

Phát triển mô hình sóng-dòng qua cặp mô hình FEM và SWAN tại vịnh Nha Trang

Development of a wave-current model through coupling of FEM and SWAN models in Nha Trang bay

Trần Văn Chung*, Ngô Mạnh Tiến, Võ Văn Quang
Tran Van Chung*, Ngo Manh Tien, Vo Van Quang

*Viện Hải dương học, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam (VAST)
Institute of Oceanography, VAST*

(Ngày nhận bài: 23/11/2020, ngày phân biện xong: 05/12/2020, ngày chấp nhận đăng: 20/12/2020)

Tóm tắt

Mô hình sóng SWAN (phiên bản 41.31) với lưới phi cấu trúc đã được áp dụng thử nghiệm vào tính sóng tại vùng biển Nha Trang. Đặc biệt, có thể sử dụng cùng mạng lưới tam giác phi cấu trúc trong tính toán dòng chảy bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Một sự kết hợp hệ thống sóng-dòng được phát triển trong bài báo này là sự kết hợp hai mô hình, mô hình thủy động lực theo phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) và mô hình sóng gần bờ (SWAN). Điều này rất hữu ích trong giải quyết bài toán tương tác sóng - dòng và sóng - sóng. Những kết quả bước đầu cho thấy, cách tiếp cận ứng dụng mô hình tính sóng này là hợp lý, ổn định cho bước thời gian bất kỳ cho mạng lưới làm mịn, mang đặc trưng địa phương trong vùng nghiên cứu.

Từ khóa: Mô hình kết hợp; SWAN; Lưới phi cấu trúc; Sai phân hữu hạn; Phần tử hữu hạn.

Abstract

The wave model SWAN (version 41.31) with unstructured grid has been applied for Nha Trang waters. In particular, the unstructured meshes (triangular mesh) can be used in order to calculate the flow by finite element method (FEM). A coupled wave-current system has been developed in the present paper based on two open source community models, the Hydrodynamic model by finite element method (FEM) and the Simulating Waves Nearshore (SWAN). This is very helpful in solving the problems of interactions between wave-current and wave-wave. It indicates that the SWAN model approach is reasonable, stable for any time step while permitting local mesh refinements in interested areas.

Keywords: Coupled model; SWAN; Unstructured grid; Finite difference; Finite Element.

1. Mở đầu

Sóng và dòng chảy thường tương tác rõ rệt ở vùng nước nông dưới các điều kiện trường độ sâu phức tạp và đóng vai trò chính trong vận chuyển trầm tích, tiến hóa hình thái và pha trộn chất ô nhiễm (Rodriguez và nnk., 1995

[1]; Li và Johns, 1998 [2]; Bever và MacWilliams, 2013 [3]). Các tương tác này là phi tuyến và phức tạp (Olabarrieta và nnk., 2011 [4]; Roland và nnk., 2012 [5]; Benetazzo nnk., 2013 [6]). Một mặt, gradient của ứng suất bức xạ kết hợp với sóng trọng lực, tổng lực đẩy

* *Corresponding Author:* Tran Van Chung; Institute of Oceanography, VAST
Email: tvanchung@gmail.com

ngang tác động bởi sóng lên trên bãi biển và khu vực gần bờ làm thay đổi dòng chảy dọc bờ (Longuet-Higgins, 1970 [7]; Garcez-Faria nnk., 2000 [8]) và do đó ảnh hưởng đến mực nước trung bình bằng cách tăng mực nước gần bờ hoặc giảm mực nước gần điểm sóng đổ (Longuet-Higgins và Stewart, 1964 [9]; Guza và Thornton, 1981 [10]). Trong khi đó, sóng trong vùng sóng đổ có thể tăng cường pha trộn theo phương ngang và lực cản đáy. Mặt khác, sự thay đổi mực nước và dòng chảy có thể ảnh hưởng đến sự chuyển động và phát triển của sóng (Dutour-Sikiric nnk., 2013 [11]; Allard nnk., 214 [12]).

Bài báo này thực hiện một ứng dụng mới của mô hình SWAN (phiên bản 41.31, cập nhật mới nhất tới thời điểm này) với lưới phi cấu trúc vào vùng nghiên cứu có đường bờ biển đổi phức tạp, biên mở rộng, xử lý biên khá phức tạp và không thuận lợi cho lan truyền sóng. Phiên bản này sử dụng khác đôi chút so với lưới phi cấu trúc với các kỹ thuật lặp đi lặp lại bốn hướng Gauss-Seidel tương tự từ phiên bản cấu trúc của SWAN, đòi hỏi sự thích nghi trong lõi tính toán. Điểm nổi bật của thuật toán lưới phi cấu trúc này là không theo phương pháp thể tích hữu hạn hoặc phương pháp phần tử hữu hạn theo phương pháp sai phân hữu hạn truyền thống. Với lộ trình thực hiện ở đây, mô hình này vẫn giữ được quá trình vật lý và số học và cấu trúc mã số của mô hình lưới cấu trúc SWAN, nhưng có thể chạy trên mạng lưới phi cấu trúc. Phiên bản mới nhất luôn được cập nhật từ trang web: <http://swanmodel.sourceforge.net/>. Các phiên bản SWAN đã được chúng tôi ứng dụng thành công khi kết hợp với mô hình thủy động lực theo phương pháp phần tử hữu hạn (FEM). Các công trình công bố điển hình, áp dụng mô hình SWAN với lưới phi cấu trúc đã được áp dụng thử nghiệm vào tính toán các đặc trưng sóng tại vùng biển Đầm Báy (Nha Trang) có xét đến

tương tác sóng - dòng theo pha triều lên và pha triều xuống (Trần Văn Chung và nnk., 2015 [13]) và trường sóng do ảnh hưởng của chế độ gió mùa Ninh Thuận - Bình Thuận (Trần Văn Chung và nnk., 2016 [14]). Đây là phiên bản đầu tiên được chúng tôi ứng dụng trên tương tác sóng - dòng do ảnh hưởng chế độ gió mùa trên khu vực không thuận lợi cho lan truyền sóng.

2. Tài liệu và phương pháp

2.1. Mô tả mô hình

2.1.1. Mô hình SWAN

Các mô hình sóng được sử dụng trong nghiên cứu này là các mô hình sóng thể hệ thứ ba SWAN 41.31 (Mô phỏng sóng gần bờ (SWAN - Simulating Waves Nearshore); mô hình phổ sóng SWAN tính toán sự phát triển của phổ mật độ tác động N sử dụng phương trình cân bằng tác động (Booij và nnk., 1999 [15]):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}}[(\vec{c}_g + \vec{U})N] + \frac{\partial c_{gN}}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{\sigma N}}{\partial \sigma} = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (1)$$

Với

$$S_{tot} = S_{in} + S_{wc} + S_{n14} + S_{bot} + S_{brk} + S_{n13} \quad (2)$$

Về bên trái phương trình (1), các số hạng lần lượt biểu diễn sự thay đổi của mật độ tác động sóng theo thời gian, sự lan truyền của sóng theo địa lý không gian \vec{x} (với \vec{c}_g các véc tơ vận tốc nhóm sóng và \vec{U} – véc tơ dòng chảy), khúc xạ do độ sâu và do dòng chảy gây ra (với c_{θ} vận tốc lan truyền theo hướng không gian θ) và sự chuyển dịch của các tần số radian σ do sự thay đổi lấy trung bình của dòng chảy và độ sâu (với vận tốc lan truyền c_{σ}). Về bên phải biểu diễn cho quá trình thành tạo, tiêu tán hoặc phân phối lại năng lượng sóng. Trong nước sâu, ba số hạng nguồn phát được sử dụng. Đây là các chuyển giao năng lượng từ gió đến các con sóng, S_{in} , sự tiêu tán năng lượng sóng do sóng bạc đầu, S_{wc} , và chuyển đổi phi tuyến của năng lượng sóng do tương tác bộ bốn (bốn sóng),

S_{n14} . Trong vùng nước nông, tiêu tán do ma sát đáy, S_{bot} , độ sâu gây ra đồ vỡ, S_{brk} , và bộ ba tương tác phi tuyến (ba sóng), S_{n13} , cho ước lượng thêm vào. Chi tiết mở rộng trên công thức của các quá trình này có thể được tìm thấy trong: Ris (1997) [16], Booij và nnk. (1999) [15] và Holthuijsen (2007) [17].

Đối với bài toán được đặt ra hợp lý, điều kiện biên phải được cung cấp. Các thành phần sóng đến ở biên phía biển được quy định bởi một phổ hai chiều. Tại biên khép kín, ví dụ: các biên đường bờ biển và biên bên, năng lượng sóng tiêu tán được hấp thụ hoàn toàn và giữ lại trong các vùng địa lý tương ứng. Các biên trên và dưới trong không gian tần số được chỉ định bởi tương ứng σ_{min} và σ_{max} . Các biên này được hấp thụ đầy đủ, mặc dù phần đuôi chẵn đoán $\sigma-4$ được thêm vào trên tần số cắt cụt cao, được sử dụng để tính toán các thành phần phi tuyến tương tác sóng-sóng và tính toán toàn bộ các thông số sóng. Từ đó định hướng không gian là một vùng vòng tròn khép kín, không cần thiết có điều kiện biên.

2.1.2. FEM model

Các công trình nghiên cứu số trị cho mô hình thủy động lực học theo phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), được xây dựng và triển khai trong các công trình nghiên cứu của Bùi Hồng Long và Trần Văn Chung (2009 [18]). Đánh giá tính hợp lý của mô hình qua so sánh với số liệu thực tế tại các trạm mực nước trong nghiên cứu chế độ dòng chảy cho Vịnh Bắc Bộ (Trần Văn Chung và Bùi Hồng Long (2015) [19]). Trong đó, đáng chú ý là bước đầu thực hiện so sánh kết quả nghiên cứu về cấu trúc dòng chảy của hai mô hình FEM và mô hình Ecosmo và các kiểm chứng thực tế đo đạc tại vùng nghiên cứu Bình Cang - Nha Trang (Trần Văn Chung và Bùi Hồng Long (2014)) [20] đây là cơ sở dữ liệu dòng chảy đầu vào quan trọng cho việc chạy liên kết tương tác sóng- dòng trong mô hình cặp FEM-SWAN.

2.2. Cơ sở dữ liệu

Cơ sở dữ liệu chính của mô hình gồm:

(1) Trường độ sâu:

Trường độ sâu được cập nhật mới nhất trong khuôn khổ đề tài tỉnh Khánh Hòa: “Xác định các khu vực có khả năng cải tạo, phát triển bãi tắm nhân tạo và đề xuất các phương án bảo vệ bãi tắm tự nhiên trong vịnh Nha Trang” (2015 - 2016) với tỉ lệ 1/25.000 cho toàn vùng và 1/10.000 cho ven bờ.

(2) Thông tin trường chảy dòng chảy tầng mặt được trích xuất từ mô hình tính thủy động lực ba chiều theo phương pháp phần tử hữu hạn cho vùng biển Bình Cang - Nha Trang, với mạng lưới tính trùng với mạng lưới tính sóng theo công trình nghiên cứu được Trần Văn Chung và Bùi Hồng Long công bố năm 2014 [20] và được mô phỏng trên cơ sở cập nhật những dữ liệu nghiên cứu mới.

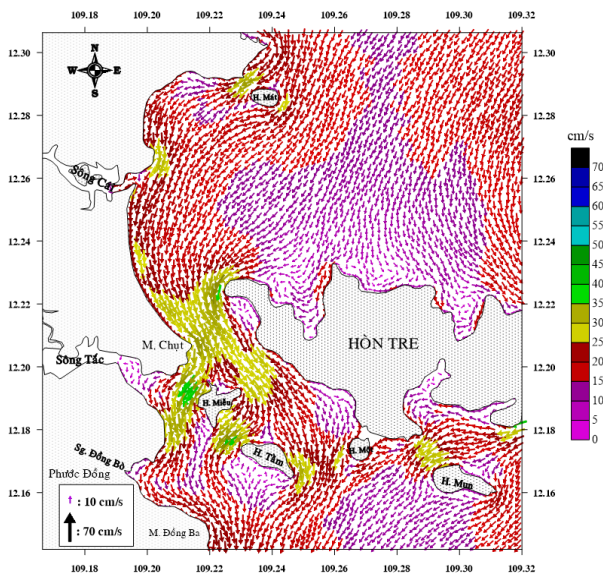
(3) Thông tin về đặc trưng sóng (độ cao, chu kỳ và hướng) tại biên ngoài khơi được cập nhật từ: http://oos.soest.hawaii.edu/erddap/grid-dap/NWW3_Global_Best.html với độ phân giải 0,5 độ theo từng giờ (số liệu tính thống kê từ ngày 07/11/ 2010 đến tháng 31/12/2019).

(4) Nguồn số liệu về vận tốc gió được cập nhật từ cơ sở dữ liệu tái phân tích của mô hình khí hậu toàn cầu CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) thuộc trung tâm dự báo môi trường NCEP (National Centers for Environmental Prediction) (NCEP CFSR) với tần suất mỗi giờ 01 số liệu. Với phiên bản 2 (NCEP CFSv2 - NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2)): số liệu được lấy từ năm 01/01/2011 đến 31/12/2019 là theo lưới $0,2^0$ theo phương ngang. Ngoài ra, để phân tích số liệu gió địa phương tại trạm Nha Trang, bài báo đã sử dụng nguồn số liệu gió tại các trạm đo khí tượng với chuỗi số liệu đo từ 1987 đến 2007, tần suất đo số liệu là 6 giờ một lần tại các giờ trong ngày 1, 7, 13, 19 giờ. Dưới đây là một vài kết quả phân tích từ dữ liệu gió có được:

3. Kết quả nghiên cứu

Kết quả tính toán các đặc trưng sóng theo dạng tương tác sóng tổng hợp với sự tác động đồng thời của trường gió, dòng chảy tầng mặt và độ cao bề mặt biển. Mô phỏng đầy đủ tương tác này sẽ làm sáng tỏ được chế độ sóng thực tế tại vùng biển Nha Trang, theo chế độ gió mùa với sự tác động tổng thể của các lực tạo sóng quan trọng. Từ đó có cái nhìn tổng quan về tác động sóng cũng như ảnh hưởng và tương tác qua lại giữa sóng - dòng trong quá trình thủy động lực trong vịnh.

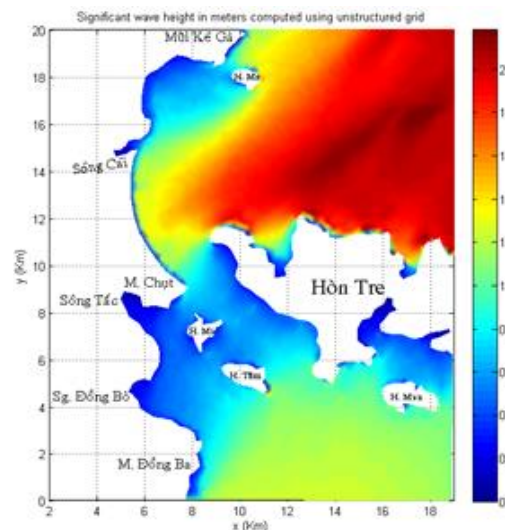
3.1. Trường sóng điển hình trong mùa gió Đông Bắc



Hình 5. Phân bố dòng chảy tầng mặt vào mùa gió Đông Bắc

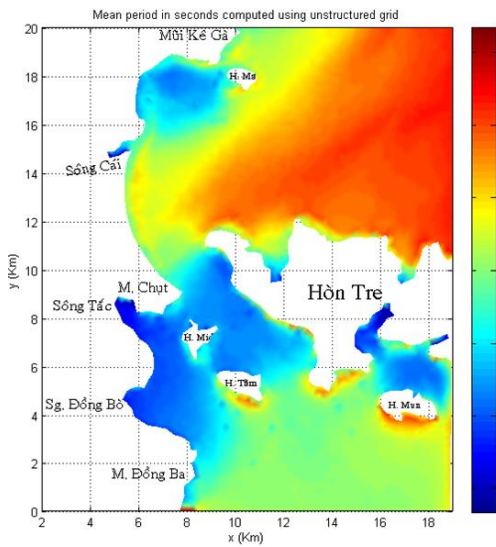
Về hình dạng phân bố có sự phân vùng độ cao sóng khá rõ rệt, phía bắc vịnh Nha Trang chịu tác động khá rõ của trường gió Đông Bắc và điểm che chắn phía nam của vịnh làm suy yếu trường sóng khi đi vào phía nam vịnh. Sự suy giảm sóng do tác động của che chắn địa hình là khá rõ ràng, chi tiết lan truyền độ cao sóng được thể hiện trên Hình 6, chu kỳ sóng Hình 7 và hướng sóng lan truyền Hình 8. Điểm đặc biệt cần lưu ý, mặc dù sóng phía ngoài bắc vịnh tương đối lớn nhưng mức độ ảnh hưởng khi đi vào vùng ven bờ bị tiêu tán và suy giảm

Hình 5 là kết quả phân tích dòng chảy trung bình tại tầng mặt tại khu vực Nha Trang vào mùa gió Đông Bắc bằng mô hình FEM. Đây là thông tin điều kiện ban đầu cho dòng chảy trong mô phỏng trường gió mùa Đông Bắc, trong nghiên cứu tương tác sóng - dòng trong mô hình SWAN. Ở công trình này, chúng tôi tập trung vào phân tích tính hợp lý của các quá trình lan truyền sóng do ảnh hưởng của dòng chảy. Bộ chương trình thể hiện các kết quả đặc trưng sóng (độ cao, chu kỳ và hướng sóng) được cải tiến và việt hóa từ bộ chương trình thể hiện kết quả tính của SWAN cho lưới phi cấu trúc trong chương trình mã nguồn mở Matlab “plotunswan.m”.

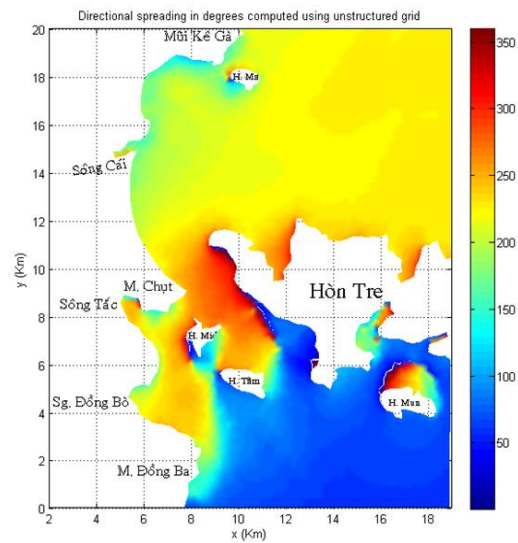


Hình 6. Độ cao sóng có nghĩa (m) trong tương tác sóng - dòng do ảnh hưởng mùa gió Đông Bắc

năng lượng sóng khá mạnh nên mức độ ảnh hưởng không còn lớn như phía ngoài khơi. Với sự tác động của yếu tố dòng chảy và mực nước hướng lan truyền sóng có sự đổi hướng so với hướng gió thuần túy, các kết quả mô phỏng cho thấy giá trị độ cao sóng lớn nhất trong mạng lưới tính đạt 2,18m với chu kỳ sóng 6,3s (độ cao sóng trung bình 1,0m, chu kỳ trung bình 3,7s) có độ sâu khoảng 26,1m, với hướng lan truyền sóng 224,7°, vị trí đạt độ cao sóng lớn nhất xung quanh vị trí (109,311996°E; 12,273005°N) (hình 6-8).

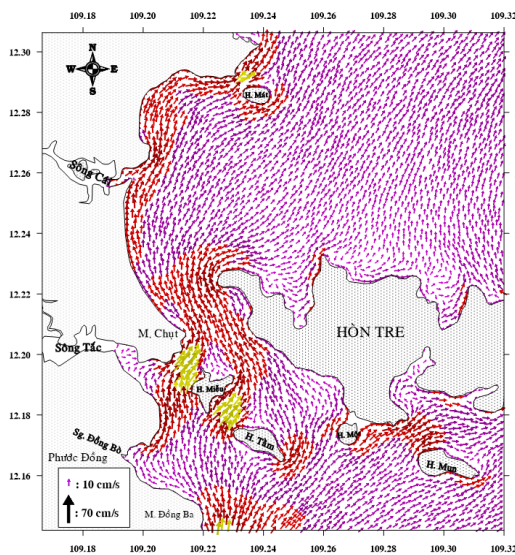


Hình 7. Chu kỳ trung bình (s) trong tương tác tổng hợp do ảnh hưởng mùa gió Đông Bắc

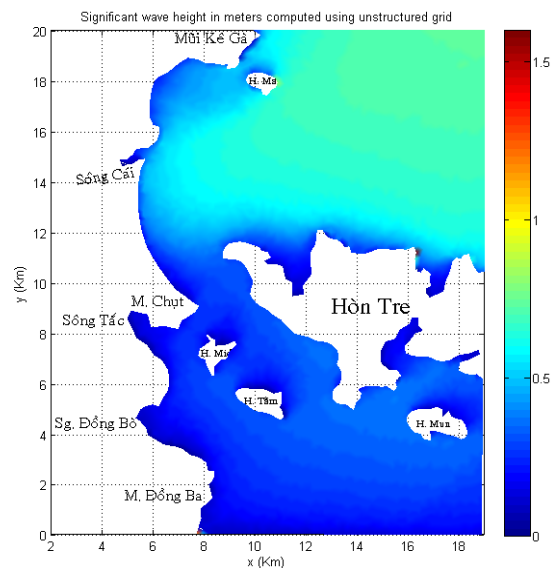


Hình 8. Hướng lan truyền sóng ($^{\circ}$) trong tương tác tổng hợp do ảnh hưởng mùa gió Đông Bắc

3.2. Trường sóng điển hình trong mùa gió Tây Nam



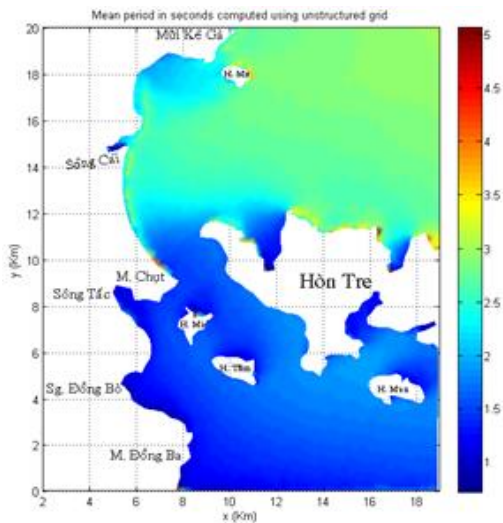
Hình 9. Phân bố dòng chảy tầng mặt vào mùa gió Tây Nam



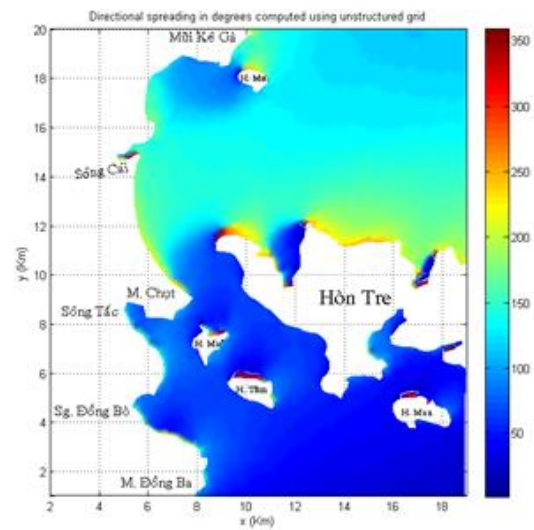
Hình 10. Độ cao sóng có nghĩa (m) trong tương tác sóng - dòng do ảnh hưởng mùa gió Tây Nam

Theo kết quả mô phỏng, trong mùa gió Tây Nam với sóng tác động đến vịnh Nha Trang là không đáng kể. Kết quả mô phỏng thể hiện khá chi tiết về độ cao lan truyền sóng có nghĩa trên Hình 10, chu kỳ sóng trên Hình 11 và hướng lan truyền trên Hình 12. Nói chung, vịnh Nha Trang là vịnh kín nên các yếu tố tác động sóng ảnh hưởng đến biến đổi đường bờ là không lớn.

Thông tin về sóng trong mùa gió Tây Nam đáng chú ý như sau: độ cao sóng có nghĩa lớn nhất trong mạng lưới tính đạt 1,4m, chu kỳ sóng 5,1s (trung bình độ cao sóng 0,4m, chu kỳ sóng trung bình 2,1s) với hướng lan truyền sóng đạt độ cao sóng lớn nhất là $211,5^{\circ}$ ở khu vực có độ sâu khoảng 3,8m xung quanh vị trí ($109,298725^{\circ}E$; $12,226684^{\circ}N$) (Hình 10 - 12).



Hình 11. Chu kỳ trung bình (s) trong tương tác tổng hợp do ảnh hưởng mùa gió Tây Nam



Hình 12. Hướng lan truyền sóng (°) trong tương tác tổng hợp do ảnh hưởng mùa gió Tây Nam

3.3. So sánh kết quả tính toán và số liệu thực đo ngoài hiện trường

Để kiểm tra tính đúng đắn của mô hình FEM, công trình của Trần Văn Chung và Bùi Hồng Long (2014) [28] đã thực hiện các so sánh với số liệu thực đo dòng chảy trong vùng nghiên cứu. Trong công trình này, để kiểm chứng và hiệu chỉnh mô hình thông qua môi tương tác sóng - dòng, các kết quả khảo sát

đồng thời được thực hiện trên máy đo sóng - dòng tại 20 trạm mặt rộng (từ ngày 7-9/9/2018) và 01 trạm liên tục (11-12/09/2018) trong vịnh Nha Trang, thể hiện ở Hình 4. So sánh kết quả nghiên cứu của mô hình với các trạm đo kiểm tra tính khả thi của mô hình trong ứng dụng tại vịnh Nha Trang (Bảng 1).

Bảng 1: So sánh một số kết quả tính toán và đo đạc hiện trường tại các trạm đo sóng điển hình

Trạm	Độ cao sóng có nghĩa			Chu kỳ trung bình sóng			Hướng lan truyền sóng		
	Đo đạc (m)	Tính toán (m)	Sai số tương đối (%)	Đo đạc (s)	Tính toán (s)	Sai số tương đối (%)	Đo đạc (°)	Tính toán (°)	Độ lệch (°)
3	0,47	0,49	4,7	4,81	4,09	15,1	275,42	272,10	3,3
7	0,67	0,57	14,6	1,73	2,20	27,2	124,69	108,84	15,9
6	0,42	0,50	18,1	5,06	4,08	19,4	0,63	341,80	18,8
Lt	0,2	0,20	2,6	3,62	3,24	10,3	84,13	82,22	1,9

4. Nhận xét và thảo luận

Tác động của sóng đến vịnh Nha Trang thường không lớn. Để đánh giá tác động sóng tổng hợp, chúng tôi đã nghiên cứu ảnh hưởng tác động của trường gió, dòng chảy tầng mặt lên tác động sóng nhằm đánh giá đúng tác động sóng lên khu vực ven bờ vịnh Nha Trang. Theo kết quả nghiên cứu, khi khu vực chịu tác động của mùa gió Đông Bắc, độ cao sóng có nghĩa trung bình cũng chỉ đạt 1,0m, chu kỳ trung bình 3,7s. Trong mùa gió Tây Nam thì ảnh hưởng của sóng là không đáng kể, khi độ cao sóng có

nghĩa trung bình độ cao sóng 0,4m, chu kỳ sóng trung bình 2,1s. So sánh kết quả tính toán với thực tế, sai số tương đối trung bình khoảng 10% (thấp nhất 2,6% và lớn nhất 18,1%) cho độ cao sóng có nghĩa và trung bình khoảng 18% (thấp nhất 10,3% và lớn nhất 27,2%) cho chu kỳ sóng trung bình. Độ lệch hướng sóng giữa tính toán và đo đạc trung bình khoảng 10° (thấp nhất 1,9° và lớn nhất 18,8°) cho hướng lan truyền sóng.

Các ứng dụng mô hình sóng SWAN thể hiện khả năng mô phỏng các trường sóng trên vùng

biển thêm lục địa, đầm và cửa sông ven biển mà điển hình được chứng minh trong công trình này với vùng biển với nhiều đảo lớn nhỏ, biên mở phức tạp trong vịnh Nha Trang một cách hiệu quả và ổn định. Đồng thời các ứng dụng cũng đủ linh hoạt để cho phép liên kết chặt chẽ cùng hệ thống mạng lưới với mô hình dòng chảy FEM (mô hình dòng chảy ba chiều phi tuyến theo phương pháp phần tử hữu hạn). Điều này rất hữu ích trong giải quyết bài toán tương tác sóng - dòng và sóng - sóng. Những kết quả nghiên cứu đã cho thấy, cách tiếp cận ứng dụng mô hình tính sóng này là hợp lý, ổn định cho bước thời gian bất kỳ cho mạng lưới làm mịn, mang đặc trưng địa phương trong vùng nghiên cứu.

Lời cảm ơn: Bài báo đã sử dụng nguồn tài liệu từ đề tài mã số VAST06.03/18-19 “Nghiên cứu cơ chế lưu giữ lại và quá trình phát tán của nguồn giống cá (trứng cá - cá bột) trong vịnh Nha Trang” và đề tài với tỉnh Khánh Hòa: “Xác định các khu vực có khả năng cải tạo, phát triển bãi tắm nhân tạo và đề xuất các phương án bảo vệ bãi tắm tự nhiên trong vịnh Nha Trang” (2015 - 2016). Các tác giả xin gửi lời cảm ơn chân thành đến Ban chủ nhiệm đề tài và đồng nghiệp trong nhóm nghiên cứu đã góp ý và hỗ trợ chúng tôi hoàn thành bài báo này.

Tài liệu tham khảo

[1] Rodriguez, A., Sanchez-Arcilla, A., Redondo, J.M., Bahia, E., Sierra, J.P. 1995. Pollutant dispersion in the nearshore region: modelling and measurements. *Water Sci. Technol.*, 32, pp. 169-178.

[2] Li, Z., Johns. B., 1998. A three-dimensional numerical model of surface waves in the surf zone and longshore current generation over a plane beach. *Estuar. Coast Shelf Sci.*, 47, pp. 395-413.

[3] Bever, A.J., MacWilliams, M.L., 2013. Simulating sediment transport processes in San Pablo Bay using coupled hydrodynamic, wave, and sediment transport models. *Mar. Geol.*, 345, pp. 235-253.

[4] Olabarrieta, M., Warner, J.C., Kumar, N., 2011. Wave-current interaction in willapa bay. *J. Geophys. Res.*, 116.

[5] Roland, A., Zhang, Y.J., Wang, H.V., Meng, Y., Teng, Y.-C., Maderich, V., Brovchenko, I., Dutour-Sikiric, M., Zanke, U., 2012. A fully coupled 3D wave-current interaction model on unstructured grids. *J. Geophys. Res.*, 117.

[6] Benetazzo, A., Carniel, S., Sclavo, M., Bergamasco, A., 2013. Wave-current interaction: effect on the

wave field in a semi-enclosed basin. *Ocean Model.*, 70, pp. 152-165.

[7] Longuet-Higgins, M.S., 1970. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves. *J. Geophys. Res.*, 75 (33), pp. 6778-6789.

[8] Garcez-Faria, A.F., Thornton, E.B., Lippmann, T.C., Stanton, T.P., 2000. Undertow over a barred beach. *J. Geophys. Res.*, 105 (C7), pp. 16999-17010.

[9] Longuet-Higgins, M.S., Stewart, R.W., 1964. Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications. *Deep Sea Res. Oceanogr. Abstr.*, 11 (4), pp. 529-562.

[10] Guza, R.T., Thornton, E.B., 1981. Wave set-up on a natural beach. *J. Geophys. Res.*, 86 (C5), pp. 4133-4137.

[11] Dutour-Sikiric, M., Roland, A., Janekovic, I., Tomazic, I., Kuzmic, M., 2013. Coupling of the Regional Ocean modeling system (ROMS) and wind wave model. *Ocean Model.*, 72, pp. 59-73.

[12] Allard, R., Rogers, E., Martin, P., Jensen, T., Chu, P., Campbell, T., Dykes, J., Smith, T., Choi, J., Gravois, U., 2014. The US navy coupled ocean-wave prediction system. *Ocean*, 27 (3), pp. 93-103.

[13] Trần Văn Chung, Nguyễn Trương Thanh Hội, Trần Văn Bình, Tô Duy Thái và Ngô Mạnh Tiến, 2015. Tính toán thử nghiệm các đặc trưng sóng ở khu vực Đầm Báy (vịnh Nha Trang) bằng mô hình SWAN trên lưới phi cấu trúc. *Tuyên tập nghiên cứu biển, tập 21, số 2. Chuyên đề về vịnh Nha Trang, tỉnh Khánh Hòa*, 13-20.

[14] Trần Văn Chung, Nguyễn Hữu Huân, Nguyễn Trương Thanh Hội, 2016. Tính toán các đặc trưng sóng ở khu vực Ninh Thuận – Bình Thuận bằng mô hình SWAN trên lưới phi cấu trúc. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ biển, Hà Nội*. 16(2), ISSN 1859 - 3097, 107 - 114.

[15] Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H., 1999. A third-generation wave model for coastal regions. Part I: Model description and validation. *J. Geophys. Res.*, 104 (C4) (1999), pp. 7649-7666.

[16] Ris, R. C., Holthuijsen, L. H., and Booij, N., 1999. A third-generation wave model for coastal regions: 2. Verification. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 104(C4): 7667-7681.

[17] Holthuijsen, L. H., 2010. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press. 404 p.

[18] Bui Hong Long, Tran Van Chung, 2009 (online 2010). Calculations of tidal currents in Vanphong bay using the finite element method. *Advances in Natural Science*, Vol 10, No. 4, 495-478

[19] Trần Văn Chung, Bùi Hồng Long, 2015. Một số kết quả tính toán dòng chảy trong Vịnh Bắc Bộ bằng mô hình ba chiều phi tuyến. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ biển, Hà Nội*, 15(4), ISSN 1859 - 3097, 320 - 333.

[20] Trần Văn Chung, Bùi Hồng Long, 2014. Đặc trưng thủy động lực vực nước Bình Cang - Nha Trang qua mô hình FEM và ECOSMO. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ biển, Hà Nội*, 14(4), ISSN 1859-3097, 320 - 331.