



ESTIMATION OF WAVE CHARACTERISTICS IN THE COASTAL WATERS OF VIETNAM USING ERA-INTERIM MODEL DATA

Vu Minh Tuan¹, Nguyen Viet Thanh^{2*}, Bach Duong¹, Vu Quoc Hung¹

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

²University of Transport and Communications, No.3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 28/03/2022

Revised: 06/06/2022

Accepted: 09/06/2022

Published online: 15/06/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.5.9>

* *Corresponding author*

Email: vietthanh@utc.edu.vn; Tel: +84913080860

Abstract. Parameters of wave height, wave period and wave direction are essential factors in the design of marine structures, but not all sea areas have all these parameters. Especially along the coast of our country, there is no long-term hydro meteorological monitoring station to be able to obtain the above set of wave parameters. On the other hand, most design waves are calculated based on the methods specified in the technical standards. To facilitate the application, in this paper, authors use wave data from the ERA-Interim global atmospheric reanalysis model developed by The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). In the ERA-Interim model, the wave field in the Vietnam East Sea is simulated and re-analyzed, so it is necessary to study the wave characteristics along the coast of Vietnam as well as the relationship between those characteristics based on wave data extracted over a 41-year time series from 1979 to 2014. Based on wave data, the authors calculated, tabulated statistics and established relationships between wave characteristics for 6 typical coastal regions of our country.

Keywords: ERA-Interim, Vietnam coastal water, Significant wave height, Mean wave period, Monsoon.



ĐÁNH GIÁ CÁC ĐẶC TRƯNG SÓNG VÙNG VEN BIỂN VIỆT NAM SỬ DỤNG DỮ LIỆU MÔ HÌNH ERA-INTERIM

Vũ Minh Tuấn¹, Nguyễn Viết Thanh^{2*}, Bạch Dương¹, Vũ Quốc Hưng¹

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

²Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 28/03/2022

Ngày nhận bài sửa: 06/06/2022

Ngày chấp nhận đăng: 09/06/2022

Ngày xuất bản Online: 15/06/2022

<https://doi.org/10.47869/tcsj.73.5.9>

* Tác giả liên hệ

Email: vietthanh@utc.edu.vn; Tel: +84913080860

Tóm tắt. Các thông số chiều cao, chu kỳ và hướng sóng là các yếu tố rất cần thiết trong thiết kế các công trình biển, tuy nhiên không phải vùng biển nào cũng có đầy đủ các thông số trên. Đặc biệt ven biển nước ta chưa không có trạm quan trắc dài kỳ nào để có thể thu được bộ thông số trên. Mặt khác, hầu hết sóng thiết kế được tính toán dựa vào các phương pháp được chỉ dẫn trong các tiêu chuẩn kỹ thuật. Để thuận lợi cho việc ứng dụng bài báo này sử dụng các số liệu sóng từ mô hình tái phân tích khí quyển toàn cầu ERA-Interim được phát triển bởi Trung tâm dự báo thời tiết hạn vừa Châu Âu (ECMWF). Trong mô hình ERA-Interim, trường sóng trên Biển Đông được mô phỏng và tái phân tích, do đó cần phải nghiên cứu các đặc trưng sóng dọc bờ biển Việt Nam cũng như mối quan hệ giữa các đặc trưng đó dựa trên dữ liệu sóng được trích xuất theo chuỗi thời gian 41 năm từ năm 1979 đến 2014. Dựa trên cơ sở dữ liệu về sóng, các tác giả đã tiến hành tính toán, lập bảng biểu thống kê và thiết lập mối quan hệ giữa các đặc trưng sóng cho 6 vùng ven biển điển hình của nước ta.

Từ khóa ERA-Interim, Vùng ven biển Việt Nam, Chiều cao sóng ý nghĩa, Chu kỳ sóng trung bình, Gió mùa.

©2022 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. MỞ ĐẦU

Việt Nam nằm ở Đông Nam châu Á và phía bờ Tây của Biển Đông, có bờ biển dài trên 3.200 km, kéo từ Móng Cái (Quảng Ninh) ở phía Đông Bắc xuống tới Hà Tiên (Kiên Giang) ở phía Tây Nam. Việt Nam có 28 tỉnh thành phố nằm dọc theo đường bờ biển. Vùng ven biển

có vai trò quan trọng trong nền kinh tế Việt Nam thông qua các dịch vụ cảng biển, đánh bắt hải sản, du lịch, nuôi trồng thủy sản, công nghiệp năng lượng và bảo vệ môi trường. Đặc biệt, trong bối cảnh nhiệt độ trái đất tăng lên và mực nước biển dâng do biến đổi khí hậu toàn cầu, việc khai thác sử dụng các nguồn năng lượng tái tạo từ vùng ven biển đang trở thành một trong những giải pháp cốt lõi trong việc đảm bảo an ninh năng lượng, bảo vệ môi trường và phát triển bền vững của nước ta. Đặc điểm sóng là yếu tố chính trong các quá trình động lực hải văn vùng ven biển và có tác động mạnh mẽ đến các hoạt động kinh tế cũng như bảo vệ môi trường. Vì vậy, việc xác định đặc điểm sóng vùng ven biển đóng vai trò quan trọng không chỉ trong việc thiết kế và thi công các công trình biển, mà còn phục vụ các hoạt động kinh tế - xã hội khác.

Để có được chế độ sóng tại khu vực nghiên cứu, phương pháp tốt nhất là đo đạc trực tiếp tại hiện trường bằng các thiết bị có độ chính xác cao và cho phép đo các thông số sóng trên cơ sở điểm – điểm và do đó rất phù hợp với các khu vực có trường sóng phân bố đồng đều về mặt không gian. Tuy nhiên, ở các khu vực ven biển với đường bờ khúc khuỷu và nhiều vịnh, đảo có trường sóng biển phân bố không đều về mặt không gian hoặc các khu vực ngoài khơi, việc đặt hoặc duy trì các thiết bị đo sóng tại chỗ có thể là một nhiệm vụ đầy thách thức. Mặc dù hiện nay, Việt Nam đã phát triển được 26 trạm đo sóng trên các điểm đảo và vùng ven biển, nhưng dữ liệu của sóng tại rất nhiều trạm chỉ có chiều cao sóng và hướng sóng. Việc thiếu dữ liệu về chu kỳ sóng thực đo đã gây nhiều khó khăn trong việc xác định các đặc trưng sóng của từng vùng biển cũng như việc tính toán lan truyền sóng từ ngoài khơi vào bờ, cũng là một trong những nội dung rất quan trọng trong khi thiết kế và thi công các công trình biển. Trong trường hợp này, công nghệ viễn thám (radar tần số cao (HFR) và thiết bị đo cao vệ tinh (SA) có thể khắc phục một số hạn chế của thiết bị đo hiện trường và có thể cung cấp cái nhìn tổng quát về trường sóng với chi phí hợp lý [1]. Tuy nhiên, các phép đo SA có thể kém chính xác hơn khi sóng nằm trong khu vực gần đường bờ biển, do các thuật giải đoán ảnh vệ tinh khó phân biệt đường bờ giữa các vùng đất/nước [2]. Bên cạnh đó, cách này vẫn còn hạn chế ở Việt Nam do cần trang thiết bị hiện đại (hệ thống HFR) và tài chính. Một hướng tiếp cận hiệu quả và kinh tế đối với nước ta, đó là khai thác các dữ liệu sóng từ các mô hình tái phân tích tin cậy. Hiện nay, Tại Việt Nam, các nghiên cứu về khai thác các nguồn dữ liệu này cũng đã được nhiều nghiên cứu thực hiện [3- 9]. Tuy nhiên, đa số các nghiên cứu này sử dụng các dữ liệu của mô hình sóng toàn cầu WAVEWATCH III của Cơ quan quản lý khí quyển và đại dương Hoa Kỳ (NOAA) mới dừng ở việc đánh giá các đặc trưng sóng cho toàn bộ Biển Đông hoặc chỉ một vùng biển cụ thể. Đặc trưng sóng cũng như quan hệ giữa các đặc trưng sóng cho các khu vực ven biển nước ta vẫn chưa được nghiên cứu nhiều.

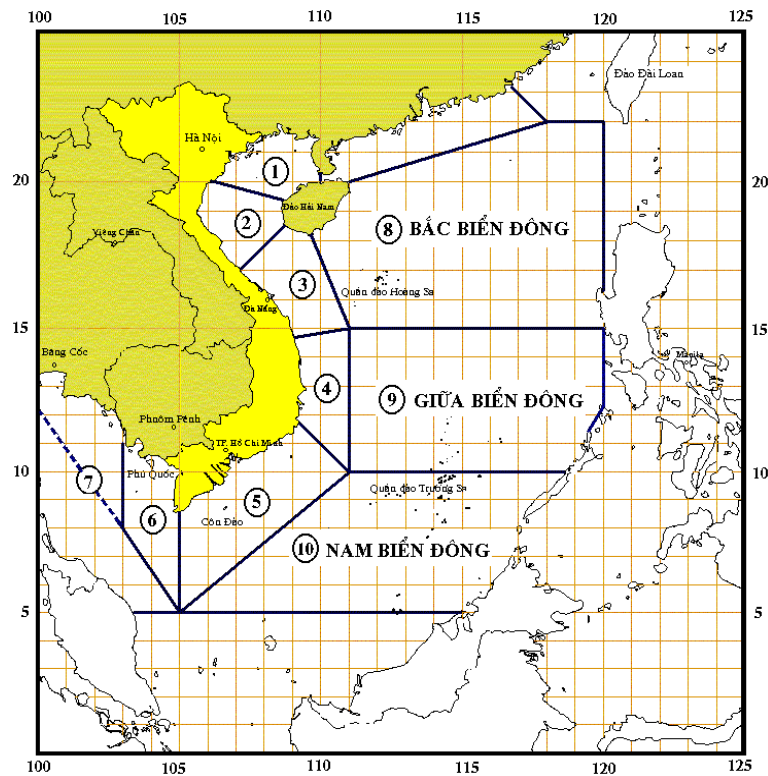
Một trong những mô hình tái phân tích phổ dụng trên thế giới đó là mô hình tái phân tích ERA-Interim của Trung tâm dự báo thời tiết hạn vừa Châu Âu (ECMWF). Rất nhiều nhà nghiên cứu đã đánh giá độ chính xác của mô hình này cũng như ứng dụng nó để làm rõ các đặc điểm sóng ở các vùng biển khác nhau. Cụ thể, Kumar và cộng sự tiến hành so sánh chiều cao sóng ý nghĩa và chu kỳ sóng trung bình trích xuất từ mô hình ERA-Interim với sóng thực đo tại sáu vị trí nước nông dọc bờ biển Ấn Độ [10]. Imani và cộng sự đã sử dụng dữ liệu sóng của mô hình ERA-Interim để làm rõ các đặc trưng sóng của vùng biển phía nam biển Caspian [11]. Năm 2017, Zikra và cộng sự đã sử dụng dữ liệu sóng mô hình ERA-Interim được thu thập trong 35 năm (1980-2014) để đánh giá sơ bộ về năng lượng sóng của các vùng biển xung quanh Indonesia [12]. Bằng phương pháp tương tự, Rusu và cộng sự đã xác định được những khu vực tiềm năng nhất cho việc phát triển các dự án điện gió tại vùng biển Bắc của Đức [13]. Gần đây, Shi và cộng sự sử dụng dữ liệu sóng thực đo tại tám trạm ven bờ biển Trung Quốc để đánh giá bộ dữ liệu sóng của mô hình ERA-Interim [14]. Do vậy, trong bài báo này, các dữ

liệu trích xuất từ mô hình tái phân tích khí quyển toàn cầu ERA-Interim sẽ được sử dụng để đánh giá các đặc điểm sóng cho các khu vực ven biển nước ta cũng như xác lập mối quan hệ giữa các đặc trưng sóng cho từng khu vực ($H_s \sim T_m$).

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Dựa trên đặc điểm địa hình, địa mạo và điều kiện tự nhiên, khu vực ven biển Việt Nam được chia thành 6 khu vực (Hình 1) như sau [6, 8, 15]:

- Vùng 1: Khu vực biển vịnh Bắc Bộ (từ Quảng Ninh đến Thanh Hóa);
- Vùng 2: Khu vực biển Bắc Trung Bộ (từ Nghệ An đến Quảng Bình);
- Vùng 3: Khu vực biển Trung Trung Bộ (từ Quảng Trị đến Quảng Nam);
- Vùng 4: Khu vực biển Nam Trung Bộ (từ Quảng Ngãi đến Ninh Thuận);
- Vùng 5: Khu vực biển Nam Bộ (từ Bình Thuận đến Cà Mau);
- Vùng 6: Khu vực biển vịnh Thái Lan (từ Cà Mau đến Kiên Giang).



Hình 1. Sơ đồ phân vùng sóng biển và bão trên Biển Đông.

Dữ liệu sóng ERA-Interim là dữ liệu sóng tái phân tích toàn cầu mô phỏng và có sẵn trên trang ECMWF ở định dạng GRIB hoặc định dạng NetCDF trên lưới Gauss với độ phân giải không gian tối đa $0,125^\circ \times 0,125^\circ$ tương đương với khoảng 14km và độ phân giải theo thời gian là 6 giờ trong giai đoạn 41 năm từ tháng 01/1979 cho đến tháng 8/2019. Mô hình này được thực hiện để thay thế dự án tái phân tích khí quyển trước đó ERA-40. Nội suy cho lưới thông thường đã bị loại bỏ để giữ độ chính xác của dữ liệu. Mô hình ERA-Interim cung cấp các tham số sóng bao gồm chiều cao sóng ý nghĩa (H_s), chu kỳ sóng trung bình (T_m) và

hướng sóng trung bình (MWD). Trong bước đầu tiên, dữ liệu sóng mô hình theo từng tháng sẽ được thu thập từ nguồn: (<https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/>). Bước thứ hai là xác định phạm vi mảng dữ liệu 2D được giới hạn bởi kinh độ và vĩ độ. Bởi vì dữ liệu chứa trong các tệp NetCDF dưới dạng mảng 2D rộng cho toàn bộ khu vực (Nam Á, Châu Âu, Bắc Mỹ, Thái Bình Dương,...) do vậy cần tiến hành cắt, gọt vùng dữ liệu quan tâm theo tọa độ và tham số sóng bằng mô đun mã nguồn mở mà đã được các tác giả lập ra để chạy trong phần mềm Matlab. Bước tiếp theo đó là trích xuất dữ liệu sóng cho điểm trong từng vùng ven biển Việt Nam nêu trên từ các tệp NetCDF đã được cắt gọt cũng bằng cách sử dụng mã nguồn mở chạy trong phần mềm Matlab. Dữ liệu sóng sau khi trích xuất sẽ được lưu trữ dưới tệp tin định dạng *dfs0 mà có thể được mở bằng phần mềm MIKE 21. Bước cuối cùng là tổng hợp và phân tích thống kê các dữ liệu sóng được trích xuất thông qua mã nguồn mở chạy trong phần mềm Matlab.

Ngoài ra, các hàm quan hệ giữa các đặc trưng sóng ($H_s \sim T_m$) được xác định bằng hộp công cụ điều chỉnh đường cong (curve fitting toolbox) trong MatLab. Hộp công cụ này sử dụng công thức bình phương tối thiểu phi tuyến để phù hợp mô hình phi tuyến với dữ liệu sóng ECMWF thông qua các tham số điều chỉnh. Việc điều chỉnh các thông số này dựa trên các giá trị được tính toán trực tiếp phù hợp với điều kiện khu vực cũng như các giá trị được các nhà nghiên cứu trước đó khuyến nghị [3, 4, 16, 17]. Sự phù hợp của các hàm quan hệ với dữ liệu sóng mô hình ECMWF được đánh giá thông qua hệ số xác định (R^2) và sai số trung bình bình phương thấp nhất (RMSE) dựa trên thuật toán Levenberg-Marquardt. Ngoài ra, các hàm tương quan này sẽ được kiểm chứng bằng việc so sánh với dữ liệu sóng thực đo tại ngoài khơi bờ biển Nha Trang (vùng IV) vào tháng 7/2020 và Cửa Lò (vùng II) vào tháng 11/2016 [18].

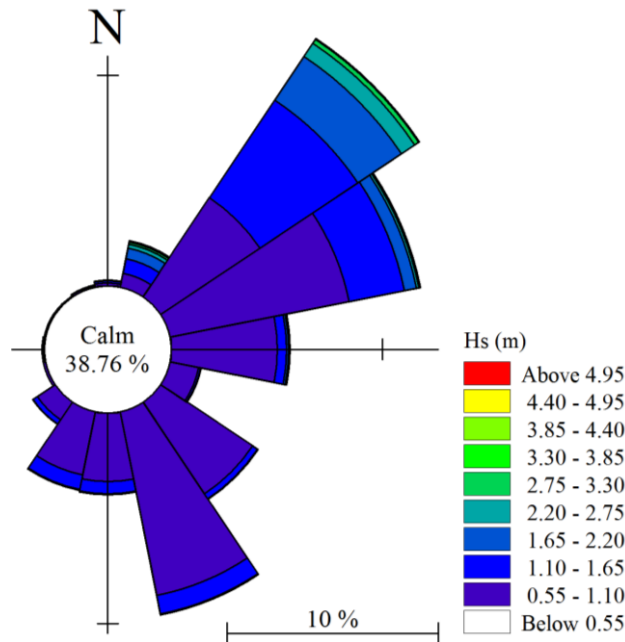
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Đặc điểm sóng khu vực biển vịnh Bắc Bộ (từ Quảng Ninh đến Thanh Hóa)

Khu vực biển từ tỉnh Quảng Ninh đến tỉnh Thanh Hóa nằm trong vịnh Bắc Bộ và được che chắn bởi đảo Hải Nam và bán đảo Lô Châu (Trung Quốc). Vịnh Bắc Bộ là vịnh tương đối nông, độ sâu trung bình khoảng 40-50m, nơi sâu nhất khoảng 100m. Đáy biển khu vực tương đối bằng phẳng và độ dốc nhỏ. Thêm lục địa thuộc phần kéo dài tự nhiên của lục địa Việt Nam ra biển khá rộng, độ dốc thoải và có một lòng máng sâu trên 70m gần đảo Hải Nam (Trung Quốc). Đây cũng là khu vực biển có số lượng các quần đảo và đảo lớn, nhỏ nhiều nhất ở Việt Nam như quần đảo Vân Hải, Cát Bà, Cô Tô, trong đó đảo Bạch Long Vĩ diện tích khoảng 2,5km² nằm cách xa đất liền nhất. Vịnh Bắc Bộ có hai cửa thông với bên ngoài. Cửa phía nam ra trung tâm Biển Đông, nơi hẹp nhất rộng khoảng 240km. Cửa phía đông qua eo biển Quỳnh Châu (nằm giữa bán đảo Lô Châu và đảo Hải Nam) ra phía bắc Biển Đông, nơi hẹp nhất khoảng 18km. Do vậy, chế độ sóng, gió vùng biển này không quá phức tạp. Sóng ở đây chủ yếu được hình thành trong vùng nước kín với đà gió bị hạn chế đối với các sóng đến từ hướng Bắc Đông Bắc đến hướng Đông Đông Nam. Ngược lại, các sóng đến từ hướng Đông Đông Nam đến Nam có đà gió không bị hạn chế [8].

Từ dữ liệu sóng của mô hình ERA-Interim (ECMWF), các tham số sóng tại điểm nằm ngoài khơi bờ biển Nam Định có tọa độ (20°00'00"N, 106°15'00"E) được trích xuất từ tháng 01/1979 đến 08/2019. Biểu đồ hoa sóng được vẽ và thể hiện trên Hình 2. Dễ dàng nhận thấy rằng có ba hướng sóng chủ đạo là Đông Bắc (NE), Đông Đông Bắc (ENE) và Nam Đông

Nam (SSE) tiếp cận khu vực biển này. Trong số các hướng này, hướng NE xuất hiện những cơn sóng có chiều cao lớn nhất tác động đến khu vực.



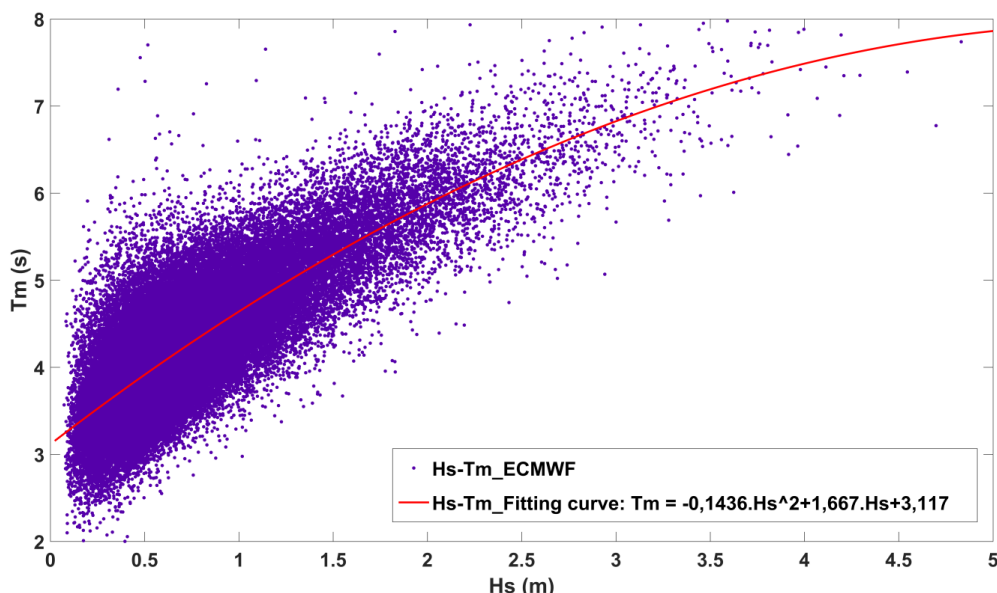
Hình 2. Biểu đồ hoa sóng khu vực từ Quảng Ninh đến Thanh Hóa.

Bảng chỉ ra rằng gần 87,2% sóng có chiều cao đáng kể nhỏ hơn 1,25 m và chỉ có 0,89% sóng có H_s trên 2,5 m. Chiều cao sóng có ý nghĩa lớn nhất xuất hiện được lên tới 5,06 m tương ứng với chu kỳ sóng là 7,78 s và phương truyền sóng là 48 độ. Hơn nữa, bảng này cũng tiết lộ rằng các sóng đến từ ba hướng chính. Hướng thường xuyên nhất là sóng ENE với khoảng 16,55% tổng chế độ. Chúng là sóng có năng lượng trung bình với chiều cao từ 0,5 đến 1,25 m chiếm tới 86% các trường hợp. Hướng thường xuyên thứ hai là NE với tần suất 16,0%. Hướng sóng thứ ba hay tác động đến khu vực vịnh Bắc Bộ là sóng hướng SSE với tần suất 15,59%. Dễ dàng thấy rằng trong ba hướng sóng thường xuyên ảnh hưởng đến khu vực, hướng sóng NE có chiều cao lớn nhất với chiều cao sóng lớn hơn 2,5m và có tần suất xuất hiện 0,49%. Chiều cao sóng ý nghĩa thống kê từ dữ liệu sóng là 1,28m với chu kỳ sóng 5,4s.

Hơn nữa, phân tích thống kê từ năm 1979 đến năm 2019 cũng được thực hiện để xác định tác động của gió mùa. Các thông số sóng (chiều cao và chu kỳ theo hướng) trong từng tháng được phân tích. Có thể thấy rõ rằng sóng NE thường xuyên và chủ yếu xuất hiện vào mùa đông (tháng 10, 11, 12, 1 và 2), trong khi các sóng SSE và SE được quan sát vào mùa hè (tháng 3, 4, 5, 6, 7 và 8). Các sóng cao NE thường xuất hiện với tần suất cao nhất 31,25% vào tháng 1, trong khi các sóng SSE cao chủ yếu hoạt động vào tháng 5 với tần suất cao nhất 33,75%.

Từ dữ liệu sóng mô hình được trích xuất, đường tương quan phổ biến nhất được xây dựng cho tất cả các hướng sóng trong vùng biển vịnh Bắc Bộ. Kết quả được thể hiện trên Hình 3. Biểu thức quan hệ giữa ($H_s \sim T_m$) (1) cung cấp kết quả phù hợp nhất với dữ liệu sóng trích xuất với hệ số xác định tốt $R^2 = 0,63$ và sai số RMSE = 0,48.

$$T_m = -0,1436H_s^2 + 1,667H_s + 3,117 \quad (1)$$



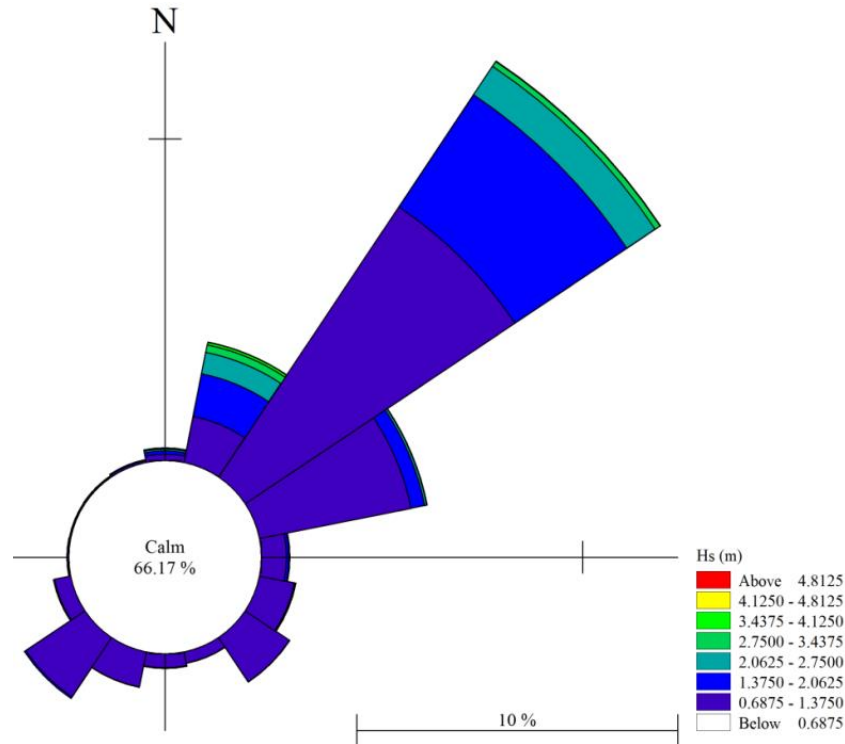
Hình 3. Quan hệ giữa chiều cao sóng và chu kỳ sóng ở khu vực biển vịnh Bắc Bộ.

3.2. Đặc điểm sóng khu vực biển Bắc Trung Bộ (từ Nghệ An đến Quảng Bình)

Khu vực biển từ Nghệ An đến Quảng Bình có đặc điểm địa hình, địa mạo gần tương tự như khu vực vịnh Bắc Bộ, cụ thể là có đả gió hạn chế đối với các sóng từ Bắc đến Đông Đông Bắc nhưng không hạn chế với các sóng hướng Đông Đông Nam đến Nam Đông Nam [8]. Nhìn chung, đáy biển khu vực này khá bằng phẳng, độ dốc không lớn. Đường đồng sâu 20m và 50m nằm cách bờ khá xa [15]. Dữ liệu sóng của điểm có tọa độ (18°36'00"N 105°52'33,6"E) nằm phía ngoài khơi bờ biển Hà Tĩnh được trích xuất từ mô hình ERA-Interim (ECMWF). Chuỗi dữ liệu sóng này từ 01/1979 đến 08/2019. Biểu đồ hoa sóng tại điểm trích xuất được vẽ và thể hiện trên Hình 4. Vì vị trí của điểm này nằm ngay ở cửa vịnh Bắc Bộ, do vậy đặc tính sóng của khu vực này tương đối khác với sóng ở khu vực vịnh Bắc Bộ. Hướng sóng thống trị trong năm là Đông Bắc (NE) và đây cũng là hướng sóng có chiều cao lớn nhất tác động đến khu vực.

Kết quả tính toán các đặc trưng thống kê sóng cho năm theo độ cao và hướng trong chuỗi số liệu 41 năm (1979 - 2019) cho thấy, tại vùng biển Bắc Trung Bộ, sóng hướng NE chiếm tỷ lệ lớn nhất khoảng 20,13%, trong khi đó hướng ENE và hướng SE lần lượt chiếm tần suất 15,07% và 12,9%. Chiều cao sóng sóng ý nghĩa trong chuỗi số liệu là 1, 2m với chu kỳ sóng 5,0s. Trong đó sóng có chiều cao dưới 2,5 m chiếm 99,0% (Bảng 2). Sóng cao nhất đạt 5,21m với chu kỳ 7,87s xuất hiện trong hướng NNE.

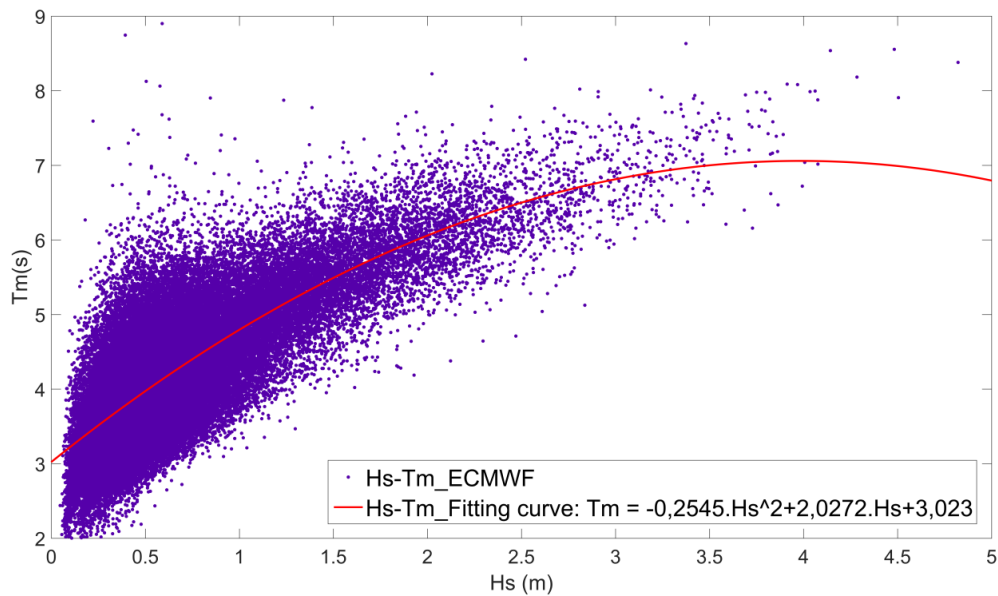
Ngoài ra, đặc trưng thống kê sóng cho từng tháng theo độ cao và hướng cũng được thực hiện cho chuỗi dữ liệu sóng tại điểm này. Kết quả thống kê đã tiết lộ ảnh hưởng của gió mùa đến trường sóng của biển khu vực này. Sóng hướng NE xuất hiện quá nửa thời gian trong một năm và tần suất cao nhất tập trung vào mùa đông (tháng 9, 10, 11, 12, 1, 2 và 3), trong khi các sóng SE và SW được quan sát vào mùa hè (tháng 4, 5, 6, 7 và 8). Các sóng cao NE thường xuất hiện với tần suất cao nhất 37,75% vào tháng 11, trong khi các sóng SE cao chủ yếu hoạt động vào tháng 5 với tần suất cao nhất 28,7% và sóng SW xuất hiện tập trung cao nhất vào tháng 7 với tần suất 24,51%. Tháng 11 cũng là tháng có nhiều sóng lớn nhất trong năm, trong khi đó tháng 6 là thời điểm biển lặng nhất với các con sóng cao hơn 1m chỉ chiếm 1,77% tổng số liệu sóng trong tháng.



Hình 4. Biểu đồ hoa sóng đặc trưng vùng biển từ Nghệ An đến Quảng Bình.

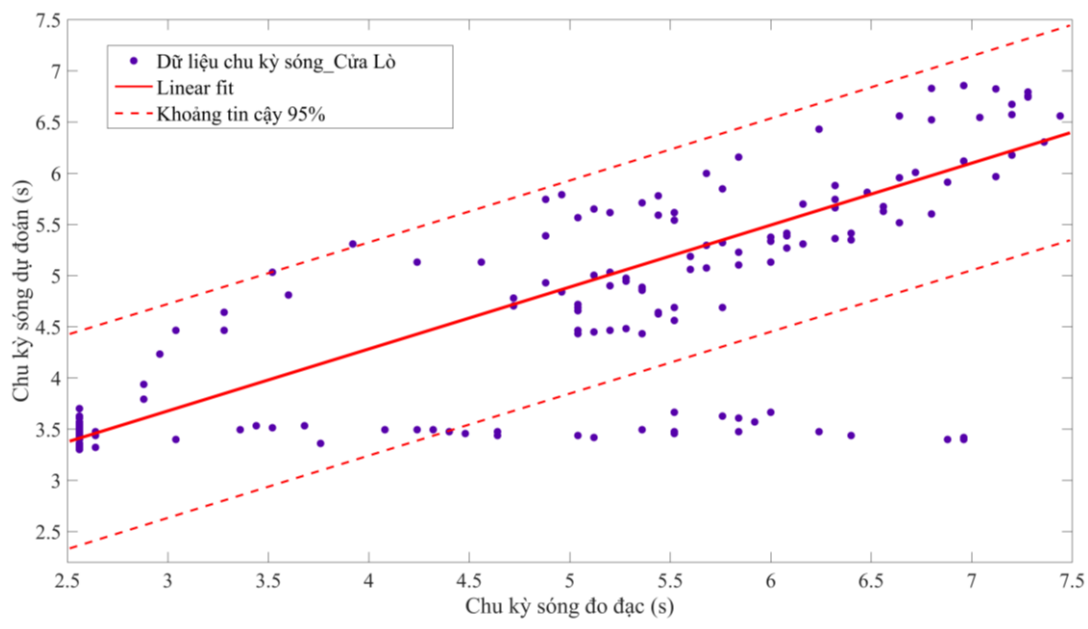
Bên cạnh đặc điểm phân bố sóng, mối quan hệ giữa các thông số sóng trong khu vực biển Bắc Trung Bộ cũng được tìm ra, như thể hiện trong Hình 5. Đường tương quan phổ biến nhất được xây dựng cho tất cả các hướng sóng từ dữ liệu sóng mô hình trích xuất. Biểu thức quan hệ phù hợp nhất giữa chiều cao sóng và chu kỳ sóng ($H_s \sim T_m$) (2) có hệ số xác định khá tốt $R^2=0,59$ và sai số $RMSE = 0,58$.

$$T_m = -0,2545H_s^2 + 2,027H_s + 3,023 \quad (2)$$



Hình 5. Quan hệ giữa chiều cao sóng và chu kỳ sóng ở khu vực biển Bắc Trung Bộ.

Hàm tương quan (2) được kiểm chứng thông qua việc so sánh với chu kỳ sóng thực đo tại ngoài khơi Cửa Lò vào tháng 11/2016. Kết quả của việc so sánh chỉ ra rằng chu kỳ sóng dự đoán có tương quan tốt ($R^2 = 0,77$) với sai số $RMSE = 0,53$. Ngoài ra, cũng dễ dàng nhận thấy rằng, tương quan rất tốt khi chu kỳ đo đặc nhỏ hơn 5 s (Hình 6). Khi giá trị của chu kỳ đo đặc lớn 5s, có nhiều giá trị nằm ngoài khoảng tin cậy 95%. Tuy vậy, nhìn chung hàm tương quan được xây dựng từ dữ liệu mô hình ERA-Interim có thể phản ánh tốt và dùng để xác định chu kỳ sóng tại vùng biển Bắc Trung Bộ.



Hình 6. So sánh giữa chu kỳ sóng thực đo và chu kỳ sóng dự đoán theo hàm tương quan (2) ở ngoài khơi Cửa Lò.

3.3. Đặc điểm sóng khu vực biển Trung Trung Bộ (từ Quảng Trị đến Quảng Nam)

Đối với khu vực biển Trung Trung Bộ, nơi đây có đường bờ biển trải dài theo hướng Tây Bắc-Đông Nam, vuông góc với hướng gió Đông Bắc là hướng gió chủ đạo trong mùa đông. Dọc dải bờ biển có nhiều vịnh lớn như vịnh Chân Mây, vịnh Đà Nẵng. Độ sâu của dải bờ biển này khá lớn, đáy biển độ dốc lớn. Đường đồng sâu 50m nước nằm gần bờ, đặc biệt đường đồng sâu 20m nước gần như nằm sát bờ [15]. Dữ liệu sóng của mô hình ERA-Interim (ECMWF) từ 01/1979 đến 08/2019 được trích xuất cho điểm nằm phía ngoài khơi bờ biển Đà Nẵng có tọa độ ($16^{\circ}06'00''N$, $108^{\circ}45'00''E$). Biểu đồ hoa sóng được vẽ và thể hiện trên Hình 7. Dễ dàng nhận thấy rằng có ba hướng sóng chủ đạo là Đông Đông Bắc (ENE), Đông Bắc (NE) và Nam Đông Nam (SSE) tiếp cận khu vực nghiên cứu. Hướng ENE xuất hiện với tần suất cao nhất gần 33% (Bảng 3), nhưng con sóng có chiều cao lớn nhất lại đến từ hướng Đông Bắc. Chiều cao sóng sóng ý nghĩa trong chuỗi số liệu là 2,06m với chu kỳ đỉnh 6,44s. Trong đó sóng dưới 2,5 m chiếm 92,66% (Bảng 3).

Ngoài đặc trưng thống kê sóng cho năm, các phân tích sóng cho từng tháng theo độ cao và hướng cũng đã được thực hiện. Kết quả phân tích thống kê cho từng tháng đã tiết lộ rằng chế độ sóng khu vực này có hai mùa rõ rệt. Sóng hướng ENE xuất hiện hầu hết vào các tháng trong năm (1, 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11, và 22), trong khi đó sóng hướng SSE chỉ tập trung vào ba tháng mùa hè (6, 7, 8). Sóng hướng ENE tập trung cao nhất với tần suất 62,2% vào tháng 1.

Bảng 1. Đặc trưng thống kê sóng theo hướng và chiều cao cho khu vực biển vịnh Bắc Bộ trong giai đoạn 1979-2019.

H_s^* (m)	N	NNE	NE	ENE	E	SEE	SE	SSE
$\leq 0,5$	0,12	0,23	1,01	3,46	5,97	4,74	6,28	4,57
$\leq 1,25$	0,20	0,93	7,88	10,82	6,32	2,06	6,78	10,62
$\leq 2,5$	0,08	1,15	6,63	2,19	0,34	0,07	0,13	0,40
$\leq 4,0$	0,01	0,21	0,48	0,07	0,04	0,02	0,01	0,003
$\leq 5,0$	0,00	0,01	0,003	0,01	0,01	0	0,002	0,002
$\leq 5,34$	0	0	0,002	0	0	0	0	0
Tổng (%)	0,42	2,53	16,00	16,55	12,67	6,89	13,20	15,59

Bảng 1 (tiếp)

H_s^* (m)	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Tổng
$\leq 0,5$	2,33	2,10	0,78	0,12	0,08	0,09	0,09	0,08	32,05
$\leq 1,25$	4,10	3,77	1,26	0,12	0,09	0,07	0,04	0,10	55,15
$\leq 2,5$	0,29	0,42	0,14	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	11,90
$\leq 4,0$	0	0	0,002	0,002	0	0	0,003	0,003	0,86
$\leq 5,0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03
$\leq 5,34$	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002
Tổng (%)	6,72	6,28	2,18	0,24	0,19	0,17	0,15	0,20	100

Bảng 2. Đặc trưng thống kê sóng theo hướng và chiều cao cho khu vực biển Bắc Trung Bộ trong giai đoạn 1979-2019.

H_s^* (m)	N	NNE	NE	ENE	E	SEE	SE	SSE
$\leq 0,5$	0,22	0,46	2,12	5,60	6,58	9,54	7,56	3,01
$\leq 1,25$	0,27	1,44	11,00	8,71	3,00	4,45	5,31	1,32
$\leq 2,5$	0,18	2,14	6,61	0,73	0,11	0,05	0,02	0,02
$\leq 4,0$	0,05	0,48	0,39	0,03	0,02	0,01	0,002	0
$\leq 5,0$	0,002	0,01	0,003	0,002	0	0	0	0
$\leq 5,34$	0	0,002	0	0	0	0	0	0
Tổng (%)	0,72	4,53	20,13	15,07	9,72	14,05	12,90	4,35

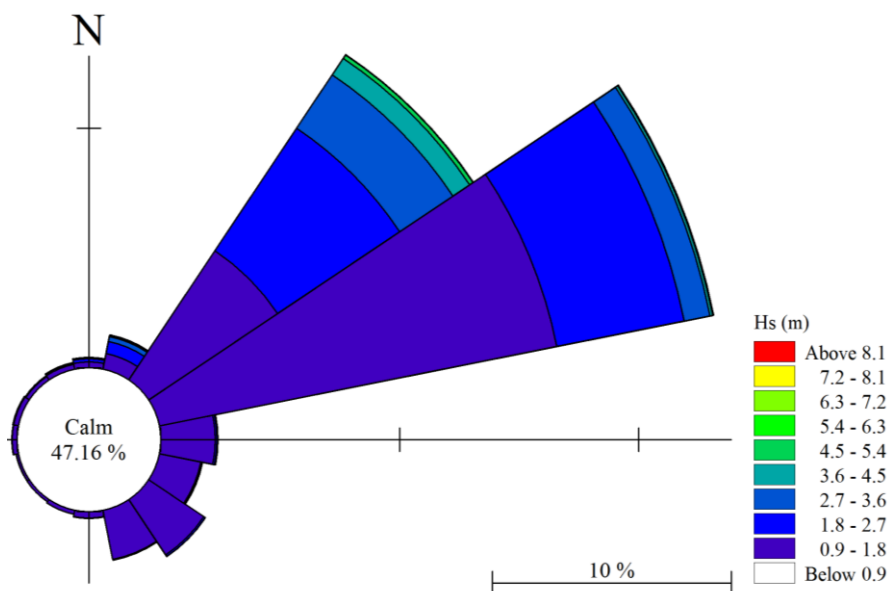
Bảng 2. (tiếp)

H_s^* (m)	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Tổng
$\leq 0,5$	2,17	2,23	2,40	1,45	0,44	0,18	0,15	0,14	44,24
$\leq 1,25$	1,39	2,53	3,92	0,97	0,10	0,06	0,05	0,08	44,60
$\leq 2,5$	0,02	0,02	0,09	0,06	0,02	0,01	0,02	0,04	10,14
$\leq 4,0$	0,002	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0,99
$\leq 5,0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02
$\leq 5,34$	0	0	0	0	0	0	0	0	0,002
Tổng (%)	3,58	4,78	6,42	2,47	0,55	0,25	0,22	0,27	100

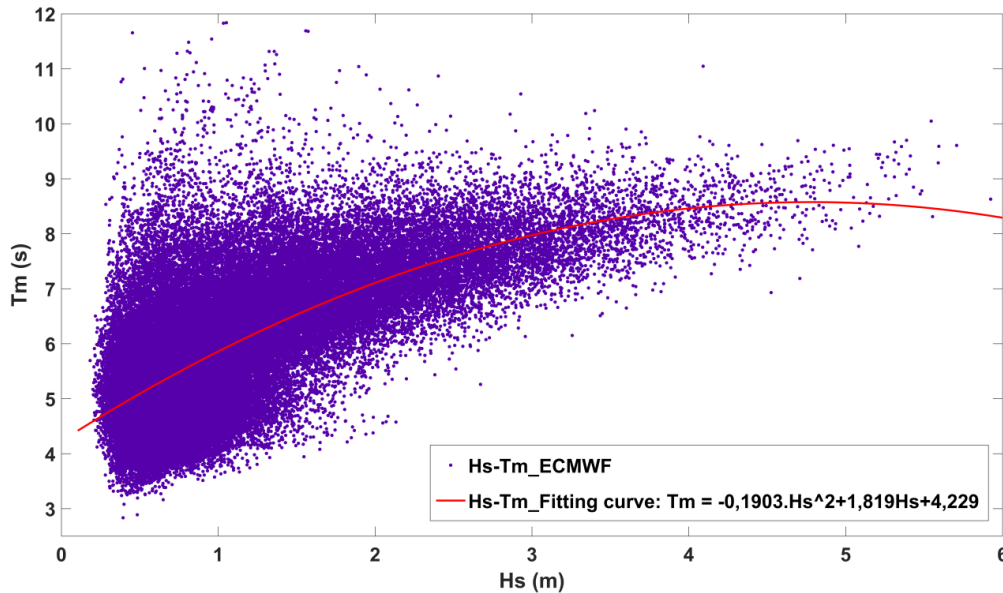
Ghi chú: * Chiều cao sóng được phân chia theo thang đo biển Douglas.

Tương tự như khu vực biển Bắc Trung Bộ, dữ liệu sóng mô hình được trích xuất cho khu vực biển Trung Trung Bộ cũng sẽ được sử dụng để xây dựng đường tương quan phổ biến nhất cho tất cả các hướng sóng trong 41 năm. Kết quả được biểu diễn trên Hình 8 và biểu thức (3). Mọi quan hệ giữa chiều cao sóng ý nghĩa (H_s) và chu kỳ sóng trung bình (T_m) chỉ phù hợp tương đối với dữ liệu sóng mô hình trích xuất khi có hệ số xác định $R^2 = 0,47$ và sai số RMSE= 0,94.

$$T_m = -0,1903H_s^2 + 1,819H_s + 4,229 \quad (3)$$



Hình 7. Biểu đồ hoa sóng đặc trưng cho vùng biển từ Quảng Trị đến Quảng Nam.

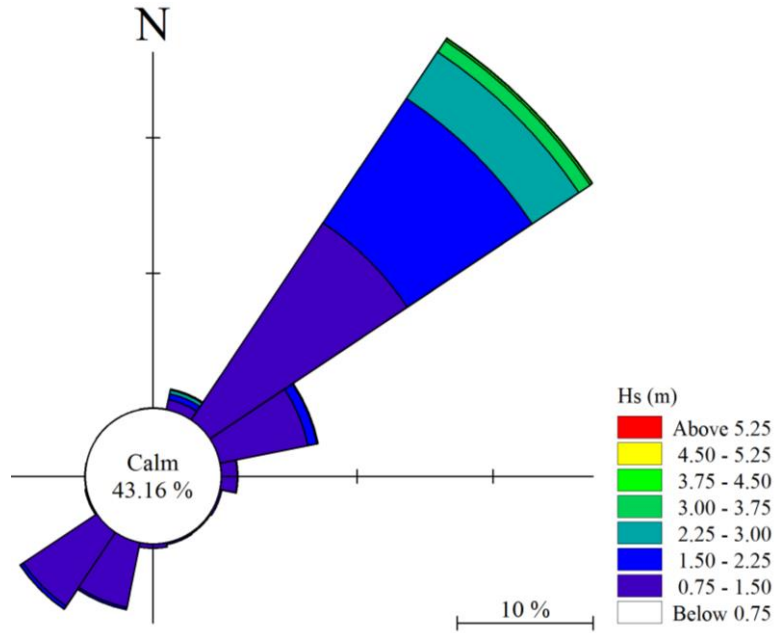


Hình 8. Quan hệ giữa chiều cao sóng và chu kỳ sóng ở khu vực biển Trung Trung Bộ.

3.4. Đặc điểm sóng khu vực biển Nam Trung Bộ (từ Quảng Ngãi đến Ninh Thuận)

Khu vực biển Nam Trung Bộ có đường bờ chạy theo hướng Bắc – Nam, tiếp xúc trực diện với biển Đông và có đả sóng gần như không bị giới hạn. Khu vực biển này có một số vịnh khá kín, thuận lợi cho tàu bè trú ẩn khi có áp thấp nhiệt đới và bão như vịnh Quy Nhơn, vịnh Xuân Đài, vịnh Vân Phong, vịnh Cam Ranh. Hệ thống đảo ven bờ vùng này nằm rải rác dọc đường bờ biển như đảo Lý Sơn (Quảng Ngãi), Cù Lao Xanh (Phú Yên), Hòn Tre (Khánh Hòa). Độ sâu trung bình của đáy vịnh khoảng 202-5m, ở các vịnh sâu dao động 40-50m. Đường đồng sâu 20m, 50m, 1000m chạy sát bờ, nhất là đoạn từ Bình Định đến Khánh Hòa. Đây cũng là khu vực biển có thềm lục địa hẹp nhất Việt Nam [15]. Từ dữ liệu sóng của mô hình ERA-Interim (ECMWF), các tham số sóng tại điểm nằm ngoài khơi bờ biển tỉnh Khánh Hòa có tọa độ (12°17'24" N, 109°13'00" E) được trích xuất trong khoảng thời gian từ 01/1979 đến 08/2019. Biểu đồ hoa sóng được vẽ và thể hiện trên Hình 9. Dễ dàng nhận thấy rằng có hai hướng sóng chủ đạo là Đông Bắc (NE) và Nam Tây Nam (SSW) ảnh hưởng đến khu vực nghiên cứu với tần suất lần lượt là 38,77% và 14,84% (Bảng 4). Trong số các hướng sóng thống kê, hướng NE xuất hiện những con sóng có chiều cao lớn nhất tác động đến khu vực. Các con sóng có chiều cao nhỏ hơn 2,5m chiếm 96,34% chuỗi dữ liệu quan trắc. Chiều cao sóng sóng ý nghĩa trong chuỗi số liệu là 1,74m với chu kỳ đỉnh 5,97s.

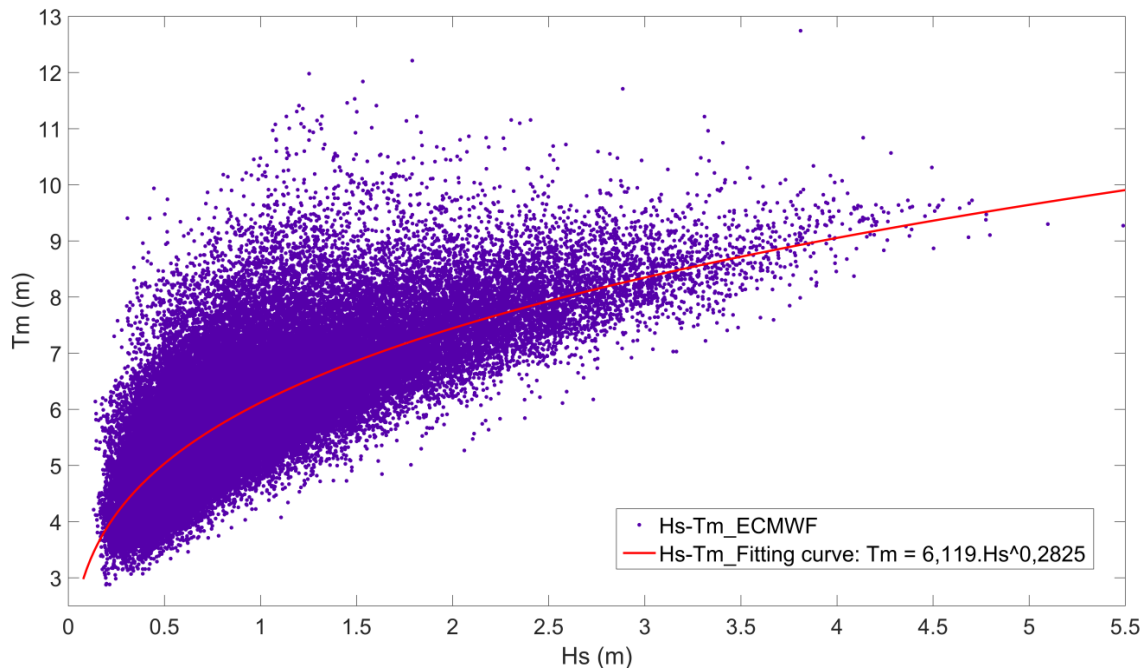
Các đặc trưng thống kê sóng cho từng tháng theo chiều cao và hướng cũng đã được phân tích để xét đến thay đổi theo mùa của sóng ở khu vực biển Nam Trung Bộ. Kết quả phân tích chỉ ra rằng sóng NE thường xuyên và chủ yếu xuất hiện vào mùa đông (tháng 10, 11, 12, 1 và 2), trong khi các sóng SSW được quan sát vào mùa hè (tháng 5, 6, 7, 8 và 9). Các sóng cao NE thường xuất hiện với tần suất cao nhất 80,7% vào tháng 1, trong khi các sóng SSW cao chủ yếu hoạt động mạnh mẽ nhất vào tháng 7 với tần suất 44,16%.



Hình 9. Biểu đồ hoa sóng đặc trưng cho vùng biển từ Quảng Ngãi đến Ninh Thuận.

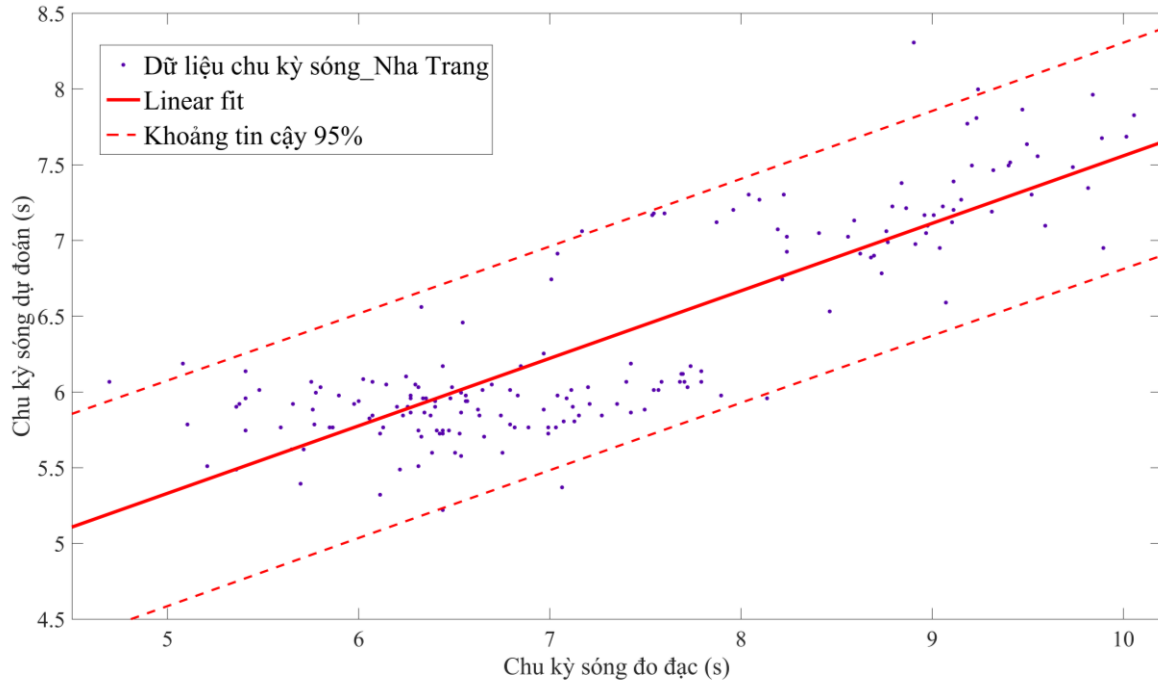
Ngoài đặc trưng sóng gió mùa, mối tương quan phổ biến nhất giữa chiều cao sóng và chu kỳ sóng ($H_s \sim T_m$) cho tất cả các hướng sóng trong khu vực được thiết lập dựa trên dữ liệu sóng mô hình trích xuất (Hình 10). Biểu thức quan hệ phù hợp nhất với dữ liệu sóng (4) có hệ số xác định rất tốt $R^2 = 0,72$ và sai số RMSE = 0,68. Đây cũng là biểu thức quan hệ có hệ số xác định cao nhất trong các khu vực biển.

$$T_m = 6,119H_s^{0,2825} \quad (4)$$



Hình 10. Quan hệ giữa chiều cao sóng và chu kỳ sóng ở khu vực biển Nam Trung Bộ.

Chu kỳ sóng trung bình được tính toán theo hàm tương quan (4) sẽ được so sánh với giá trị đo đạc tại ngoài khơi vịnh Nha Trang vào tháng 7/2020 và được thể hiện trên hình 11. Mặc dù hệ số xác định $R^2 = 0,72$ nhỏ hơn so với so sánh ở vùng biển Bắc Trung Bộ, nhưng sai số RMSE = 0,37 lại tốt hơn. Ngoài ra, phần lớn toàn bộ các điểm giá trị đều nằm trong khoảng tin cậy 95%. Kết quả là hàm tương quan (4) có độ tin cậy cao trong việc xác định chu kỳ sóng tại vùng biển Nam Trung Bộ.



Hình 11. So sánh giữa chu kỳ sóng thực đo và chu kỳ sóng dự đoán theo hàm tương quan (4) ở ngoài khơi Nha Trang.

Bảng 3. Đặc trưng thống kê sóng theo hướng và chiều cao cho khu vực biển Trung Trung Bộ trong giai đoạn 1979-2019.

H_s^* (m)	N	NNE	NE	ENE	E	SEE	SE	SSE	S
$\leq 0,5$	0,04	0,05	0,25	1,20	1,28	1,49	2,22	3,15	1,51
$\leq 1,25$	0,39	0,75	4,15	16,37	6,15	5,53	7,53	8,18	2,37
$\leq 2,5$	0,21	0,76	9,23	13,53	0,61	0,34	0,64	0,46	0,08
$\leq 4,0$	0,07	0,33	4,34	1,77	0,04	0,01	0,01	0,00	0,00
$\leq 5,0$	0,02	0,037	0,470	0,062	0,003	0,003	0	0	0
$\leq 5,34$	0,002	0,005	0,03	0,007	0,002	0	0	0	0
$\leq 6,0$	0	0,003	0,022	0,004	0,002	0	0	0	0
Tổng (%)	0,72	1,94	18,50	32,95	8,08	7,38	10,40	11,79	3,97

Bảng 3. (tiếp)

H_s^* (m)	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Tổng
$\leq 0,5$	0,39	0,12	0,07	0,04	0,03	0,03	0,02	11,89
$\leq 1,25$	0,95	0,45	0,33	0,39	0,29	0,26	0,24	54,33
$\leq 2,5$	0,04	0,05	0,04	0,09	0,13	0,07	0,15	26,44
$\leq 4,0$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,04	6,65
$\leq 5,0$	0	0	0	0,002	0,002	0,003	0,002	0,60
$\leq 5,34$	0	0	0	0,002	0	0	0	0,05
$\leq 6,0$	0	0	0	0	0	0	0	0,03
Tổng (%)	1,39	0,62	0,44	0,54	0,46	0,37	0,45	100

Bảng 4. Đặc trưng thống kê sóng theo hướng và chiều cao cho khu vực biển Nam Trung Bộ trong giai đoạn 1979-2019.

H_s^* (m)	N	NNE	NE	ENE	E	SEE	SE	SSE	S
$\leq 0,5$	0,01	0,07	1,28	2,67	3,36	1,85	1,25	1,42	2,44
$\leq 1,25$	0,06	0,70	15,28	11,34	3,56	0,70	0,34	0,44	1,50
$\leq 2,5$	0,02	0,76	18,85	1,56	0,14	0,02	0,00	0,03	0,02
$\leq 4,0$	0	0,24	3,27	0,03	0,01	0,002	0	0	0
$\leq 5,0$	0,002	0,01	0,09	0,002	0	0	0	0	0
$\leq 5,34$	0	0,002	0,004	0	0	0	0	0	0
Tổng (%)	0,09	1,79	38,77	15,60	7,07	2,57	1,59	1,89	3,96

Bảng 4. (tiếp)

H_s^* (m)	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Tổng
$\leq 0,5$	3,43	1,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	18,83
$\leq 1,25$	10,80	9,54	0,12	0,02	0,01	0,01	0,02	54,45
$\leq 2,5$	0,60	1,02	0,04	0,01	0,002	0,003	0,002	23,06
$\leq 4,0$	0,003	0	0	0	0	0	0	3,56
$\leq 5,0$	0	0	0	0	0	0	0	0,10
$\leq 5,34$	0	0	0	0	0	0	0	0,006
Tổng (%)	14,84	11,57	0,17	0,03	0,02	0,02	0,03	100

Bảng 5. Đặc trưng thống kê sóng theo hướng và chiều cao cho khu vực biển Nam Bộ trong giai đoạn 1979-2019.

H _s [*] (m)	N	NNE	NE	ENE	E	SEE	SE	SSE	S
≤ 0,5	0,03	0,07	0,53	3,24	4,36	1,65	1,03	1,10	1,96
≤ 1,25	0,12	0,16	3,29	19,61	4,87	0,37	0,21	0,18	0,57
≤ 2,5	0,02	0,06	5,41	13,30	0,19	0,01	0,01	0,003	0,01
≤ 4.0	0	0,003	0,56	0,41	0	0	0	0	0,002
Tổng (%)	0,16	0,29	9,79	36,56	9,43	2,02	1,24	1,28	2,54

Bảng 5. (tiếp)

H _s [*] (m)	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Tổng
≤ 0,5	3,21	2,49	0,95	0,44	0,13	0,06	0,06	21,30
≤ 1,25	3,56	8,34	9,44	2,89	0,40	0,21	0,13	54,33
≤ 2,5	0,14	0,88	2,47	0,83	0,03	0,02	0,01	23,38
≤ 4.0	0	0,002	0,008	0,002	0	0	0	0,99
Tổng (%)	6,91	11,71	12,86	4,17	0,55	0,29	0,20	100

Bảng 6. Đặc trưng thống kê sóng theo hướng và chiều cao cho khu vực biển vịnh Thái Lan trong giai đoạn 1979-2019.

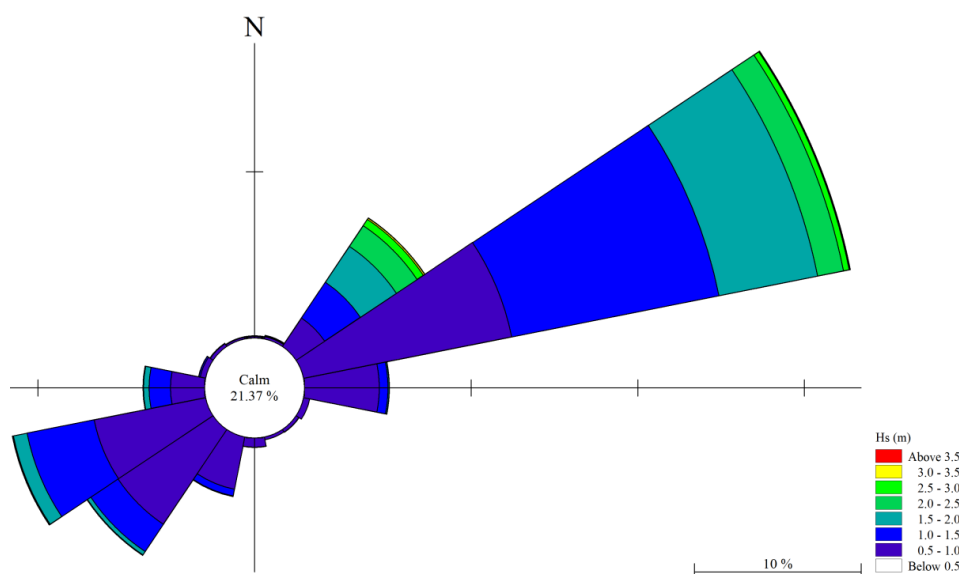
H _s [*] (m)	N	NNE	NE	ENE	E	SEE	SE	SSE	S
≤ 0,5	0,34	0,66	1,12	2,16	5,08	10,15	6,03	3,15	3,14
≤ 1,25	0,15	0,86	2,10	3,73	7,88	7,66	0,91	0,22	0,79
≤ 2,5	0,01	0,18	0,35	0,34	0,41	0,17	0	0,002	0,01
≤ 4.0	0,002	0,002	0,003	0	0	0	0	0	0
Tổng (%)	0,50	1,70	3,58	6,24	13,38	17,98	6,94	3,37	3,94

Bảng 6. (tiếp)

H _s [*] (m)	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Tổng
≤ 0,5	2,53	2,79	2,92	2,16	0,89	0,36	0,19	43,68
≤ 1,25	1,17	2,94	8,29	9,73	2,05	0,14	0,03	48,65
≤ 2,5	0,01	0,10	1,72	3,69	0,60	0,01	0,01	7,61
≤ 4.0	0	0	0,01	0,04	0	0	0	0,06
Tổng (%)	3,72	5,83	12,94	15,63	3,54	0,51	0,23	100

3.5. Đặc điểm sóng khu vực biển Nam Bộ (từ Bình Thuận đến Cà Mau)

Khu vực này có đường bờ biển chạy theo hướng Đông Bắc – Tây Nam. Suốt cả dải đường bờ là vùng nước nông, đáy thoải và độ dốc nhỏ. Đường đồng sâu 50m cách rất xa bờ, càng về phía nam đường này càng xa bờ. Khu vực biển này có lác đác một số quần đảo và hòn đảo như quần đảo Phú Quý (Bình Thuận), quần đảo Côn Sơn (Bà Rịa – Vũng Tàu) và đảo Hòn Khoai (Cà Mau) [15]. Dữ liệu sóng của mô hình ERA-Interim (ECMWF) tại điểm nằm gần Côn Đảo có tọa độ (8°45'00"N, 106°42'00"E) được trích xuất trong khoảng thời gian từ 01/1979 đến 08/2019 để xác định các đặc trưng cơ bản của sóng tại vùng biển này. Biểu đồ hoa sóng được vẽ và thể hiện trên Hình 12. Bốn hướng sóng chính thường xuyên trong khu vực là các hướng Đông Bắc (NE), Đông Đông Bắc (ENE), Tây Nam (SW) và Tây Tây Nam (WSW). Trong số các hướng này, hướng ENE chiếm ưu thế tuyệt đối với tần suất cao nhất 36,56% kèm theo những cơn sóng có chiều cao lớn nhất tác động đến khu vực. Phần lớn các cơn sóng ở điểm trích xuất là các cơn sóng có năng lượng trung bình và yếu với chiều cao dưới 1,25m chiếm đến 75,63% chuỗi số liệu (Bảng 5). Chiều cao sóng sóng ý nghĩa trong chuỗi số liệu là 1,54m với chu kỳ đỉnh 5,5s.

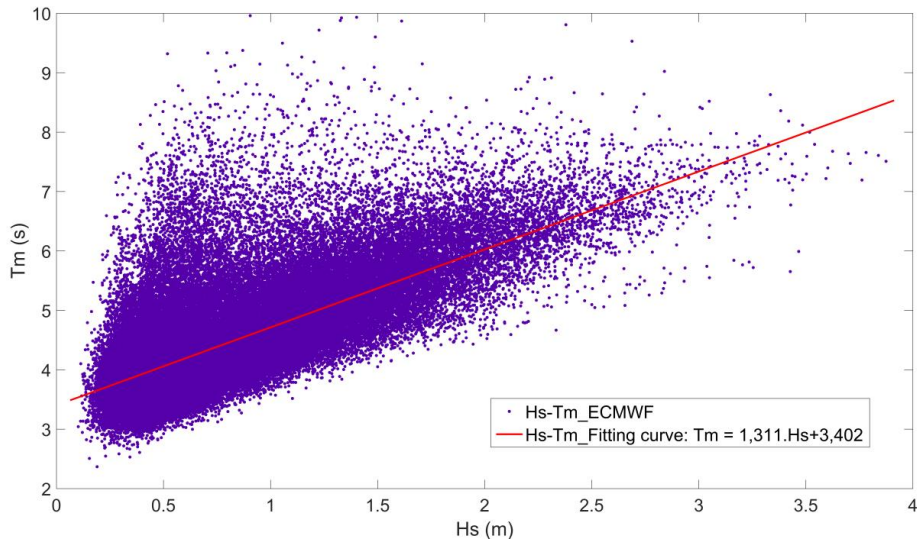


Hình 12. Biểu đồ hoa sóng đặc trưng cho vùng biển từ Bình Thuận đến Cà Mau.

Ngoài đặc trưng sóng theo hướng, các đặc trưng sóng (chiều cao và hướng sóng) phân bố theo từng tháng cũng được phân tích. Kết quả phân tích chỉ ra rằng sóng hướng ENE xuất hiện tập trung các tháng mùa đông (10, 11, 12, 1, 2, 3 và 4), trong khi đó sóng hướng WSW lại thường xuyên được hoạt động vào các tháng mùa hè (6, 7, 8 và 9). Sóng hướng ENE xuất hiện với tần suất cao nhất 83,42% với chiều cao lớn nhất vào tháng 2 hàng năm. Sóng hướng WSW với tần suất cao nhất 36,86% được ghi nhận vào tháng 8. Tháng 5 cũng là tháng biển lặng nhất trong năm với sóng có chiều cao lớn hơn 1m chỉ chiếm 2,42% tổng số liệu.

Mối tương quan giữa chiều cao sóng và chu kỳ sóng ($H_s \sim T_m$) được điều tra và được thể hiện trên Hình 13. Dễ dàng nhận thấy rằng, biểu thức tương quan (5) có mức độ phù hợp cao với các dữ liệu sóng mô hình trích xuất. Hệ số xác định quá tốt với $R^2 = 0,70$ và sai số RMSE = 0,54.

$$T_m = 1,311H_s + 3,402 \quad (5)$$

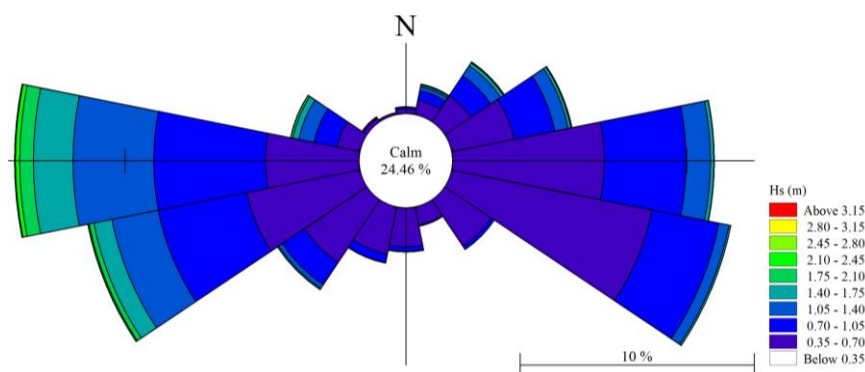


Hình 13. Quan hệ giữa chiều cao sóng và chu kỳ sóng ở khu vực biển Nam Bộ.

3.6. Đặc điểm sóng khu vực biển vịnh Thái Lan (từ Cà Mau đến Kiên Giang)

Khu vực biển từ Cà Mau đến Kiên Giang thuộc vịnh Thái Lan, một biển nửa kín. Đây cũng là một vịnh nông, nơi sâu nhất chỉ khoảng 80m. Địa hình đáy vùng ven bờ thoải, nông và độ dốc rất nhỏ. Đường đồng sâu 20m nằm cách bờ khoảng 50-60 hải lý. Từ độ sâu 20m trở ra, đáy biển mập mạp hơn do sự có mặt của các thung lũng sông cổ hướng tây bắc – đông nam [15]. Trong khu vực biển này, hệ thống các đảo và quần đảo khá phong phú, với các đảo lớn như đảo Phú Quốc, Thổ Chu, Nam Du. Các đảo nhỏ nằm gần bờ hơn như các đảo Hòn Tra, Hải Tặc, Hòn Nghệ, ... Đường bờ biển phần lớn có hướng Nam – Bắc và Đông – Nam chịu ảnh hưởng lớn của gió mùa Tây Nam. Để hiểu được chế độ sóng tại khu vực biển từ Cà Mau đến Kiên Giang, dữ liệu sóng của mô hình ERA-Interim (ECMWF) của điểm nằm ngoài khơi cách đường bờ biển huyện U Minh, tỉnh Cà Mau khoảng 35km có tọa độ (9°22'12"N, 104°30'00"E) được trích xuất trong khoảng thời gian từ 01/1979 đến 08/2019. Biểu đồ hoa sóng đặc trưng cho khu vực biển này được trình bày trên Hình 14. Bốn hướng sóng chủ đạo trong khu vực là các hướng Tây (W), Tây Tây Nam (WSW), Đông (E) và Đông Đông Nam (SEE). Trong số các hướng này, hướng SEE xuất hiện với tần suất cao nhất 17,98% chuỗi số liệu, trong khi đó hướng W có những con sóng có chiều cao lớn nhất tác động đến khu vực. Phần lớn các con sóng là các con sóng có năng lượng trung bình và yếu với chiều cao dưới 1,25m chiếm đến 92,33% chuỗi số liệu (Bảng 6). Chiều cao sóng sóng ý nghĩa trong chuỗi số liệu là 1,07m với chu kỳ đỉnh 4,9s.

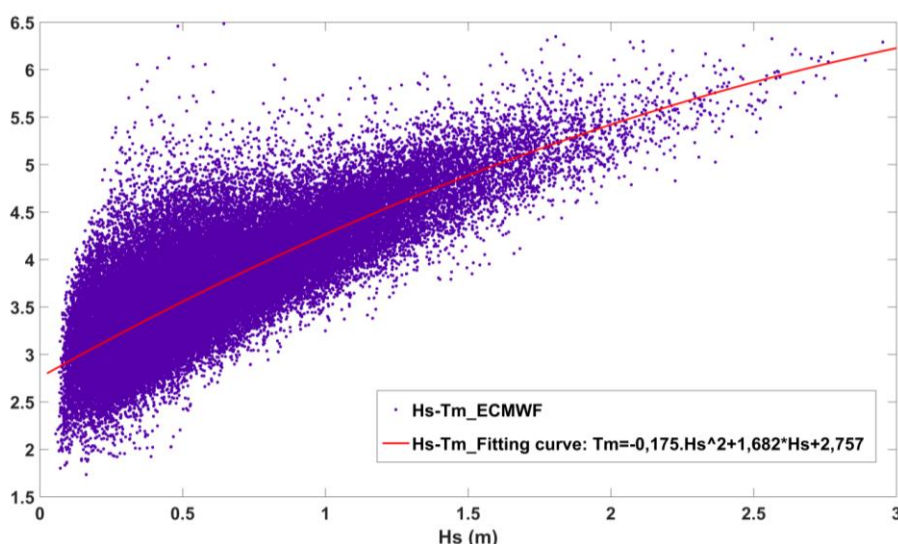
Kết quả phân tích thống kê sóng cho từng tháng theo chiều cao và hướng sóng đã chỉ ra rằng sóng E và SEE thường xuyên xuất hiện trong các tháng 1, 2, 3, 4, 11, 12. Trong khi đó, các sóng W và WSW tập trung cao nhất trong các tháng 5, 6, 7, 8, 9, 10. Sóng hướng SEE tập trung cao nhất vào tháng 2 với tần suất lên đến 59,54%. Sóng hướng W xuất hiện với tần suất cao nhất 41,25% vào tháng 8. Mặc dù, thời gian xuất hiện trong năm ít hơn các sóng hướng E và SEE, nhưng các sóng hướng W và WSW có năng lượng lớn hơn nhiều so với các sóng này. Trong năm, tháng 1 và tháng 2 là những tháng có chiều cao sóng thấp nhất, chỉ có 2,48% các con sóng có chiều cao từ 1,25m đến 2,5m.



Hình 14. Biểu đồ hoa sóng đặc trưng cho vùng biển từ Cà Mau đến Kiên Giang.

Ngoài ra, mối quan hệ giữa chiều cao sóng và chu kỳ sóng cho tất cả các hướng sóng trong khu vực biển vịnh Thái Lan cũng được xác định dựa vào dữ liệu sóng mô hình trích xuất. Kết quả được thể hiện trên Hình 15 và biểu thức (6). Mặc dù hệ số xác định ($R^2 = 0,64$) không bằng vùng biển Nam Bộ và Nam Trung Bộ, nhưng sai số trung bình bình phương lại nhỏ nhất trong các vùng biển với $RMSE = 0,39$.

$$T_m = 0,175H_s^2 + 1,682 H_s + 2,757 \quad (6)$$

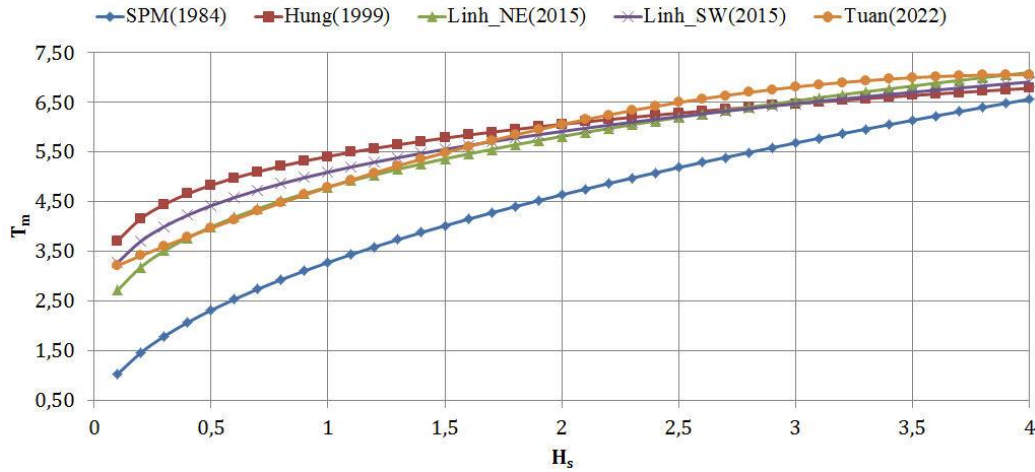


Hình 15. Quan hệ giữa chiều cao sóng và chu kỳ sóng ở khu vực biển vịnh Thái Lan.

3.7. So sánh với các công thức tương quan đã được xây dựng

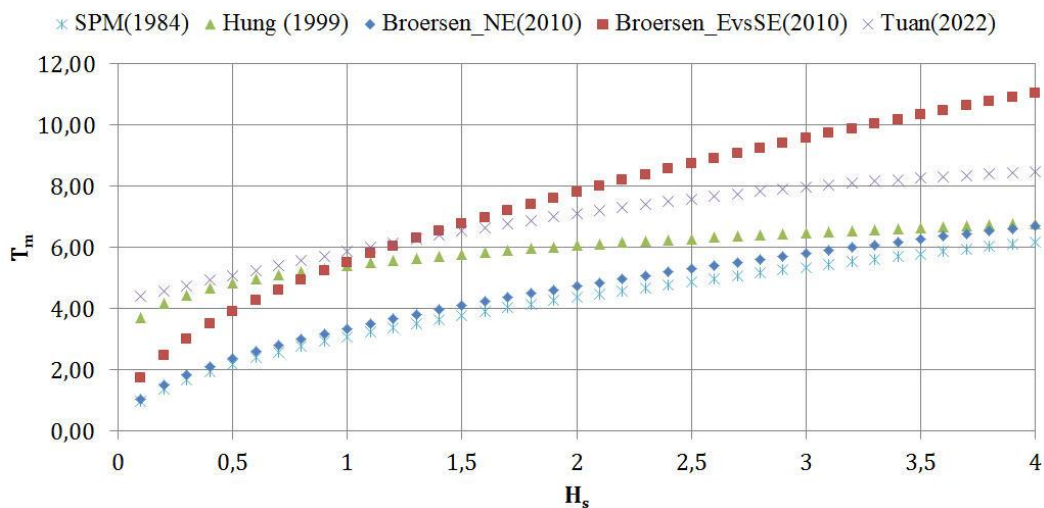
Trong nghiên cứu này, các kết quả hàm tương quan giữa chiều cao sóng và chu kỳ sóng vừa được xây dựng ở phần trên sẽ được so sánh và phân tích với các công thức của Nguyễn Xuân Hùng (1999), SPM (1984), Linh và Tuấn [4] và Broersen (2010) cho vùng biển Bắc Trung Bộ và Trung Trung Bộ. Các tác giả đã tiến hành tính toán nội suy tương quan trong khoảng chiều cao sóng nhỏ hơn 4 m (đây cũng là chiều cao lớn nhất thường xuyên xuất hiện trong chuỗi số liệu). Kết quả so sánh được thể hiện trên Hình 16 cho thấy rằng chu kỳ sóng xác định theo phương pháp của nghiên cứu này không quá ngắn như của Nguyễn Xuân Hùng (1999), Đặng Thị Linh và cộng sự (2015) và cũng không quá dài như theo SPM (1984). Trong khoảng chiều cao sóng dưới 1,5 m, đường tương quan này có xu thế đi sát với đường của Đặng Thị Linh và cộng sự (2015) trong gió mùa Đông Bắc. Tuy nhiên, khi chiều cao sóng lớn

hơn 1,5 m, chu kỳ sóng nội suy theo công thức của Đặng Thị Linh và cộng sự (2015) cho cả hai mùa gió ngắn hơn so với hàm tương quan được lập bởi các tác giả.



Hình 16. So sánh đường tương quan của chiều cao sóng và chu kỳ sóng ở khu vực biển Bắc Trung Bộ (Nghệ An).

Bên cạnh việc so sánh với đường tương quan được xây dựng cho đặc trưng sóng tại vùng biển Bắc Trung Bộ, quan hệ giữa chiều cao và chu kỳ sóng tại vùng biển Trung Trung Bộ, mà được xây dựng ở phần trên cũng sẽ được đối chiếu với các kết quả nghiên cứu của Nguyễn Xuân Hùng (1999) và Broersen (2010). Hình 17 thể hiện biến thiên giá trị dự đoán của chu kỳ sóng khi chiều cao sóng tăng. Dễ dàng thấy rằng tương quan của Broersen (2010) xây dựng đối với sóng Đông Bắc có xu thế tương đồng với tương quan của SPM (1984). Còn đối với sóng hướng Đông và Đông Nam, tương quan của Broersen (2010) cho chu kỳ quá dài. Trong khi đó, đường tương quan của Nguyễn Xuân Hùng (1999) cho chu kỳ sóng xác định được thường là quá ngắn (độ dốc quá lớn) chưa thực sự phù hợp với sóng ngẫu nhiên hiện nay. Một lần nữa, kết quả so sánh chỉ ra rằng chu kỳ sóng được xác định theo phương pháp của nghiên cứu này không quá ngắn như của Nguyễn Xuân Hùng (1999) và cũng không quá dài như theo Broersen (2010).



Hình 17. So sánh đường tương quan của chiều cao sóng và chu kỳ sóng ở khu vực biển Trung Trung Bộ (Huế).

Bảng 7 là thể hiện sai số của nghiên cứu này với kết quả của nhà nghiên cứu khác đã ứng dụng dữ liệu mô hình ERA-INTERIM cho các vùng biển khác trên thế giới [10, 14, 19]. Kết quả so sánh chỉ ra rằng, các sai số trong nghiên cứu này cũng tương ứng và thậm chí là khá tốt so với các nghiên cứu khác.

Bảng 7. So sánh sai số của R^2 và RMSE với các nghiên cứu khác.

Nghiên cứu này	[10]	[14]	[19]
$R^2 = 0,47 \sim 0,77$	$R^2 = 0,50 \sim 0,96$	$R^2 = 0,26 \sim 0,90$	$R^2 = 0,18 \sim 0,74$
RMSE = 0,37 ~ 0,94	RMSE = 0,18 ~ 0,40	RMSE = 0,20 ~ 0,89	RMSE = 0,53 ~ 0,87

4. KẾT LUẬN

Dữ liệu mô hình tái phân tích ERA-Interim (ECMWF) để phân tích và đánh giá trường sóng khu vực dọc bờ biển nước ta là phù hợp thông qua kết quả kiểm chứng bằng số liệu thực đo ven biển ở Cửa Lò và Nha Trang.

Xây dựng được các quan hệ điển hình giữa chiều cao sóng và chu kỳ sóng với tất cả các hướng sóng cho từng khu vực ven biển nước ta. Các quan hệ này rất hữu ích trong việc tính toán ước lượng chu kỳ sóng từ chiều cao sóng tại các khu vực không có chu kỳ sóng thực đo, từ đó có thể xác định các thông số sóng tính toán đầu vào phục vụ việc tính toán lan truyền sóng cũng như tính toán quy mô công trình bảo vệ bờ, đê chắn sóng.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được hỗ trợ bởi Bộ Giao thông vận tải trong đề tài mã số DT214006, tên là “Nghiên cứu đánh giá khả năng giảm sóng của kết cấu đê nổi T-FB ứng dụng trong xây dựng các công trình bảo vệ cảng và khu neo đậu tàu thuyền” và các đề tài cấp Bộ Giáo dục và Đào tạo mã số CT 2022.01.GHA.03 và CT 2022.01.GHA.06 thuộc Chương trình KHCN Cấp Bộ năm 2022.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Jur Vogelzang, Kees Boogaard, Konstanze Reichert, Katrin Hessner, Wave height measurement with navigation radar, in International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam, 2000.
- [2]. S. Vignudelli, A. G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste, Coastal Altimetry, Springer Berlin Heidelberg, 2011. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12796-0>
- [3]. W.A. Broersen, Analysis of boundary conditions and concept design for Dong Lam, Thua Thien – Hue province, Viet Nam, Delft University of Technology, 2010.
- [4]. Đặng Thị Linh, Thiều Quang Tuấn, Quan hệ chu kỳ và chiều cao của sóng gió mùa vùng biển Bắc và Bắc Trung Bộ Việt Nam, Hội nghị khoa học thường niên Đại học Thủy Lợi, 2015.
- [5]. Dư Văn Toán, Nghiêm Thanh Hải, Hiện trạng năng lượng gió biển thế giới và đề xuất phát triển năng lượng gió biển Việt Nam hướng tới mục tiêu giảm thiểu tác động biến đổi khí hậu, Tạp chí Môi trường, I (2017).
- [6]. Lê Đức Đạt, Dư Văn Toán, Nguyễn Cao Văn, Đỗ Tá Hòa, Năng lượng sóng biển trên thế giới và đề xuất nghiên cứu, phát triển đối với các vùng biển Việt Nam, Tạp chí Khoa học biến đổi khí hậu, 2 (2017).
- [7]. Lê Đình Mậu, Nguyễn Văn Tuấn, Estimation of wave characteristics in East Vietnam Sea using WAM model. Vietnam Journal of Marine Science and Technology, 14 (2014) 212-218,

<https://doi.org/10.15625/1859-3097/5158>

- [8]. Nguyễn Thanh Hoàn, Nguyễn Thị Hải Lý, Nguyễn Minh Dũng, Đánh giá tiềm năng năng lượng sóng khu vực bờ biển Việt Nam theo số liệu sóng dài kỳ của NOAA, Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, (2017) 32.
- [9]. Xuan Hien Nguyen, Van Uu Dinh, Van Khiem Mai, Van Tra Tran, Van Tien Pham, Impacts of climate change on wave regimes in the east sea. Vietnam Journal of Science, Technology and Engineering, 59 (2017), 2017. [https://doi.org/10.31276/VJSTE.59\(1\).88](https://doi.org/10.31276/VJSTE.59(1).88)
- [10]. V. Sanil Kumar, T. Muhammed Naseef, Performance of ERA-Interim Wave Data in the Nearshore Waters around India. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 32 (2015) 1257-1269. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00153.1>
- [11]. Hasan Imani, Bahareh Kamranzad, Evaluation of ERA-Interim wave characteristics in Southern Caspian Sea, in the 12th International Conference on Coastal, Ports and Marine Structures, Tehran, Iran, 2016.
- [12]. Muhammad Zikra, Hasan Ikhwan, N. S. Roni, Silvianita Silvianita, Wave energy assessment in Indonesia seas based on era-interim reanalysis. International Journal of Civil Engineering and Technology, 8 (2017) 380-387.
- [13]. Eugen Rusu, Florin Onea, Wind and wave energy resource of Germany reported by ERA-Interim reanalysis data, in The International Conference on Renewable Energy and Environment Engineering - REEE2019. 2019: Munich, Germany. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912204003>
- [14]. Hongyuan Shi, Jiacheng Sun, Zai-Jin You, Qingjie Li, Delei Li, Xuefeng Cao, The assessment of ERA-interim wave data in the China Sea. Desalination and Water Treatment, 187 (2020) 56-62. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25284>
- [15]. Trần Đức Thanh, Nguyễn Chu Hồi, Nguyễn Cẩn, Nguyễn Thanh Sơn, Trịnh Phùng, Nguyễn Văn Tạc, Đặc điểm địa mạo biển Việt Nam - Geomorphological features of Vietnam Sea. Nhà xuất bản Khoa học và kỹ thuật, (1997) 7-28.
- [16]. Michael Selwyn Longuet-Higgins, On the joint distribution of wave periods and amplitudes in a random wave field, Proceedings of the Royal Society of London, A Mathematical and Physical Sciences, 1983. 389 (1977) 241-258. <https://doi.org/10.1098/rspa.1983.0107>
- [17]. SPM, Shore Protection Manual, ed. C.o.E. US Army. Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, 1984.
- [18]. Nguyen Viet Thanh, Vu Minh Tuan, Chi Zhang, Numerical Investigation of Hydrodynamics and Cohesive Sediment Transport in Cua Lo and Cua hoi Estuaries, Vietnam, Journal of Marine Science and Engineering, 9 (2021). <https://doi.org/10.3390/jmse9111258>
- [19]. P.R. Shanas, V. Sanil Kumar, Comparison of ERA-Interim waves with buoy data in the eastern Arabian Sea during high waves. Indian Journal of Geo-Marine Sciences, 43 (2014) 1343-1346.