

Đánh giá tiềm năng ứng dụng mô hình TELEMAC2D mô phỏng lan truyền mặn ở vùng Đồng bằng sông Cửu Long

Châu Nguyễn Xuân Quang*, Hồ Văn Hòa, Ngô Ngọc Hoàng Giang



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

TÓM TẮT

Mô hình toán là công cụ hiệu quả để cung cấp thông tin định lượng hỗ trợ ra quyết định trong quản lý rủi ro xâm nhập mặn (XNM) tại các vùng ven biển. Nghiên cứu này nhằm đánh giá khả năng sử dụng mô hình mã nguồn mở TELEMAC2D mô phỏng quá trình lan truyền mặn ở vùng ĐBSCL. Kết quả mô phỏng lưu lượng và mực nước tại trạm Cần Thơ và Mỹ Thuận có độ tin cậy khá cao với hệ số $NSE \geq 0,78$, $r^2 \geq 0,85$ và $16\% < PBIAS < 6,0\%$. Mô phỏng nồng độ mặn tại các trạm Cầu Quan, Trà Vinh và Hòa Bình đều có hệ số $NSE > 0,5$ (ngoại trừ giai đoạn hiệu chỉnh, hệ số NSE có giá trị lần lượt là 0,4 và 0,46 tại trạm Cầu Quan và Trà Vinh), chỉ số $r^2 \geq 0,71$ và $-2,53\% \leq PBIAS \leq 4,96\%$. Ranh mặn 4 g/l mô phỏng năm 2016 và năm 2020 có sự chênh lệch nhỏ từ 0,9 - 2,9 km so với dữ liệu quan trắc. Hơn nữa, kết quả tính toán từ mô hình cho thấy diễn biến XNM theo các kịch bản khá phù hợp với xu thế tác động của lưu lượng thượng nguồn và mực nước hạ lưu ven biển đến diễn biến XNM tại vùng ĐBSCL. Những kết quả này chứng tỏ rằng mô hình mô phỏng XNM đạt được độ tin cậy chấp nhận được và có nhiều tiềm năng ứng dụng để tính toán dòng chảy và XNM cho khu vực có chế độ thủy lực phức tạp và rộng lớn như vùng ĐBSCL.

Từ khóa: Đồng bằng sông Cửu Long, mô phỏng dòng chảy, xâm nhập mặn, TELEMAC2D

GIỚI THIỆU

Xâm nhập mặn (XNM) đang trở nên trầm trọng hơn những năm vừa qua, với thời gian xảy ra XNM có xu hướng sớm hơn trước đây, phạm vi xâm nhập sâu hơn¹, gây ra nhiều thiệt hại cho sản xuất nông nghiệp và hệ sinh thái vùng ĐBSCL^{2,3}. Điển hình vào năm 2020, nồng độ mặn trên các sông chính tăng cao (5,7 g/l tại trạm Mỹ Tho – sông Tiền và 9,2 g/l tại trạm Cầu Quan – sông Hậu), làm cho diện tích trồng lúa vụ Đông Xuân ở Bến Tre, Cà Mau, Kiên Giang, Trà Vinh, Vĩnh Long, và Sóc Trăng thiệt hại nặng nề, và nhiều nơi không có nước sinh hoạt⁴. Do đó, xây dựng các công cụ tính toán định lượng diễn biến XNM là rất cần thiết nhằm hỗ trợ cho công tác quản lý và kiểm soát tác động XNM.

Tại ĐBSCL, nhiều mô hình toán đã được áp dụng thành công trong mô phỏng XNM như mô hình VSAP, COD, DELTA^{5,6}, MIKE11, 21, 31^{7,8} và Delft3D⁹. Tuy nhiên, vẫn còn tồn tại một số hạn chế trong việc áp dụng các mô hình này như khả năng chia sẻ mã nguồn, chi phí cho bản quyền khá lớn, hạn chế về tốc độ tính toán và khả năng tích hợp với các mô hình khác để mô phỏng đầy đủ các quá trình vật lý của khu vực. Do đó, việc phát triển mô hình mô phỏng XNM mã nguồn mở nhằm nâng cao hiệu quả tính toán và giảm thiểu chi phí cũng như đảm bảo tính mở rộng cho các mô phỏng các quá trình vật lý khác

là rất ý nghĩa, đóng góp cho công tác quản lý, giảm nhẹ các rủi ro thiên tai liên quan đến nước tại vùng ĐBSCL.

TELEMAC2D được phát triển bởi Tập đoàn điện lực Pháp vào năm 1987 và trở thành mã nguồn mở từ năm 2010, là phần mềm thủy lực hai chiều khá nổi tiếng đã được áp dụng để mô phỏng XNM tại nhiều lưu vực trên toàn cầu¹⁰. Với khả năng hỗ trợ tính toán song song và kết nối với các mô-đun mô phỏng quá trình vận chuyển bùn cát, sóng và các hiện tượng khác, TELEMAC2D có nhiều tiềm năng áp dụng để mô phỏng toàn diện các quá trình vật lý cho khu vực rộng lớn và có chế độ thủy văn và thủy lực phức tạp như ĐBSCL. TELEMAC2D còn có ưu điểm trong việc sử dụng triều thiên văn và độ mặn của nước biển làm biên hạ lưu. Ngoài ra, với nền tảng mã nguồn mở TELEMAC2D mang lại sự linh hoạt và chi phí thấp hơn so với các phần mềm thương mại. Hơn thế nữa, TELEMAC2D có một cộng đồng quốc tế hỗ trợ mạnh mẽ, giúp kết nối, chia sẻ kinh nghiệm về các vấn đề kỹ thuật nhanh chóng¹¹.

Mặc dù TELEMAC2D đã được sử dụng cho các nghiên cứu liên quan đến ngập lụt và biến đổi hình thái lòng dẫn ở ĐBSCL^{12,13} nhưng các nghiên cứu về khả năng mô phỏng XNM của TELEMAC2D tại khu vực này vẫn còn hạn chế. Vì vậy, nghiên cứu này nhằm đánh giá khả năng ứng dụng mô hình

Phòng Thủy văn và Tài nguyên nước,
Viện Môi trường và Tài nguyên,
ĐHQG-HCM, Việt Nam

Liên hệ

Châu Nguyễn Xuân Quang, Phòng Thủy văn và Tài nguyên nước, Viện Môi trường và Tài nguyên, ĐHQG-HCM, Việt Nam

Email: cnxquang@hcmier.edu.vn

Lịch sử

- Ngày nhận: 04-12-2024
- Ngày sửa đổi: 02-01-2025
- Ngày chấp nhận: 11-3-2025
- Ngày đăng: 16-06-2026

DOI: <https://doi.org/10.32508/vnuhcmj-ees.v10i1.797>



Bản quyền

© Tạp chí ĐHQG-HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.

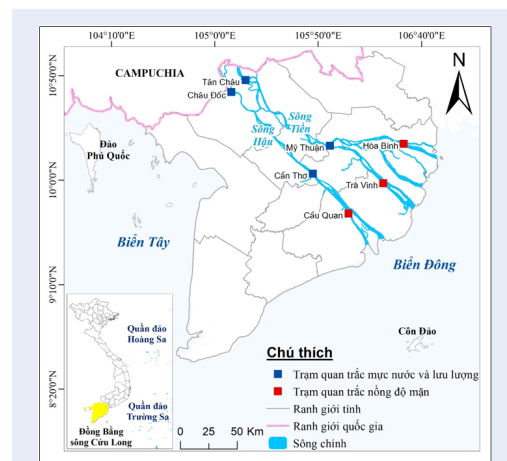
Trích dẫn bài báo này: Quang C N X, Hòa H V, Giang N N H. **Đánh giá tiềm năng ứng dụng mô hình TELEMAC2D mô phỏng lan truyền mặn ở vùng Đồng bằng sông Cửu Long**. VNUHCM J. Environ. Earth Sci. 2026; 10(1):1204-1213.

TELEMAC2D trong mô phỏng quá trình lan truyền mặn trong hệ thống sông – rạch phức tạp ở ĐBSCL. Cụ thể, nghiên cứu sẽ: (1) Đánh giá mức độ tin cậy của mô hình thông qua kết quả hiệu chỉnh và kiểm định; và (2) Ứng dụng mô hình đã được hiệu chỉnh, kiểm định để đánh giá diễn biến XNM do tác động của biến đổi khí hậu (BĐKH) từ phía thượng nguồn lưu vực Mê Công và nước biển dâng (NDB) từ phía biển.

DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Khu vực nghiên cứu

ĐBSCL có tọa độ địa lý từ $8^{\circ}35' - 10^{\circ}02'30''$ vĩ độ Bắc và $104^{\circ}25' - 106^{\circ}50'$ kinh độ Đông (Hình 1), có địa hình tương đối bằng phẳng, hơn 50% diện tích có cao độ từ 0,7 m – 1,2 m. Khu vực nằm trong vùng khí hậu nhiệt đới gió mùa, nhiệt độ trung bình khoảng $27,15^{\circ}\text{C}$, và lượng mưa trung bình hàng năm dao động từ 1.100 mm – 2.550 mm, chủ yếu xảy ra vào mùa những tháng mùa mưa từ tháng 5 đến tháng 11.



Hình 1: Bản đồ khu vực nghiên cứu và vị trí các trạm quan trắc thủy văn và xâm nhập mặn

Trong vùng có 02 con sông lớn là sông Tiền (chiều dài khoảng 215 km) và sông Hậu (chiều dài khoảng 115 km), với độ rộng bình quân khoảng 1.000 m – 1.500 m và độ sâu bình quân khoảng 10 m – 20 m, nhận khoảng 450 tỷ m^3 nước mỗi năm từ thượng nguồn Mê Công. Chế độ thủy lực của vùng chịu sự chi phối bởi dòng chảy thượng nguồn, chế độ thủy triều từ biển Đông và biển Tây. Lưu lượng bình quân vào mùa lũ (tháng 7 đến tháng 11) đạt $30.000 \text{ m}^3/\text{s} - 32.000 \text{ m}^3/\text{s}$, trong khi lưu lượng bình quân mùa kiệt (tháng 1 đến tháng 6) chỉ đạt $2.500 \text{ m}^3/\text{s} - 4.000 \text{ m}^3/\text{s}$. XNM đang có xu hướng tăng trong mùa khô, đặc biệt trong

những năm có lượng mưa thấp, gây ảnh hưởng lớn đến đời sống và sản xuất của dân cư trong vùng.

Dữ liệu

Dữ liệu khí tượng - thủy văn và mặn được thu thập để làm điều kiện biên và hiệu chỉnh, kiểm định mô hình TELEMAC2D. Trong đó, dữ liệu lưu lượng tại trạm Tân Châu và Châu Đốc năm 2016 và 2020 được sử dụng để làm điều kiện biên. Dữ liệu mực nước và lưu lượng các trạm Vàm Nao, Mỹ Thuận, Cần Thơ phục vụ để hiệu chỉnh và kiểm định mô hình (Hình 1). Các dữ liệu quan trắc độ mặn năm 2016 và 2020 tại các trạm Cầu Quan, Trà Vinh và Hòa Bình phục vụ để hiệu chỉnh và kiểm định mô hình mô phỏng XNM. Ngoài ra, dữ liệu địa hình lòng dẫn trên sông Tiền và sông Hậu cũng được thu thập và xử lý, làm đầu vào mô hình toán. Bộ dữ liệu được thu thập từ đề tài KHCN-TNB.ĐT/14-19/C11, 2021¹⁴, chi tiết ở Bảng 1.

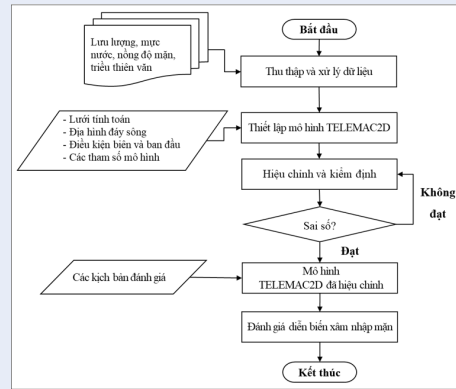
Bảng 1: Bảng tổng hợp thông tin dữ liệu

STT	Dữ liệu	Thời gian
1	Lưu lượng tại trạm Tân Châu và Châu Đốc	Tháng 03/2016, 02/2020
2	Mực nước, lưu lượng tại trạm Mỹ Thuận và Cần Thơ	Tháng 03/2016, 02/2020
3	Nồng độ mặn tại trạm Hòa Bình, Trà Vinh và Cầu Quan	Tháng 03/2016, 02/2020
4	Địa hình lòng dẫn sông Tiền và sông Hậu	2014 - 2017

Phương pháp nghiên cứu

Khung nghiên cứu

Sơ đồ các bước nghiên cứu được trình bày tại Hình 2. Đầu tiên, dữ liệu địa hình, lưu lượng, mực nước, nồng độ mặn, triều thiên văn, gió,... trong phạm vi nghiên cứu được thu thập và xử lý để thiết lập mô hình thủy lực và lan truyền mặn bằng mô hình TELEMAC2D. Tiếp theo, xây dựng lưới tính toán có gắn thông tin địa hình lòng dẫn, thiết lập điều kiện biên, điều kiện ban đầu và các thông số mô hình. Sau đó, tiến hành hiệu chỉnh bộ thông số độ nhám, hệ số phân tán,... để đảm bảo giá trị mực nước, lưu lượng và nồng độ mặn giữa thực đo và mô phỏng đạt sai số cho phép và sau đó thực hiện tiếp bước kiểm định để đảm bảo độ tin cậy. Tiếp đó, áp dụng mô hình TELEMAC2D để mô phỏng các kịch bản đã đề xuất nhằm đánh giá tác động của lưu lượng thượng nguồn và mực nước ven biển đến diễn biến XNM tại vùng ĐBSCL.



Hình 2: Tiến trình thực hiện nghiên cứu

Cơ sở lý thuyết

TELEMAC2D được dùng để mô phỏng dòng chảy bề mặt tự do hai chiều theo phương ngang. Tại mỗi điểm của lưới, chương trình tính toán độ sâu của nước và hai thành phần vận tốc. Chương trình TELEMAC2D giải đồng thời các phương trình sau¹⁵:

- Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \vec{\nabla}(h) + h \text{div}(\vec{u}) = q \quad (1)$$

- Phương trình động lượng theo phương X:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \vec{\nabla}(u) = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \text{div}(h v_t \vec{\nabla} u) \quad (2)$$

- Phương trình động lượng theo phương Y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \vec{\nabla}(v) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \text{div}(h v_t \vec{\nabla} v) \quad (3)$$

- Phương trình bảo toàn vết:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \vec{\nabla}(T) = S_T + \frac{1}{h} \text{div}(h v_T \vec{\nabla} T) \quad (4)$$

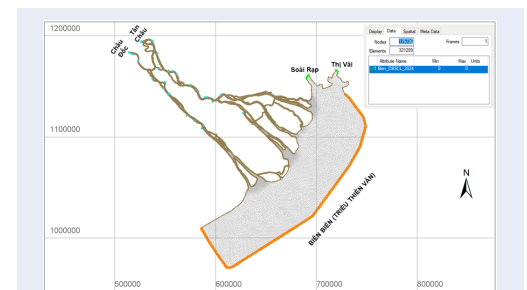
Trong đó: h (m): chiều sâu nước; u, v (m/s): các thành phần vận tốc theo phương x, y ; T (g/l) hoặc ($^{\circ}\text{C}$): nồng độ chất hòa tan hoặc nhiệt độ; g (m/s^2): gia tốc trọng trường; v_t, v_T (m^2/s): hệ số khuếch tán vận tốc và hệ số khuếch tán chất; Z (m): cao trình mặt thoáng; t (s): thời gian; q (m^3/s): lưu lượng đơn vị của nguồn; S_x, S_y (m/s^2): các ngoại lực (gió, lực Coriolis, ma sát đáy,...); S_T (g/l/s): nguồn chất hòa tan.

Thiết lập mô hình

Quá trình thiết lập mô hình TELEMAC2D bao gồm các bước chính: (1) xây dựng lưới tính toán; (2) thiết lập điều kiện biên và điều kiện ban đầu; (3) thiết lập các thông số mô hình và tích hợp các mô-đun cần thiết.

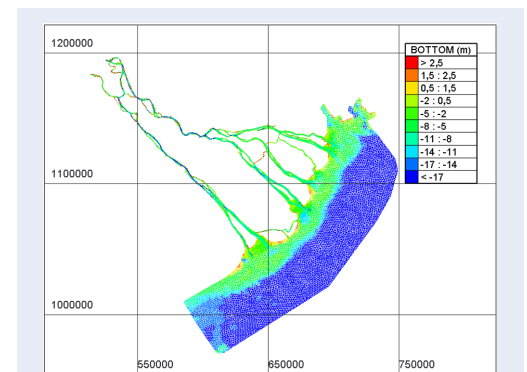
Xây dựng lưới tính toán

Lưới tính toán là cơ sở của mô hình số, quyết định độ chính xác, hiệu quả mô phỏng, được khởi tạo bằng phần mềm Blue Kenue. Trong nghiên cứu này, lưới tính phi cấu trúc, dạng tam giác được sử dụng, bao gồm 176.730 nút, 321.289 phần tử. Góc nhỏ nhất của các phần tử tam giác trong lưới là 30° . Khoảng cách giữa các nút dao động từ 15 m đến 100 m ở vùng kênh nhánh, sông Tiền, sông Hậu và 1.000 m đến 2.500 m ở biển Đông. Lưới bao phủ toàn bộ sông Tiền và sông Hậu, từ biên thượng nguồn tại trạm Châu Đốc và Tân Châu đến các cửa sông đổ ra biển Đông, nên mạng lưới tính toán là bao gồm các kênh-sông chính và vùng biển gần bờ (Hình 3).



Hình 3: Miền lưới tính toán và vị trí các biên trong TELEMAC2D

Về địa hình, cao độ bờ khu vực nghiên cứu khoảng 0,8 m đến trên 1,5 m, cao độ đáy sông từ -1,0 m đến -45,0 m, và vùng đáy biển sâu -14,0 m - 36,0 m. (Hình 4).



Hình 4: Địa hình lòng dẫn khu vực nghiên cứu

Thiết lập điều kiện biên

Các biên chính của miền mô phỏng bao gồm: (i) Biên thượng nguồn là lưu lượng quan trắc tại trạm Tân

Châu (sông Tiền) và Châu Đốc (sông Hậu); (ii) 30 biên nhập bên được trích xuất từ mô hình MIKE 11 cho vùng ĐBSCL đã được trong nghiên cứu trước đây của Hòa và cộng sự (2022)¹⁶, (iii) Biên hạ lưu (biên biển) với dữ liệu triều thiên văn biển Đông và biển Tây, cách vị trí đất liền 50 km, có dạng (Z, U, V). Dữ liệu triều thiên văn được sử dụng gồm 7 sóng thủy triều chính (K1, K2, O1, N2, P1, Q1 và S2) thuộc bộ cơ sở dữ liệu mực nước triều toàn cầu TPXO có độ phân giải (1.513 m x 1.230 m) ở vùng Ấn Độ Dương và được hiệu chỉnh lại theo mực nước triều vùng ven biển ĐBSCL; (iv) Biên độ mặn ở hạ lưu được thiết lập bằng 32% (nồng độ mặn của nước biển) cùng với biên triều thiên văn và các biên thượng nguồn độ mặn bằng 0; (v) Biên bên (biên đất liền): được xem là biên không thấm, không có dòng chảy qua. Điều kiện ban đầu (mực nước và vận tốc) được khởi tạo bằng cách mô phỏng trước 4 ngày so với thời điểm tính toán để ổn định mô hình (chế độ hotstart). Giá trị độ mặn ban đầu được nội suy theo không gian từ dữ liệu quan trắc để phản ánh trạng thái thực tế tại thời điểm mô phỏng.

Thiết lập bộ thông số mô hình

Mô hình được hiệu chỉnh thông qua quá trình thử - sai giá trị hệ số Manning (n) từ 0,01 đến 0,035, phù hợp với đặc điểm lòng sông Tiền, sông Hậu và vùng biển Đông và các nghiên cứu trước đây^{12,17}. Hệ số khuếch tán (D) từ khoảng 50 m²/s đến 550 m²/s trên sông Tiền; sông Hậu từ khoảng 80 m²/s đến 550 m²/s; trên sông Cổ Chiên, sông Hàm Luông: 70 m²/s đến 550 m²/s và khoảng 450 m²/s đến 650 m²/s khu vực biển Đông.

Đánh giá sai số mô hình

Trước khi mô phỏng kịch bản, mô hình được hiệu chỉnh và kiểm định thủy lực với các chuỗi giá trị lưu lượng, mực nước lần lượt vào các tháng 3/2016 và tháng 2/2020 tại trạm Mỹ Thuận và trạm Cần Thơ (Hình 1). Tương tự, mô hình XNM cũng được hiệu chỉnh và kiểm định với chuỗi dữ liệu nồng độ mặn quan trắc tại các trạm Cầu Quan, Trà Vinh và Hòa Bình, cùng thời kỳ thiết lập cho mô phỏng thủy lực. Các chỉ số thống kê r^2 , NSE và PBIAS được sử dụng để đo lường mức độ tin cậy của mô hình sau quá trình hiệu chỉnh và kiểm định. Dựa theo nghiên cứu của Moriasi¹⁸, chỉ số r^2 và NSE > 0,5 và PBIAS < 25% thì mô hình được xem là có đủ độ tin cậy để tính toán kịch bản.

Hệ số xác định r^2 :

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) (P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (5)$$

Hệ số Nash-Sutcliffe (NSE):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

Sai số trung bình lệch chuẩn (PBIAS):

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad (7)$$

Trong đó P_i thể hiện giá trị mô phỏng, và O_i thể hiện giá trị thực đo.

Kịch bản mô phỏng

Các tác động chính gây ra XNM ở ĐBSCL bao gồm sự suy giảm dòng chảy thượng nguồn và sự gia tăng mực nước triều do NBD. Vì vậy, nghiên cứu đề xuất 4 kịch bản (KB) mô phỏng XNM, ứng với việc thay đổi điều kiện biên như Bảng 2.

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình

Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình thủy lực

Nghiên cứu tiến hành hiệu chỉnh và kiểm định với chuỗi dữ liệu lưu lượng, mực nước vào tháng 3/2016 và tháng 2/2020 tại trạm Mỹ Thuận và Cần Thơ. Bảng 3 cho thấy chỉ số NSE và r^2 lớn hơn 0,75 và đồng thời chỉ số -16 % < PBIAS < 6,0 %, chứng tỏ mô hình đảm bảo độ tin cậy về mặt thủy lực.

Bên cạnh sự phù hợp theo các chỉ số thống kê, Hình 5 đến Hình 8 cho thấy mực nước và lưu lượng mô phỏng phù hợp với dữ liệu quan trắc vào năm 2016 và 2020. Mặc dù một số thời điểm có sự sai lệch về đỉnh dòng chảy, nhưng nhìn chung, kết quả thống kê cho thấy mô hình tương đối phù hợp với chế độ thủy lực của khu vực. Do đó, mô hình có đủ độ tin cậy phục vụ mô phỏng XNM.

Hiệu chỉnh và kiểm định

Mô hình XNM lần lượt được hiệu chỉnh và kiểm định tại trạm Cầu Quan (sông Hậu), trạm Trà Vinh và Hòa Bình (sông Tiền) giai đoạn 2016 và 2020 (Hình 1). Kết quả cho thấy chỉ số PBIAS nhỏ hơn 10% cho cả giai đoạn hiệu chỉnh và kiểm định. So với nghiên cứu của Tuấn và cộng sự (2023)²⁰ khi áp dụng mô hình một chiều, chỉ số PBIAS trong giai đoạn hiệu chỉnh của nghiên cứu này tương đối khả quan hơn. Hệ số xác định r^2 hai giai đoạn này lớn hơn 0,7 (từ 0,71 đến 0,82). Tuy nhiên, chỉ số NSE ở mức chấp nhận được, từ 0,4 đến 0,61.

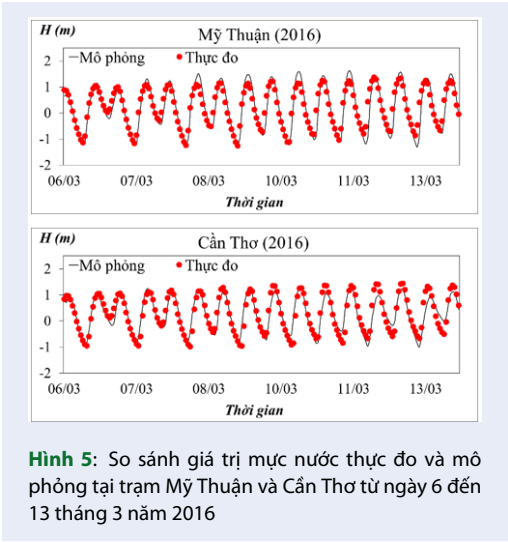
Chỉ số NSE khi kiểm định tại một số trạm còn thấp, ví dụ như tại Trà Vinh khoảng 0,4, vì mô phỏng XNM

Bảng 2: Tổng hợp các kịch bản mô phỏng lan truyền mặn

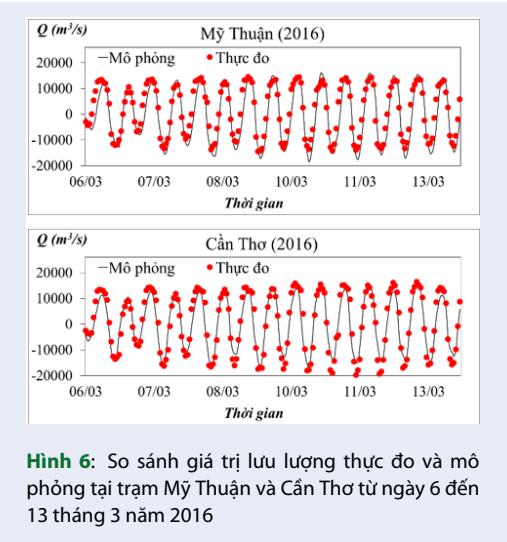
Kịch bản	Lưu lượng (Q) (m ³ /s)	Mức nước (H) (m)	Ghi chú
KB0	Q2016	H2016	Kịch bản nền 2016
KB1	Q2016	H2016 và HRCp4.5	Tác động của gia tăng mức nước hạ lưu do NBD đến năm 2050 (RCP 4.5).
KB2	QBĐKH	H2016	Ảnh hưởng lưu lượng thượng lưu do tác động của BĐKH theo kịch bản dòng chảy thấp nhất được đề xuất trong nghiên cứu Heiko và cộng sự, 2024 ¹⁹ .
KB3	QBĐKH	H2016 và HRCp4.5	Kịch bản đánh tác động kết hợp suy giảm lưu lượng từ lưu vực Mê Công do BĐKH ¹⁹ và gia tăng mức nước hạ lưu do NBD đến năm 2050 (RCP 4.5).

Bảng 3: Kết quả đánh giá sai số mô hình thủy lực tại trạm Mỹ Thuận và Cần Thơ

Trạm	Thông số	Hiệu chỉnh (2016)			Kiểm định (2020)		
		NSE	r ²	PBIAS	NSE	r ²	PBIAS
Mỹ Thuận	H (m)	0,89	0,89	-6,7	0,80	0,88	-9,5
	Q (m ³ /s)	0,89	0,93	5,8	0,86	0,88	-11,1
Cần Thơ	H (m)	0,81	0,85	-4,8	0,78	0,86	-15,6
	Q (m ³ /s)	0,87	0,87	-15,3	0,88	0,90	-11,4



Hình 5: So sánh giá trị mực nước thực đo và mô phỏng tại trạm Mỹ Thuận và Cần Thơ từ ngày 6 đến 13 tháng 3 năm 2016



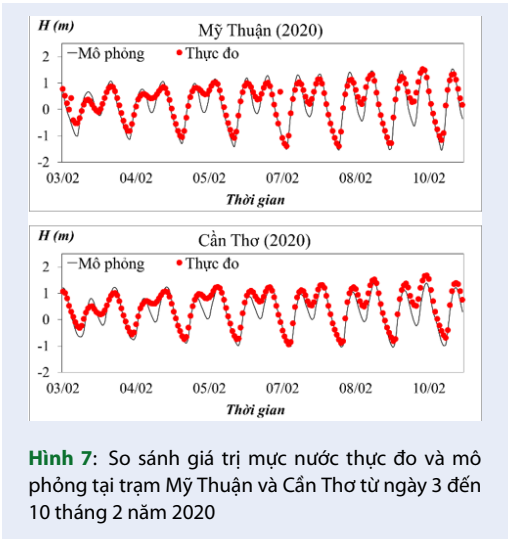
Hình 6: So sánh giá trị lưu lượng thực đo và mô phỏng tại trạm Mỹ Thuận và Cần Thơ từ ngày 6 đến 13 tháng 3 năm 2016

là quá trình phức tạp, cần xem xét tác động từ nhiều yếu tố như hệ số nhám, hệ số khuếch tán, dòng chảy thủy triều, thông số nồng độ mặn đầu vào, sự tương tác giữa sông, rạch, và biển. Những tác nhân này đều ảnh hưởng đáng kể đến sự lan truyền mặn, khiến cho việc hiệu chỉnh và kiểm định mô hình trở nên khó khăn. Ngoài ra, dữ liệu nồng độ mặn thực đo có bước thời gian 3 giờ cũng làm hạn chế tính chính xác khi đánh giá sai số của mô hình.

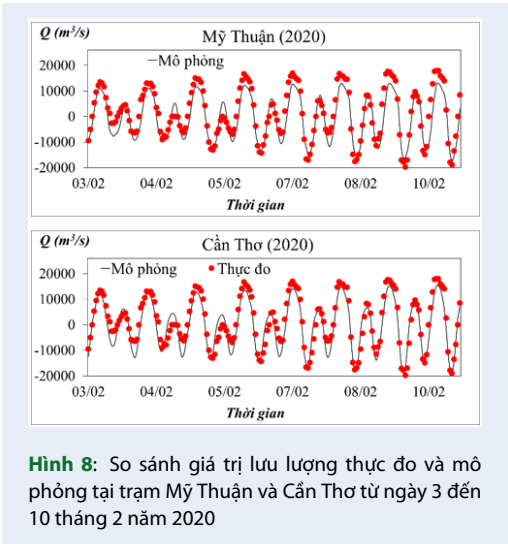
Hình 9 và Hình 10 cho thấy sự tương quan khá rõ ràng giữa nồng độ mặn mô phỏng và thực đo trong giai đoạn hiệu chỉnh và kiểm định. Nhìn chung, với kết quả khá phù hợp về mặt chỉ số thống kê và sự tương quan về mặt xu thế hình ảnh. Như vậy, mô hình TELEMAC2D đảm bảo tin cậy để mô phỏng XNM tại vùng ĐBSCL.

Bảng 4: Kết quả đánh giá sai số mô hình tại các trạm quan trắc

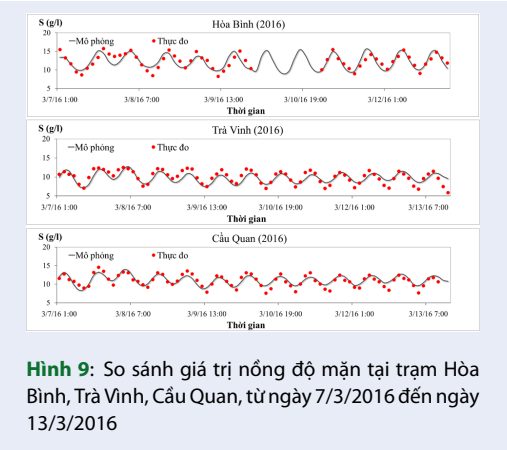
Giai đoạn	Thời gian	Chỉ tiêu	Trạm quan trắc		
			Cầu Quan	Trà Vinh	Hòa Bình
Hiệu chỉnh	6 - 13/3/2016	NSE	0,61	0,55	0,52
		r^2	0,75	0,76	0,78
		IAS	-0,51	3,26	0,27
Kiểm định	6 - 13/2/2020	NSE	0,46	0,40	0,53
		r^2	0,82	0,71	0,75
		IAS	-0,09	4,96	-2,53



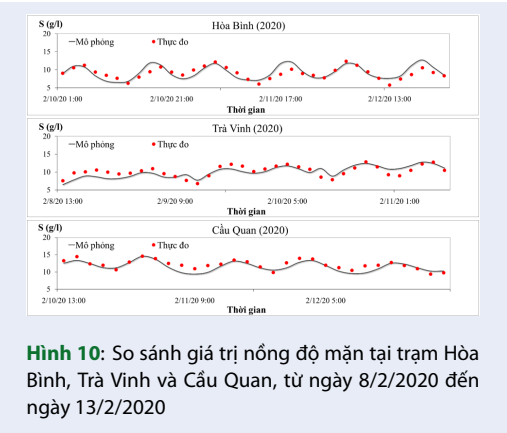
Hình 7: So sánh giá trị mực nước thực đo và mô phỏng tại trạm Mỹ Thuận và Cần Thơ từ ngày 3 đến 10 tháng 2 năm 2020



Hình 8: So sánh giá trị lưu lượng thực đo và mô phỏng tại trạm Mỹ Thuận và Cần Thơ từ ngày 3 đến 10 tháng 2 năm 2020



Hình 9: So sánh giá trị nồng độ mặn tại trạm Hòa Bình, Trà Vinh, Cầu Quan, từ ngày 7/3/2016 đến ngày 13/3/2016



Hình 10: So sánh giá trị nồng độ mặn tại trạm Hòa Bình, Trà Vinh và Cầu Quan, từ ngày 8/2/2020 đến ngày 13/2/2020

Phân tích diễn biến xâm nhập mặn

Bảng 5 trình bày kết quả mô phỏng XNM theo từng kịch bản. Dựa theo kết quả tính, khi lưu lượng thượng nguồn suy giảm hoặc mực nước triều tăng, nồng độ

mặn trên các sông chính cũng gia tăng rõ rệt và ranh mặn cũng tiến sâu vào nội đồng hơn.

Đối với kịch bản nền (KB0, Bảng 5), kết quả tương đối phù hợp với thực trạng XNM vào năm 2016, khi XNM (ranh mặn 4 g/l) xâm nhập vào nội đồng trên sông Tiền khoảng 73 km và sông Hậu khoảng 60 km²¹.

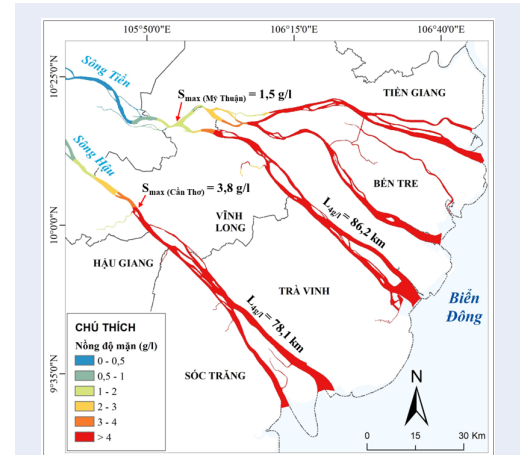
Với KB1 (Bảng 5), khi mực nước triều hạ lưu gia tăng (theo RCP 4.5 đến 2050), nồng độ mặn lớn nhất (S_{max}) trên sông Tiền và sông Hậu lần lượt là 0,8 g/l và 1,1 g/l. So với KB0, nồng độ mặn đã gia tăng khoảng + 0,1 g/l đến + 0,2 g/l. Lúc này, độ sâu xâm nhập của ranh mặn 4 g/l vào khoảng 77,2 km trên sông Tiền và 65,8 km trên sông Hậu. Như vậy, khi có tác động của NBD, nước mặn đã theo sông chính xâm nhập vào nội đồng, và sâu hơn KB0 khoảng + 3,3 km trên sông Tiền và + 2,9 km trên sông Hậu. Kết quả XNM tương tự với các ranh mặn 2 g/l và 3 g/l.

Với KB2 (Bảng 5), khi lưu lượng thượng nguồn giảm, S_{max} trên sông Tiền và sông Hậu lần lượt là 1,3 g/l và 1,5 g/l. So với KB0, nồng độ mặn gia tăng khoảng + 0,6 g/l đến + 1,0 g/l. Độ sâu xâm nhập trên các sông chính cũng gia tăng đáng kể. Ví dụ trường hợp ranh mặn 4 g/l, XNM đã tiến xa hơn so với KB0 trên sông Tiền khoảng +10,3 km và sông Hậu khoảng + 13,8 km. Như vậy, yếu tố lưu lượng thượng nguồn suy giảm (theo KB2) sẽ ảnh hưởng đến XNM nhiều hơn so với mức độ gia tăng mực nước triều (theo KB1).

Đối với KB3 (Bảng 5), khi tác động tổng hợp của giảm lưu lượng từ lưu vực Mê Công và gia tăng mực nước triều, thì XNM gia tăng đáng kể cả về nồng độ lẫn độ sâu xâm nhập. S_{max} trên sông Tiền (tại Cần Thơ) là 1,5 g/l, cao hơn KB0 là + 0,9 g/l. Trong khi đó S_{max} trên sông Hậu (tại Mỹ Thuận) là 3,8 g/l, cao hơn KB0 là + 2,9 g/l. Về mặt không gian (Hình 11) khi xét ranh mặn 4 g/l, độ sâu XNM ở sông Tiền là 86,2 km và sông Hậu là 78,1 km. XNM ảnh hưởng khá lớn đến các tỉnh như Bến Tre, Tiền Giang, Trà Vinh, Sóc Trăng,...

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Mô hình TELEMAC2D có khả năng mô phỏng tốt chế độ thủy lực và lan truyền mặn tại vùng ĐBSCL. Giá trị các chỉ số thống kê đánh giá sai số mô hình r^2 , NSE và PBIAS cho thấy kết quả mô phỏng đạt mức độ tin cậy cho phép. Kết quả mô phỏng theo các kịch bản cho thấy rằng sự gia tăng mực nước biển và suy giảm dòng chảy thượng nguồn đều làm tăng mức độ XNM tại ĐBSCL, trong đó suy giảm dòng chảy thượng nguồn là yếu tố tác động mạnh hơn. Với khả năng tính toán song song trên hệ thống máy tính hiệu năng cao (HPC), TELEMAC2D có thể thực hiện mô phỏng bài toán quy mô lớn hơn so với các mô hình 1D và 2D thông thường. Việc sử dụng mô hình TELEMAC2D cho phép kéo dài biên hạ lưu ra



Hình 11: Bản đồ phân bố nồng độ mặn (g/l) và ranh mặn 4g/l trên sông Tiền và sông Hậu (KB3)

phía biển, từ đó sử dụng dữ liệu triều thiên văn và nồng độ mặn của nước biển làm các biên tính toán. Là một phần mềm mã nguồn mở, TELEMAC2D cho phép phát triển thêm những mô-đun tính toán, giúp ứng dụng rộng rãi hơn so với các phần mềm thương mại. Hơn nữa, khả năng tích hợp với các mô hình như TELEMAC3D, TOMAWAC (sóng) và SISYPHE (bùn cát) tạo điều kiện xây dựng hệ thống mô hình tích hợp, giúp mô phỏng toàn diện các yếu tố vật lý hệ thống sông và vùng ven biển. Các nghiên cứu tiếp theo cần bổ sung thêm yếu tố gió, cập nhật địa hình và các cống thủy lợi cũng như dữ liệu độ mặn chi tiết hơn trong mô hình tính toán để nâng cao độ chính xác kết quả mô phỏng.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi ĐHQG-HCM trong khuôn khổ đề tài mã số C2023-24-04.

Cảm ơn Phòng thí nghiệm Tính toán hiệu năng cao, Trường Đại học Bách Khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho công tác tính toán mô phỏng trên hệ thống máy tính HPC.

XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

Nhóm tác giả xin cam đoan rằng không có bất kỳ xung đột lợi ích nào trong công bố bài báo này.

ĐÓNG GÓP CỦA CÁC TÁC GIẢ

Châu Nguyễn Xuân Quang đóng vai trò xây dựng ý tưởng, kế hoạch nghiên cứu, góp ý thiết lập, hiệu chỉnh và kiểm định, phân tích kết quả, viết và chỉnh sửa bản thảo.

Hồ Văn Hòa đóng vai trò thiết lập, hiệu chỉnh và kiểm định mô hình TELEMAC2D, tổng hợp và hỗ trợ phân

Bảng 5: Tổng hợp kết quả mô phỏng theo các kịch bản

Kịch bản	Nồng độ mặn lớn nhất (g/l)	ΔS (g/l)	Chiều sâu ranh mặn (km)					
			Ranh mặn 4 g/l	$\Delta L4$	Ranh mặn 3 g/l	$\Delta L3$	Ranh mặn 2 g/l	$\Delta L2$
Sông Tiền (trạm Mỹ Thuận)								
KB0	0,7	-	73,9	-	78,7	-	87,1	-
KB1	0,8	+ 0,1	77,2	+ 3,3	81,2	+ 2,5	88,9	+ 1,8
KB2	1,3	+ 0,6	84,2	+ 10,3	89,5	+ 10,8	91,9	+ 4,8
KB3	1,5	+ 0,9	86,2	+12,3	90,4	+ 11,7	93,0	+ 5,9
Sông Hậu (trạm Cần Thơ)								
KB0	0,9	-	62,9	-	68,4	-	73,9	-
KB1	1,1	+ 0,2	65,8	+ 2,9	71,1	+ 2,7	75,8	+ 1,9
KB2	2,9	+ 2,0	76,7	+ 13,8	78,9	+ 10,5	88,3	+ 14,4
KB3	3,8	+ 2,9	78,1	+ 15,2	85,2	+ 16,8	93,7	+ 19,8

Ghi chú: Nồng độ mặn lớn nhất xem xét tại trạm Mỹ Thuận (sông Tiền) và trạm Cần Thơ (sông Hậu). ΔS là chênh lệch nồng độ mặn và $\Delta L4$, $\Delta L3$, $\Delta L2$ là chênh lệch chiều dài của ranh mặn 4g/l, 3 g/l và 2 g/l giữa các KB1, 2, 3 so với kịch bản nền KB0.

tích kết quả và hỗ trợ viết bản thảo.

Ngô Ngọc Hoàng Giang đóng vai trò tổng hợp dữ liệu, bản đồ, hỗ trợ phân tích kết quả và hỗ trợ viết bản thảo.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Nguyễn VH, Phan TA, Nguyễn TP. Biến đổi khí hậu và những tác động của biến đổi khí hậu đến phát triển bền vững tiểu vùng sinh thái ven biển Đồng bằng sông Cửu Long. Vietnam J Hydrometeorol. 2019;p. 11–19. Available from: <http://tapchikttv.vn/article/106>.

2. Thạch KSR, Lee JY, Ha MT, Cao MT, Nayga RM, Yang JE. Effect of saline intrusion on rice production in the Mekong River Delta. Heliyon [Internet. 2023;9(10):e20367. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20367>.

3. Trần NLT, Bùi HH, Nguyễn TXH. Đánh giá tác động ngập nước và xâm nhập mặn đến hoạt động quân sự khu vực Đồng bằng sông Cửu Long và tình hình ứng phó tại các đơn vị. Tạp chí Nghiên cứu Khoa học và Công nghệ quân sự. 2022;p. 167–177.

4. Cục quản lý đề điều và phòng chống thiên tai. Báo cáo tổng hợp tình hình hạn hán, xâm nhập mặn khu vực miền nam 2019 - 2020 (cập nhật đến ngày 02/03/2020) . 2020;Available from: <https://phongchongthientai.mard.gov.vn/Pages/bao-cao-tong-hop-tinh-hinh-han-han-xam-nhap-man-khu-vuc-mien-nam-2019--2020.aspx>.

5. Đặng HL, Đ Nguyễn P, Nguyễn VS. Xây dựng Phương án dự báo xâm nhập mặn trên các sông chính của tỉnh Bến Tre. Vietnam J Hydrometeorol. 2023;3(747):37–53.

6. Vũ TTL, Hoàng TS, Nguyễn BT, Đ T Nguyễn. Phát triển mô hình Delta cảnh báo xâm nhập mặn các sông vùng hạ lưu lưu vực Vu Gia-Thu Bồn. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam (Bản B). 2019;61(6).

7. Vu MT, Luu C, Bui DQ, Vu QH, Pham MQ. Simulation of hydrodynamic changes and salinity intrusion in the lower Vietnamese Mekong Delta under climate change-induced sea level rise and upstream river discharge. Reg Stud Mar Sci . 2024;78(July):103749. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103749>.

8. Anh DT, Hoang LP, Bui MD, Rutschmann P. Simulating future flows and salinity intrusion using combined one- and two-dimensional hydrodynamic modelling-the case of Hau River, Vietnamese Mekong Delta. Water (Switzerland). 2018;10(7).

9. Eslami S, Hoekstra P, Kernkamp HWJ, Trung NN, Duc DD, Nghia HN, et al. Dynamics of salt intrusion in the Mekong Delta: Results of field observations and integrated coastal-inland modelling. Earth Surf Dyn. 2021;9(4):953–76.

10. Kopmann R, Obreque JP. Simulation of embayment lab experiments with TELEMAT-2D/GAIA. 2020 Telemac-Mascaret. Telemac-Mascaret. 2021;p. 58.

11. Le NA, Tran DD, Thong N, Van CT, Vinh DH, Au NH, et al. Drastic variations in estuarine morphodynamics in Southern Vietnam: Investigating riverbed sand mining impact through hydrodynamic modelling and field controls. J Hydrol. 2022;608(February):127572. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127572>.

12. Binh DV, Kantoush SA, Sumi T, Mai NP, Ngoc TA, Trung LV, et al. Effects of riverbed incision on the hydrology of the Vietnamese Mekong Delta. Hydrol Process. 2021;35(2):1–21.

13. Binh DV, Kantoush SA, Ata R, Tassi P, V NT, Lepesqueur J, et al. Hydrodynamics, sediment transport, and morphodynamics in the Vietnamese Mekong Delta: Field study and numerical modelling. Geomorphology. 2022;413.

14. Viện Môi trường và Tài nguyên. Nghiên cứu sự biến đổi môi trường sinh thái vùng hạ lưu sông Mekong thuộc lãnh thổ Việt Nam và đánh giá tác hại của các hoạt động kinh tế không được kiểm soát tại vùng thượng lưu sông Mekong. 2021;.

15. Lang P, Desombre J, Riadh A, Goeury C, Hervouet JM. TELEMAT-2D Software, user manual V7p0. 2014;7(December):134.

16. Ho VH, Chau NXQ, Ngo NHG, Tran DD. An initial assessment of mobile dam efficiency in raising low-flow water levels in the Vietnamese Mekong Delta. IOP Conf Ser Earth Environ Sci. 2024;1345(1).

17. Nguyen VD, Merz B, Bárdossy A, Tang DT, Apel H. Multi-objective automatic calibration of hydrodynamic models utilizing inundation maps and gauge data. Hydrol Earth Syst Sci. 2011;15(4):1339–54.

18. Moriasi DN, Arnold JG, Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL. Model evaluation guidelines for systematic quantifica-

- tion of accuracy in watershed simulations. Trans ASABE. 2007;50(3):885–900.
19. Apel H, Triet NVK, Dung NV, Toan TQ. Chapter 14 - Saltwater intrusion in the Mekong Delta: Causes, future prospects and recommendations. Ecohydrology from Catchment to Coast. 2024;p. 453–78.
 20. Pham HTV, Ho VH, Tran DD, Pham DT, Huynh ND, Chau NXQ. Impacts of Water Resources Variation on Winter-Spring Rice Yield in the Upper Vietnamese Mekong Delta: A Case Study of An Giang Province. Irrig Drain. 2023;Proofing(IRD-23-0070.R3):1–28.
 21. Viện Khoa học Thủy lợi Miền Nam. Báo cáo dự án: Điều tra dự báo giám sát xâm nhập mặn vùng Đồng bằng sông Cửu Long phục vụ chỉ đạo điều hành sản xuất nông nghiệp nhiều năm 2005-đến nay. TP. Hồ Chí Minh: SIWRR;.

Evaluating the potential of TELEMAC2D for modeling salinity propagation in the Vietnamese Mekong Delta

Chau Nguyen Xuan Quang*, Ho Van Hoa, Ngo Ngoc Hoang Giang



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

ABSTRACT

Numerical models are essential tools for providing quantitative information to support decision-making in the risk management of salinity intrusion (SI) in coastal areas. The object of this study is to evaluate the applicability of the open-source TELEMAC2D model in simulating salinity propagation in the Vietnamese Mekong Delta (VMD). The simulated results of discharge and water level at the Can Tho and My Thuan stations are of high reliability, with NSE coefficients ≥ 0.78 , $r^2 \geq 0.85$, and PBIAS ranging from -16% to 6.0%. SI modeling at the Cau Quan, Tra Vinh, and Hoa Binh stations also yielded NSE coefficients > 0.5 (except during the calibration period, where NSE values were 0.4 and 0.46 at the Cau Quan and Tra Vinh stations, respectively), $r^2 \geq 0.71$, and PBIAS values ranging from -2.53% to 4.96%. The simulated salinity ring (4 g/l) in 2016 and 2020 showed a relatively small discrepancy of 0.9 to 2.9 km compared to observed data. Furthermore, simulated results indicated that the SI dynamics under different scenarios align well with the impacts of upstream flow and downstream coastal water levels on SI progression in the VMD. These findings demonstrate that the model achieves an acceptable level of reliability and has great potential for simulating flow dynamics and SI in an extensive region with complex hydrodynamic regimes like the VMD.

Key words: Vietnamese Mekong Delta, hydrodynamic simulation, salinity intrusion, TELEMAC2D

Department of Hydrology and Water Resources, Institute for Environment and Resources, Vietnam National University Ho Chi Minh City, Vietnam

Correspondence

Chau Nguyen Xuan Quang, Department of Hydrology and Water Resources, Institute for Environment and Resources, Vietnam National University Ho Chi Minh City, Vietnam

Email: cnxquang@hcmier.edu.vn

History

- Received: 4-12-2024
- Revised: 2-01-2025
- Accepted: 11-3-2025
- Published Online: 16-06-2026

DOI : <https://doi.org/10.32508/vnuhcmj-ees.v10i1.797>



Copyright

© VNUHCM Journal. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International license.

Cite this article : Quang C N X, Hoa H V, Giang N N H. **Evaluating the potential of TELEMAC2D for modeling salinity propagation in the Vietnamese Mekong Delta.** *VNUHCM J. Environ. Earth Sci.* 2026; 10(1):1204-1213.