VẬT LIỆU & XÂY DỰNG
Tạp chí Vật liệu và Xây dựng
ISSN 1859 - 381X
Website: www. jomc.vn

Xây dựng mô hình mô phỏng dòng chảy trong sông Cần Thơ bằng mô hình nước nông

Đinh Văn Duy[1*], Nguyễn Quốc Bằng[1], Phạm Phú An[2]

[1]Trường Bách khoa, Đại học Cần Thơ

[2]Công ty Hưng Lợi

TỪ KHOÁ

Sông cần thơ
Mô hình nước nông
Thủy động lực học 2D
Lưới cong
Hiệu chỉnh
Kiểm định

TÓM TẮT

Nghiên cứu xây dựng và đánh giá một mô hình thủy động lực học hai chiều trung bình theo độ sâu cho đoạn sông Cần Thơ chịu ảnh hưởng mạnh của thủy triều. Dữ liệu đầu vào gồm hai tuyến bờ kè, 103 mặt cắt ngang trên đoạn sông dài khoảng 10,6 km và chuỗi mực nước, lưu lượng theo giờ liên tục 15 ngày tại Cái Răng và Mỹ Khánh. Hệ phương trình nước nông hai chiều dạng giản lược (bỏ qua gia tốc đối lưu) được giải bằng phương pháp sai phân hữu hạn hiện trên lưới cong so le kiểu Arakawa C; bước thời gian được khống chế theo điều kiện CFL và bộ lọc Shapiro được sử dụng để hạn chế nhiễu số. Mô hình được hiệu chỉnh trên 8 ngày và kiểm định độc lập trên 7 ngày, với hệ số nhám Manning tối ưu n = 0,025. Trong giai đoạn hiệu chỉnh, NSE đạt 0,789 đối với mực nước tại Cái Răng và 0,641 đối với lưu lượng tại Mỹ Khánh; các giá trị tương ứng trong giai đoạn kiểm định tăng lên 0,915 và 0,747. RMSE kiểm định đạt 0,168 m đối với mực nước và 189,93 m^3/s đối với lưu lượng, trong khi R^2 lần lượt đạt 0,962 và 0,901. Kết quả cho thấy mô hình tái hiện tốt pha và dao động mực nước triều; lưu lượng được tái hiện ở mức khá về pha và quá trình đổi chiều (RMSE kiểm định bằng khoảng 50 % độ lệch chuẩn quan trắc), song sai số tại các cực trị còn đáng kể. Trong phạm vi các giả thiết đã nêu, mô hình có thể làm nền thủy động lực cho các bài toán vận chuyển vật chất trên đoạn Cái Răng–Mỹ Khánh.

KEYWORDS

Can Tho River
Shallow water equations
2D hydrodynamics
Curvilinear grid
Calibration
Validation

ABSTRACT

This study develops and evaluates a depth-averaged two-dimensional hydrodynamic model for the tide-dominated Can Tho River. Model inputs include two revetment alignments, 103 surveyed cross-sections along an approximately 10.6 km river reach, and 15 consecutive days of hourly water-level and discharge observations at Cai Rang and My Khanh. The two-dimensional shallow-water equations, simplified by neglecting advective acceleration, are solved using an explicit finite-difference scheme on a curvilinear Arakawa C staggered grid. The time step is constrained by the CFL condition, and a Shapiro filter is applied to suppress short-wave numerical noise. The model is calibrated over the first 8 days and independently validated over the remaining 7 days, yielding an optimal Manning coefficient of n = 0.025. During calibration, NSE values are 0.789 for water level at Cai Rang and 0.641 for discharge at My Khanh; the corresponding validation values increase to 0.915 and 0.747. Validation RMSE is 0.168 m for water level and 189.93 m^3/s for discharge, while R^2 reaches 0.962 and 0.901, respectively. The model reproduces tidal water-level phase and variability well. Discharge phase and flow reversal are reproduced reasonably (validation RMSE ≈ 50% of the observed standard deviation), although errors at peak flows remain notable. Within the stated assumptions, the model provides a hydrodynamic basis for material-transport studies along the Cai Rang–My Khanh reach.

1. Mở đầu

Sông Cần Thơ là một chi lưu của sông Hậu, chảy qua khu vực đô thị trung tâm và chịu tác động rõ rệt của chế độ bán nhật triều không đều. Trên đoạn nghiên cứu, mực nước có thể dao động khoảng -0,9 đến +1,5 m theo hệ cao độ Hòn Dấu, trong khi lưu lượng đổi dấu theo pha triều và có thể đạt trên 1.000 m^3/s. Điều kiện dòng chảy hai chiều, hình học lòng dẫn uốn khúc và biến đổi độ sâu theo không gian làm cho việc mô tả thủy động lực bằng các quan hệ một chiều đơn giản gặp nhiều hạn chế. Một mô hình hai chiều trung bình theo độ sâu vì vậy phù hợp để mô tả đồng thời sự truyền triều và phân bố dòng chảy theo mặt bằng.

Các nghiên cứu mô hình thủy động lực ở Đồng bằng sông Cửu Long đến nay chủ yếu được thực hiện ở quy mô toàn châu thổ. Mô hình mạng sông 1D và 1D–2D đã được hiệu chỉnh cho bài toán lũ [11], đánh

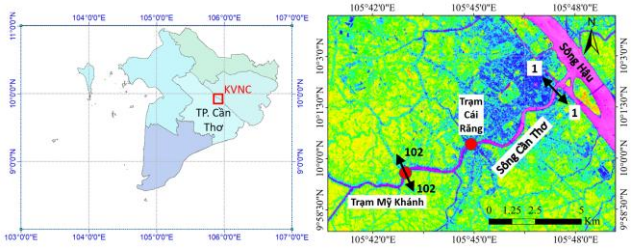
*Liên hệ tác giả: huynhnhatminh@hcmut.edu.vn
Nhận ngày 30/09/2026, sửa xong ngày 05/10/2026, chấp nhận đăng ngày 06/10/2026
Link DOI: https://doi.org/10.54772/jomc.05.2026.1522

giá bồi lắng bùn cát vùng ngập [12] và tác động của hệ thống đê bao đến lũ hạ du [13, 14]. Mô hình Delft3D FM tích hợp ven biển–nội địa cũng đã được áp dụng cho bài toán xâm nhập mặn [15]. Đối với TP. Cần Thơ, các nghiên cứu ngập đô thị tập trung vào tác động của đô thị hóa, biến đổi khí hậu và tổ hợp lũ–mưa [16, 17]. Trong các mô hình này, sông Cần Thơ thường được biểu diễn như một nhánh 1D với mặt cắt thưa, hoặc chỉ đóng vai trò biên của bài toán ngập; trường dòng chảy 2D trong lòng sông chưa được hiệu chỉnh và kiểm định trực tiếp. Bên cạnh đó, các bài toán vận chuyển vật chất quy mô đoạn sông như bám vết vi nhựa đòi hỏi một mô hình thủy động lực đủ gọn để chạy nhiều kịch bản và dễ ghép với mô-đun Lagrange. Hệ phương trình nước nông (Shallow Water Equations, SWE) là nền tảng kinh điển cho mô phỏng dòng chảy sông, cửa sông và vùng nước nông [1]. Trong nghiên cứu này, mô hình được xây dựng trực tiếp bằng Python trên lưới cong bám theo hai tuyến bờ kè thực tế, nhằm giảm sai khác hình học tại các khúc cong và cho phép nội suy địa hình từ hệ thống mặt cắt khảo sát. Việc đánh giá mô hình được thực hiện bằng nhiều chỉ số thống kê thay vì một chỉ số đơn lẻ, phù hợp với khuyến nghị về đánh giá mô hình thủy văn và môi trường [2–5]. Mục tiêu của bài báo là trình bày ngắn gọn quy trình xây dựng, hiệu chỉnh và kiểm định mô hình thủy động lực học 2D cho sông Cần Thơ; các nội dung mô phỏng vận chuyển vi nhựa không được xem xét trong phạm vi bài báo này. Nghiên cứu này không đề xuất cải tiến về sơ đồ số: hệ SWE, lưới so le Arakawa C [18], điều kiện CFL [10] và bộ lọc Shapiro [19] đều là kỹ thuật kinh điển. Đóng góp của bài báo gồm: (i) một mô hình 2D trung bình theo độ sâu được hiệu chỉnh và kiểm định độc lập cho đoạn sông Cần Thơ đô thị đã kè hai bờ, với dòng chảy đổi chiều trên 1.000 m^3/s; (ii) một quy trình tạo lưới cong trực tiếp từ hồ sơ thiết kế công trình (hai tuyến kè và 103 mặt cắt), có thể áp dụng lại cho các sông nhánh chịu triều khác. Mô hình không nhằm thay thế các phần mềm như Delft3D FM, TELEMAC hay MIKE 21, mà là một công cụ gọn, minh bạch, phục vụ trực tiếp các bài toán vận chuyển vật chất trên đoạn sông nghiên cứu.

2. Dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Khu vực nghiên cứu và dữ liệu

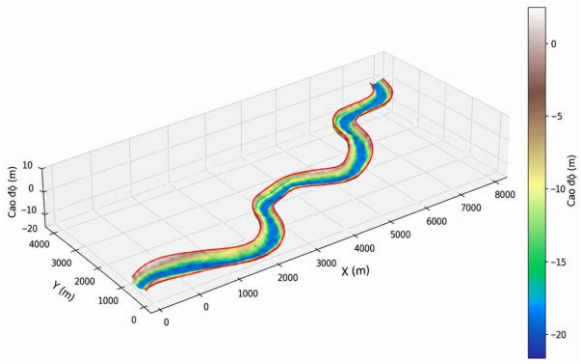
Miền nghiên cứu kéo dài khoảng 10,6 km từ mặt cắt MC0-0, tại khu vực giáp sông Hậu, đến MC102-102 tại Mỹ Khánh. Bề rộng mặt nước thay đổi khoảng 100 đến 260 m; hai bờ được kè kiên cố. Dữ liệu địa hình gồm hai tuyến bờ kè và 103 mặt cắt ngang, với khoảng cách trung bình giữa các mặt cắt xấp xỉ 100 m, kế thừa từ hồ sơ thiết kế và khảo sát của Dự án Kè bờ sông Cần Thơ [6]. Dữ liệu thủy văn gồm mực nước và lưu lượng theo giờ liên tục 15 ngày (06/04–21/04) tại Cái Răng và Mỹ Khánh, bao quát một chu kỳ triều cường–triều kém [7]. Các chuỗi quan trắc được kiểm tra tính liên tục và làm trơn bằng trung bình trượt 3 giờ để loại dao động gai do thiết bị. Phép lọc này giảm biên độ thành phần M2 khoảng 8 % và K1 khoảng 2 %; nó được áp dụng như nhau cho chuỗi điều kiện biên và chuỗi dùng để đánh giá. Ảnh hưởng của phép lọc được kiểm tra bằng cách chạy lại mô hình với số liệu gốc.



Hình 1. Vị trí khu vực nghiên cứu và đoạn sông Cần Thơ được mô hình hóa (Nguồn: Tuấn và ctv., 2025 [8]).

2.2. Xây dựng lưới cong và địa hình đáy

Lưới cong được xây dựng để bám theo hình học lòng dẫn thực tế [9]. Tim tuyến dòng chảy được xác định từ hai tuyến bờ bằng phương pháp ghép cặp điểm gần nhất; trung điểm của từng cặp tạo thành đường tim và khoảng cách giữa hai điểm bờ cung cấp bề rộng cục bộ. Các dị thường bề rộng do hình học hoặc sai số số hóa được xử lý bằng bộ lọc trung vị và giới hạn theo nền cục bộ. Mỗi mặt cắt được chuẩn hóa theo tọa độ ngang không thứ nguyên ξ từ -1 đến +1, sau đó nội suy lên 17–21 điểm chung theo phương ngang và nội suy tuyến tính giữa các mặt cắt theo phương dọc sông. Tọa độ thực của lưới được xác định từ tim tuyến, bề rộng sông và véc-tơ pháp tuyến cục bộ. Bước lưới dọc sông sử dụng $\Delta s = 20$ m, tương ứng khoảng 530 hàng lưới. Do mô hình chưa có thuật toán ướt–khô [20], 25% bề rộng sát mỗi bờ được loại khỏi miền động lực.



Hình 2. Địa hình đáy nội suy trên lưới cong của đoạn sông Cần Thơ.

2.3. Mô hình thủy động lực học

Mô hình sử dụng hệ SWE hai chiều trung bình theo độ sâu dạng giản lược, bỏ qua gia tốc đối lưu và lực Coriolis nhưng giữ nguyên số hạng ma sát bậc hai và độ sâu tức thời trong phương trình liên tục [21]. Gọi s là chiều dài cung dọc tim tuyến, $\xi \in [-1, 1]$ là tọa độ ngang không thứ nguyên, B(s) là bề rộng cục bộ, n(s) là véc-tơ pháp tuyến đơn vị và κ(s) là độ cong tim tuyến. Vị trí thực của một điểm lưới là:

$$x(s, \xi) = x_c(s) + \xi \cdot [B(s)/2] \cdot n(s) \quad (1)$$

Các hệ số Lamé tương ứng là $h_s = 1 - \xi\kappa B/2$ và $h_\xi = B/2$; Jacobian $J = h_s \cdot h_\xi$. Với u, v là các thành phần vận tốc vật lý theo hai hướng lưới, hệ phương trình trong tọa độ cong trực giao (s, ξ) được viết:

$$\partial\eta/\partial t + [\partial(h_\xi Hu)/\partial s + \partial(h_s Hv)/\partial\xi]/(h_s h_\xi) = 0 \quad (2)$$

$$\partial u/\partial t = -(g/h_s)\partial\eta/\partial s - (gn^2/H^{(4/3)})u\sqrt{(u^2+v^2)} \quad (3)$$

$$\partial v/\partial t = -(g/h_\xi)\partial\eta/\partial\xi - (gn^2/H^{(4/3)})v\sqrt{(u^2+v^2)} \quad (4)$$

trong đó η là cao độ mực nước; u và v là các thành phần vận tốc theo phương dọc và ngang sông; H = η - Zb là độ sâu tức thời; g là gia tốc trọng trường và n là hệ số nhám Manning. Các số hạng chứa đạo hàm của hệ số Lamé trong phương trình động lượng (như số hạng ly tâm $u^2\kappa$) đều xuất phát từ gia tốc đối lưu nên được bỏ qua một cách nhất quán; hệ số Lamé chỉ còn xuất hiện trong toán tử phân kỳ (1) và gradient áp lực (2)–(3). Hệ phương trình được giải bằng sai phân hữu hạn hiện trên lưới so le kiểu Arakawa C [18]. Mực nước được cập nhật tại tâm ô, còn hai thành phần vận tốc được bố trí trên các mặt ô. Thông lượng qua mặt ô và gradient mực nước được tính theo chiều dài cạnh và khoảng cách thực giữa các tâm ô (tương ứng $h_s\Delta s$ và $h_\xi\Delta\xi$), nhờ đó hệ số Lamé được đưa vào thông qua các đại lượng hình học này. Bước thời gian được tự động xác định theo điều kiện ổn định Courant–Friedrichs–Lewy [10] với hệ số an toàn α = 0,35. Sau mỗi bước thời gian, bộ lọc Shapiro [19] được áp dụng với εη = 0,06 cho mực nước và εuv = 0,03 cho vận tốc để hạn chế nhiễu bước sóng ngắn. Sông Cần Thơ thuộc loại sông triều chi phối bởi ma sát [22, 23]. Tuy nhiên, ở quy mô khúc cong bán kính vài trăm mét, gia tốc đối lưu có thể cùng bậc với ma sát; giả thiết này do đó phù hợp cho truyền triều và lưu lượng mặt cắt, nhưng chưa đủ để mô tả dòng thứ cấp hoặc phân bố vận tốc cục bộ tại khúc cong.

Bảng 1. Các tham số chính của mô hình.

Tham số	Ký hiệu	Giá trị	Ghi chú
Bước lưới dọc sông	Δs	20 m	Cố định
Điểm lưới ngang	-	17–21	Trước loại trừ vùng sát bờ
Hệ số CFL	α	0,35	Điều khiển bước thời gian
Lọc Shapiro mực nước	εη	0,06	Mỗi bước thời gian
Lọc Shapiro vận tốc	εuv	0,03	Mỗi bước thời gian
Nhám Manning	n	0,025 $s/m^{1/3}$	Kết quả hiệu chỉnh

2.4. Điều kiện biên, hiệu chỉnh và kiểm định

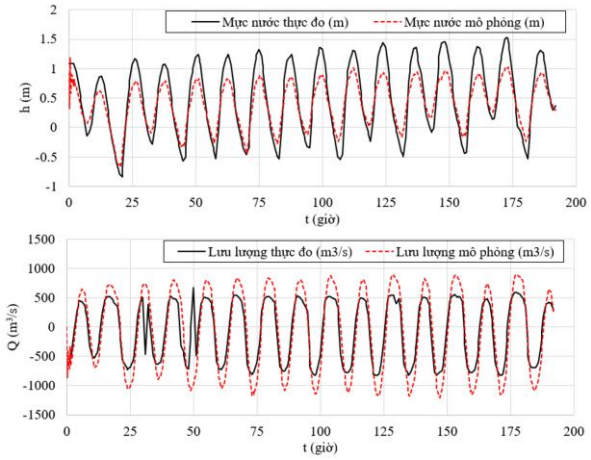
Hai bên bờ được thiết lập là biên cứng không thấm. Trên đoạn Cái Răng–Mỹ Khánh dài khoảng 5 km dùng cho hiệu chỉnh và kiểm định, lưu lượng thực đo tại Cái Răng được dùng làm biên lưu lượng, trong khi mực nước thực đo tại Mỹ Khánh được dùng làm biên mực nước. Hai đại lượng còn lại, gồm mực nước tại Cái Răng và lưu lượng tại Mỹ Khánh, được dành độc lập để đánh giá mô hình. Điều kiện ban đầu là mực nước đồng nhất theo giá trị biên ban đầu và vận tốc bằng 0; 24 giờ đầu được xem là thời gian spin-up và không dùng để diễn giải chất lượng mô hình.

Chuỗi 15 ngày được chia thành 8 ngày đầu để hiệu chỉnh và 7 ngày sau để kiểm định. Hệ số Manning được điều chỉnh theo phương pháp thử–sai có định hướng, đồng thời kiểm tra tính hợp lý vật lý. Chất lượng mô hình được đánh giá bằng RMSE, Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE), PBIAS, RSR, R^2 và độ lệch pha. Việc sử dụng đồng thời nhiều chỉ số giúp hạn chế cách diễn giải phiến diện đối với chuỗi dao động triều [2–5].

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Hiệu chỉnh mô hình

Giá trị n = 0,025 cho sự cân bằng tốt nhất giữa khả năng tái hiện mực nước và lưu lượng. Trong 8 ngày hiệu chỉnh, mô hình tái hiện tốt chu kỳ và thời điểm xuất hiện đỉnh, chân triều. Đối với mực nước tại Cái Răng, NSE = 0,789, RMSE = 0,279 m, RSR = 0,461 và R^2 = 0,955. Mô hình còn xu hướng làm giảm biên độ tại một số cực trị, thể hiện qua PBIAS +14,2%. Đối với lưu lượng tại Mỹ Khánh, mô hình mô phỏng được quá trình đổi chiều dòng chảy theo triều; NSE = 0,641, RMSE = 305,89 m^3/s, RSR = 0,599 và R^2 = 0,855. PBIAS gần 0 (+0,9%) nhưng cần được diễn giải thận trọng vì lưu lượng đổi dấu có thể làm sai số dương và âm bù trừ nhau.

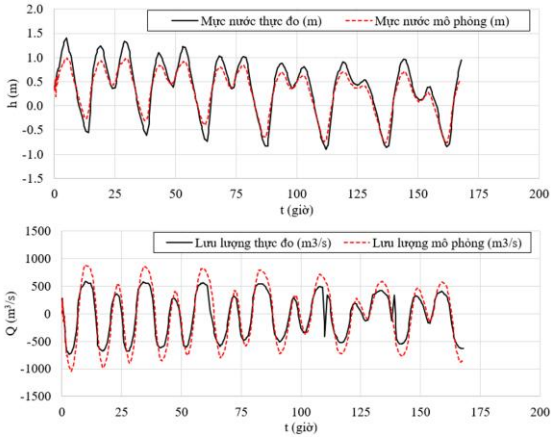


Hình 3. So sánh mực nước và lưu lượng mô phỏng với thực đo trong giai đoạn hiệu chỉnh.

3.2. Kiểm định mô hình

Toàn bộ tham số được giữ nguyên khi chạy 7 ngày kiểm định. Kết quả không suy giảm so với hiệu chỉnh; ngược lại, các chỉ số chính còn được cải thiện. Mực nước tại Cái Răng đạt NSE = 0,915, RMSE = 0,168 m, RSR = 0,292 và R^2 = 0,962. Lưu lượng tại Mỹ Khánh đạt NSE = 0,747, RMSE = 189,93 m^3/s, RSR = 0,503 và R^2 = 0,901. RMSE lưu lượng tương đương khoảng 50% độ lệch chuẩn của chuỗi quan trắc (≈ 378 m^3/s). Theo thang đánh giá của Moriasi và ctv. [3], lưu lượng kiểm định đạt mức "khá" (NSE 0,747; RSR 0,503) và mực nước đạt mức "rất tốt" (NSE 0,915; RSR 0,292); do thang này được xây dựng cho mô hình lưu vực, nó chỉ được dùng làm tham chiếu. Độ lệch pha ước tính nhỏ, khoảng -15 phút đối với mực nước và +30 phút đối

với lưu lượng. Mặc dù biên độ lưu lượng tại một số cực trị vẫn lớn hơn thực đo, mô hình tái hiện khá chính xác thời điểm đỉnh, đáy và quá trình đổi chiều dòng chảy.



Hình 4. So sánh mực nước và lưu lượng mô phỏng với thực đo trong giai đoạn kiểm định.

Bảng 2. Chỉ số đánh giá mô hình trong giai đoạn hiệu chỉnh và kiểm định.

Chỉ số	Hiệu chỉnh		Kiểm định	
	Mực nước	Lưu lượng	Mực nước	Lưu lượng
NSE	0,789	0,641	0,915	0,747
PBIAS (%)	+14,2	+0,9	+9,579	-6,390
RSR	0,461	0,599	0,292	0,503
RMSE	0,279 m	305,89 m^3/s	0,168 m	189,93 m^3/s
R^2	0,955	0,855	0,962	0,901
Lệch pha	-15 phút	+30 phút	-15 phút	+30 phút

3.3. Đánh giá tổng hợp

Sự ổn định của các chỉ số trong giai đoạn kiểm định cho thấy bộ tham số hiệu chỉnh không bị quá khớp rõ rệt với giai đoạn 8 ngày đầu. Đặc biệt, NSE và R^2 đều tăng trong kiểm định, trong khi RMSE giảm khoảng 40 % đối với mực nước và 38% đối với lưu lượng. Kết quả này chủ yếu phản ánh điều kiện thủy động lực của hai giai đoạn số liệu khác nhau, nhưng đồng thời cho thấy mô hình có khả năng khái quát hợp lý trong phạm vi đoạn Cái Răng–Mỹ Khánh. Sai khác lớn hơn đối với lưu lượng so với mực nước cho thấy cấu trúc mô hình giản lược và giả thiết vận tốc trung bình theo độ sâu vẫn hạn chế khả năng tái hiện chính xác các cực trị dòng chảy. Ngoài ra, mô hình hiện chưa xử lý quá trình ướt–khô và các thành phần đối lưu phi tuyến, do đó cần thận trọng khi mở rộng sang các khu vực có bãi ngập hoặc dòng chảy cục bộ phức tạp.

4. Kết luận

Bài báo đã xây dựng một mô hình thủy động lực học 2D cho sông Cần Thơ dựa trên hệ phương trình nước nông dạng giản lược (bỏ qua gia tốc đối lưu), lưới cong bám theo hình học thực tế và sơ đồ sai phân hữu hạn hiện. Quy trình xử lý 103 mặt cắt ngang và hai tuyến bờ cho phép hình thành miền tính có độ phân giải dọc 20 m; các tham số ổn định số gồm $\alpha = 0,35$, $\varepsilon\eta = 0,06$ và $\varepsilon uv = 0,03$. Sau hiệu chỉnh, hệ số nhám Manning $n = 0,025$ cho kết quả phù hợp với quan trắc. Trong kiểm định độc lập, NSE đạt 0,915 đối với mực nước và 0,747 đối với lưu lượng, R^2 tương ứng đạt 0,962 và 0,901. Mô hình tái hiện tốt pha và dao động mực nước triều; lưu lượng được tái hiện ở mức khá về pha và quá trình đổi chiều, song sai số tại các cực trị còn đáng kể. Trong phạm vi các giả thiết đã nêu, mô hình có thể làm nền thủy động lực cho các nghiên cứu vận chuyển vật chất trên đoạn Cái Răng–Mỹ Khánh. Những cải tiến cần ưu tiên gồm bổ sung số liệu tại biên MC0-0, xử lý biên ướt–khô và xem xét các số hạng phi tuyến khi yêu cầu mô tả dòng chảy cục bộ chi tiết hơn. Bên cạnh đó, so sánh đối chứng với Delft3D FM trên cùng miền tính sẽ giúp đánh giá rõ hơn ảnh hưởng của các giả thiết giản lược.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Cần Thơ, Mã số: CTCS2024-06-04.

Tài liệu tham khảo

[1]. de Saint-Venant, A.J.-C. (1871). Théorie du mouvement non-permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit. CR Acad. Sci. Paris, 73, 237–240.

[2]. Legates, D.R., McCabe Jr., G.J. (1999). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research, 35(1), 233–241.

[3]. Moriasi, D.N., et al. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 50(3), 885–900.

[4]. Bennett, N.D., et al. (2013). Characterising performance of environmental models. Environmental Modelling & Software, 40, 1–20.

[5]. Moriasi, D.N., et al. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. Transactions of the ASABE, 58(6), 1763–1785.

[6]. BQLDA-ĐTXD-TPCT (2013). Thuyết minh thiết kế cơ sở - Dự án Kè bờ sông Cần Thơ - Ứng phó với biến đổi khí hậu TP. Cần Thơ. Cần Thơ.

[7]. BQLDA-ĐTXD-TPCT (2013). Báo cáo khảo sát thủy văn - Dự án Kè bờ sông Cần Thơ - Ứng phó với biến đổi khí hậu TP. Cần Thơ. Cần Thơ.

[8]. Tuấn, H.M., Duy, Đ.V., Đạt, P.T. (2025). Phân tích diễn biến đường bờ sông Cần Thơ bằng công nghệ ảnh viễn thám. Tạp chí Vật liệu và Xây dựng, 15(04), 158–163.

[9]. Margolin, L., Shashkov, M. (1999). Using a curvilinear grid to construct symmetry-preserving discretizations for Lagrangian gas dynamics. Journal of Computational Physics, 149(2), 389–417.

[10]. Courant, R., Friedrichs, K., Lewy, H. (1928). Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik. Mathematische Annalen, 100(1), 32–74.

[11]. Dung, N.V., Merz, B., Bárdossy, A., Thang, T.D., Apel, H. (2011). Multi-objective automatic calibration of hydrodynamic models utilizing inundation maps and gauge data. Hydrology and Earth System Sciences, 15, 1339–1354.

[12]. Manh, N.V., Dung, N.V., Hung, N.N., Kummu, M., Merz, B., Apel, H. (2015). Future sediment dynamics in the Mekong Delta floodplains: Impacts of hydropower development, climate change and sea level rise. Global and Planetary Change, 127, 22–33.

[13]. Triet, N.V.K., Dung, N.V., Fujii, H., Kummu, M., Merz, B., Apel, H. (2017). Has dyke development in the Vietnamese Mekong Delta shifted flood hazard downstream? Hydrology and Earth System Sciences, 21, 3991–4010.

[14]. Thanh, V.Q., Roelvink, D., van der Wegen, M., Reyns, J., Kernkamp, H., Vinh, G.V., Linh, V.T.P. (2020). Flooding in the Mekong Delta: the impact of dyke systems on downstream hydrodynamics. Hydrology and Earth System Sciences, 24, 189–212.

[15]. Eslami, S., Hoekstra, P., Kernkamp, H.W.J., et al. (2021). Dynamics of salt intrusion in the Mekong Delta: results of field observations and integrated coastal–inland modelling. Earth Surface Dynamics, 9, 953–976.

[16]. Huong, H.T.L., Pathirana, A. (2013). Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho city, Vietnam. Hydrology and Earth System Sciences, 17, 379–394.

[17]. Apel, H., Martínez Trepat, O., Hung, N.N., Chinh, D.T., Merz, B., Dung, N.V. (2016). Combined fluvial and pluvial urban flood hazard analysis: concept development and application to Can Tho city, Mekong Delta, Vietnam. Natural Hazards and Earth System Sciences, 16, 941–961.

[18]. Arakawa, A., Lamb, V.R. (1977). Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model. Methods in Computational Physics, 17, 173–265.

[19]. Shapiro, R. (1970). Smoothing, filtering, and boundary effects. Reviews of Geophysics, 8(2), 359–387.

[20]. Medeiros, S.C., Hagen, S.C. (2013). Review of wetting and drying algorithms for numerical tidal flow models. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 71(4), 473–487.

[21]. Vreugdenhil, C.B. (1994). Numerical Methods for Shallow-Water Flow. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

[22]. Friedrichs, C.T. (2010). Barotropic tides in channelized estuaries. In: Valle-Levinson, A. (Ed.), Contemporary Issues in Estuarine Physics. Cambridge University Press, 27–61.

[23]. Hoitink, A.J.F., Jay, D.A. (2016). Tidal river dynamics: Implications for deltas. Reviews of Geophysics, 54(1), 240–272.