

Bài báo khoa học

Mô phỏng và đánh giá mức độ xâm nhập mặn trên hệ thống sông tỉnh Tiền Giang trong bối cảnh biến đổi khí hậu - nước biển dâng

Nguyễn Hữu Tuấn¹, Nguyễn Trọng Khanh¹, Cấn Thu Văn^{1*}

¹ Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường TP. Hồ Chí Minh; nhtuan@hcmunre.edu.vn; ntkhanh@hcmunre.edu.vn; ctvan@hcmunre.edu.vn

*Tác giả liên hệ: ctvan@hcmunre.edu.vn; Tel.: +84-983738347

Ban Biên tập nhận bài: 5/8/2023; Ngày phản biện xong: 9/10/2023; Ngày đăng bài: 25/11/2023

Tóm tắt: Tiền Giang là tỉnh thuộc vùng đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL), là hạ nguồn sông Mê Công có 2 cửa sông chảy ra biển nên thường xuyên chịu tác động nặng từ hiện tượng xâm nhập mặn (XMN). Bài báo áp dụng mô hình Mike 11-AD kết hợp công cụ GIS trong việc mô phỏng mức độ XNM trên hệ thống sông tỉnh Tiền Giang theo các kịch bản biến đổi khí hậu – nước biển dâng (BĐKH-NBD). Kết quả mô phỏng độ mặn theo các kịch bản cho thấy diễn biến mặn trên các sông trong tương lai có xu hướng xâm nhập sâu vào nội đồng. Dưới tác động của BĐKH - NBD, mặn có xu thế ăn sâu vào đất liền. Kịch bản RCP4.5, mặn 1^{0/00} có khả năng ăn sâu vào 60-80 km, mặn 2^{0/00} sắp si 55 km, mặn >4^{0/00} sắp si 25 km. Kịch bản RCP8.5, mặn 1^{0/00} có khả năng ăn sâu vào 75-85 km, mặn 2^{0/00} sắp si 60-80 km, mặn > 4^{0/00} sắp si 45-55 km.

Từ khóa: MIKE11; Xâm nhập mặn; Biến đổi khí hậu; Tỉnh Tiền Giang.

1. Giới thiệu

XNM là hiện tượng nước mặn từ biển tràn vào đất liền qua cửa sông, hệ thống sông rạch, kênh mương và gây nhiễm mặn nguồn nước và đất đai chuyển tiếp giữa sông và biển, cũng là một loại hình thiên tai đáng quan tâm tại nước ta. Tỉnh Tiền Giang có vị trí địa lý thuộc vùng ĐBSCL, tiếp giáp biển Đông với chiều dài 40,2 km. Tỉnh Tiền Giang đã trải qua nhiều ảnh hưởng nghiêm trọng trong cấp nước sinh hoạt, nông nghiệp là vào mùa khô, lượng nước từ thượng nguồn đổ về suy giảm lớn cùng với dưới ảnh hưởng của hướng gió mạnh đẩy nước biển lấn sâu vào nội đồng như năm 2011, 2016, 2017, 2020,....

Vào những thập niên 70, bắt đầu xuất hiện phương trình 3D diễn toán quá trình XNM [1-2]. Tuy nhiên, yêu cầu về số liệu và tính toán là vô cùng lớn, công tác kiểm tra đánh giá cũng gặp khó khăn khi yêu cầu về dữ liệu rất nhiều. Với thực trạng đây, [3] đã đơn giản hoá bằng cách kết hợp giữa 1D - đáp ứng các yêu cầu về bài toán trong thực tế - và 2D.

Tại Việt Nam, [4] thực hiện dự án xác định ranh mặn theo phương pháp thống kê dữ liệu tại 9 vùng cửa sông ĐBSCL. Với sự phát triển khoa học công nghệ, Bộ Tài nguyên và môi trường, Viện Khí tượng Thủy văn và BĐKH [5] đã xây dựng được kịch bản BĐKH đến năm 2050 dưới tác động nhiều yếu tố đồng thời đưa ra các giải pháp thích ứng với BĐKH và NBD. Ngoài ra, những năm gần đây nhiều dự án, công trình đã phân tích được các yếu tố chính dẫn đến XMN tại vùng ĐBSCL, đồng thời dự báo XNM tại nhiều vị trí trên sông chính theo từng thời kỳ [6-11].

Từ những kết quả nghiên cứu đạt được của các nhà khoa học, [12] đã đánh giá thực trạng XMN tỉnh Bến Tre vào các năm 2010 và 2016 và mô phỏng diễn biến mặn lớn nhất theo kịch bản BĐKH đến năm 2050. Đặng Hoàng Lam và nhóm nghiên cứu đã xây dựng phương án

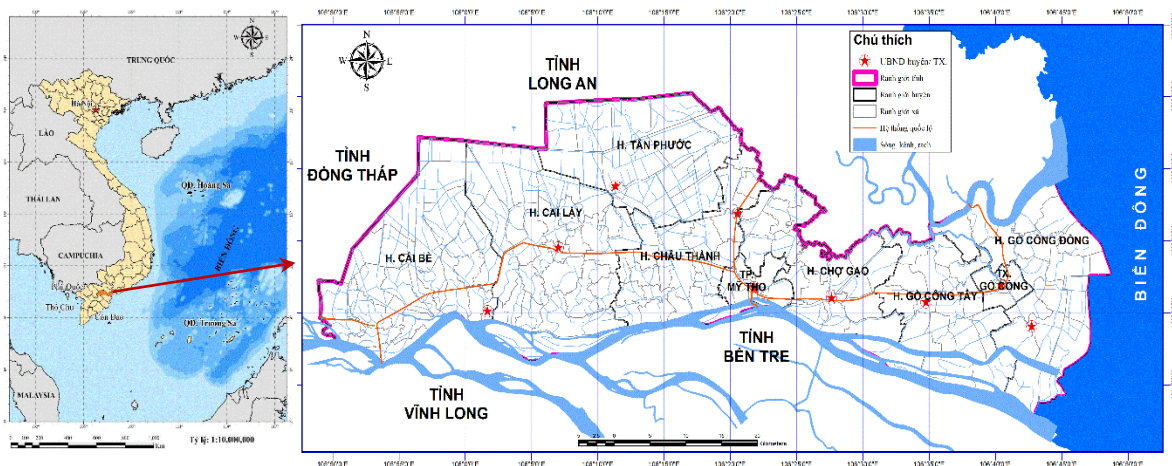
dự báo XNM áp dụng tại Đài khí tượng thủy văn tỉnh Bến Tre góp phần hoàn thiện bản tin dự báo XNM thời hạn 10 ngày và thời hạn tháng [13].

Nghiên cứu này đánh giá mức độ xâm nhập mặn tỉnh Tiền Giang được giới hạn trên từ đoạn sông Cầu Mỹ Thuận đến giới hạn dưới cửa ra là cửa Tiểu trên địa bàn tỉnh Tiền Giang, áp dụng số liệu mặn năm 2016, năm 2020 mô phỏng XNM với kịch bản ĐKH RCP4.5, RCP8.5 đến năm 2030.

2. Số liệu sử dụng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Khu vực nghiên cứu

Tỉnh Tiền Giang trải dài từ 105049'07" đến 106048'06" kinh độ Đông và ở bờ phải sông Tiền với chiều dài trên 120 km, Tiền Giang có diện tích tự nhiên là 2.556,4 km², chiếm khoảng 6% diện tích tự nhiên vùng ĐBSCL [14]. Địa hình tương đối bằng phẳng với độ dốc nhỏ hơn 1% và cao trình mặt đất dao động từ 0,30-1,60 m so với mốc Hòn Dấu. Nhiệt độ trung bình tháng tại trạm Mỹ Tho giai đoạn 1980-2020 dao động từ 24,8-28,6°C, tháng IV là nóng nhất. Ngược lại, tổng lượng bốc hơi lại có sự khác biệt rõ rệt giữa các tháng trong năm. Tổng lượng mưa bình quân năm của tỉnh đạt từ 1.295,3-1.525,6 mm, lượng mưa tập trung từ tháng V-XI và cao nhất tại tháng VIII-X với lượng mưa trung bình khoảng 150,1-297,2 mm. Trong năm, triều cao nhất thường xuất hiện vào tháng XII-I năm sau, mực nước đỉnh triều trung bình khoảng +1,3 m đến +1,4 m. Mưa phân bố không đều theo không gian kết hợp với thời đoạn mưa góp phần tạo nên hiện tượng XNM nghiêm trọng trên địa bàn tỉnh [15].



Hình 1. Bản đồ hành chính tỉnh Tiền Giang.

Tại trạm Vàm Kênh, trước năm 2010 độ mặn quanh năm lớn hơn 4 g/l, tháng IX và X độ mặn dao động từ 2,5-4,0 g/l, cao nhất dao động từ 20-25 g/l xuất hiện vào tháng IV hằng năm. Tuy nhiên từ 2014 đến 2020, độ mặn có xu hướng gia tăng, đặc biệt là mùa khô, độ mặn trung bình dao động từ 10-20 g/l.

2.2. Giới thiệu về mô hình MIKE 11

Với trình độ phát triển như hiện nay, XNM được nghiên cứu và đánh giá mức độ xâm nhập qua nhiều loại mô hình, trong nghiên cứu này, kết quả tính toán mô phỏng được áp dụng bằng mô hình MIKE 11 (HD, AD) - được nghiên cứu và phát triển bởi Viện thủy lực Đan Mạch - phương trình Saint Venant 1D được sử dụng trong mô hình này [21-22].

Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

Phương trình động lượng:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{gQ|Q|}{C^2AR} = 0 \tag{2}$$

Phương trình truyền tải - khuếch tán:

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial QC}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -AKC + C_2q \tag{3}$$

Trong đó Q là lưu lượng (m³/s); A là diện tích mặt cắt (m²); q là lưu lượng nhập lưu trên một đơn vị chiều dài dọc sông (m²/s); C là hệ số Chezy; α là hệ số sửa chữa động lượng; R là bán kính thủy lực (m); C là nồng độ (kg/m³); D là hệ số khuếch tán. Để đánh giá chất lượng so sánh kết quả hiệu chỉnh mô hình, nghiên cứu đã sử dụng 03 chỉ số NSE, RSR và PBIAS để đánh giá chất lượng tính toán và thực đo [23–26], được tính toán theo các công thức (4).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{iTD} - X_{iTT})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{iTD} - \bar{X}_{iTD})^2}$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (X_{iTD} - X_{iTT}) \times 100}{\sum_{i=1}^n X_{iTD}} \tag{4}$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{iTD} - X_{iTT})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{iTD} - \bar{X}_{iTD})^2}}$$

Trong đó XTD là giá trị thực đo; \bar{X}_{iTD} là giá trị trung bình thực đo, XTT là giá trị tính toán, n là số lượng giá trị thực đo.

Bảng 1. Tiêu chí đánh giá chất lượng các chỉ số.

Xếp loại	NSE	RSR	PBIAS (%)
Rất tốt	0,75 < NSE ≤ 1	0 ≤ RSR ≤ 0,5	PBIAS < ±10
Tốt	0,65 < NSE ≤ 0,75	0,5 ≤ RSR ≤ 0,6	±10 ≤ PBIAS < ±15
Đạt yêu cầu	0,5 < NSE ≤ 0,65	0,6 ≤ RSR ≤ 0,7	±15 ≤ PBIAS < ±25
Không đạt	NSE ≤ 0,5	RSR > 0,7	PBIAS ≥ ±25

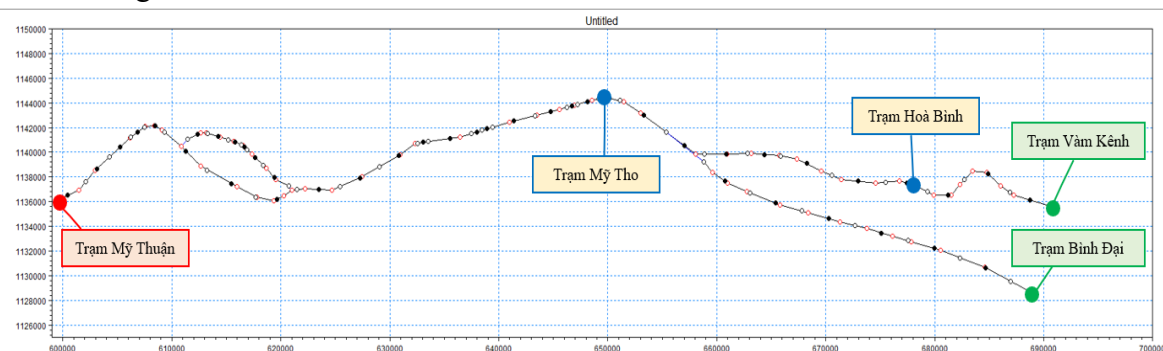
2.3. Số liệu sử dụng

Số liệu dùng để phục vụ nghiên cứu tính toán mô phỏng thủy lực (MIKE 11HD) là số liệu thời đoạn giờ như sau:

- Biên lưu lượng nước: Trạm Mỹ Thuận.
- Biên dưới mực nước: Trạm Vàm Kênh và trạm Bình Đại.
- Hiệu chỉnh và kiểm định thủy lực: Trạm Mỹ Tho và Hoà Bình.
- Thời gian hiệu chỉnh từ 01/I/2016 đến 31/XII/2016.
- Thời gian kiểm định từ 01/I/2020 đến 31/XII/2020.

Số liệu dùng để phục vụ nghiên cứu tính toán lan truyền mặn (MIKE 11AD) là số liệu thời đoạn giờ như sau:

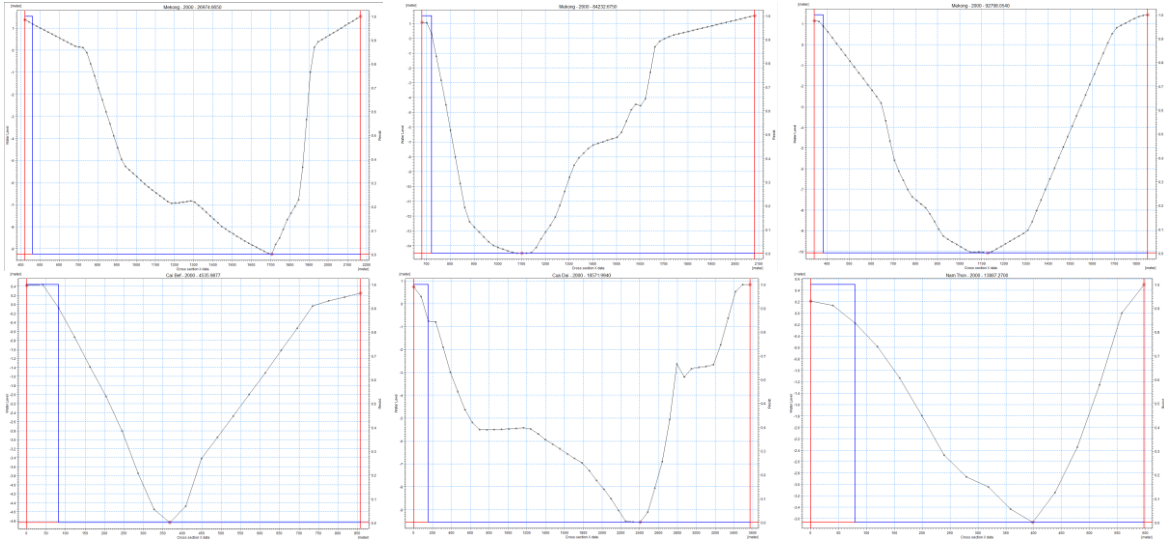
- Biên mặn tại trạm Vàm Kênh, Bình Đại.
- Hiệu chỉnh, kiểm định tại trạm Mỹ Tho và Hoà Bình.
- Thời gian hiệu chỉnh từ 01/I/2016 đến 30/VI/2016.
- Thời gian kiểm định từ 01/I/2020 đến 30/VI/2020.



Hình 2. Sơ đồ khối nghiên cứu lan truyền mặn.

2.4. Thiết lập mô hình

Hệ thống mạng lưới thủy lực của mô hình được thiết lập trong mô hình MIKE 11 với 01 biên lưu lượng phía thượng lưu - trạm Mỹ Thuận và 02 biên mực nước tại phía hạ lưu tại trạm Vàm Kênh và Bình Đại. Để phục vụ tính toán mô phỏng, nghiên cứu này đã sử dụng 142 mặt cắt đại hình trên sông Tiền Giang, sông Cửa Tiểu, sông Cửa Đại để thiết lập sơ đồ thủy lực trong mô hình MIKE 11 [27] (Hình 3).



Hình 3. Một số mặt cắt trong mô hình MIKE 11.

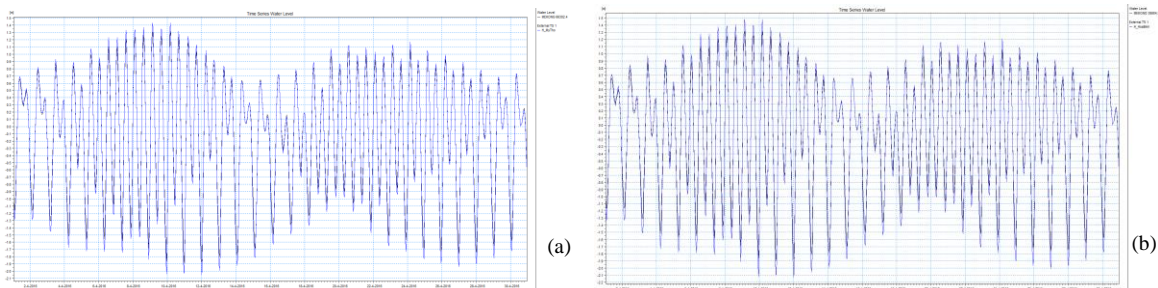
2.5. Kịch bản biến đổi khí hậu

Nghiên cứu áp dụng kịch bản BĐKH RCP4.5 và RCP8.5 với thay đổi của yếu tố NBD đối với khu vực nghiên cứu theo kịch bản BĐKH năm 2020 của Bộ Tài nguyên và Môi trường đã đưa ra cái nhìn tương tận về sự thay đổi trong thế kỷ XXI tại Việt Nam. Tiền Giang nằm trong khu vực Mũi Kê Gà - Mũi Cà Mau, giá trị nước biển dâng theo kịch bản RCP4.5 vào năm 2030 là 7-17 cm và giá trị mực nước biển dâng được chọn dùng để mô phỏng là 12 cm. Giá trị nước biển dâng theo Kịch bản RCP8.5 năm 2030 là 10-18 cm và giá trị mực nước biển dâng được chọn dùng để mô phỏng là 14 cm [28].

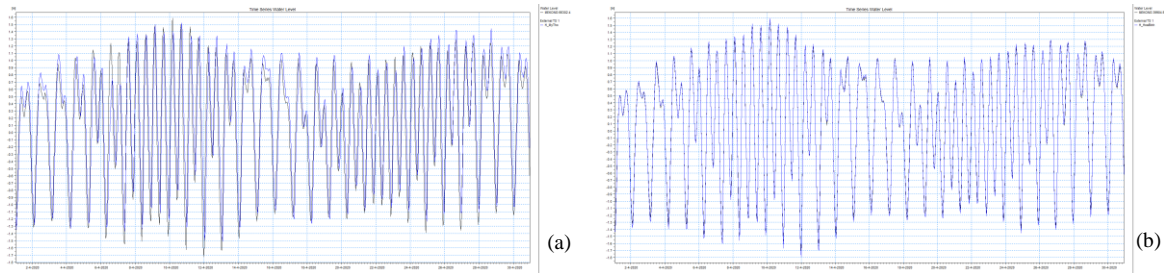
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình thủy lực

Quá trình hiệu chỉnh và kiểm định mô hình thủy lực sử dụng chuỗi số liệu thực đo trong thời gian năm 2016 và 2020 tại hai trạm Hoà Bình và Mỹ Tho để so sánh giữa số liệu thực đo và tính toán, mô phỏng từ mô hình. Kết quả đánh giá vào tháng IV năm 2016 và năm 2020 chỉ số Nash dao động từ 0,89-0,94 và hệ số tương quan R^2 dao động từ 0,90-0,97 đạt kết quả tốt. Kết quả mô hình cho thấy bộ thông số có thể áp dụng cho quá trình tính toán XNM.



Hình 4. Kết quả hiệu chỉnh H tính toán và thực đo tháng IV/2016 tại trạm (a) Mỹ Tho, (b) Hoà Bình.



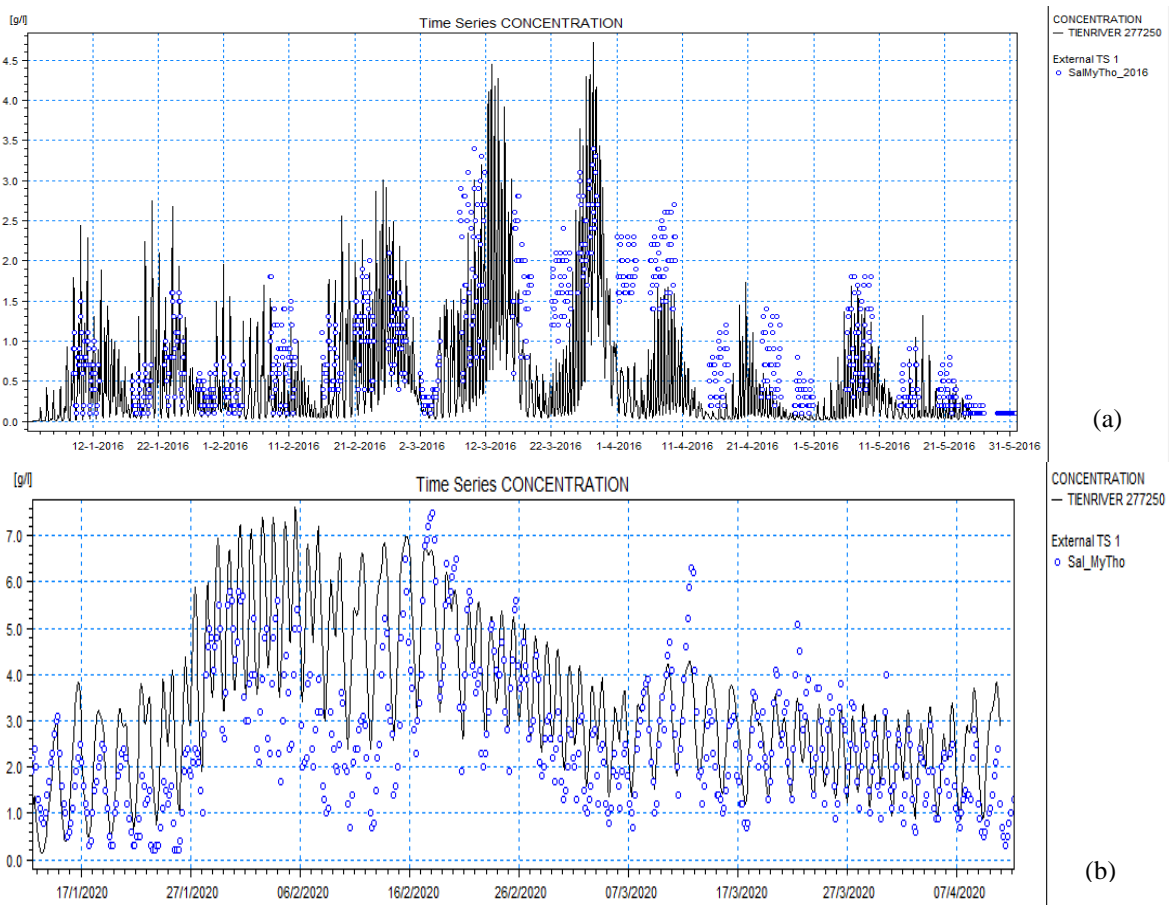
Hình 5. Kết quả kiểm định H tính toán và thực đo tháng IV/2016 tại trạm (a) Mỹ Tho, (b) Hoà Bình.

Bảng 2. Kết quả đánh giá sai số hiệu chỉnh và kiểm định mô hình thủy lực.

Quá trình	Năm	Chỉ tiêu	Hoà Bình	Mỹ Tho	Đánh giá
Hiệu chỉnh	IV/2016	Nash	0,90	0,95	Rất tốt
		R ²	0,92	0,97	Rất tốt
Kiểm định	IV/2020	Nash	0,89	0,94	Rất tốt
		R ²	0,90	0,96	Rất tốt

3.2. Hiệu chỉnh và kiểm định mô hình truyền tải - khuếch tán

Sau khi hiệu chỉnh và kiểm định mô hình thủy lực, bộ thông số tìm được tiếp tục sử dụng để mô phỏng tính toán quá trình truyền tải khuếch tán trong sông. Nghiên cứu sử dụng số liệu quan trắc mặn thời kỳ mùa kiệt trong hai năm 2016 và 2020 để phục vụ cho quá trình hiệu chỉnh và kiểm định mô hình. Kết quả hiệu chỉnh và kiểm định giữa số liệu tính toán và thực đo độ mặn lớn nhất tại trạm Mỹ Tho. Kết quả đánh giá hiệu chỉnh và kiểm định đạt kết quả tốt, vậy nên, bộ thông số HD và AD được sử dụng để mô phỏng cho các kịch bản BĐKH RCP4.5 và RCP8.5.



Hình 6. Kết quả (a) hiệu chỉnh, (b) kiểm định độ mặn tính toán và thực đo tại trạm Mỹ Tho thời kỳ mùa kiệt năm 2016 và 2020.

Bảng 3. Kết quả đánh giá sai số hiệu chỉnh và kiểm định mô hình truyền tải khuếch tán.

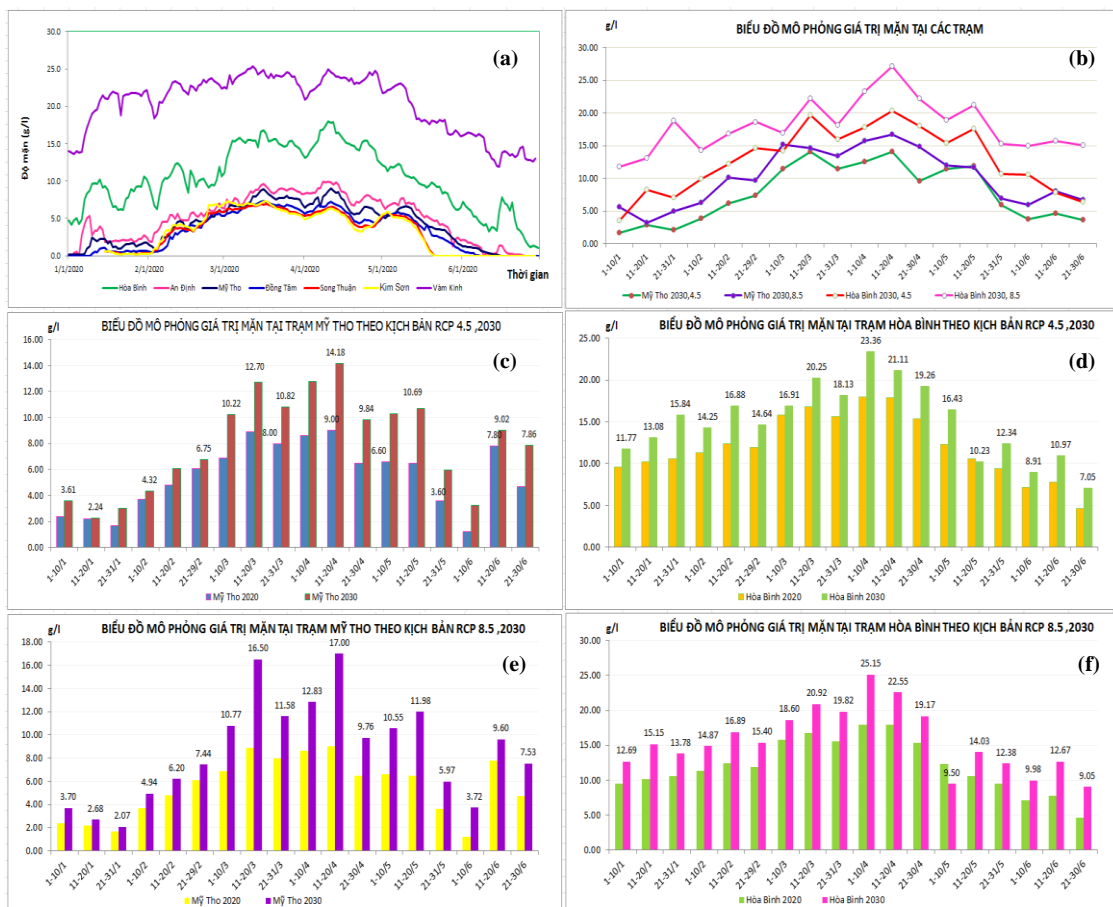
Quá trình	Năm	Chỉ tiêu	Mỹ Tho	Đánh giá
Hiệu chỉnh	I-VI/2016	Nash	0,67	Tốt
		RSR	0,55	Tốt
		PBIAS	12,3	Tốt
Kiểm định	I-VI/2020	Nash	0,72	Tốt
		RSR	0,58	Tốt
		PBIAS	13,7	Tốt

3.3. Kết quả mô phỏng XNM theo kịch bản BĐKH

Kết quả mô phỏng được trình bày chi tiết ở bảng 4, hình 7-8.

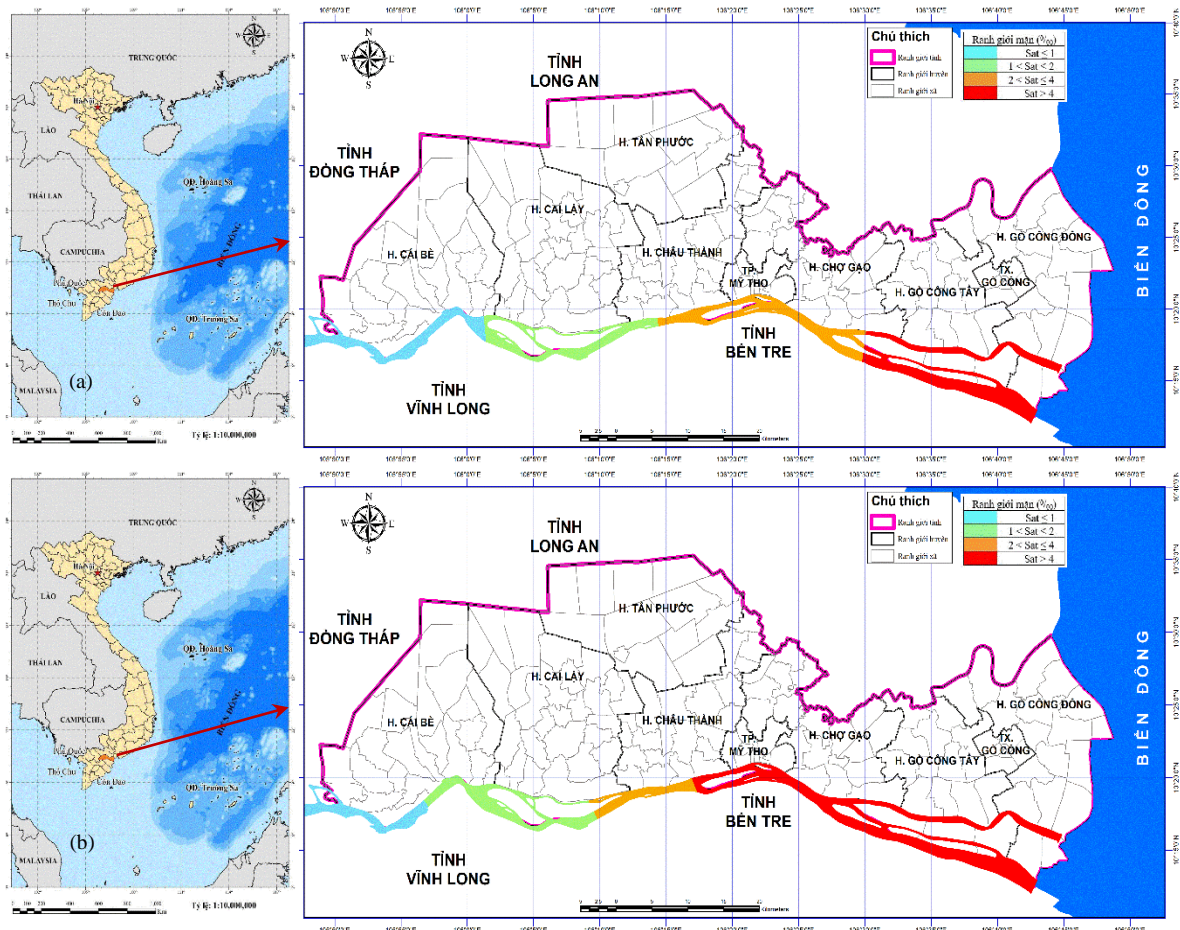
Bảng 4. Kết quả mô phỏng vị trí các ranh mặn theo kịch bản RCP4.5 và RCP8.5 năm 2030.

Kịch bản	Độ mặn	Khoảng cách	Địa danh bị ảnh hưởng (huyện, xã)
RCP4.5	1 ⁰ /00	60-80 km	Xã Song Thuận, Long Hưng, Vĩnh Kim, Bình Trưng, Bàn Long - huyện Châu Thành.
	2 ⁰ /00	55 km	Xã Ngũ Hiệp, Tân Phong - huyện Cai Lậy
	> 4 ⁰ /00	25 km	Xã Bình Đức - huyện Châu Thành
RCP8.5	1 ⁰ /00	78-80 km	Xã Tam Bình, Mỹ Long, Long Tiên, Bình Phú – huyện Cai Lậy
	2 ⁰ /00	60-68 km	Xã Song Thuận, Long Hưng, Vĩnh Kim, Bình Trưng, Bàn Long, Kim Sơn, Phú Phong - huyện Châu Thành. Xã Ngũ Hiệp, Tân Phong - huyện Cai Lậy.
	> 4 ⁰ /00	45-55 km	Xã Xuân Đông, Hoà Định, Bình Ninh - huyện Chợ Gạo. Xã Thới Sơn, xã Tây Mỹ Chánh, P. Tân Long, P1, P9 - TP. Mỹ Tho



Hình 7. Kết quả (a) Đường quá trình diễn biến mặn năm 2020 tại các trạm; (b) Phân bố nồng độ mặn lớn nhất tại trạm Mỹ Tho và Hoà Bình theo kịch bản BĐKH RCP 4.5 và RCP 8.5; (c), (d), (e) và (f) Biểu đồ so sánh mặn thực đo và tính toán trạm Mỹ Tho và trạm Hoà Bình năm 2030 theo kịch bản BĐKH RCP4.5 và RCP8.5.

Kết quả mô phỏng các kịch bản BĐKH và NBD đến năm 2030 cho thấy khả năng mặn theo dòng chảy mực nước biển tăng cao vào sâu trong đất liền qua các năm hoàn toàn có thể xảy ra với cường độ lớn. Độ mặn ảnh hưởng đến khu vực nghiên cứu không chỉ thay đổi theo thời gian mà theo không gian. Nghiên cứu tiến hành nghiên cứu đánh giá mức độ XNM vào nội đồng tại các khoảng: $< 1^0/00$, $1^0/00 - 2^0/00$, $2^0/00 - 4^0/00$ và $> 4^0/00$, kết quả cho ta thấy rằng trong điều kiện biến đổi khí hậu hiện nay và cả trong tương lai, mặn có thể xuất hiện sớm, lấn sâu và lan rộng là điều khó dự đoán trước được. Mức độ chỉ số mặn trên $4^0/00$ đã lấn sâu vào toàn bộ khu vực tỉnh Tiền Giang và có thể gây những thiệt hại to lớn đối với người dân trên địa bàn tỉnh.



Hình 8. Bản đồ ranh mặn lớn nhất theo kịch bản BĐKH (a) RCP4.5, (b) RCP8.5 đến năm 2030.

- Độ mặn $> 4^0/00$, chiều sâu mặn xâm nhập có sự khác biệt rõ rệt giữa 2 kịch bản, RCP4.5 khoảng 25km ảnh hưởng tới 1 phần huyện Chợ Gạo, RCP8.5 khoảng 45-55 km ảnh hưởng tới 1 phần huyện Châu Thành dọc sông Tiền.

- Độ mặn $2^0/00 - 4^0/00$, KB RCP4.5 khoảng 30 km ảnh hưởng từ huyện Chợ Gạo đến huyện Châu Thành, RCP8.5 khoảng 13-15km ảnh hưởng từ huyện Châu Thành đến 1 phần huyện Cai Lậy.

- Độ mặn $1^0/00 - 2^0/00$, KB RCP4.5 khoảng 5-25 km ảnh hưởng từ huyện Châu Thành đến huyện huyện Cai Lậy, RCP8.5 khoảng 12 km ảnh hưởng từ huyện Cai Lậy đến 1 phần huyện Cái Bè.

Qua các kết quả đánh giá và mô phỏng mặn trên hệ thống sông tỉnh Tiền Giang, nhận thấy rằng hiện tượng XNM sẽ diễn ra ngày càng phức tạp và tiến sâu hơn vào nội đồng. Ảnh hưởng nghiêm trọng đến nguồn nước cấp cho nhà máy nước Bình Đức và Đồng Tâm, dẫn đến tình trạng thiếu nguồn nước cấp cho sinh hoạt của các hộ dân thuộc các huyện Châu Thành, TP. Mỹ Tho và các huyện giáp biển Đông.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã ứng dụng mô hình toán MIKE11 1D trong việc mô phỏng, tính toán và đánh giá mức độ XNM trên hệ thống sông tỉnh Tiền Giang. Kết quả hiệu chỉnh và kiểm nghiệm mô hình HD và AD đều đạt kết quả tốt, cho thấy rằng bộ thông số có thể dùng để mô phỏng các kịch bản bất thường có thể xảy ra trong tương lai. Bên cạnh đó, nghiên cứu cũng đã áp dụng công cụ viễn thám thành lập bản đồ ranh mặn 1^{0/00}, 2^{0/00}, và 4^{0/00} theo các kịch bản BĐKH. Nghiên cứu chỉ mới dừng lại ở việc mô phỏng, tính toán trên dòng sông chính sông Tiền tại tỉnh Tiền Giang, mà chưa xem xét đến sự suy giảm lưu lượng nước từ thượng lưu, sự nhập lưu khu giữa và cũng như ảnh hưởng của các công trình/ dự án tại tỉnh. Vì vậy, việc đưa các điều kiện vào mô hình sẽ giúp kết quả tính toán, mô phỏng đạt chất lượng cao.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: C.T.V.; Xử lý số liệu: N.H.T., N.T.K.; Viết bản thảo bài báo: N.H.T.; Chỉnh sửa bài báo: C.T.V.

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

1. Harleman, D.R.F. One dimensions estuarine modeling an assessment, Tracor, Inc, Project 16070DVZ, Water Quality Office, U.S Environmental Protection Agency, Stock No. 5501-0129, U.S Government Printing, Office, Washington, DC, 1971.
2. Prichard, D. The dynamic structure of a coastal plain estuary. *J. Mar. Res.* **1971**, 15, 33–42.
3. Leendertee. Aspect of a computational model for long period water wave propagation, RM - RC-5294, Rand Corp, Santa Monica, California. 1971.
4. Khuê, N.N. Modelling of tidal propagation and salinity intrusion in the Mekong main estuarine system. Technical paper, Mekong Secretariat, 1986.
5. Viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Môi trường. Dự án “Đánh giá tác động của BĐKH lên tài nguyên nước và các biện pháp thích ứng”, 2010.
6. Trung tâm Thâm định-Tư vấn Tài nguyên nước, Cục Quản lý Tài nguyên nước. Đề tài cấp nhà nước “Nghiên cứu cơ sở khoa học xác định nguyên nhân, đề xuất giải pháp ứng phó với xâm nhập mặn trong điều kiện Biến đổi khí hậu ở vùng đồng bằng sông Cửu Long”, 2012-2013.
7. Khuê, N.N. Nghiên cứu về đặc điểm xâm nhập mặn của ĐBSCL. Viện Khoa học Thủy lợi Miền Nam, 1994.
8. Niên, N.A.; Lân, N.V. Nghiên cứu xâm nhập mặn ở Việt Nam. Viện Khoa học Thủy lợi Miền Nam, 1999.
9. Sâm, L. Dự án Khảo sát điều tra chua mặn ĐBSCL, Viện Khoa học Thủy lợi miền Nam, Bộ NN&PTNT, 1993-2000.
10. Viện Khoa học Thủy lợi Miền Nam. Đề tài độc lập cấp nhà nước KC08-18 Nghiên cứu xâm nhập mặn phục vụ phát triển kinh tế-xã hội vùng ven biển Đồng bằng sông Cửu Long, 2001-2004.
11. Viện Khoa học Thủy lợi Miền Nam. Đề tài độc lập cấp nhà nước Nghiên cứu đề xuất các giải pháp KHCN phục vụ xây dựng hệ thống đê biển, đê ngăn mặn cửa sông Nam Bộ, 2002.
12. Đào, N.V.; Bình, P.T.T. Đánh giá thực trạng và tác động của biến đổi khí hậu đến xâm nhập mặn tỉnh Bến Tre. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2019**, 700, 12–22.
13. Lam, Đ.H.; Định, N.P.; Sỹ, N.V. Xây dựng Phương án dự báo xâm nhập mặn trên các sông chính của tỉnh Bến Tre. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2023**, 747, 37–53. doi: 10.36335/VNJHM.2023(747).37-53.
14. Tỉnh Tiền Giang. Cổng thông tin điện tử tỉnh Tiền Giang. 2019. Trục tuyến: <http://tiengiang.gov.vn/chi-tiet-tin/?/gioi-thieu-ve-tien-giang/11243313>.

15. Tuấn, P.H.Q.; Tùng, N.B.; Trí, Q.Đ.; Anh, T.N.; Nhật, N.V. Nghiên cứu đánh giá tác động của ngập lụt tỉnh Tiền Giang. *Tap chí Khí tượng Thủy văn* 2022, 740(1), 11–23. doi:10.36335/VNJHM.2022(2022(1)).11-23.
16. Doan, Q.T.; Nguyen, C.D.; Chen, Y.C.; Pawan, K.M. Modeling the influence of river flow and salinity intrusion in the Mekong River estuary, Vietnam. *Lowland Technol. Int.* 2014, 16(1), 14–25.
17. Doan, Q.T.; Quach, T.T.T. Effect of climate change on the salinity intrusion: case study Ca river basin, Vietnam. *Int. J. Clim. Change* 2016, 2(1), 91–101.
18. Doan, Q.T.; Tran, H.T. Adaptation to Climate Change on the Saltwater Intrusion in Estuaries. LAP LAMBERT Academic Publishing, OmniScriptum GmbH & Co. KG, BahnhofstraBe 28, 66111 Saarbrücken Germany, 2017, pp. 60.
19. Luong, P.T. Luận văn cao học “Nghiên cứu ứng dụng mô hình MIKE 11 tính toán xâm nhập mặn hạ lưu sông Cà dưới tác động của biến đổi khí hậu”. 2019, tr. 94.
20. Tran, H.T.; Hoang, V.D.; Doan, Q.T. Application Couple Model in Saltwater Intrusion Forecasting in Estuary. LAP LAMBERT Academic Publishing, OmniScriptum GmbH & Co. KG, BahnhofstraBe 28, 66111 Saarbrücken Germany, 2017, pp. 124.
21. DHI. MIKE 11 Reference Manual, 2007.
22. Shooshtari, M.M. Principles of flow in open channels. Shahid Chamran University Press 2008, 15(2), 643–745.
23. Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V. River flow forecasting through conceptual models: part I - A discussion of principles. *J. Hydrol.* 1970, 10(3), 282–290.
24. Greenberg, D.A.; Blanchard, W.; Smith, B.; Barrow, E. Climate Change, Mean Sea Level and High Tides in the Bay of Fundy. *Atmosphere-Ocean* 2012, 50(3), 261–276. Doi:10.1080/07055900.2012.668670.
25. Islam, A.S.; Bala, S.K.; Haque, M.A. Flood inundation map of Bangladesh using MODIS time-series images. *J. Flood Risk Manage.* 2010, 3, 210–222.
26. McCuen, R.H.; Knight, Z.; Cutter, A.G. Evaluation of the Nash-Sutcliffe efficiency Index. *J. Hydrol. Eng.* 2006, 11, 597–602.
27. Nguyễn Thị Tuyết, 2018, Nghiên cứu đánh giá sự biến đổi dòng chảy mặt và xâm nhập mặn vùng ĐTM dưới tác động của hệ thống đê bao và đề xuất các biện pháp quản lý; Đề tài cấp Bộ Tài nguyên và Môi trường mã số TNMT.2016.05.10.
28. Kịch bản biến đổi khí hậu và nước biển dâng năm 2020. Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2020.

Modeling and Assessing the Salinity Intrusion Level in the River System of Tiền Giang Province in the Context of Climate Change and Rising Sea Levels

Nguyen Huu Tuan¹, Nguyen Trong Khanh¹, Can Thu Van^{1*}

¹ Ho Chi Minh City University of Natural Resources and Environment;
nhtuan@hcmunre.edu.vn; ntkhanh@hcmunre.edu.vn; ctvan@hcmunre.edu.vn

Abstract: Tien Giang is a province located in the Mekong Delta region, where the Mekong River originates and has two river mouths flowing into the sea, making it frequently vulnerable to the phenomenon of saltwater intrusion (SWI). This article applies the Mike 11-AD model in conjunction with GIS tools to simulate the level of SWI in the river system of Tiền Giang province under the conditions of the RCP4.5 and RCP8.5 climate change scenarios. The results of hydraulic model calibration and validation indicate a high degree of similarity in phase and amplitude of water level oscillations between calculated and measured data during the dry seasons of 2016 and 2020. The simulation results of salinity

levels under various climate change scenarios and sea-level rise (SLR) scenarios reveal a trend of increased salinity intrusion into the inland areas of the rivers. Under the influence of climate change and sea-level rise, there is a tendency for saltwater to penetrate deeper into the interior. In the RCP4.5 scenario, SWI with a salinity of $1^{0/00}$ has the potential to intrude up to 60-80 km, while $2^{0/00}$ salinity approaches approximately 55 km, and salinity levels $> 4^{0/00}$ encroach to around 25 km. In the RCP8.5 scenario, SWI with a salinity of $1^{0/00}$ is capable of advancing up to 75-85 km inland, $2^{0/00}$ salinity reaches approximately 60-80 km, and salinity levels $> 4^{0/00}$ extend to around 45-55 km.

Keywords: MIKE11; Saline Intrusion; Climate Change; Tien Giang Province.