



ASSESSING THE POTENTIAL IMPACT OF SEA LEVEL RISE DUE TO CLIMATE CHANGE ON HYDRODYNAMICS IN THE LOWER MEKONG DELTA IN THE PERIOD OF 2020-2100

Vu Minh Tuan^{1*}, Luu Thi Dieu Chinh¹, Pham Minh Quan^{1,2}

¹Hanoi University of Civil Engineering, No 55 Giai Phong Street, Hanoi, Vietnam

²Portcoast, No 92 Nam Ky Khoi Nghia Street, Ho Chi Minh, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 24/11/2023

Revised: 12/04/2024

Accepted: 28/05/2024

Published online: 15/06/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.5.9>

* *Corresponding author*

Email: tuanvm@huce.edu.vn; Tel: +84983004286

Abstract. The Vietnamese Mekong Delta (VMD) is shaped by alluvium of the Mekong River and is the largest delta in Vietnam. This area has a very complex hydrodynamic regime due to the interaction between the sea and the intricate system of estuaries, rivers and canals, especially the downstream area of the VMD (from My Thuan and Can Tho to estuaries and coastal areas). This place is considered one of the most vulnerable and most heavily affected deltas in the world due to the negative impacts of sea level rise and climate change. According to the climate change scenario announced by the Ministry of Natural Resources and Environment in 2020, nearly half of the area (47.29%) of the VMD is at risk of being flooded by 2100 if sea level rises to a maximum of over 100 cm. As a result, impacts from the sea aggravate erosion problems and changes in hydrodynamics. This paper presents the results of research on assessing and predicting changes in the hydrodynamic regime in the downstream area of the VMD due to future sea level rise using a two-dimensional numerical model of MIKE 21. Simulation results clarified that wave propagation into the Ham Luong estuary in the 2020 dry season is higher than in other estuaries. In addition, the results also proved that the future sea level could cause an increase in wave height both during high tide and low tide. Meanwhile, this phenomenon only induced an increase in current speed during high tide and a reduction in current speed during low tide.

Keywords: VMD, sea level rise, wave height, current speed, tide, estuary

@ 2024 University of Transport and Communications



ĐÁNH GIÁ TÁC ĐỘNG TIỀM ẨN CỦA NƯỚC BIỂN DÂNG DO BIẾN ĐỔI KHÍ HẬU ĐẾN CHẾ ĐỘ THỦY ĐỘNG LỰC KHU VỰC HẠ LƯU ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG TRONG GIAI ĐOẠN 2020-2100

Vũ Minh Tuấn^{1*}, Lưu Thị Diệu Chinh¹, Phạm Minh Quân^{1,2}

¹Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, Số 55 Giải Phóng, Hà Nội, Việt Nam

²Portcoast, Số 92 Nam Kỳ Khởi Nghĩa, Hồ Chí Minh, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 24/11/2023

Ngày nhận bài sửa: 12/04/2024

Ngày chấp nhận đăng: 28/05/2024

Ngày xuất bản Online: 15/06/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.5.9>

* Tác giả liên hệ

Email: tuanvm@huce.edu.vn; Tel: +84983004286

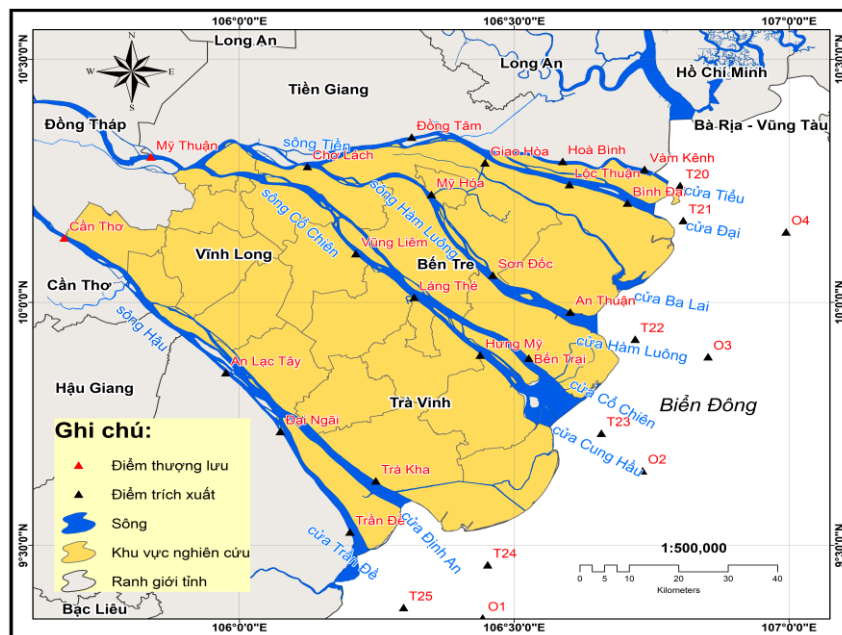
Tóm tắt. Đồng bằng sông Cửu Long được hình bởi phù sa của sông Tiền và sông Hậu và là đồng bằng lớn nhất Việt Nam. Khu vực này có chế độ thủy động lực học rất phức tạp do tương tác giữa biển với hệ thống các cửa sông, sông và kênh rạch chằng chịt, đặc biệt là khu vực hạ lưu của đồng bằng sông Cửu Long (từ Mỹ Thuận và Cần Thơ đến các cửa sông và ven biển). Nơi đây được đánh giá là một trong những đồng bằng dễ bị tổn thương nhất do các tác động tiêu cực của nước biển dâng (NBD) và biến đổi khí hậu. Theo kịch bản biến đổi khí hậu do Bộ Tài nguyên và Môi trường công bố năm 2020, khoảng gần một nửa diện tích (47,29%) đồng bằng sông Cửu Long có nguy cơ bị ngập vào năm 2100 nếu mực nước biển dâng tối đa trên 100 cm. Hệ quả là tác động từ biển làm trầm trọng thêm xói lở bờ và thay đổi chế độ thủy động lực. Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu đánh giá và dự báo sự biến động của chế độ thủy động lực khu vực hạ lưu của đồng bằng sông Cửu Long do nước biển dâng trong tương lai bằng mô hình số hai chiều MIKE 21. Kết quả mô phỏng đã làm sáng tỏ rằng sóng lan truyền vào cửa Hàm Luông trong mùa khô 2020 cao hơn so với các cửa sông khác. Ngoài ra, kết quả cũng cho thấy NBD trong tương lai sẽ gây ra sự gia tăng chiều cao sóng cả khi triều lên và triều rút. Trong khi đó, hiện tượng này chỉ làm cho vận tốc dòng chảy tăng lên khi triều rút và giảm xuống khi triều lên.

Từ khóa: đồng bằng sông Cửu Long, NBD, chiều cao sóng, vận tốc dòng chảy, thủy triều, cửa sông

@ 2024 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. MỞ ĐẦU

Đồng bằng sông Cửu Long nằm ở hạ lưu của hệ thống sông Cửu Long với tổng diện tích khoảng 40.577,6 km² [1] (Hình 1). Đây cũng là một trong những đồng bằng lớn, phì nhiêu nhất Đông Nam Á và thế giới, là trung tâm sản xuất, xuất khẩu lương thực và vùng cây ăn trái nhiệt đới lớn nhất Việt Nam [2]. Tuy nhiên, trong khoảng hai thập kỷ trở lại đây, khu vực này đang bị đe dọa nghiêm trọng bởi hiện tượng sạt lở bờ sông, bờ biển cũng như xâm nhập mặn. Theo số liệu thu thập của Hoài và các cộng sự [3], trên sông Tiền có trên 202 điểm sạt lở với tổng chiều dài 218 km và trên sông Hậu có trên 90 điểm sạt lở với tổng chiều dài 183 km. Ngoài ra, bờ biển khu vực này cũng đang phải đối mặt với hiện tượng xói lở bờ biển diễn ra trên 268/744 km đường bờ với tốc độ xói lở từ 1–40 m/năm [4]. Bên cạnh đó, đồng bằng sông Cửu Long liên tiếp hứng chịu những đợt xâm nhập mặn với các đỉnh mặn liên tục bị phá. Trong mùa khô 2015–2016, nước mặn đã xâm nhập hơn 90 km vào đất liền và gây thiệt hại mùa màng nghiêm trọng ở 11 trong số 13 tỉnh (trong đó có 09 tỉnh ven biển) [5, 6]. Sau đó, hạn và mặn trong mùa khô năm 2019-2020 đã xảy ra nghiêm trọng hơn mùa khô năm 2015-2016 với ranh mặn 4g/lít xâm nhập tới gần 60 km theo sông Hàm Luông, sâu hơn trung bình nhiều năm tới 24 km [7]. Vấn đề sẽ trở nên trầm trọng nếu hiện tượng nước biển dâng do biến đổi khí hậu toàn cầu kéo theo sự xuất hiện các cơn bão ngày càng nhiều và lớn [8].



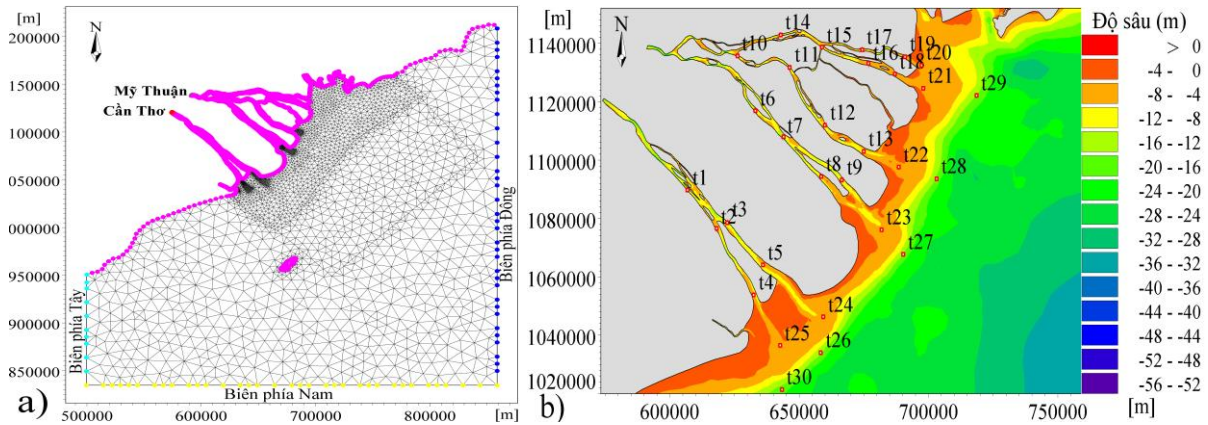
Hình 1. Bản đồ khu vực nghiên cứu và vị trí các trạm quan trắc.

Một trong những nguyên nhân chính gây ra hiện tượng xói lở bờ và xâm nhập mặn đó là do sự biến đổi của chế độ thủy động lực học của hệ thống sông Cửu Long [3]. Cho đến nay đã có rất nhiều các công trình nghiên cứu được thực hiện để tìm hiểu chế độ thủy động lực của hệ thống sông này cũng như tác động của NBD đến chế độ thủy động lực [9-12, 14, 17-18, 20]. Trong khi đó, một số học giả đã tiến hành một số nghiên cứu về xâm nhập mặn dưới tác động của biến đổi khí hậu ở đồng bằng sông Cửu Long như Trí [13], Kantoush và các cộng sự [15], Dương và các cộng sự [16], Jordan và các cộng sự [19]. Hầu hết các nghiên cứu này chỉ dừng lại ở mức độ tái mô phỏng và phân tích chế độ thủy động lực khu vực trong quá khứ hoặc có sự thay đổi lưu lượng dòng chảy ở thượng lưu. Mục đích của nghiên cứu này là làm sáng tỏ chế độ thủy động lực khu vực hạ lưu hệ thống sông Cửu Long vào mùa khô 2020 cũng như đánh giá ảnh hưởng của nước biển dâng do biến đổi khí hậu trong tương lai lên chế độ thủy động lực này.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô tả mô hình toán

Để đánh giá những tác động của nước biển dâng lên chế độ thủy động lực ở khu vực hạ lưu đồng bằng sông Cửu Long, mô hình MIKE 21 HD và mô hình MIKE 21 SW nằm trong bộ mô hình số MIKE 21 [21] được sử dụng trong nghiên cứu này. Các mô hình số sẽ được giải trên một lưới tính toán có diện tích khoảng 90.000 km². Miền tính toán này được giới hạn bởi hai biên tính phía thượng lưu của sông và ba biên tính phía biển. Biên thượng lưu sông Hậu tại Cần Thơ và cách cửa sông Định An khoảng 94 km. Biên thượng lưu sông Tiền tại Mỹ Thuận và lần lượt cách cửa sông Cổ Chiên khoảng 96 km và cửa Tiểu khoảng 105 km. Ba biên tính phía biển lần lượt ở biên phía đông, tây và nam. Lưới tính toán hỗn hợp bao gồm cả lưới cấu trúc tứ giác cho khu vực trong sông và cửa sông và lưới phi cấu trúc tam giác cho khu vực ven biển và ngoài khơi. Toàn bộ lưới này được xây dựng bởi 12.494 nút và 14.043 phần tử. Diện tích ô lưới nhỏ nhất là khoảng 10,000 m² bên trong sông và dọc theo các bãi biển, trong khi diện tích ô lưới lớn nhất là khoảng 98 km² ở khu vực ngoài khơi (Hình 2a).



Hình 2. Miền tính (a) và địa hình khu vực nghiên cứu (b).

Đối với mô hình SW, các biên phía biển sẽ sử dụng các dữ liệu điều kiện sóng từ mô hình ECMWF lan truyền vào khu vực ven bờ. Ngoài dữ liệu sóng dùng làm dữ liệu biên lan truyền cho mô hình sóng, giá trị gió biển đổi theo thời gian và không gian được thu thập từ nguồn dữ liệu ECMWF sẽ được sử dụng kết hợp với dữ liệu sóng từ ECMWF. Trong khi đó, các dữ liệu mực nước quan trắc ở các trạm ngoài khơi (S1, S2) và cửa sông sẽ được sử dụng cho các biên phía biển trong mô hình HD (Hình 2b). Đối với các biên thượng lưu, lưu lượng dòng chảy tại trạm Mỹ Thuận và trạm Cần Thơ sẽ được gán như đầu vào của mô hình thủy lực. Ngoài ra, kết quả của mô hình SW (các ứng suất bức xạ sóng) sẽ được sử dụng trong mô hình này.

2.2. Các tham số hiệu chỉnh và kiểm định mô hình

Các mô hình được hiệu chỉnh và kiểm định dựa trên các dữ liệu thực đo. Các kết quả mô phỏng được so sánh với dữ liệu thực đo và sau đó độ chính xác và khả năng của mô hình sẽ được đánh giá thông qua các sai số thống kê bao gồm hệ số xác định bội (R^2), hệ số hiệu dụng hay hiệu quả Nash-Sutcliffe (NSE), sai số tuyệt đối trung bình (MAE) và sai số bình phương trung bình gốc (RMSE).

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (OBS_i - \overline{OBS})(SIM_i - \overline{SIM}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (OBS_i - \overline{OBS})^2 \sum_{i=1}^N (SIM_i - \overline{SIM})^2} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |OBS_i - SIM_i| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i)^2} \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (OBS_i - SIM_i)^2}{\sum_{i=1}^N (OBS_i - \overline{OBS})^2} \quad (4)$$

Với OBS_i là giá trị quan sát (thực đo) thứ i trong chuỗi số liệu thống kê. SIM_i là giá trị thứ i tính theo mô hình tương đương. \overline{OBS} , \overline{SIM} lần lượt là giá trị trung bình của chuỗi giá trị thực đo và chuỗi giá trị tính theo mô hình tương đương, $i = 1, \dots, N$.

Trong mô hình số MIKE 21 HD, sức cản của đáy được xác định bằng số Manning. Nó có thể thay đổi tùy theo độ sâu của nước [22, 23]. Quá trình hiệu chỉnh mô hình số này là xác định số Manning cuối cùng trong miền tính toán dựa trên hệ số lực cản và độ sâu nước [23]. Theo cách tương tự, mô hình số MIKE 21 SW sẽ được hiệu chỉnh bằng cách điều chỉnh bằng độ dài nhám Nikuradse k_n , mà là hàm của đường trung bình của hạt bùn cát D_{50} trong miền nghiên cứu [23].

2.3. Các kịch bản nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, xâm nhập mặn mùa khô tháng 2/2020 được lựa chọn làm kịch bản nền, vì đây là năm có xâm nhập mặn cao nhất theo số liệu quan trắc lịch sử [7]. Mức nước biển ở khu vực ven biển đồng bằng sông Cửu Long được dự báo sẽ tăng từ 22 cm đến 26 cm vào những năm 2050 so với năm 2013 theo các kịch bản biến đổi khí hậu RCP4.5 và RCP8.5 [24]. Các nghiên cứu khác cho rằng mực nước biển có thể tăng 0,55 cm mỗi năm [25, 15]; do đó, hợp lý khi cho rằng mực nước biển vào năm 2050 có thể tăng khoảng 17 cm so với mực nước biển năm 2020. Bên cạnh đó, NBD trung bình được dự báo dao động từ 23 đến 28 cm vào năm 2050 và từ 53 đến 73 cm vào năm 2100 so với giai đoạn cơ sở (1986–2005) theo RCP4.5 và RCP8.5 [26]. Như vậy, dự báo vào giữa thế kỷ, NBD dao động trong khoảng 0,46–0,56 cm/năm (giai đoạn 2020–2050 là 14–17 cm). Tương tự, dự báo vào cuối thế kỷ này, mực nước biển sẽ tăng từ 0,53 đến 0,73 cm mỗi năm (giai đoạn 2020–2100 tương ứng là 42–58 cm). Trong nghiên cứu này, các kịch bản đáng tin cậy được xây dựng để đánh giá tác động của NBD trong mùa khô, bao gồm NBD lần lượt là 14 và 17 cho năm 2050 và 42 và 58 cm cho năm 2100 (Bảng 1).

Bảng 1. Các kịch bản mô phỏng NBD cho năm 2050 và 2100 so với kịch bản gốc năm 2020.

| Stt | Kịch bản mô phỏng | NBD | Thời đoạn mô phỏng | Kịch bản nồng độ khí nhà kính |
|-----|-------------------|---------|--------------------|-------------------------------|
| 1 | Kịch bản gốc | | 2/2020 | |
| 2 | Kịch bản 1 | +0,14 m | 2/2050 | RCP 4.5 |
| 3 | Kịch bản 2 | +0,17 m | 2/2050 | RCP 8.5 |
| 4 | Kịch bản 3 | +0,42 m | 2/2100 | RCP 4.5 |
| 5 | Kịch bản 4 | +0,58 m | 2/2100 | RCP 8.5 |

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả hiệu chỉnh và kiểm định mô hình

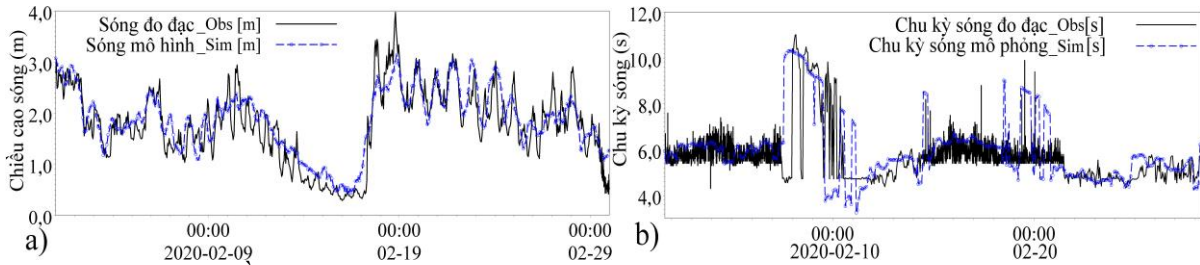
3.1.1. Kết quả hiệu chỉnh mô hình

Kết quả hiệu chỉnh của mô hình MIKE 21 SW thể hiện trong Bảng 2. Chiều cao sóng tại trạm S1 cho hệ số $NSE = 0,74$ và $R^2 = 0,77$ đều nằm trong khoảng được đánh giá tốt [27, 28, 29, 30, 31]. Trong khi đó, chu kỳ tại trạm S1 cho hệ số $NSE = 0,14$ nằm trong phạm vi từ 0 đến 1 là có thể chấp nhận được. Ngoài ra, so sánh các kết quả mô hình (SIM) và số liệu đo

đặc (OBS) được thể hiện trên Hình 3. Điều đó cho thấy kết quả chiều cao sóng của mô hình phản ánh rất sát với số liệu đo đạc. Kết quả hiệu chỉnh lựa chọn được độ dài nhám Nikurase kn cho toàn miền tính toán là 0,0002 m.

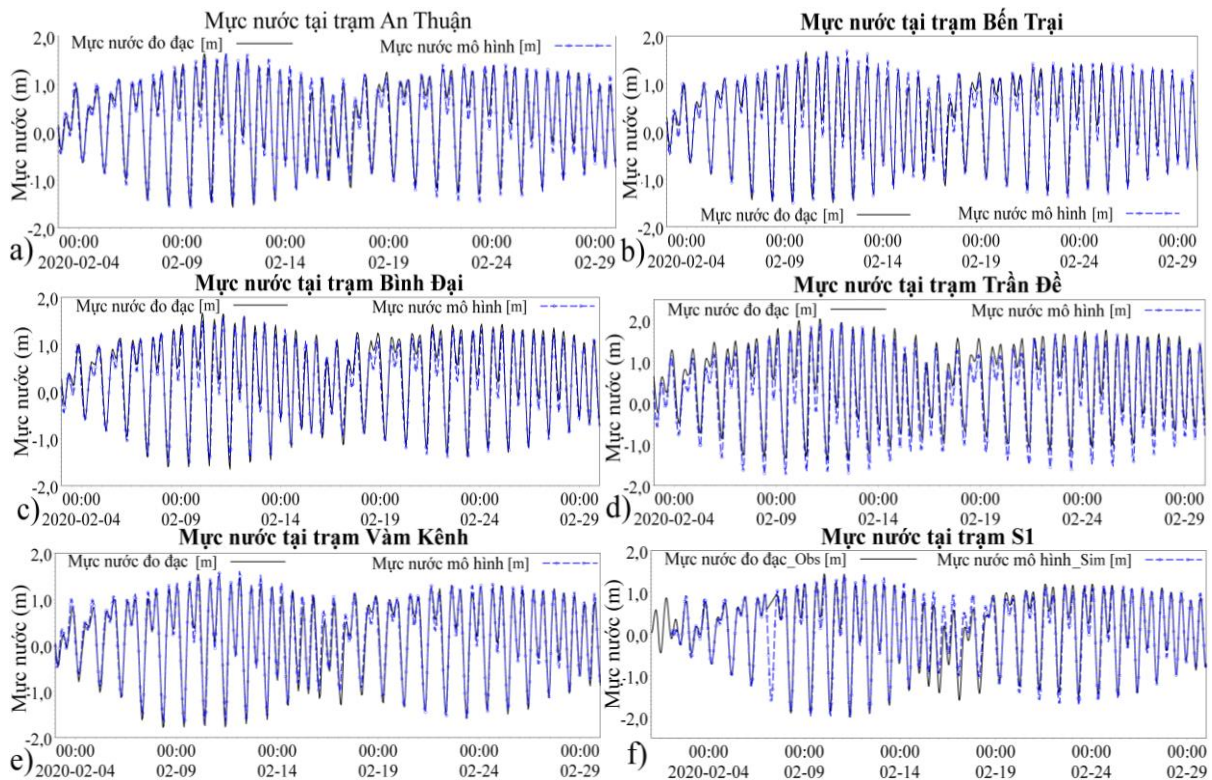
Bảng 2. Kết quả tính toán các chỉ số đánh giá mô hình MIKE 21SW.

| Tham số | R ² | RMSE | MAE | NSE |
|-----------------------------------|----------------|------|------|------|
| Chiều cao sóng H _s (m) | 0,77 | 0,37 | 0,28 | 0,74 |
| Chu kỳ sóng T _p (s) | 0,40 | 1,25 | 0,77 | 0,14 |



Hình 3. So sánh chiều cao sóng (a) và chu kỳ sóng (b) mô phỏng (SIM) và thực đo (OBS) tại trạm S1.

Mô hình thủy lực MIKE21 HD được hiệu chỉnh dựa trên cơ sở điều chỉnh số nhám Manning để đạt được sự phù hợp nhất giữa dòng chảy/mức nước tính toán và thực đo. Hình 4 thể hiện kết quả hiệu chuẩn mực nước lần lượt cho các trạm S1, An Thuận, Bến Trại, Bình Đại, Trần Đề, và Vàm Kênh. Những kết quả đó chỉ ra rằng kết quả mô phỏng có mối tương quan chặt chẽ và dự đoán tuyệt vời với dữ liệu đo đạc cả về trị số lẫn xu thế, độ lệch tuyệt đối lớn nhất là 29 cm (Bảng 3). Ngoài ra, giá trị của hệ số hiệu dụng NSE dao động trong khoảng 0,85–0,96 và chỉ số xác định bội R² đạt khoảng 0,94–0,97. Các mức giá trị này được xếp loại phù hợp xuất sắc [27-31]. Sau quá trình hiệu chỉnh, số Manning thu được dao động từ 30–53 m^{1/3}/s.

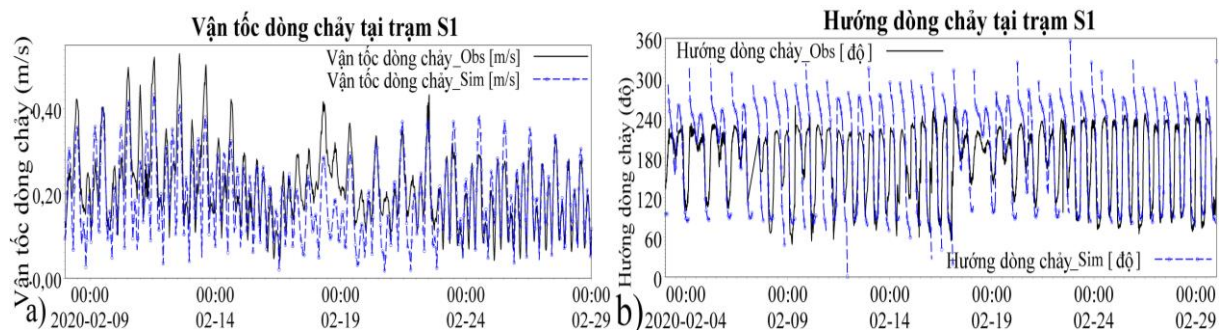


Hình 4. So sánh dao động mực nước mô phỏng (SIM) và thực đo (OBS) tháng 2/2020 tại các trạm.

Bảng 3. Kết quả tính toán các chỉ tiêu đánh giá mô hình MIKE 21 HD.

| Tham số | R ² | RMSE | MAE | NSE |
|---------------------------------|----------------|-------|-------|------|
| Vận tốc dòng chảy trạm S1 (m/s) | 0,53 | 0,07 | 0,05 | 0,37 |
| Hướng dòng chảy trạm S1 (độ) | 0,76 | 44,31 | 35,29 | 0,34 |
| Mực nước trạm S1 (m) | 0,94 | 0,21 | 0,16 | 0,94 |
| Mực nước trạm An Thuận (m) | 0,96 | 0,17 | 0,13 | 0,95 |
| Mực nước trạm Bến Trại (m) | 0,95 | 0,18 | 0,14 | 0,95 |
| Mực nước trạm Bình Đại (m) | 0,96 | 0,20 | 0,16 | 0,93 |
| Mực nước trạm Trần Đề (m) | 0,96 | 0,33 | 0,29 | 0,85 |
| Mực nước trạm Vàm Kênh (m) | 0,96 | 0,16 | 0,12 | 0,96 |

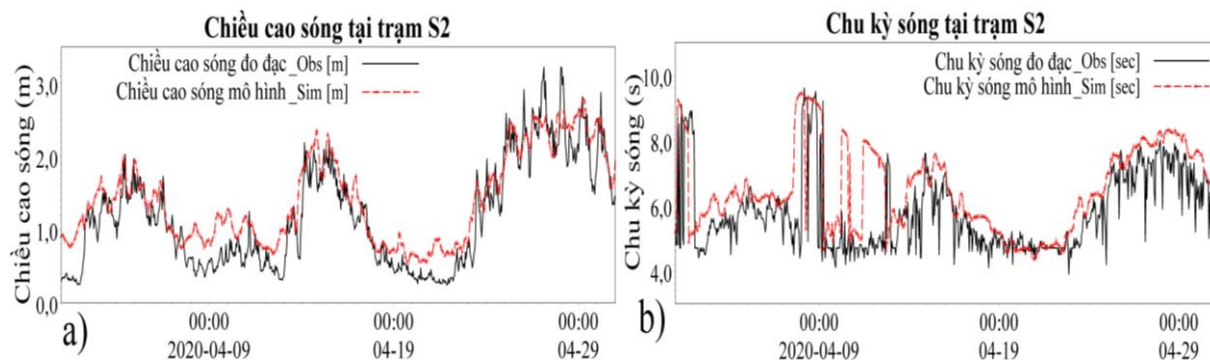
Đối với dòng chảy tại trạm S1 phía ngoài Cửa Đại của sông Tiền, kết quả mô phỏng cho thấy tương đối phù hợp với dòng chảy thực đo (Hình 5). Hệ số hiệu dụng NSE có kết quả lần lượt là 0,37 và 0,34 (Bảng 3). Điều này chứng tỏ rằng kết quả mô phỏng có sự chênh lệch và tính chất phân tán của chuỗi giá trị mô hình với chuỗi số liệu thực đo là tương đối phù hợp. Trong khi đó, chỉ số xác định bội R² lần lượt là 0,53 và 0,76 đối với vận tốc và hướng dòng chảy cho thấy sự phù hợp tương đối có thể chấp nhận được giữa kết quả mô hình và thực đo.



Hình 5. So sánh vận tốc (a) và hướng dòng chảy (b) mô phỏng (SIM) và thực đo (OBS) tại trạm S1.

3.1.2. Kiểm định mô hình

Việc kiểm định mô hình số lan truyền sóng được thực hiện thông qua việc so sánh chiều cao sóng và chu kỳ mô phỏng với dữ liệu thực đo tại trạm S2 nằm ngoài khơi cửa sông Cổ Chiên và bờ biển tỉnh Trà Vinh khoảng 16 km vào tháng 4/2020 (Hình 6). Kết quả so sánh cho thấy nhìn chung xu thế của chiều cao và chu kỳ sóng được tái tạo tốt với lần lượt R²=0,90 và R²=0,80. Mặc dù giá trị của RMSE = 0,4 m và MAE = 0,34 m đối với chiều cao sóng và RMSE = 0,72 s và MAE = 0,53 s đối với chu kỳ sóng là tương đối lớn (Bảng 4), tuy vậy chúng vẫn nằm trong khoảng hợp lý [27-31].

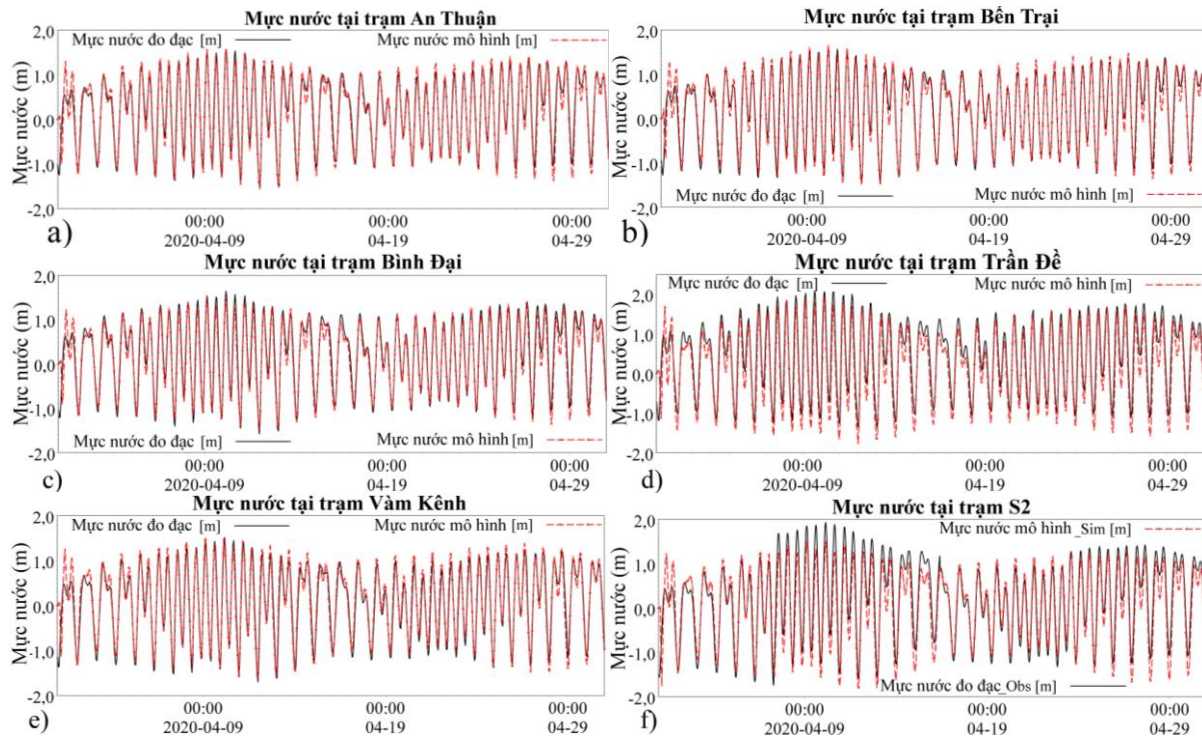


Hình 6. So sánh chiều cao (a) và chu kỳ sóng (b) mô phỏng (SIM) và thực đo (OBS) tại trạm S2.

Bảng 4. Kết quả kiểm định mô hình sóng MIKE 21 SW.

| Tham số | R ² | RMSE | MAE | NSE |
|-----------------------------------|----------------|------|------|------|
| Chiều cao sóng H _s (m) | 0,90 | 0,31 | 0,25 | 0,86 |
| Chu kỳ sóng T _p (s) | 0,80 | 0,72 | 0,53 | 0,56 |

Đối với mô hình thủy lực MIKE 21 HD, việc kiểm định được tiến hành bằng cách so sánh mực nước và dòng chảy mô phỏng với dữ liệu quan trắc vào tháng 4/2020 (Hình 7). Ngoài ra, các chỉ số R² dao động 0,94–0,96 và NSE nằm trong khoảng 0,83–0,95 (Bảng 5) đã khẳng định một lần nữa về khả năng của mô hình trong việc dự đoán biến động mực nước.



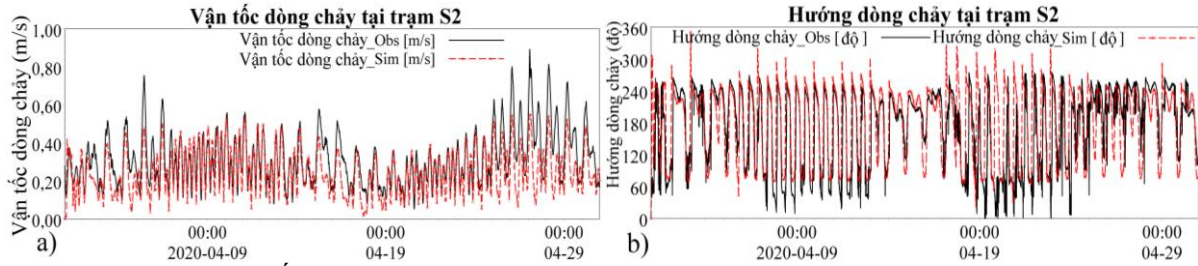
Hình 7. So sánh dao động mực nước mô phỏng (SIM) và thực đo (OBS) vào tháng 4/2020.

Bảng 5. Kết quả tính toán các chỉ tiêu kiểm định mô hình MIKE 21 HD.

| Tham số | R ² | RMSE | MAE | NSE |
|---------------------------------|----------------|-------|-------|------|
| Vận tốc dòng chảy trạm S2 (m/s) | 0,78 | 0,06 | 0,05 | 0,72 |
| Hướng dòng chảy trạm S2 (độ) | 0,59 | 57,62 | 31,56 | 0,45 |
| Mực nước trạm S2 (m) | 0,96 | 0,40 | 0,37 | 0,83 |
| Mực nước trạm An Thuận (m) | 0,95 | 0,17 | 0,11 | 0,95 |
| Mực nước trạm Bến Trại (m) | 0,95 | 0,18 | 0,12 | 0,94 |
| Mực nước trạm Bình Đại (m) | 0,95 | 0,19 | 0,13 | 0,94 |
| Mực nước trạm Trần Đề (m) | 0,95 | 0,33 | 0,29 | 0,86 |
| Mực nước trạm Vàm Kênh (m) | 0,94 | 0,20 | 0,14 | 0,93 |

Kết quả mô hình vận tốc và hướng dòng chảy được so sánh với dữ liệu thực đo tại trạm S2 như thể hiện trong Hình 8. Nhìn chung, cả vận tốc và hướng dòng chảy mô hình có xu thế khá tốt so với giá trị thực đo với R² = 0,59–0,78. Riêng đối với vận tốc dòng chảy, cả giá trị RMSE và MAE đều nhỏ hơn 0,1 m/s và nằm trong ngưỡng phù hợp xuất sắc [27, 28, 29, 30,

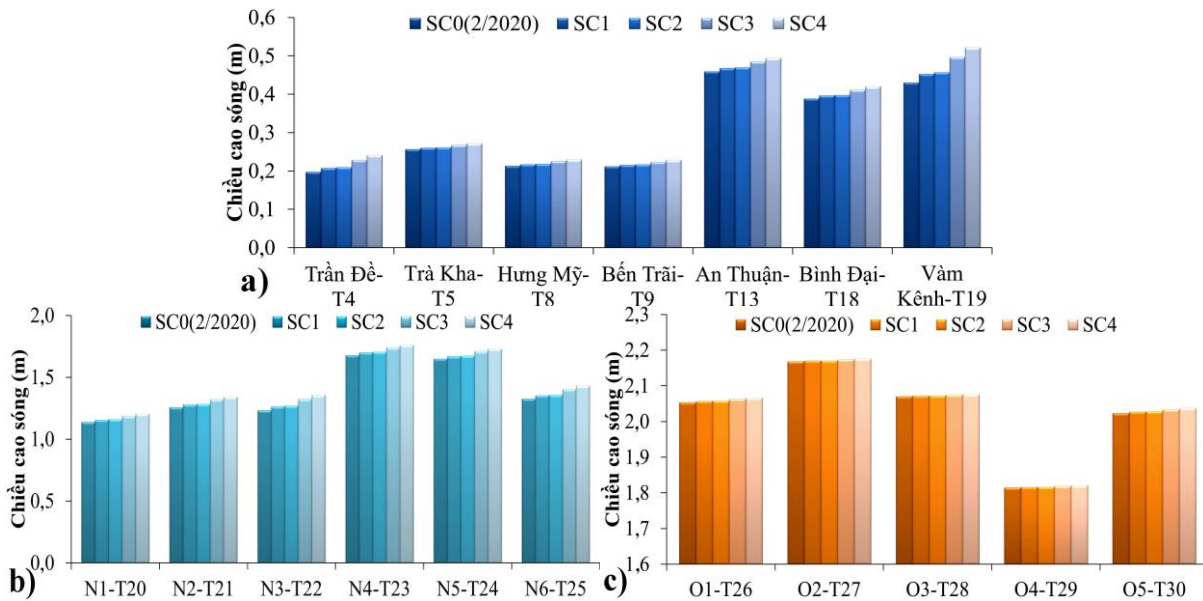
31]. Mặc dù hướng dòng chảy vẫn tồn tại sai số khá lớn (RMSE = 57,62 độ và MAE=31,56 độ), nhưng chỉ số hiệu dụng NSE = 0,45 vẫn nằm trong ngưỡng hợp lý và chấp nhận được.



Hình 8. So sánh vận tốc (a) và hướng dòng chảy (b) mô phỏng (SIM) và thực đo (OBS) tại trạm S2.

3.2. Ảnh hưởng của NBD đến trường sóng

Có sự khác biệt về phân bố không gian của trường chiều cao sóng giữa kịch bản nền và các kịch bản NBD, đặc biệt là ở khu vực lân cận cửa sông và ven biển. Nhìn chung, chiều cao sóng có xu hướng tăng lên ở tất cả các điểm trích xuất (Hình 9). Tuy nhiên, mức độ tăng chiều cao sóng là khác nhau giữa các khu vực trong vùng nghiên cứu. Cụ thể, chiều cao sóng tăng lên rõ rệt ở vùng ven biển và cửa sông; trong khi đó thay đổi không đáng kể ở vùng ngoài khơi khi NBD. Nguyên nhân chính của sự gia tăng chiều cao sóng này có thể là do độ sâu của nước tăng do NBD, dẫn đến nhiều con sóng lớn được lan truyền và vỡ gần bờ. Nếu mực nước biển dâng lên +0,14 m (SC1), chiều cao sóng dao động từ 0,20 m đến 0,46 m ở vùng cửa sông (tăng từ 1,48% đến 5,09% so với kịch bản nền) (Hình 9a), từ 1,15 m đến 1,69 m ở các luồng tàu vào cửa sông (tăng từ 1,29% đến 2,58% so với kịch bản nền) (Hình 9b) và từ 1,81 m đến 2,17 m ở khu vực ngoài khơi của các cửa sông (tăng không đáng kể từ 0,07% đến 0,16% so với kịch bản nền) (Hình 9c). Hai điểm có chiều cao sóng tăng lớn nhất (trên 5%) là điểm T4 ở cửa Trần Đề và điểm T19 ở cửa Tiểu. Với kịch bản SC2 với NBD +0,17 m, chiều cao sóng dao động từ 0,21 m đến 0,47 m ở vùng cửa sông (tăng từ 1,79% đến 6,21% so với kịch bản nền) (Hình 9a), từ 1,16 m đến 1,71 m ở các luồng tàu vào cửa sông (tăng từ 1,56% đến 3,13% so với kịch bản nền) (Hình 9b) và từ 1,82 m đến 2,17 m ở khu vực ngoài khơi của các cửa sông (tăng không đáng kể từ 0,09% đến 0,20% so với kịch bản nền) (Hình 9c). Hai điểm T4 và T19 vẫn là hai điểm có chiều cao sóng tăng nhiều nhất (hơn 6%).



Hình 9. Chiều cao sóng trung bình tại một số điểm quan trắc trong khu vực nghiên cứu.

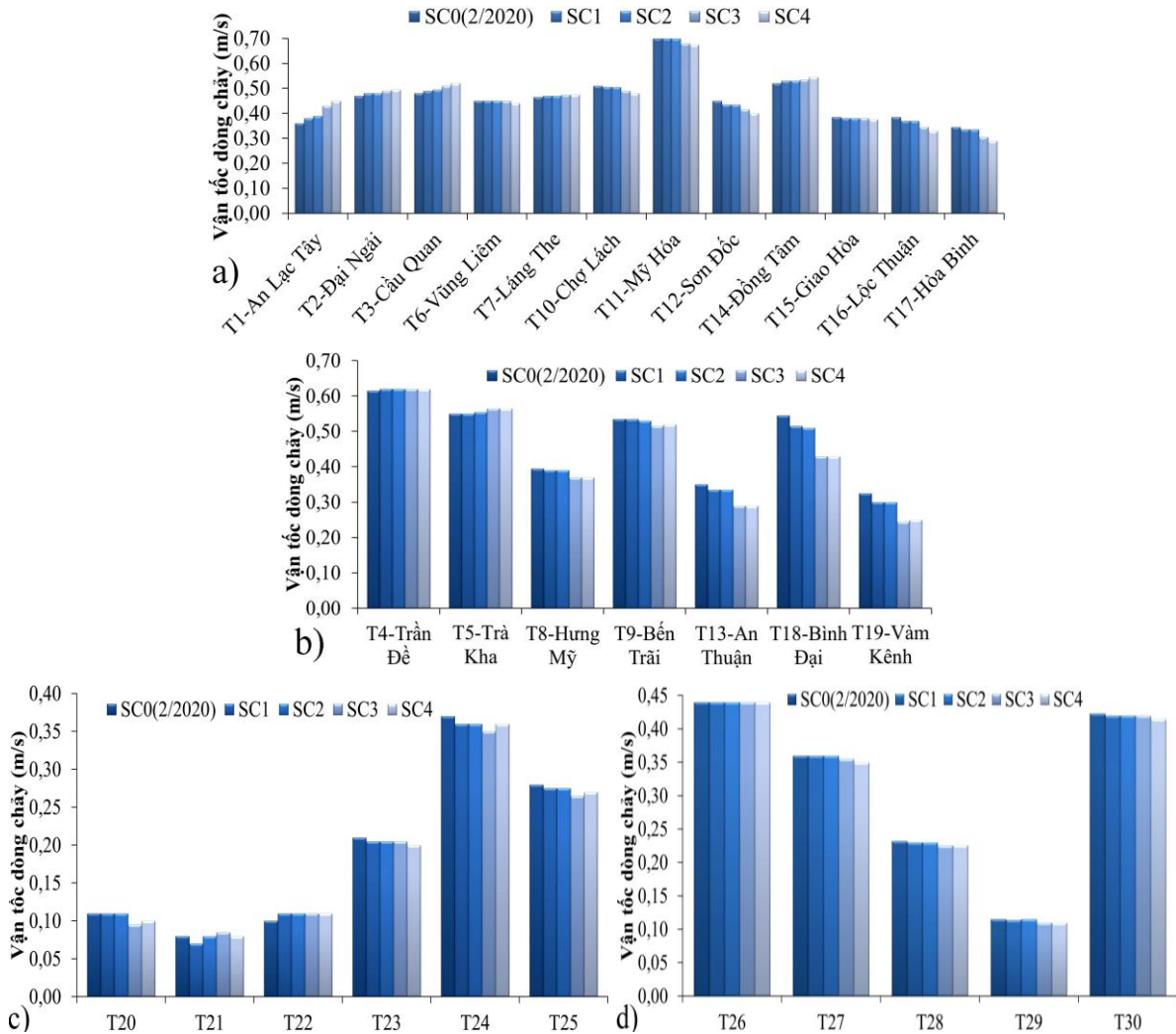
Dưới sự tác động của NBD +0,42 m trong kịch bản SC3, sóng có chiều cao lớn vẫn tập trung tiếp cận khu vực ven biển từ cửa Cổ Chiên đến cửa Đại, đặc biệt là cửa Hàm Luông. NBD cao đột biến (so với các kịch bản SC1 và SC2) cũng đã làm cho chiều cao của sóng tăng lên khá nhiều và sự khác biệt trở lên rõ ràng. Cụ thể, chiều cao sóng dao động từ 0,22 m đến 0,50 m ở vùng cửa sông (tăng từ 4,30% đến 15,86% so với kịch bản nền) (Hình 9a), từ 1,19 m đến 1,74 m ở các luồng tàu vào cửa sông (tăng từ 3,71% đến 7,53% so với kịch bản nền) (Hình 9b) và từ 1,82 m đến 2,17 m ở khu vực ngoài khơi của các cửa sông (tăng không đáng kể từ 0,21% đến 0,50% so với kịch bản nền) (Hình 9c). Ngoài ra, khi so sánh riêng giữa kịch bản SC3 và SC2, mực nước tăng lên gần 2,5 lần (+0,42 m và 0,17 m) cũng làm cho sự khác biệt về chiều cao sóng tăng lên với tỷ lệ tương ứng. Kịch bản NBD cực đoan nhất xảy ra ở khu vực nghiên cứu là kịch bản SC4. Sóng lớn tiếp tục lan truyền và thâm nhập sâu vào trong các cửa sông. Việc so sánh chiều cao sóng với kịch bản nền đã tiết lộ rằng chiều cao sóng tăng từ 5,83% đến 22,25% ở vùng cửa sông (Hình 9a), tăng từ 5,00% đến 10,21% ở các luồng tàu vào cửa sông (Hình 9b) và tăng không đáng kể từ 0,30% đến 0,69% ở khu vực ngoài khơi của các cửa sông (Hình 9c). Nếu so sánh riêng giữa kịch bản SC4 với SC2 tương ứng với mực nước tăng lên gần 3,5 lần, chiều cao sóng cũng tăng lên tương ứng khoảng 3,5 lần.

3.3. Ảnh hưởng của NBD đến trường dòng chảy

Kết quả mô hình hóa cho thấy sự phân bố không gian của vận tốc dòng chảy cũng như tại các điểm quan trắc trong khu vực nghiên cứu có sự khác nhau giữa các kịch bản được tính toán có xét đến NBD. Khi triều lên ở kịch bản SC1, dễ dàng thấy rằng xu thế vận tốc dòng chảy cũng khác nhau rất nhiều. Nếu so sánh với kịch bản nền (SC0), các điểm trên sông Hậu (T1-T3) và sông Cổ Chiên (T6-7) có vận tốc tăng lên từ 1–2 cm/s khi NBD (Hình 10a). Trong khi đó, vận tốc dòng chảy các điểm trên sông Hàm Luông (T10-12) và sông Tiền (T14-16) có xu hướng giảm 0,5–2 cm/s (Hình 10a). Đối với các điểm ở cửa sông (T4, 5, 8, 9, 13, 18, 19) và luồng tàu (T20-25), vận tốc dòng chảy khi triều lên và NBD (SC1) có khả năng giảm, nhỏ hơn 0,5–3 cm/s so với kịch bản nền (Hình 10b và Hình 10c). Vận tốc dòng chảy tại các điểm ngoài khơi (T26-30) khá tương đồng giữa kịch bản nền và kịch bản NBD (SC1) (Hình 10d). Khi triều rút và NBD 14 cm, vận tốc dòng chảy tại các điểm bên trong các sông (T1-T3, T6-T7, T10-T12, T15-T17) và cửa sông (T4-5, T8-9, T13, T18-19) có xu thế giống nhau và có xu hướng tăng lên khi NBD (khoảng 0,5–2 cm/s) (Hình 11a và Hình 11b). Trái ngược xu thế tăng vận tốc ở trong sông và cửa sông, vận tốc dòng chảy tại các điểm trên luồng tàu vào cửa sông (T20-M25) thấp hơn rõ rệt so với kịch bản nền (nhỏ hơn 2–4 cm/s) (Hình 11c). Vận tốc dòng chảy tại các điểm ngoài khơi (T26-T30) không khác biệt đáng kể giữa các kịch bản (Hình 11d).

Nếu mực nước biển tăng thêm 17 cm theo kịch bản RCP 8.5 (SC2) so với mùa khô tháng 2/2020, xu thế của vận tốc dòng chảy cũng tương tự như kịch bản SC1. Khi triều lên, các điểm trên sông Hậu (T1-T3) và sông Cổ Chiên (T6-7) có vận tốc tăng lên từ 0,3–3 cm/s so với kịch bản gốc và từ 0,5–1 cm/s so với kịch bản SC1 (Hình 10a). Trái ngược lại, vận tốc dòng chảy các điểm trên sông Hàm Luông (T10-12) và sông Tiền (T14-16) tương đồng với kịch bản SC1 và giảm 0,5–2 cm/s so với kịch bản nền (a). Đối với các điểm ở cửa sông, vận tốc dòng chảy được ghi nhận tăng nhẹ (0,1–1 cm/s) tại các điểm ở cửa sông Hậu (T4-T5) và giảm rõ rệt khoảng 0,5–4 cm/s tại các điểm ở các cửa sông khác (T8-9, T13, T18-19) khi so sánh với kịch bản nền (Hình 10b). Vận tốc dòng chảy của các điểm trên luồng tàu ngoài cửa sông (T20-T25) và các điểm ngoài khơi (T26-T30) không có sự khác biệt đáng kể so với kịch bản SC1 (Hình 10c, d). Khi triều rút, vận tốc dòng chảy tại các điểm trong vùng nghiên cứu gần như không thay đổi so với kịch bản SC1, ngoại trừ các điểm ở luồng tàu ngoài cửa sông. Tại

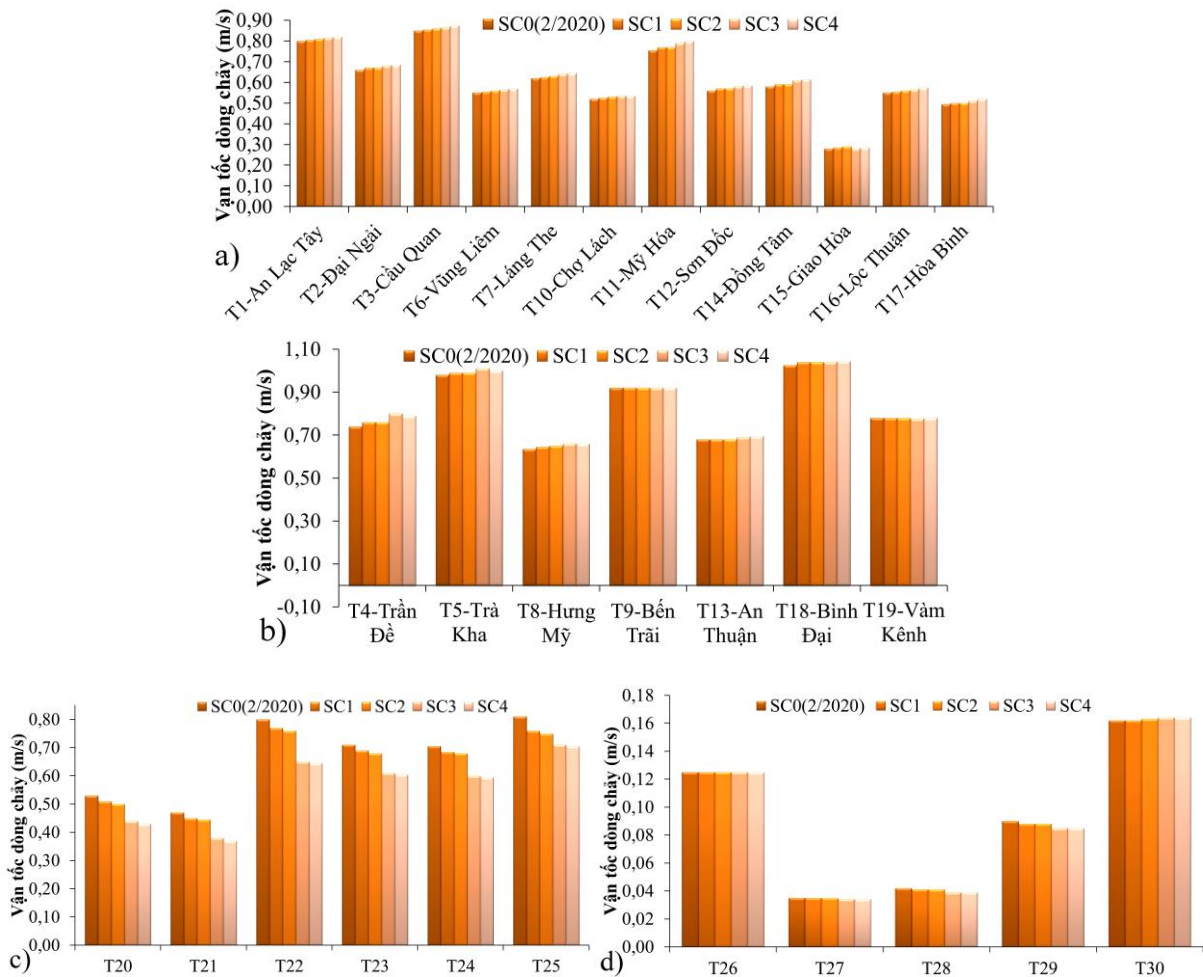
các điểm này (T20-T25), xu thế giảm nhẹ (khoảng 0,5–1 cm/s) của vận tốc dòng chảy so với kịch bản SC1 tiếp tục được ghi nhận (Hình 11c).



Hình 10. Vận tốc dòng chảy trung bình tại một số điểm quan trắc khi triều lên.

Các xu thế thay đổi của vận tốc dòng chảy ở khu vực nghiên cứu được làm sáng tỏ hơn khi NBD lớn hơn vào năm 2100. Khi triều lên kết hợp với NBD 42 cm (SC3), vận tốc dòng chảy tại các điểm trong sông đều có sự khác biệt rõ rệt so với kịch bản SC1 và SC2 (Hình 10a). Cụ thể, vận tốc dòng chảy ở các điểm trên sông Hậu (T1-T3) tiếp tục có xu thế tăng từ 2–7 cm/s so với kịch bản nền và 1–4 cm/s so với kịch bản SC2. Các điểm trên sông Cỏ Chiên (T6-T7) cũng tăng nhẹ so với kịch bản SC2. Ngược lại, các điểm trên sông Hàm Luông (T10-T12) và sông Tiền (T14-T17) có vận tốc giảm từ 1–4 cm/s so với kịch bản nền và 0,5–3 cm/s so với kịch bản SC2 (Hình 10b). Tại các cửa sông, phần lớn các điểm đều giảm tương đối lớn so với kịch bản nền, ngoại trừ điểm T5 trên cửa Định An thì tăng nhẹ. Các điểm trên cửa sông giảm từ 0,2–12 cm/s so với kịch bản nền và khoảng 1–8 cm/s so với kịch bản SC2. Trong khi đó, các điểm ngoài cửa sông (trên luồng vào và ngoài khơi) có thay đổi rất ít so với kịch bản SC1 và SC2 (Hình 10c, d). Với kịch bản NBD 42 cm cùng với thời điểm triều rút vào tháng 2/2100 (SC3), vận tốc dòng chảy tại các điểm trong các sông có xu thế tăng ở hầu hết các điểm tương tự như các kịch bản SC1 và SC2, nhưng giá trị cao hơn từ 1–2 cm/s so với kịch bản SC2 (Hình 11a). Xu thế tăng của vận tốc dòng chảy cũng được quan sát thấy ở các cửa

sông. Tốc độ tăng lớn nhất khoảng 4 cm/s xảy ra ở điểm T4 của cửa Trần Đề (Hình 11b). Trái ngược hoàn toàn với các điểm trong sông và cửa sông, các điểm ở luồng tàu ngoài cửa sông có vận tốc giảm rõ rệt khi NBD lên 42 cm. Cụ thể, vận tốc dòng chảy ở những điểm này giảm từ 4–11 cm/s (Hình 11c). Trong khi đó, các điểm ngoài khơi có vận tốc dòng chảy tương đồng với kịch bản nền (SC0) cũng như các kịch bản tháng 2/2050.



Hình 11. Vận tốc dòng chảy trung bình tại một số điểm quan trắc khi triều rút.

Trường vận tốc dòng chảy ở khu vực nghiên cứu trong kịch bản cực đoan nhất (NBD 58 cm kết hợp với triều cường) cho thấy rằng vận tốc dòng chảy tiếp tục tăng lên ở các điểm trên sông Hậu (T1-T3) và sông Cỏ Chiên (T6-T7) từ 1–9 cm/s so với kịch bản nền và 0,2–2 cm/s so với kịch bản SC3. Trong khi đó, xu thế giảm vận tốc dòng chảy khi mực nước biển tăng lên lại được ghi nhận đối với các điểm trên sông Hàm Luông (T10-T12) và trên sông Tiền (T14-T17). Vận tốc của các điểm này giảm khoảng 1–6 cm/s so với kịch bản nền và 0,1–2 cm/s so với kịch bản SC3. Điểm duy nhất trên sông Tiền duy trì xu thế tăng của vận tốc dòng chảy là điểm T14 (Hình 10a). Đối với các điểm ở cửa sông, luồng tàu và ngoài khơi, vận tốc dòng chảy gần như không khác biệt nhiều so với kịch bản SC3, mặc dù mực nước tăng thêm 16 cm so với kịch bản này (Hình 10b,c,d). Tuy nhiên, khi NBD lên 58 cm vào năm 2100 và triều rút, sự gia tăng vận tốc dòng chảy là xu thế chính đối với các điểm trên sông và cửa sông. Vận tốc các điểm này tăng lên từ 0,5–5 cm/s so với kịch bản nền (Hình 11a,b). Tuy nhiên, đối với các điểm ngoài cửa sông, bao gồm các điểm trên luồng tàu và các điểm ngoài khơi, vận tốc dòng chảy gần như không thay đổi so với kịch bản SC3 (Hình 11c,d).

4. KẾT LUẬN

Chế độ thủy động lực học của khu vực hạ lưu đồng bằng sông Cửu Long được dự đoán dựa trên bốn kịch bản được hình thành từ giá trị mực nước biển dâng theo kịch bản biến đổi khí hậu (RCP 4.5 và RCP 8.5) vào năm 2050 và 2100. Kết quả so sánh giữa kịch bản nền (tháng 2/2020) và 04 kịch bản mực nước biển dâng đã cho ta thấy bức tranh tổng thể về sự biến đổi của chế độ thủy động lực (sóng và dòng chảy) ở khu vực nghiên cứu vào mùa khô có thể xảy ra trong tương lai. Đặc biệt ở hai kịch bản cuối cho thấy rằng sự gia tăng chiều cao sóng (khoảng 5%–23%) cũng như vận tốc dòng chảy (khoảng 4,5–9 cm/s) khi triều rút diễn ra ở trên hầu hết các nhánh sông. Ngoài ra, để đánh giá một cách toàn diện về tình trạng biến đổi thủy động lực học ở hạ lưu đồng bằng sông Cửu Long dưới tác động của biến đổi khí hậu, sự suy giảm lưu lượng ở thượng nguồn, sự xuất hiện của các công trình chỉnh trị và quá trình xâm nhập mặn cần được kể đến trong các kịch bản mô phỏng trong nghiên cứu tiếp theo.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được hỗ trợ bởi Bộ Giáo dục và đào tạo trong đề tài mã số CT.2022.01.XDA.04, tên là “*Nghiên cứu phương pháp đánh giá rủi ro xâm nhập mặn có xét tới ảnh hưởng của biến đổi khí hậu*”. Các tác giả xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Phan Hoàng, Gỡ khó cho tiêu thụ sản phẩm nông nghiệp vùng đồng bằng sông Cửu Long, Báo Nhân Dân, 2023.
- [2]. Quốc Thanh, Số phận đồng bằng sông Cửu Long, Báo Tuổi trẻ, 2016.
- [3]. Huỳnh Công Hoài, Nguyễn Thị Bảy, Đào Nguyên Khôi, Trà Nguyễn Quỳnh Nga, Phân tích nguyên nhân gây gia tăng xói lở bờ sông ở đồng bằng sông Cửu Long, Tạp chí Khí tượng thủy văn, 7 (2019) 42 - 50.
- [4]. Lê Xuân Tú, Đỗ Văn Dương, Lương Thanh Tùng, Đánh giá tình hình sạt lở, hệ thống bảo vệ bờ biển ở đồng bằng sông Cửu Long và định hướng giải pháp bảo vệ, Tạp chí Khoa học và công nghệ Thủy lợi, 58 (2020) 1 - 10.
- [5]. Nguyen Ngoc Anh, Historic drought and salinity intrusion in the Mekong Delta in 2016: Lessons learned and response solutions, Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering, 59 (2017) 93 - 96.
- [6]. Nguyen Xuan Hoan, Dao Nguyen Khoi, Luu Duc Trung, Assessing the adaptive capacity of farmers under the impact of saltwater intrusion in the Vietnamese Mekong Delta, Journal of Environmental Planning and Management, 62 (2019) 1619 - 1635. <https://doi.org/10.1080/09640568.2019.1631147>
- [7]. VDMA, Summary report on the situation of drought and saltwater intrusion in the Southern region 2019-2020, Viet Nam Disaster Management Authority, 2020.
- [8]. R. J. Nicholls, A. C. de la Vega-Leinert, Implications of Sea-Level Rise for Europe's Coasts: An Introduction, Journal of Coastal Research, 23 (2008) 285 - 287.
- [9]. V. T. Nguyen, J. H. Zheng, J. S. Zhang, Mechanism of back siltation in navigation channel in Dinh An Estuary, Vietnam, Water Science and Engineering, 6 (2013) 178 - 188. <https://doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2013.02.006>
- [10]. N. D. Dang, V. T. Nguyen, Influence of enlargement of Quan Chanh Bo channel on hydrodynamic and sediment transport in Dinh An estuary, Vietnam, The 19th IAHR-APD Congress 2014, Hanoi, Vietnam, 2014.

- [11]. T. Q. Toan, 9 - Climate Change and Sea Level Rise in the Mekong Delta: Flood, Tidal Inundation, Salinity Intrusion, and Irrigation Adaptation Methods, [in] N.D. Thao, H. Takagi, M. Esteban, Coastal Disasters and Climate Change in Vietnam, Elsevier, Oxford, 2014. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800007-6.00009-5>
- [12]. N. N. Thanh, S. Nakajo, T. Mukunoki, Effects of Current on Sediment Transport at Dinh An Estuary, Mekong River, Vietnam, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering), 71 (2015) 790 - 795.
- [13]. Doan Quang Tri, Application MIKE 11 model on simulation and calculation for saltwater intrusion in Southern Region, Journal of Hydro-Meteorology, 11 (2016) 39 - 46.
- [14]. Lê Thanh Chương, Trần Bá Hoàng, Chế độ thủy thạch động lực khu vực cửa sông, ven biển vùng đồng bằng sông Cửu Long, Tạp chí Khoa học và công nghệ Thủy lợi, 40 (2017) 10 - 22.
- [15]. S. Kantoush, D. V. Binh, T. Sumi, L. V. Trung, Impact of Upstream Hydropower Dams and Climate Change on Hydrodynamics of Vietnamese Mekong Delta, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 73 (2017) 109 - 114.
- [16]. D. T. Anh, H. P. Long, B. D. Minh, P. Rutschmann, Modelling seasonal flows alteration in the Vietnamese Mekong Delta under upstream discharge changes, rainfall changes and sea level rise, International Journal of River Basin Management, 17(2019) 435 - 449.
- [17]. Trần Bá Hoàng, Nguyễn Bình Dương, Nguyễn Công Phong, Chế độ vận chuyển bùn cát vùng đồng bằng sông Cửu Long trong kịch bản phát triển thượng nguồn, Tạp chí Khoa học và công nghệ Thủy lợi, 57(2019) 47 - 57.
- [18]. L. X. Tu, V. Q. Thanh, J. Reynolds, P. V. Song, D. T. Anh, D. D. Thanh, Sediment transport and morphodynamical modeling on the estuaries and coastal zone of the Vietnamese Mekong Delta, Continental Shelf Research, 186 (2019) 64 - 76. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.07.015>
- [19]. C. Jordan, J. Visscher, N. V. Dung, H. Apel, T. Schlurmann, Impacts of Human Activity and Global Changes on Future Morphodynamics within the Tien River, Vietnamese Mekong Delta, Water, 12(2020) 1-21. <https://doi.org/10.3390/w12082204>
- [20]. D. V. Binh, S. A. Kantoush, R. Ata, P. Tassi, T. V. Nguyen, J. Lepesqueur, Hydrodynamics, sediment transport, and morphodynamics in the Vietnamese Mekong Delta: Field study and numerical modelling, Geomorphology, 413 (2022) 108368. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108368>
- [21]. DHI, MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM - Hydrodynamic and Transport Module - Scientific Documentation, 2014.
- [22]. R. Soulsby, Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications. London, UK, Thomas Telford, 1997.
- [23]. V. M. Tuan, Y. Lacroix, N. V. Thanh, Investigating the impacts of the regression of Posidonia oceanica on hydrodynamics and sediment transport in Giens Gulf, Ocean Engineering, 146 (2017) 70 - 86. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.09.051>.
- [24]. N. T. T. Ha, H. T. Trang, N. V. Vuong, D. N. Khoi, Simulating impacts of sea level rise on salinity intrusion in the Mekong Delta, Vietnam in the period 2015-2100 using MIKE 11, Naresuan University Engineering Journal, 11 (2016) 21 - 24.
- [25]. T. W. Doyle, R. H. Day, T. C. Michot, Development of sea level rise scenarios for climate change assessments of the Mekong Delta, Vietnam, Report 2010-1165, 2010.
- [26]. MONRE, Climate Change Scenarios (Kịch bản biến đổi khí hậu), Ministry of Natural Resources and Environment of Viet Nam, Hanoi, Vietnam, 2021.
- [27]. M. Hsu, A. Kuo, J. Kuo, W. Liu, Procedure to Calibrate and Verify Numerical Models of Estuarine Hydrodynamics, Journal of Hydraulic Engineering, 125 (1999) 166 - 182.
- [28]. L. C. Van Rijn, D. J. R. Walstra, B. Grasmeijer, J. Sutherland, S. Pand, J. P. Sierra, The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based Profile models, Coastal Engineering, 47 (2003) 295 - 327.

[https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00120-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00120-5)

[29]. J. Sutherland, A. H. Peet, R. L. Soulsby, Evaluating the performance of morphological models, Coastal Engineering, 51 (2004) 917 - 939. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.015>

[30]. J. Sutherland, D. J. R. Walstra, T. J. Chesher, L. C. van Rijn, H. N. Southgate, Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth, Coastal Engineering, 51 (2004) 119 - 142.

<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2003.12.003>

[31]. S. Perreault, A. El Alem, K. Chokmani, A. N. Cambouris, Development of Pedotransfer Functions to Predict Soil Physical Properties in Southern Quebec (Canada), Agronomy, 12 (2022).

<https://doi.org/10.3390/agronomy12020526>