức là khi Cái Bé đóng dần để hạn chế mặn xâm nhập trực tiếp từ biển Tây, thì Cái Lớn được mở một phần nhằm duy trì dòng chảy cân bằng giữa hai cửa sông. Cách vận hành này tạo ra sự phân bố áp lực thủy lực đều hơn, giúp giảm gradient mặn giữa hai cửa và ngăn chặn quá trình lan truyền mặn nhanh theo hướng từ Cái Bé vào vùng giữa hệ thống, đặc biệt trong những đợt triều mạnh có biên độ trên 2,8 m. Việc duy trì chênh mực nước hợp lý giữa hai cửa còn giúp hạn chế hiện tượng xoáy dòng và khuếch tán mặn cục bộ trong vùng hợp lưu sông Xẻo Rô - Cái Bé, là khu vực dễ xảy ra hiện tượng tích tụ và duy trì mặn kéo dài trong các năm khô hạn trước khi công trình được đưa vào vận hành [4].

Một điểm đáng chú ý khác là chiến lược lấy mặn sớm vào đầu mùa khô, thường áp dụng trong các tháng 1-2 hằng năm. Khi độ mặn ngoài cửa sông dao động trong khoảng 8-10‰, hệ thống vận hành mở có kiểm soát nhằm đưa một lượng nước lợ vừa phải vào vùng nội đồng, giúp duy trì độ mặn nền ổn định cho mô hình canh tác tôm - lúa. Việc chủ động lấy mặn sớm không chỉ giúp giảm áp lực lấy nước trong giai đoạn cao điểm mặn (tháng 3-4) mà còn góp phần ổn định môi trường ao nuôi, hạn chế biến động độ mặn đột ngột gây sốc cho sinh vật thủy sản. Ngược lại, khi nồng độ mặn ngoài cửa vượt quá ngưỡng 10‰, hệ thống sẽ chuyển sang chế độ đóng cống hoàn toàn hoặc

bán phần tùy theo diễn biến mực nước và triều, nhằm bảo vệ vùng ngọt phía trong, đặc biệt là khu vực phía Đông, nơi phục vụ sản xuất lúa và cấp nước sinh hoạt cho các vùng Gò Quao, Vĩnh Thuận và Hồng Dân.

Nhờ sự phối hợp vận hành linh hoạt này, hệ thống Cái Lớn - Cái Bé có thể đồng thời đáp ứng hai mục tiêu tương chừng mâu thuẫn: vừa bảo vệ vùng ngọt ổn định, vừa duy trì độ mặn cần thiết cho vùng sản xuất lúa - tôm luân canh. Đây là ưu điểm nổi bật của cơ chế vận hành ngược pha - thích ứng theo tín hiệu mặn, giúp giảm thiểu xung đột sử dụng nước giữa các tiêu vùng và nâng cao hiệu quả tổng hợp của công trình trong điều kiện thủy văn - khí hậu ngày càng biến động phức tạp.

4.2. Giới hạn và rủi ro vận hành

Kết quả phân tích cho thấy trong các năm có điều kiện thủy văn cực đoan, đặc biệt là năm 2020 và năm 2024, hiệu quả kiểm soát mặn của hệ thống Cái Lớn - Cái Bé chịu ảnh hưởng đáng kể bởi biến động nguồn nước thượng lưu sông Mekong, thể hiện qua lưu lượng tại trạm Tân Châu - cửa ngõ chính dẫn nguồn nước ngọt vào vùng hạ lưu và Bán đảo Cà Mau. Khi lưu lượng về Tân Châu giảm xuống dưới 1.000 m³/s, lượng nước ngọt bổ sung cho hệ thống sông Hậu - Cái Sắn - Quản Lộ giảm mạnh, làm suy yếu dòng đẩy mặn tự nhiên từ thượng nguồn và khiến ranh mặn 4 g/l có xu hướng xâm nhập sâu hơn 8-10 km so với các năm trung bình. Kết quả mô phỏng bằng mô hình MIKE 11/21FM chỉ ra rằng trong điều kiện lưu lượng thấp hơn ngưỡng 1.000 m³/s, hiệu quả giảm mặn của hệ thống CLCB giảm từ 15-20%, tức khả năng đẩy lùi mặn của cống Cái Lớn - Cái Bé giảm tương ứng với mức thiếu hụt dòng chảy từ thượng lưu.

Điều này chứng tỏ vai trò điều tiết nguồn nước từ sông Hậu là yếu tố nền tảng trong cơ chế

kiểm soát mặn - ngọt của toàn vùng, và rằng hiệu quả vận hành công trình ở hạ lưu chỉ phát huy tối đa khi có sự hỗ trợ ổn định từ nguồn nước ngọt thượng nguồn. Trong các năm khô hạn kéo dài, dòng chảy giảm sâu, hoặc khi hệ thống thủy điện thượng lưu điều tiết bất lợi, ranh mặn có thể tiến nhanh vào nội đồng, làm thu hẹp vùng ngọt hóa và ảnh hưởng đến cả sản xuất lúa lẫn nguồn nước sinh hoạt.

Vì vậy, để đảm bảo tính chủ động trong điều hành, cần tích hợp dữ liệu thượng lưu - đặc biệt là lưu lượng Tân Châu, Châu Đốc, mực nước Kratie và tình hình điều tiết các hồ chứa trên dòng chính Mekong - vào hệ thống dự báo vận hành thời gian thực của CLCB. Việc này không chỉ giúp dự báo sớm nguy cơ xâm nhập mặn mà còn cho phép xác định trước các kịch bản đóng - mở cống tối ưu theo xu hướng dòng chảy và triều, qua đó nâng cao tính thích ứng của hệ thống trong bối cảnh biến động khí hậu và sự thay đổi chế độ dòng chảy từ thượng nguồn. Đây cũng là định hướng quan trọng để xây dựng mô hình điều hành tích hợp, tiến tới vận hành liên kết giữa các công trình thủy lợi lớn vùng Đồng bằng sông Cửu Long.

4.3. Hàm ý quản lý

Kết quả nghiên cứu và thực tiễn vận hành hai năm cho thấy, để phát huy tối đa hiệu quả điều tiết của hệ thống thủy lợi Cái Lớn - Cái Bé, quy trình vận hành cần được chuyển đổi căn bản từ cơ chế đóng - mở theo lịch cố định sang vận hành theo tín hiệu mặn - nước - triều. Trước đây, việc điều hành chủ yếu dựa trên lịch vận hành định sẵn cho từng mùa, được xây dựng theo kinh nghiệm và trung bình nhiều năm. Cách tiếp cận này tuy đảm bảo tính đơn giản và dễ áp dụng nhưng lại thiếu tính linh hoạt trong các điều kiện thủy văn, khí tượng ngày càng biến động mạnh. Khi biên độ triều, lượng mưa và dòng chảy thượng nguồn thay đổi bất thường, việc tuân thủ lịch cố định dễ dẫn đến tình trạng vận hành không phù hợp, hoặc đóng sớm gây thiếu nước, hoặc mở muộn tạo điều kiện cho mặn xâm nhập.

Việc vận hành theo tín hiệu mặn - nước - triều hướng đến mô hình điều hành chủ động, linh

hoạt theo thời gian thực, trong đó quyết định mở hoặc đóng cống dựa trên các ngưỡng kích hoạt của ba yếu tố chính: (i) độ mặn ngoài và trong cống, (ii) mực nước nội đồng và chênh lệch giữa hai phía công trình, và (iii) pha triều và tốc độ biến đổi mực nước tại cửa sông. Cách tiếp cận này cho phép phản ứng nhanh với diễn biến thủy văn, giảm độ trễ trong quyết định vận hành và hạn chế tối đa rủi ro xâm nhập mặn hoặc ngập cục bộ. Các ngưỡng kích hoạt có thể được xác định thông qua mô phỏng MIKE 11/21 và kiểm định bằng dữ liệu thực đo trong các năm gần đây, từ đó hình thành khung vận hành thích ứng linh hoạt theo mùa.

Để thực hiện được cơ chế này một cách hiệu quả, cần nâng cấp đồng bộ hệ thống quan trắc và mô phỏng theo thời gian thực, bao gồm mạng lưới cảm biến đo mực nước, độ mặn, lưu lượng và lượng mưa, kết nối trực tiếp với trung tâm điều hành. Việc tích hợp mô hình MIKE 11/21FM với hệ thống thu thập dữ liệu tự động (SCADA) sẽ cho phép cập nhật liên tục trạng thái hệ thống, mô phỏng dự báo trong 24-48 giờ và hỗ trợ đề xuất phương án đóng - mở tối ưu. Khi đó, hệ thống Cái Lớn - Cái Bé không chỉ được vận hành theo lịch trình mà trở thành một hệ thống vận hành thông minh - nơi các quyết định điều hành được hỗ trợ bằng dữ liệu và mô hình, góp phần nâng cao tính an toàn, chủ động và bền vững cho công trình trong dài hạn.

5. KẾT LUẬN

Sau hai năm vận hành thử, các kết quả quan trắc và mô phỏng cho thấy hệ thống thủy lợi Cái Lớn - Cái Bé đã phát huy hiệu quả rõ rệt trong kiểm soát xâm nhập mặn, giảm ngập nội đồng và điều tiết nước ngọt phục vụ sản xuất; những cải thiện này thể hiện nhất quán ở cả các chỉ tiêu ranh mặn 4 g/l, mực nước đỉnh triều, độ mặn trung bình theo mùa và diện tích ngập. Trên nền tảng độ tin cậy của mô hình và số liệu thực đo, giải pháp vận hành điều tiết linh hoạt theo tín hiệu mặn - triều - nước được khẳng định là phù hợp cho bối cảnh biến động thủy văn hiện nay, giúp rút ngắn thời gian thoát nước sau đỉnh triều và giữ ổn định vùng

ngọt trong mùa khô. Từ các phân tích này, Quy trình vận hành chính thức theo khung thích ứng ba cấp, gồm cấp công trình đầu mối (Cái Lớn - Cái Bé) đảm nhiệm cắt đỉnh triều và điều hòa mặn-ngọt, cấp phân vùng trung gian (Xẻo Rô - Quản Lộ - Phụng Hiệp) giữ vai trò phân phối-cân bằng theo tiểu vùng, và cấp nội đồng (trạm bơm, kênh cấp 1-2) tối ưu hóa tưới-tiêu theo nhu cầu sản xuất và an toàn

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] **Bộ Nông nghiệp và Phát triển nông thôn.** (2021). *Quyết định số 4789/QĐ-BNN-TCTL ngày 06/12/2021 về vận hành thử nghiệm hệ thống thủy lợi Cái Lớn - Cái Bé.* Hà Nội, Việt Nam.
- [2] **Công ty TNHH MTV Khai thác Công trình Thủy lợi Miền Nam.** (2023). *Báo cáo khảo sát thủy văn và độ mặn hệ thống Cái Lớn - Cái Bé (12/2023).* TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam.
- [3] **TCVN 8225:2009.** (2009). *Công trình thủy lợi - Quy trình đo đạc và xác định cao độ.* Hà Nội, Việt Nam: Bộ Khoa học và Công nghệ.
- [4] **Viện Khoa học Thủy lợi Miền Nam, Viện Kỹ thuật Biển, Viện Quy hoạch thủy lợi Miền Nam.** (2024). *Báo cáo thuyết minh kỹ thuật: Rà soát, điều chỉnh quy trình vận hành tạm thời hệ thống thủy lợi Cái Lớn - Cái Bé (03/2024).* TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam.
- [5] **Viện Kỹ thuật Biển.** (2023). *Kết quả đo cao độ dẫn chèo năm 2023 (mốc AT-M30) khu vực cống Cái Lớn.* TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam.
- [6] **Mekong River Commission (MRC).** (2024). *Hydrological datasets for Kratie, Tan Chau and Chau Doc: Discharge and water level time series (2018-2024).* Vientiane, Lao PDR: MRC Data & Information Services (DIS).
- [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.