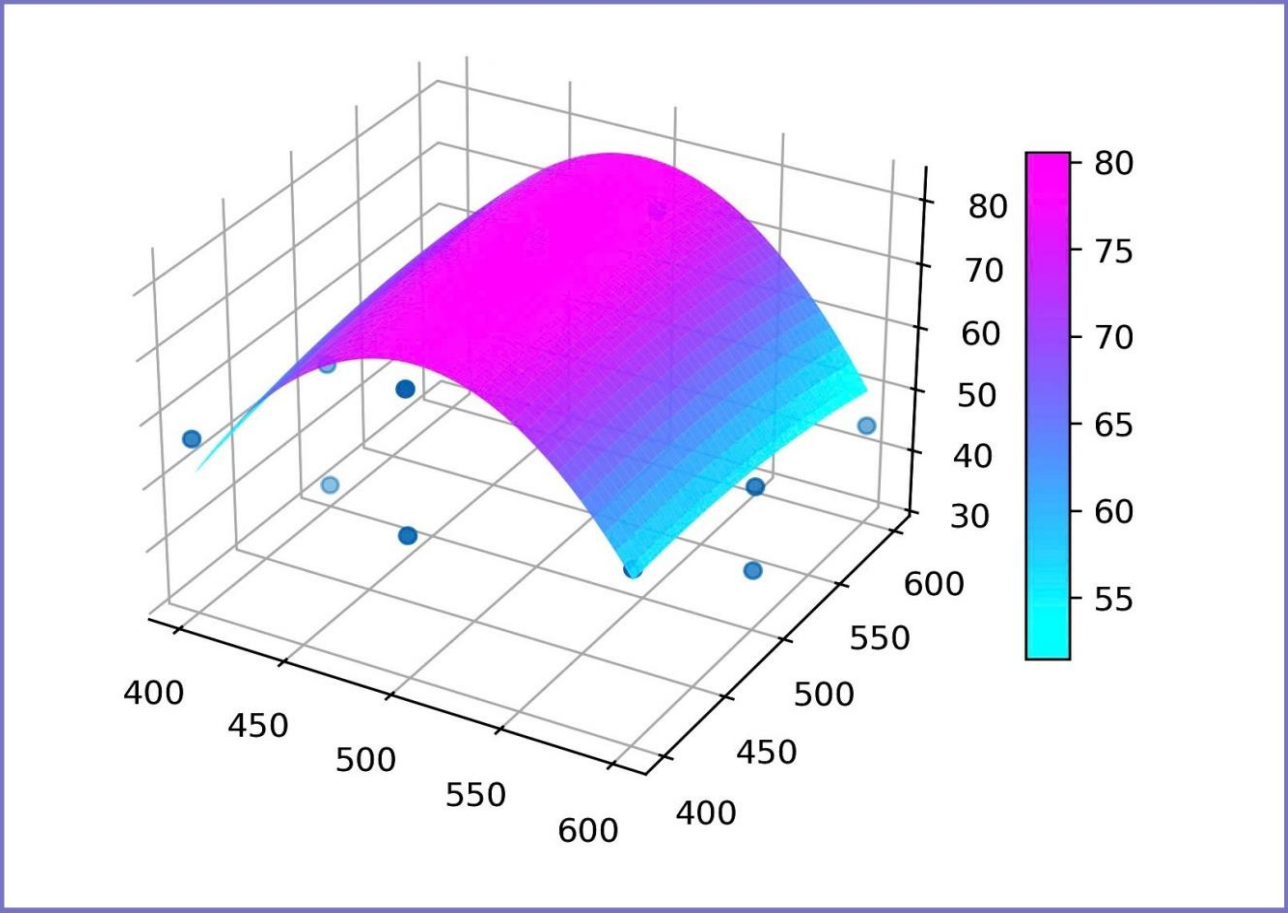
TẬP 67 KỲ 3 06 - 2026

ISSN 1859 - 1469

TẠP CHÍ KHOA HỌC KỸ THUẬT MỎ - ĐỊA CHẤT

https://tapchi.humg.edu.vn



Trường Đại học Mỏ - Địa chất

TẠP CHÍ KHOA HỌC KỸ THUẬT MỎ - ĐỊA CHẤT
Tập 67, kỳ 3
06 - 2026
Trường Đại học Mỏ - Địa chất

TẠP CHÍ KHOA HỌC KỸ THUẬT MỎ - ĐỊA CHẤT

TẬP 67, KỲ 3 – 2026

MỤC LỤC

1. Tính toán mật độ công suất sóng theo độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh trên Biển Đông Nguyễn Văn Sáng	**1**
2. Nghiên cứu ứng xử của vỏ chống lắp ghép trong đường hầm tiết diện chữ nhật cong chịu tải trọng tĩnh Đỗ Xuân Hội, Phạm Văn Vĩ , Đỗ Ngọc Anh	**15**
3. Nghiên cứu xây dựng mô hình hệ thống dầu khí 3D khu vực Đông Bắc bể Cửu Long, Việt Nam Hà Quang Mẫn, Lê Anh Tuấn, Nguyễn Anh Đức, Trịnh Sóng Biển, Nguyễn Văn Thanh, Phan Thị Quỳnh Anh, Trần Đăng Hùng, Lê Văn Trường, Nguyễn Lê Trung, Huỳnh Huỳnh Yên Hạ, Đỗ Mạnh Toàn	**30**
4. Đặc điểm thành phần độ hạt và khoáng vật trong trầm tích tầng mặt vùng biển đảo Vĩnh Thực, bắc Biển Đông và mối liên quan với môi trường trầm tích Phan Văn Bình, Hoàng Văn Long, Lê Anh Thắng, Trần Thanh Hải, Nguyễn Hữu Hiệp, Vũ Anh Đạo, Nguyễn Thị Mỹ Hạnh	**44**
5. Tối ưu hóa chế độ thuốc tuyển trong tuyển nổi quặng kẽm oxit mỏ Chợ Điền bằng phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) và thiết kế BOX-BEHNKEN Đỗ Thị Như Quỳnh, Phạm Văn Luận, Lê Việt Hà	**54**
6. Tăng cường các thông số từ cứng của hợp kim AlNiCuCo35Ti5Nb bằng công nghệ xử lý nhiệt trong từ trường Trần Mạnh Tùng, Nguyễn Huynh, Nguyễn Văn Minh, Phạm Thị Thủy, Nguyễn Anh Tú	**66**
7. Tổng quan về các công nghệ mới trong tuyển quặng Bauxit cỡ hạt mịn: định hướng thu hồi quặng đuôi mịn từ bãi thải Công ty Nhôm Đắk Nông - TKV Phạm Thanh Hải, Lê Việt Hà, Phạm Văn Luận	**78**
8. Nghiên cứu ứng dụng hóa phẩm ức chế gốc polyamine trong hệ dung dịch khoan gốc nước khi khoan qua địa tầng sét hoạt tính mỏ Bạch Hổ Nguyễn Bảo Trung Anh, Hoàng Hồng Lĩnh, Đỗ Quang Khánh, Trương Hoài Nam	**92**
9. Ứng dụng Wavelet lọc tín hiệu GNSS liên tục và so sánh với lọc Kalman Phạm Quốc Khánh	**107**
10. Dự báo biến động lớp phủ/sử dụng đất tại Đà Nẵng dựa trên mô hình CA-ANN và dữ liệu ảnh vệ tinh Đặng Thanh Tùng, Hoàng Thị Thủy	**116**
11. Công nghệ làm sạch đường ống vận chuyển dầu khí bằng Foam Pig và khả năng ứng dụng tại Việt Nam Nguyễn Văn Thành, Lê Quang Duyến, Nguyễn Khắc Long, Tô Hữu Toàn, Nguyễn Quốc Dũng, Vũ Việt Thanh	**131**

Available online at website: https://jmes.humg.edu.vn

JOURNAL OF MINING AND EARTH SCIENCES

Volume 67, Issue 3 – 2026

TABLE OF CONTENTS

1. Calculation of the wave power density based on significant wave height determined from satellite altimetry data over the East Sea Sang Van Nguyen	**1**
2. Study on the behaviour of segmental lining in sub-rectangular tunnel under static loading Hoi Xuan Do, Vi Van Pham, Anh Ngoc Do	**15**
3. 3D petroleum system modelling of North East Cuu Long Basin, Viet Nam Ha Quang Man, Le Anh Tuan, Nguyen Anh Duc, Trinh Song Bien, Nguyen Van Thanh, Phan Thi Quynh Anh, Tran Dang Hung, Le Van Truong, Nguyen Le Trung, Huynh Huynh Yen Ha, Do Manh Toan	**30**
4. Grain size and mineral characteristics of surface sediments surrounding Vinh Thuc island, Northern East Sea and their implications for the sediment environment Binh Van Phan, Hoang Van Long, Thang Anh Le, Hai Thanh Tran, Hiep Huu Nguyen, Hau Vinh Bui, Dao Anh Vu, Hanh My Thi Nguyen	**44**
5. Optimization of reagent conditions for flotation of oxidized zinc ore from the Cho Dien deposit using the RSM-BBD approach Quynh Nhu Thi Do, Luan Van Pham, Ha Viet Le	**54**
6. Enhancement of magnetic properties of ALNiCuCo35Ti5Nb alloy by magnetic heat treatment technology Tung Manh Tran, Huynh Nguyen, Minh Van Nguyen, Thuy Thi Pham, Tu Anh Nguyen	**66**
7. Overview of new technologies in fine bauxite ore processing: orientation of fine tailings recovery from the tailing pond of Dak Nong Aluminum Company - Vinacomin Hai Thanh Pham, Ha Viet Le, Luan Van Pham	**78**
8. Application of polyamine-based inhibitors in water-based drilling fluids for reactive shale formations in the Bach Ho field Anh Trung Bao Nguyen, Linh Hong Hoang, Khanh Quang Do, Nam Hoai Truong	**92**
9. Application of Wavelet Filtering for continuous GNSS signals and comparison with Kalman Filtering Khanh Quoc Pham	**107**
10. Predicting Land Use/Land Cover changes in Da Nang based on CA-ANN Model and Satellite Image Data Tung Thanh Dang, Thuy Thi Hoang	**116**
11. Potential applications of foam pig technology in cleaning oil and gas pipelines in Vietnam Thanh Van Nguyen, Duyen Quang Le, Long Khac Nguyen, Toan Huu To, Dung Quoc Nguyen, Thanh Viet Vu	**131**

Journal of Mining and Earth Sciences

Website: https://jmes.humg.edu.vn

Calculation of the wave power density based on significant wave height determined from satellite altimetry data over the East Sea

Sang Van Nguyen *

Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:
Received 25th Dec. 2025
Revised 28th Mar. 2026
Accepted 17th Apr. 2026

Keywords:
East Sea,
Satellite altimetry,
Significant wave heights,
Wave power density.

ABSTRACT

Economic growth increases energy demand while fossil fuel resources are gradually being depleted and contribute to climate change. Therefore, the development of renewable energy sources is essential. Ocean wave energy, with an estimated global potential of about 1 TW, is abundant and environmentally friendly. Vietnam has significant advantages in this resource; however, studies on assessing wave power density (P_w) using satellite altimetry data remain limited. The paper focuses on calculating wave power density based on wave heights derived from satellite altimetry data over the East Sea. Various formulas for computing wave power density are reviewed, compared, and validated. The study also examines the influence of water depth and gravity on P_w. A cross-validation-based approach is developed to evaluate P_w, from which a computational workflow is established. To automate P_w calculations, the authors develop and verify a computer program. An experiment is conducted in the East Sea using SARAL/AltiKa satellite data from cycle 32, collected between 03 March 2016 and 06 April 2016, comprising 7,542 measurement points. Results show that wave power density during the study period mainly ranges from 1.5 kW/m to 44.3 kW/m, with a P_w estimation error of ±1.023 kW/m. The study provides a foundation for comprehensive assessment of wave energy potential in the East Sea using satellite altimetry data.

Copyright © 2026 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author
E - mail: nguyenvansang@humg.edu.vn
DOI: 10.46326/JMES.2026.67(3).01

Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: https://tapchi.humg.edu.vn

Tính toán mật độ công suất sóng theo độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh trên Biển Đông

Nguyễn Văn Sáng *

Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:
Nhận bài 25/12/2025
Sửa xong 28/3/2026
Chấp nhận đăng 17/4/2026

Từ khóa:
Biển Đông,
Độ cao sóng,
Đo cao vệ tinh,
Mật độ công suất sóng.

TÓM TẮT

Sự tăng trưởng kinh tế làm gia tăng nhu cầu năng lượng trong khi nguồn năng lượng hóa thạch ngày càng cạn kiệt và gây biến đổi khí hậu. Vì vậy, phát triển năng lượng tái tạo là yêu cầu cấp thiết. Năng lượng sóng đại dương, với tiềm năng khoảng 1 TW, dồi dào, thân thiện môi trường. Việt Nam có lợi thế lớn về nguồn này, nhưng nghiên cứu đánh giá mật độ công suất sóng (P_w) từ số liệu đo cao vệ tinh hiện còn hạn chế. Bài báo tập trung nghiên cứu tính toán mật độ công suất sóng theo độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh trên Biển Đông. Các công thức tính toán mật độ công suất sóng đã được tìm hiểu, so sánh và kiểm chứng. Ảnh hưởng của độ sâu và trọng lực đến P_w cũng được quan tâm. Phương pháp đánh giá P_w được xây dựng trên cơ sở đánh giá chéo. Từ đó, sơ đồ quy trình tính toán P_w đã được xây dựng. Để tự động tính toán P_w, các tác giả đã xây dựng và kiểm chứng chương trình máy tính. Thực nghiệm đã được thực hiện trên Biển Đông với số liệu của vệ tinh SARAL/AltiKa, chu kỳ 32, được đo từ ngày 03/3/2016 đến ngày 06/4/2016, với 7.542 điểm đo. Kết quả thực nghiệm cho thấy: mật độ công suất sóng trong thời gian thực nghiệm chủ yếu tập trung trong khoảng từ 1,5 kW/m đến 44,3 kW/m; sai số xác định P_w đạt ±1,023 kW/m. Nghiên cứu này tạo cơ sở để đánh giá tiềm năng năng lượng sóng toàn diện trên Biển Đông từ số liệu đo cao vệ tinh.

© 2026 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

*Tác giả liên hệ
E - mail: nguyenvansang@humg.edu.vn
DOI: 10.46326/JMES.2026.67(3).01

1. Mở đầu

Sự phát triển của các nền kinh tế đang làm tăng nhu cầu về năng lượng. Trong khi đó, nguồn năng lượng hóa thạch như dầu mỏ, khí đốt tự nhiên và than đá là có hạn (Bai, 2006). Ngoài ra, khí thải từ các nguồn năng lượng hóa thạch dẫn đến sự nóng lên toàn cầu. Vì vậy, việc phát triển các nguồn năng lượng tái tạo mới là một yêu cầu cấp thiết đối với mỗi quốc gia. Năng lượng sóng trong các đại dương, bao phủ khoảng 71% bề mặt trái đất, là một trong những nguồn năng lượng tái tạo dồi dào (Guan, 2011). Năng lượng sóng có tiềm năng lớn nhất và là loại năng lượng có giá trị nhất của đại dương vì nó sẽ chỉ ảnh hưởng nhẹ đến môi trường và nó là một dạng năng lượng cơ học. Theo ước tính của các nghiên cứu trên thế giới, năng lượng sóng trong các đại dương khoảng 1 TW (Li và nnk., 2010). Vì vậy, việc khai thác và sử dụng các nguồn năng lượng sóng là một chiến lược quan trọng để giải quyết các vấn đề năng lượng do thiếu các nguồn năng lượng thông thường và các vấn đề môi trường.

Trước khi khai thác năng lượng sóng, cần phải đánh giá tiềm năng của nó, bao gồm: phân bố năng lượng sóng theo thời gian và không gian, biến đổi theo mùa. Các đánh giá năng lượng sóng đã được thực hiện ở một số quốc gia. Ban đầu, các đánh giá năng lượng sóng chủ yếu dựa trên các quan sát trực tiếp, nên không thể cung cấp kết quả dài hạn và quy mô lớn (Quayle và Changery, 1981). Về sau, các nghiên cứu đã đánh giá nguồn năng lượng sóng ở một số khu vực trên thế giới bằng cách sử dụng các mô hình sóng số (Pontes, 1998; Pontes và nnk., 2005; Cornett, 2008; Zheng và Pan., 2014). Sự phát triển của công nghệ đo cao vệ tinh đã đưa ra một phương pháp mới để đo độ cao sóng (SWH). Từ đó, một số nghiên cứu đánh giá tài nguyên năng lượng sóng bằng số liệu đo cao vệ tinh đã được thực hiện. Trong tài liệu (Barstow và nnk., 1998) các tác giả đã đánh giá năng lượng sóng ở hàng trăm điểm rời rạc trên những vùng nước sâu dọc theo bờ biển toàn cầu bằng dữ liệu đo cao vệ tinh Topex/Poseidon. Năng lượng sóng được đánh giá bởi Pontes và Bruck (2008) bằng dữ liệu đo độ cao vệ tinh và dữ liệu SAR. Nghiên cứu cho thấy các số liệu này có hiệu quả cho việc đánh giá năng lượng sóng. Trong tài liệu (WAN và nnk., 2015), tài nguyên năng lượng sóng trên khu vực nghiên cứu được đánh giá dựa vào số liệu nhiều loại vệ tinh đo cao. Nghiên cứu đã lập được bản đồ năng lượng sóng, tính các chỉ số năng lượng sóng. Gần đây, vấn đề này vẫn được quan tâm nghiên cứu trên thế giới: Trong tài liệu (Leon và nnk., 2023), các tác giả đã nghiên đánh giá tiềm năng năng lượng sóng ở vùng biển của Pháp theo độ cao sóng xác định từ dữ liệu đo độ cao vệ tinh 26 năm, từ tháng 1 năm 1992 đến tháng 12 năm 2018. Kết quả nghiên cứu cho thấy: vào mùa Đông, nguồn năng lượng sóng cao hơn so với các mùa khác. Trong tài liệu (Leon và nnk., 2025), các tác giả tập trung đánh giá tiềm năng năng lượng sóng bằng phương pháp thực nghiệm nhằm xác định chu kỳ sóng - một tham số then chốt trong tính toán năng lượng sóng. Dữ liệu trạng thái biển độ phân giải cao được thu thập từ hai vệ tinh Sentinel-3A/B và CryoSat-2, sau đó được xử lý lại bằng bộ theo dõi tiên tiến SAMOSA+. Ngoài ra, nghiên cứu còn sử dụng các số liệu đo tại chỗ từ mạng lưới phao sóng tại Tây Ban Nha, Pháp, Ý và Hy Lạp để phục vụ đánh giá tiềm năng năng lượng sóng. Các kết quả nghiên cứu cho thấy rằng phương pháp đo cao vệ tinh có hiệu quả và khả thi trong đánh giá tiềm năng năng lượng sóng.

Việt Nam là quốc gia có bờ biển dài, diện tích biển lớn, tiềm năng năng lượng sóng biển rất lớn. Nếu khai thác được nguồn năng lượng này sẽ rất hữu ích cho Việt Nam. Cho đến nay, đã có một số công trình nghiên cứu tính toán, xác định, thành lập bản đồ, đánh giá tài nguyên năng lượng sóng biển trên Biển Đông, tiêu biểu như: Báo cáo đánh giá tiềm năng năng lượng bức xạ, gió và sóng tại Việt Nam của Bộ Tài nguyên và Môi trường công bố năm 2022 (Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2022). Công trình này đã sử dụng số liệu quan trắc sóng, gió trực tiếp tại 17 trạm hải văn của Việt Nam, và số liệu tái phân tích từ vệ tinh để đánh giá tiềm năng năng lượng sóng, gió trên biển Việt Nam. Kết quả đã đưa ra những đánh giá về tiềm năng năng lượng gió và sóng tại các vùng biển Việt Nam và dự báo tiềm năng năng lượng gió, sóng theo kịch bản biến đổi khí hậu. Báo cáo cung cấp các thông tin về thực trạng nghiên cứu, phát triển công nghệ và khai thác năng lượng gió, sóng ngoài khơi trên thế giới và tại Việt Nam. Đây là những kết quả nghiên cứu bước đầu về phân bố chi tiết tiềm năng năng lượng gió, sóng tại các vùng biển của Việt Nam. Công trình này là tài liệu hữu ích để các bộ, ngành địa phương tham khảo và sử dụng trong các hoạt động có liên quan. Tuy nhiên, trong

công trình này, số liệu được sử dụng có độ chính xác và độ phân giải chưa cao; chưa sử dụng số liệu đo cao vệ tinh; mới đánh giá năng lượng sóng trong điều kiện nước sâu mà chưa tính đến ảnh hưởng của độ sâu nước biển. Trong tài liệu (Curto và nnk., 2020), các tác giả đã tổng hợp những kết quả tính toán, đánh giá về tiềm năng năng lượng sóng và gió đã có từ trước và có những phân tích về hiệu quả kinh tế của việc đầu tư khai thác năng lượng gió, sóng ngoài khơi Biển Đông.

Với những phân tích, đánh giá như trên, bài báo này tập trung nghiên cứu, tính toán mật độ công suất sóng theo độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh trên Biển Đông có xét đến các yếu tố trọng lực, độ sâu nước biển. Đồng thời đưa ra phương pháp đánh giá độ chính xác của mật độ công suất sóng xác định được.

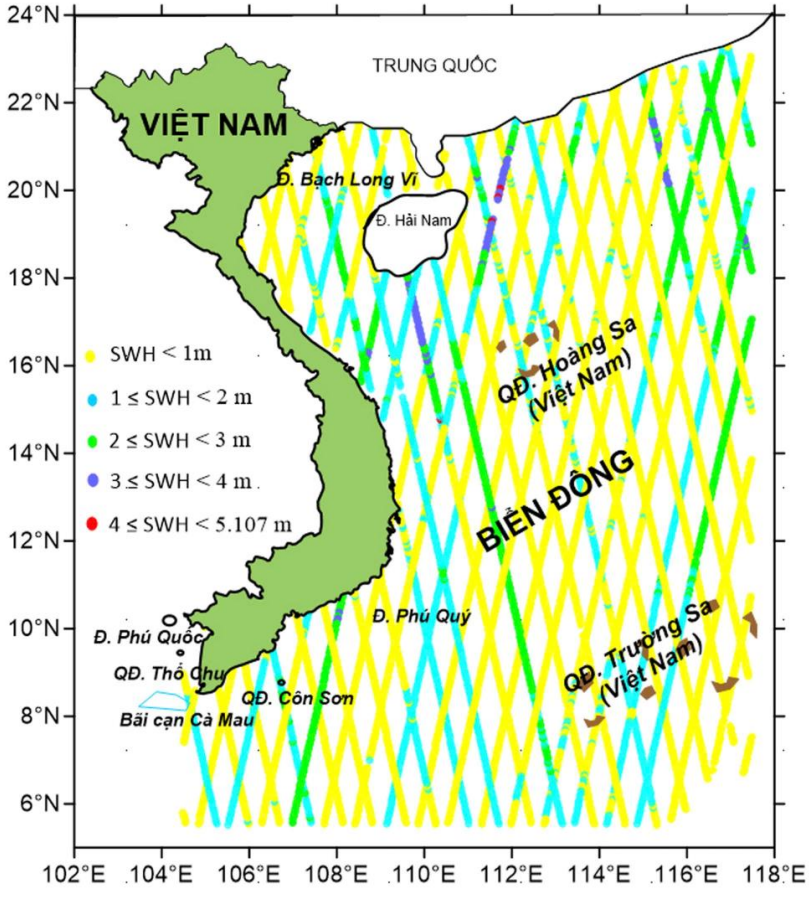
2. Khu vực và số liệu nghiên cứu

2.1. Khu vực nghiên cứu

Khu vực nghiên cứu có giới hạn: độ vĩ từ 5,5^{0}N đến 24,0^{0}N; độ kinh từ 104,5^{0}E đến 117,5^{0}E, thuộc Biển Đông (xem Hình 1). Đây là khu vực chịu tác động mạnh của gió mùa Đông Bắc và Tây Nam, tạo nên trường sóng biến đổi rõ rệt theo mùa. Khu vực nghiên cứu được đánh giá là có tiềm năng năng lượng sóng lớn (Bộ Tài nguyên và Môi trường, 2022). Việc đánh giá độ chính xác của độ cao sóng xác định từ dữ liệu đo cao vệ tinh Sentinel-3A/B đạt ±0,118 m (Nguyen, 2025). Khai thác năng lượng sóng trên Biển Đông cũng đã được xác định trong chiến lược phát triển năng lượng quốc gia Việt Nam đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045 (Chính phủ Việt Nam, 2024).

2.2. Số liệu nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, số liệu độ cao sóng xác định từ vệ tinh SARAL/AltiKa chu kỳ 32 được sử dụng. Vệ tinh SARAL/AltiKa là vệ tinh đo cao được phóng năm 2013 với sự hợp tác giữa CNES (Pháp) và ISRO (Ấn Độ), nhằm tăng cường năng lực đo cao vệ tinh đại dương. SARAL mang theo thiết bị



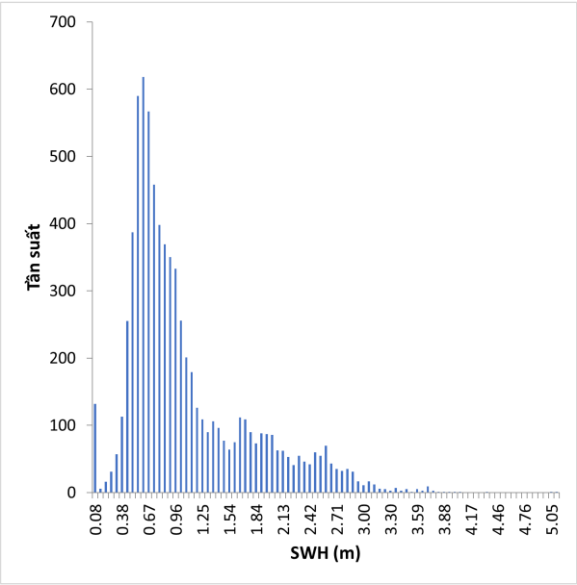
Hình 1. Khu vực nghiên cứu và số liệu nghiên cứu.

đo cao AltiKa hoạt động ở băng tần Ka (35,75 GHz), cho phép thu dữ liệu với độ phân giải không gian cao hơn và tỷ lệ nhiễu thấp hơn so với các vệ tinh băng Ku truyền thống. Dữ liệu SARAL/AltiKa phục vụ nghiên cứu độ cao sóng, mực nước biển, dòng chảy đại dương và các ứng dụng khí tượng, hải dương quan trọng (Verron và nnk., 2015; CNES và ISRO, 2013). Trên khu vực nghiên cứu, chúng tôi thu thập được số liệu của vệ tinh SARAL/AltiKa được đo từ ngày 03/3/2016 đến ngày 06/4/2016, bao gồm 7.542 điểm đo. Số liệu được cung cấp bởi (Department of Earth Observation and Space Systems - DEOS). Độ cao sóng nhỏ nhất là 0,084 m; lớn nhất là 5,106 m; trung bình là 1,042 m. Trên Bảng 1 là thống kê phân loại độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh trên khu vực nghiên cứu.

Bảng 1. Thống kê phân loại số liệu độ cao sóng.

Khoảng phân loại (m)	Số điểm	%
0,084 ≤ SWH < 1,0	4.863	64,5%
1,0 ≤ SWH < 2,0	1.827	24,2%
2,0 ≤ SWH < 3,0	765	10,1%
3,0 ≤ SWH < 4,0	83	1,1%
4,0 ≤ SWH < 5,107	4	0,1%
Tổng	*7.542*	*100%*

Trên Hình 2 là biểu đồ tần suất độ cao sóng trên khu vực nghiên cứu. Biểu đồ này cho thấy: độ cao sóng tập trung chủ yếu trong khoảng từ 0,2÷3,2 m.



Hình 2. Biểu đồ tần suất độ cao sóng.

3. Phương pháp nghiên cứu

3.1. Tính mật độ công suất sóng

Mật độ công suất sóng là đặc tính quan trọng nhất để đánh giá tài nguyên năng lượng sóng. Tham số này thường được tính toán dựa trên các mô hình sóng số. Trong trường hợp này, mật độ công suất sóng (Pw) của một đơn vị chiều dài đỉnh sóng được tính bằng (Iglesias và nnk., 2009):

$$P_w = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} C_g(f,d) S(f,\theta) df d\theta \qquad (1)$$

Trong đó: ρ - khối lượng riêng của nước biển; g là trọng lực; C_g - vận tốc nhóm của sự lan truyền năng lượng sóng; $S(f,\theta)$ - phổ sóng; f - tần số sóng; θ - hướng sóng; d - độ sâu của nước.

Trong một số tài liệu như (Zheng và nnk., 2011; Zheng và Li, 2011; Zheng và nnk., 2012; Zheng và nnk., 2013) các tác giả sử dụng mô hình thực nghiệm để tính mật độ công suất sóng cho các vùng nước sâu ngoài khơi. Khi đó giá trị Pw được tính:

$$P_w \approx 0{,}5 SWH^2 T_e, \qquad (2)$$

Trong đó: SWH - độ cao sóng; Te - chu kỳ sóng.

Tuy nhiên, ở vùng nước nông hoặc trung bình, chúng ta phải xem xét đến các hiệu ứng độ sâu đáy biển khi tính toán mật độ năng lượng sóng (Iglesias và nnk., 2009). Lúc này, phải dùng công thức (1) để tính P_w. Tuy nhiên, dữ liệu đo cao vệ tinh không cung cấp phổ sóng, do đó, không thể tính P_w bằng phương pháp tích phân phổ.

Để giải quyết vấn đề này, một mô hình tham số tính P_w có xem xét đến độ sâu của nước đã được giới thiệu. Khi đó, P_w có thể tính được như sau (Wang và Lu, 2009):

$$P_w = \bar{E} C_g = \bar{E}\left(\frac{gT_e}{2\pi} tanhkd\right) P_*, \qquad (3)$$

Trong đó: $\bar{E} = \left(\frac{1}{16}\right)\rho g SWH^2$; k = 2π/λ - số sóng, λ là bước sóng;

$$P_* = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2kd}{sinh\ 2kd}\right) \qquad (4)$$

a) Đối với vùng nước sâu

Ở vùng nước sâu (d/λ ≥ 1/2), khi đó P* ≈ 1/2 và tanhkd ≈ 1, đưa vào công thức (3) và sắp xếp lại, công thức tính P_w trở thành:

$$P_w = \frac{\rho g^2}{64\pi} SWH^2 T_e \approx 0{,}5 SWH^2 T_e \quad (5)$$

Công thức này giống như công thức (2).

b) Đối với vùng nước nông

Ở vùng nước nông (d/λ < 1/20), khi đó P* ≈ 1 và tanhkd ≈ 2πd/λ, đưa vào công thức (3) và sắp xếp lại, ta được công thức tính P_w như sau:

$$P_w = \frac{\rho g^2}{16} SWH^2 \sqrt{gd} \quad (6)$$

Trong tài liệu (Cornett, 2008), các tác giả cũng đưa ra công thức tính P_w như sau:

$$P_w = \frac{1}{8} \rho g SWH^2 C_g \quad (7)$$

Trong đó:

$$C_g = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{2kd}{sinh\ (2kd)}\right)\frac{\lambda}{T_e} \quad (8)$$

λ - chiều dài sóng; T_e - chu kỳ sóng;

Ở vùng nước nông, λ được tính theo công thức (Cornett, 2008):

$$\lambda = \frac{gT_e^2}{2\pi}\left\{tanh\left[\left(\frac{4\pi^2 d}{gT_e^2}\right)^{3/4}\right]\right\}^{2/3} \quad (9)$$

Như vậy có sự khác nhau về công thức tính P_w giữa 2 tài liệu. Vấn đề này sẽ được kiểm tra trong phần thực nghiệm.

c) Đối với vùng nước trung bình

Đối với độ sâu nước trung bình (1/20 ≤ d/λ < 1/2), chúng ta phải xem xét hiệu chỉnh độ sâu của nước. Khi đó, Pw được tính như sau:

$$P_w = \bar{E}\left(\frac{gT_e}{2\pi} tanhkd\right)\left[\frac{1}{2}\left(1 + \frac{2kd}{sinh\ 2kd}\right)\right] \quad (10)$$

Như vậy, độ sâu của nước (d) và bước sóng (λ) là cần thiết để xác định các điều kiện thích hợp trong tính toán P_w. Bước sóng được ước tính theo chu kỳ sóng trung bình theo công thức:

$$\lambda = \frac{g}{2\pi} T_e^2 \quad (11)$$

Tuy nhiên, trong tài liệu (Wen và Yu, 1985), các tác giả chỉ ra rằng để thu được kết quả chính xác hơn, không thể tính trực tiếp bước sóng từ biểu thức trên được. Thay vào đó, chúng ta phải nhân với hệ số thực nghiệm là (0,87). Do đó, bước sóng có thể được tính theo công thức:

$$\lambda = 0{,}87 \frac{g}{2\pi} T_e^2 \quad (12)$$

Như vậy, để tính được công suất năng lượng sóng thì ngoài độ cao sóng, cần phải biết độ sâu đáy biển *d*, chu kỳ T_e và giá trị trọng lực *g*. Trong các phần sau sẽ nghiên cứu về các vấn đề này.

3.2. Xác định trọng lực cho các điểm cần tính P_w

Để tính toán P_w cần biết trọng lực *g* tại mỗi điểm đo độ cao sóng. Trong các nghiên cứu trước đây, *g* thường được lấy là 9,81 m/s^2. Tuy nhiên, đây chỉ là giá trị gần đúng và có thể ảnh hưởng đến độ chính xác của kết quả tính toán P_w. Tuy ảnh hưởng này là không cao nhưng cũng cần quan tâm để nâng cao độ chính xác tính P_w. Hiện tại, chưa có số liệu đo trọng lực chi tiết đầy đủ trên Biển Đông. Trong khi đó, trên thế giới đã xây dựng được một số mô hình thế trọng trường toàn cầu (Ince và nnk., 2019). Từ các mô hình này, chúng ta có thể tính được giá trị trọng lực của các điểm đo trên Biển Đông.

Kết quả nghiên cứu trong tài liệu (Do và nnk., 2023) cho thấy mô hình SGG-UGM-2 là mô hình phù hợp nhất ở Biển Đông. Dựa trên dữ liệu mô hình SGG-UGM-2 kết hợp với các phép đo trọng lực trên tàu, chúng tôi đã xây dựng được mô hình trọng lực cho Biển Đông. Giá trị trọng lực tại các điểm cần tính toán năng lượng sóng được xác định bằng nội suy theo phương pháp trọng số khoảng cách nghịch đảo (Shepard, 1968). Theo phương pháp này, trong một vòng tròn bán kính R xung quanh điểm cần tính (ví dụ: R = 0,1^0), các điểm dữ liệu trọng lực được lựa chọn. Nên sử dụng tối thiểu bốn điểm trong vòng tròn. Nếu số điểm trong vòng tròn ít hơn bốn, R sẽ được tăng lên bằng cách nhân với hệ số lớn hơn 1. Quá trình này có thể được tự động hóa trong lập trình tính toán.

Trọng số p_i của điểm *i* được tính bằng công thức (Shepard, 1968):

$$p_i = \frac{1}{D_i} \quad (13)$$

Trong đó: D_i là khoảng cách từ điểm cần tính đến điểm *i* đã biết giá trị trọng lực.

Giá trị trọng lực của điểm cần tính được nội suy từ n điểm theo công thức (Shepard, 1968):

$$g = \frac{\sum_{i=1}^{n} g_i p_i}{\sum_{i=1}^{n} p_i} \quad (14)$$

Phương pháp này có ưu điểm là có thể áp dụng cả khi dữ liệu trọng lực được cung cấp dưới dạng lưới và khi chúng ở dạng các điểm đo rời rạc. Khối lượng tính toán không quá lớn và phù hợp với cả khu vực có biến động trọng lực mạnh hoặc yếu. Do đó, trong bài toán xác định giá trị trọng lực tại các điểm đo cao vệ tinh để tính toán tiềm năng năng lượng sóng, chúng tôi đề xuất sử dụng phương pháp này.

3.3. Xác định độ sâu cho các điểm cần tính P_w

Hiện nay, chưa có số liệu đo độ sâu trực tiếp đầy đủ trên Biển Đông. Trong điều kiện đó, một số mô hình độ sâu toàn cầu đã được xây dựng và cho phép xác định độ sâu trên Biển Đông, trong đó có 2 mô hình hiện đại như: GEBCO2022 và TOPO-V25.1. Trong tài liệu (Nguyễn và nnk., 2023) đã đánh giá độ chính xác mô hình GEBCO2022 và TOPO-V25.1 bằng cách so sánh chúng với 27.663 điểm đo sâu trực tiếp. Kết quả đánh giá cho thấy mô hình GEBCO2022 có độ chính xác tốt hơn trên Biển Đông. Do đó, mô hình này kết hợp với số liệu đo sâu trực tiếp sẽ được sử dụng để tính toán.

Số liệu độ sâu đáy biển có thể là số liệu đo đạc độ sâu đáy biển hoặc mô hình độ sâu đáy biển. Dù là loại số liệu nào thì các điểm có độ sâu thường không trùng với các điểm đo cao vệ tinh. Do đó, cần phải xác định giá trị độ sâu đáy biển cho các điểm đo cao vệ tinh bằng phương pháp các nội suy. Phương pháp nội suy trọng số khoảng cách nghịch đảo (Shepard, 1968) có thể được áp dụng để nội suy độ sâu.

3.4. Xác định chu kỳ sóng

Dữ liệu đo độ cao vệ tinh cung cấp độ cao sóng (*SWH*) và tốc độ gió chính xác. Tuy nhiên, nó không cung cấp chu kỳ sóng, đây là thông số quan trọng để tính P_w. Để giải quyết vấn đề này chu kỳ sóng thường được xác định bằng mô hình đảo ngược. Các nghiên cứu của (Wang, 2006) và (Miao và nnk., 2012) là nền tảng cho sự phát triển của các mô hình đa thức. (Wang, 2006) trình bày mối quan hệ giữa chiều cao sóng không thứ nguyên và tuổi sóng như sau:

$$1{,}44\frac{gT_z}{2\pi U_{10}} = \alpha\left(\frac{gSWH}{U_{10}^2}\right)^{\beta} \quad (15)$$

Trong đó: phần nằm trong ngoặc đơn là chiều cao sóng không thứ nguyên; vế bên trái là tuổi sóng; Tz là chu kỳ sóng trung bình, theo (Li, 2007) $T_z = 0{,}8017\ T_e$; và U_{10} là tốc độ gió. Trên cơ sở dữ liệu đo độ cao ERA-40 và Jason-1, (Miao và nnk., 2012) phát triển một mô hình thực nghiệm đa thức bậc bốn cho sự đảo ngược xác định chu kỳ sóng. Mô hình đa thức được xây dựng có dạng như sau:

$$1{,}44\frac{gT_z}{2\pi U_{10}} = \sum_{i=1}^{n} a_i\left(\frac{gSWH}{U_{10}^2}\right)^{i} + C \quad (16)$$

Dựa vào các số liệu thực nghiệm, xác định được các hệ số a_i và C thì mô hình trên hoàn toàn xác định và từ đó có thể xác định được chu kỳ T_Z và T_e. Kết quả thực nghiệm cho thấy mô hình đa thức từng phần theo từng phân đoạn độ cao sóng có độ chính xác cao nhất.

3.5. Đánh giá độ chính xác mật độ công suất sóng

Đánh giá độ chính xác mật độ công suất sóng là việc cần thiết nhưng cũng rất khó thực hiện do hạn chế về trị đo trực tiếp có độ chính xác cao trên biển. Trong điều kiện đó, bài báo này đề xuất cách đánh giá phương pháp xác thực chéo (Cross validation) như sau: Giả sử trên khu vực nghiên cứu có n điểm đã tính được P_w. Lấy ra 1 điểm i có giá trị $P_{w_i}^{Đo}$. Dùng (n-1) điểm còn lại để nội suy ra mật độ công suất sóng cho điểm i ($P_{w_i}^{NS}$). Tính độ lệch giữa giá trị đo và giá trị nội suy theo công thức:

$$\Delta P_{w_i} = P_{w_i}^{NS} - P_{w_i}^{Đo} \quad (17)$$

Lần lượt thay đổi điểm *i* từ *1* đến *n* ta sẽ có tập hợp độ lệch ΔP_{w_i}. Coi độ lệch này là trị đo thứ cấp thì giá trị thực của trị đo này bằng 0. Sai số thực chính bằng độ lệch. Khi đó, sai số trung phương của độ lệch được tính (Gauss, 1823):

$$m_{\Delta Pw} = \pm\sqrt{\frac{[\Delta Pw \Delta Pw]}{n}} \quad (18)$$

Từ công thức (17) ta có công thức tính sai số trung phương (Đặng và nnk., 2015):

$$m_{\Delta Pw}^2 = m_{Pw_NS}^2 + m_{Pw_đo}^2 \quad (19)$$

Trong đó: $m_{Pw_NS}^2$ là sai số của giá trị P_w nội suy; $m_{Pw_đo}^2$ là sai số của giá trị P_w đo.

Nếu coi sai số của giá trị nội suy bằng sai số của giá trị đo (điều này là gần đúng vì sai số của giá trị nội suy thường lớn hơn sai số của giá trị đo), thay vào công thức (19) ta có:

$$m_{\Delta Pw}^2 = m_{Pw_đo}^2 + m_{Pw_đo}^2 \quad (20)$$

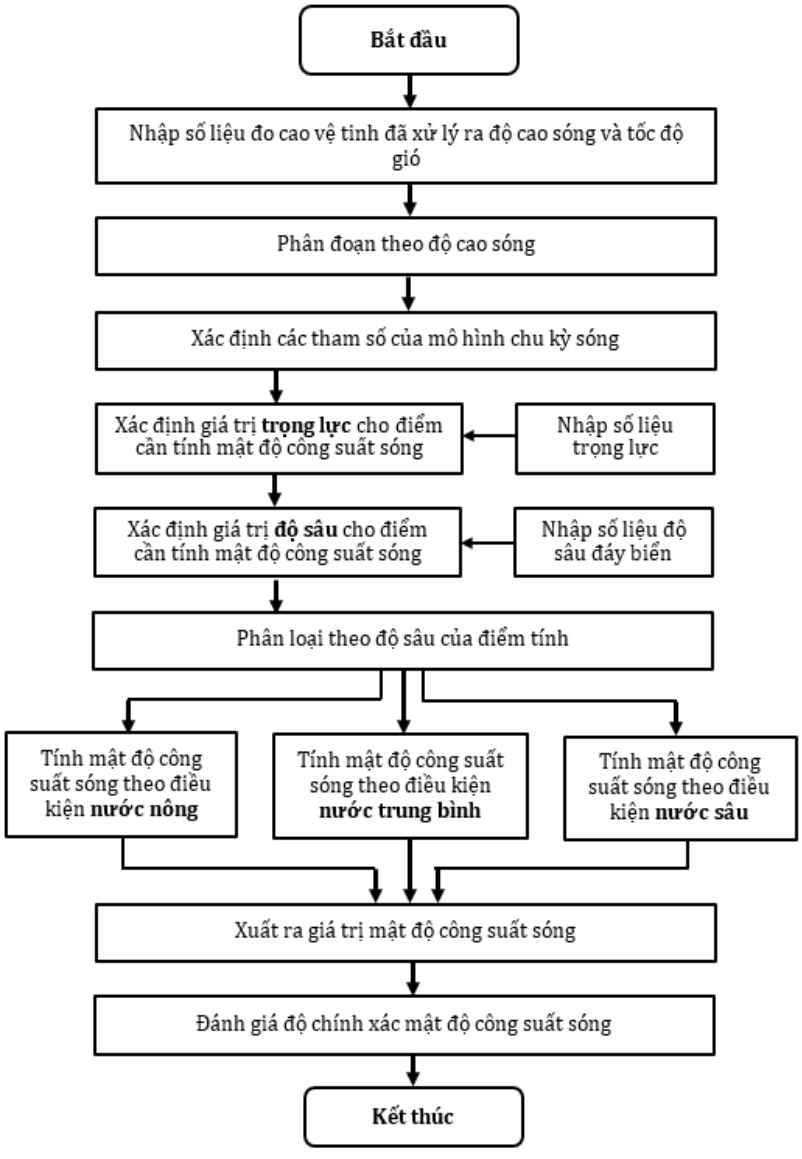
Từ đây suy ra:

$$m_{Pw_{đo}} = \frac{m_{\Delta pw}}{\sqrt{2}} = \pm\sqrt{\frac{[\Delta Pw \Delta Pw]}{2n}} \quad (21)$$

Lưu ý rằng: đây chỉ là độ chính xác nội bộ của mật độ công suất sóng.

3.6. Sơ đồ thuật toán xác định mật độ công suất sóng từ số liệu đo cao vệ tinh trên Biển Đông

Với cơ sở lý thuyết như trên, sơ đồ thuật toán xác định mật độ công suất sóng từ số liệu đo cao vệ tinh trên Biển Đông được xây dựng (Hình 3).



Hình 3. Sơ đồ thuật toán xác định mật độ công suất sóng từ số liệu đo cao vệ tinh trên Biển Đông.

4. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

4.1. Tính toán thử nghiệm để kiểm chứng công thức

Để kiểm chứng các công thức, chúng tôi tiến hành tính toán thủ công bằng excel cho 09 điểm ở 3 điều kiện: nước nông, nước sâu và nước trung bình. Kết quả tính được trình bày trên Bảng 2. Trong bảng này, cột (5) là kết quả tính theo công thức đơn giản, phổ biến, chưa xét đến điều kiện chi tiết về phân loại độ sâu. Kết quả này được dùng để kiểm tra sai số lớn, thô. Cột (6) và (7) là kết quả tính ở điều kiện nước nông theo các công thức khác nhau. Cột (8) và (9) là kết quả tính theo điều kiện nước trung bình.

Kết quả tính trong điều kiện nước nông theo công thức (7) phù hợp với công thức (2). Kết quả tính trong điều kiện nước nông theo công thức (6) không phù hợp, giá trị chỉ bằng một nửa kết quả tính theo công thức (2). Như vậy, công thức (7) được lựa chọn.

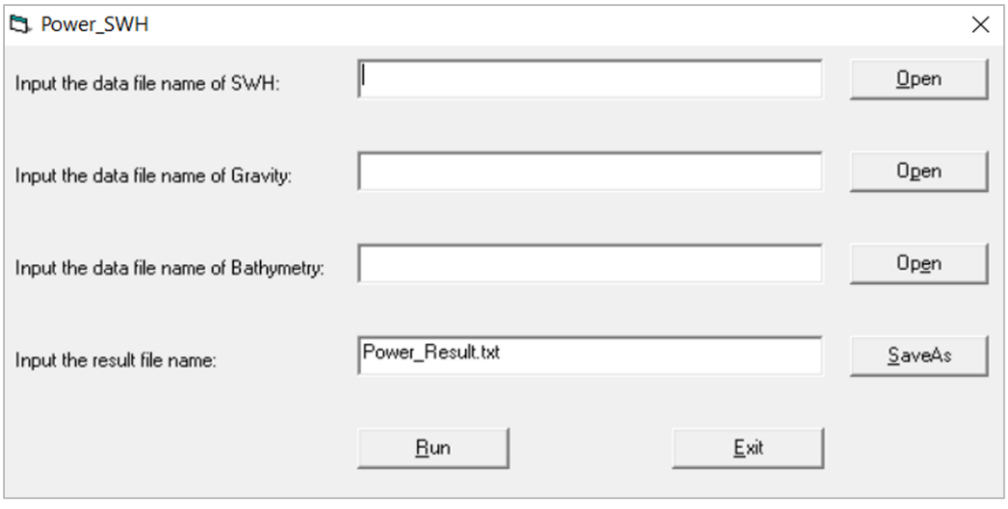
Kết quả tính trong điều kiện nước sâu và nước trung bình theo các công thức (5) và (10) phù hợp với kết quả tính theo công thức (2). Các công thức này được lựa chọn để lập chương trình tính toán tiếp theo.

4.2. Kết quả xây dựng chương trình tính mật độ năng lượng sóng

Với lý thuyết và quy trình tính ở trên, và để tự động việc tính toán, chương trình tính mật độ năng lượng sóng được xây dựng như Hình 4.

Bảng 2. Kết quả tính toán kiểm chứng công thức.

TT	SWH (m)	Độ sâu (m)	Phân loại theo độ sâu	Pw				
				Theo công thức (2)	Nước nông, theo công thức (6)	Nước nông, theo công thức (7)	Nước sâu, theo công thức (5)	Nước trung bình, theo công thức (10)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1	1,801	-69,949	Sâu	15,611			15,227	15,393
2	1,860	-69,000	Sâu	17,082			16,662	16,922
3	2,004	-62,098	Sâu	17,865			17,426	17,577
4	1,966	-44,597	Trung bình	19,366			18,890	19,368
5	1,805	-38,001	Trung bình	15,181			14,807	16,309
6	1,862	-59,011	Trung bình	16,364			15,962	16,313
7	0,509	-0,757	Nông	0,832	0,442	0,881	0,812	
8	0,440	-1,030	Nông	0,545	0,380	0,752	0,532	
9	0,618	-1,001	Nông	1,297	0,749	1,490	1,265	



Hình 4. Giao diện chương trình tính mật độ công suất sóng.

Trình tự chạy chương trình như sau:

- Nhập file số liệu vào mục: Input the data file name of SWH
- Nhập file số liệu trọng lực và mục: Input the data file name of Gravity
- Nhập file số liệu độ sâu vào mục: Input the data file name of Bathymetry
- Nhập file kết quả tính vào mục: Input the result file name.
- Chạy chương trình bằng nút lệnh Run. Sau khi chạy xong, thoát khỏi chương trình bằng nút lệnh Exit.

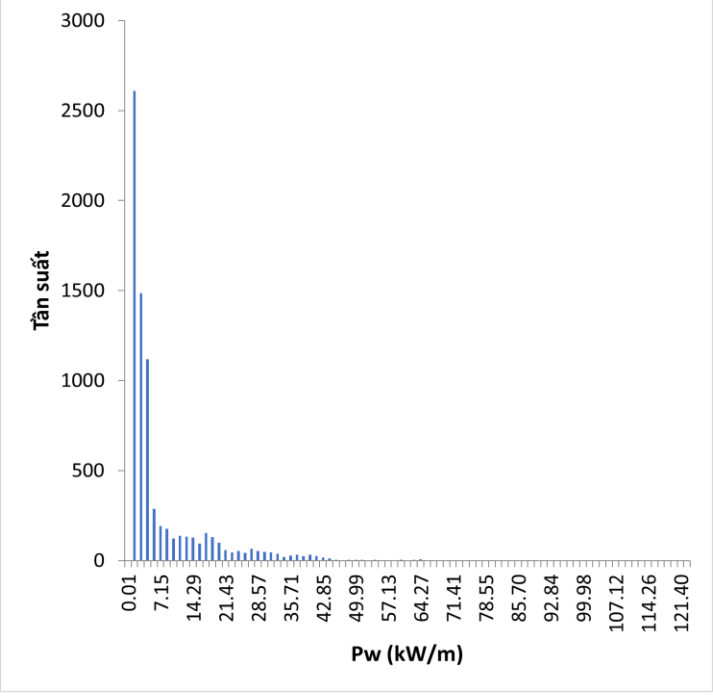
Để kiểm chứng chương trình, kết quả tính của chương trình được so sánh với kết quả tính thủ công bằng excel (Bảng 3). Kết quả so sánh cho thấy: độ lệch giữa tính thủ công và tính bằng chương trình rất nhỏ, độ lệch lớn nhất chỉ là 0,001 kW/m, chứng tỏ chương trình tính toán đúng.

4.3. Kết quả tính toán mật độ công suất sóng

Từ số liệu đo cao vệ tinh, chung tôi đã tính toán được mật độ công suất sóng cho 7.542 điểm trên Biển Đông. Mật độ công suất sóng nhỏ nhất là 0,006 kW/m; lớn nhất là 122,827 kW/m; trung bình là 6,519 kW/m. Trên Hình 5 là biểu đồ tần suất của P_w. Hình này cho thấy: mật độ công suất sóng chủ yếu tập trung trong khoảng từ 1,5÷44,3 kW/m.

Bảng 3. Kết quả kiểm chứng chương trình.

TT	B (°)	L (°)	SWH(m)	Pw (kW/m)		
				Chương trình	Kiểm chứng	Độ lệch
1	5,536202	107,425088	1,801	15,226	15,227	-0,001
2	5,597525	107,411535	1,860	16,662	16,662	0,000
3	5,658848	107,397980	2,004	17,425	17,426	-0,001
4	5,781493	107,370864	1,966	19,367	19,368	-0,001
5	6,088104	107,303039	1,805	16,309	16,309	0,000
6	6,149425	107,289467	1,862	16,313	16,313	0,000
7	20,102131	110,568007	0,509	0,881	0,881	0,000
8	20,958922	110,361569	0,440	0,752	0,752	0,000
9	11,760957	117,020453	0,618	1,490	1,490	0,000



Hình 5. Biểu đồ tần suất của mật độ công suất sóng.

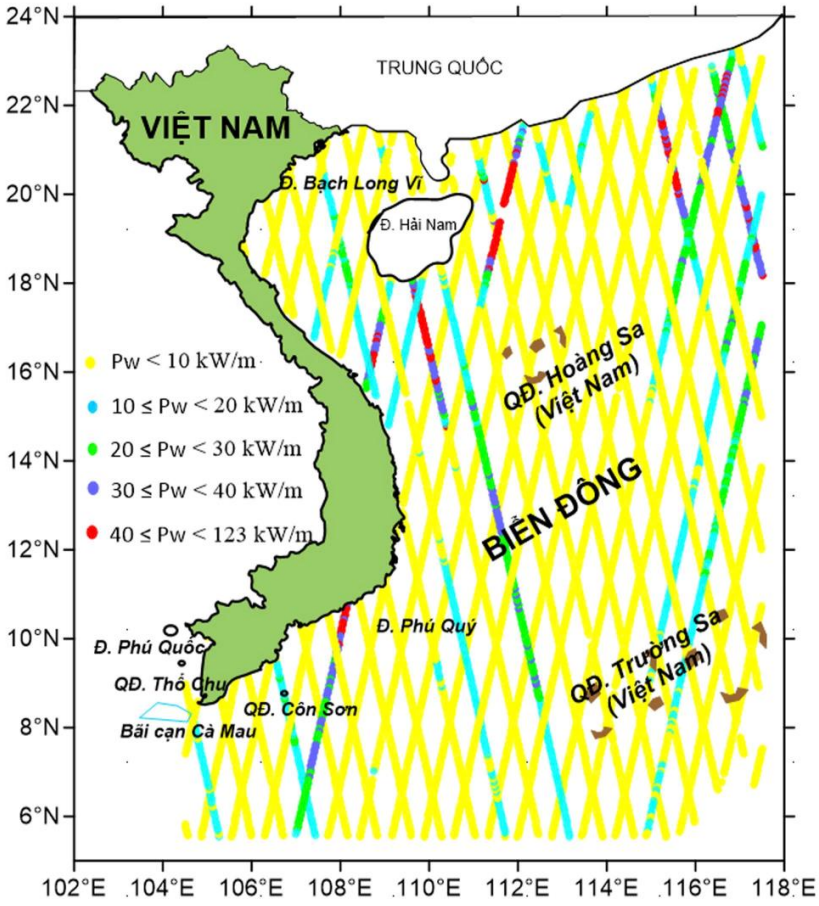
Để biết được phân bố của P_w theo vị trí, chúng tôi biểu diễn P_w trên Hình 6. Hình này cho thấy: phần lớn các điểm có giá trị P_w nhỏ hơn 10 kW/m, chỉ một số nơi có P_w lớn hơn 10 kW/m.

Thống kê theo độ lớn của P_w cũng được thực hiện và trình bày trên Bảng 4. Bảng này cho thấy những điểm có $P_w < 10$ kW/m chiếm tới gần 80%.

4.4. Kết quả đánh giá độ chính xác mật độ công suất sóng

Theo phương pháp đánh giá đã trình bày ở mục 3.5, kết quả đánh giá như sau: Độ lệch lớn nhất là 19,136 kW/m; nhỏ nhất là -21,729 kW/m; trung bình là 0,012 kW/m. Sai số trung phương của độ lệch là ±1,443 kW/m. Sai số xác định P_w đạt ±1,023 kW/m.

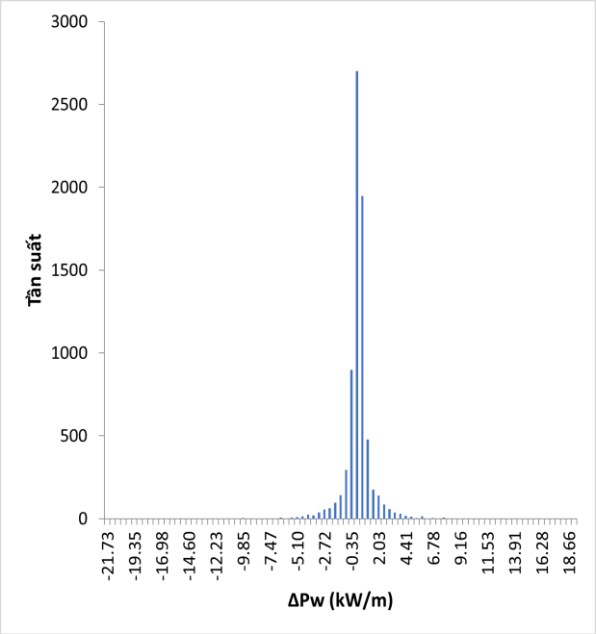
Biểu đồ tần suất độ lệch được trình bày trên Hình 7. Hình này cho thấy: độ lệch có giá trị lớn có tần suất ít; độ lệch có giá trị nhỏ có tần suất lớn; độ lệch có tính chất đối xứng.



Hình 6. Phân bố của P_w theo vị trí.

Bảng 4. Kết quả thống kê theo độ lớn của P_w.

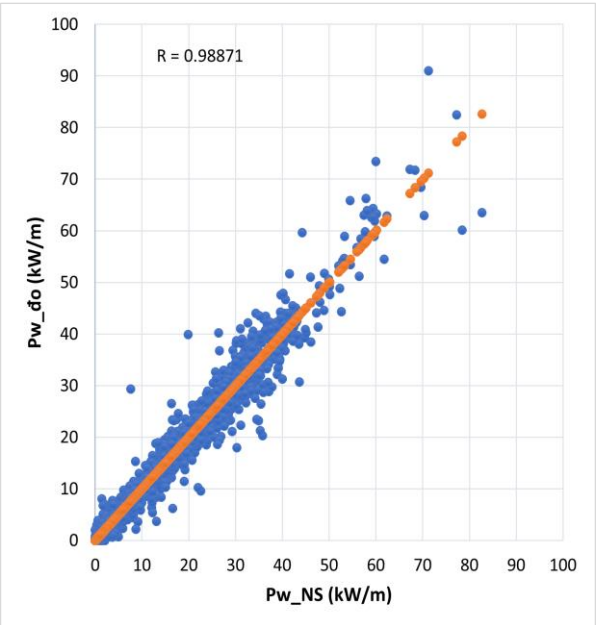
Khoảng phân loại (kW/m)	Số điểm	%
0,006 ≤ Pw < 10	5.989	79,4%
10 ≤ Pw < 20	868	11,5%
20 ≤ Pw < 30	363	4,8%
30 ≤ Pw < 40	212	2,8%
40 ≤ Pw < 122,827	110	1,5%
Tổng	7.542	100%



Hình 7. Biểu đồ tần suất độ lệch P_w.

Kết quả thống kê cũng cho thấy chỉ có 153 điểm có giá trị độ lệch lớn hơn 3 lần sai số trung phương, chiếm 2,03%. Điều này chứng tỏ độ lệch có tính chất ngẫu nhiên, tuân theo luật phân bố chuẩn.

Trên Hình 8 là biểu đồ tương quan giữa P_w đo và P_w nội suy. Hình này cho thấy tương quan này rất tốt; hệ số tương quan (R) gần bằng 1.



Hình 8. Tương quan giữa mật độ công suất sóng đo và nội suy.

5. Kết luận và kiến nghị

Nghiên cứu này đã xây dựng được phương pháp và quy trình tính toán mật độ công suất sóng theo độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh trên Biển Đông. Việc tính toán có xem xét đến yếu tố trọng lực và độ sâu. Bài báo cũng đề xuất phương pháp đánh giá độ chính xác của kết quả tính. Trên cơ sở lý thuyết nghiên cứu được, bài báo đã xây dựng chương trình để tự động việc tính toán. Chương trình được kiểm tra, đảm bảo kết quả tính tin cậy.

Kết quả thực nghiệm đã tính toán được mật độ công suất sóng cho 7.542 điểm từ số liệu đo cao vệ tinh SARAL/AltiKa ở chu kỳ 32 trên Biển Đông. Giá trị nhỏ nhất là 0,006 kW/m; lớn nhất là 122,827 kW/m; trung bình là 6,519 kW/m. Mật độ công suất sóng chủ yếu tập trung trong khoảng từ 1,5 kW/m đến 44,3 kW/m. Sai số xác định P_w đạt ±1,023 kW/m. Đây là kết quả mới về ứng dụng số liệu đo cao vệ tinh để đánh giá năng lượng sóng trên Biển Đông.

Kết quả nghiên cứu này là cơ sở để phát triển nghiên cứu xác định mật độ công suất sóng trong thời gian dài từ số liệu kết hợp nhiều loại vệ tinh đo cao. Từ đó, có những đánh giá tiềm năng năng lượng sóng toàn diện trên Biển Đông.

Lời cảm ơn

Chúng tôi xin chân thành cảm ơn Đề tài mã số TNMT.ĐL.2025.06.01 của Bộ Nông nghiệp và Môi trường đã tài trợ cho nghiên cứu này. Chúng tôi cũng xin cám ơn Department of Earth Observation and Space Systems (DEOS) đã cung cấp số liệu cho nghiên cứu này.

Tài liệu tham khảo

Bai, S. (2006). A brief analysis of the world energy crisis and China's strategic solution. *Experiment Science & Technology*, Z1, 168-170.

Barstow, S., Haug, O., & Krogstad, H. (1998). Satellite altimeter data in wave energy studies. In *Proceedings of Waves'97* (pp. 339-354). Universiti Teknologi Malaysia.

Bộ Tài nguyên và Môi trường. (2022). *Báo cáo tiềm năng năng lượng gió, sóng ngoài khơi tại các vùng biển Việt Nam*.

Chính phủ Việt Nam. (2024). *Quyết định 215/QĐ-TTg phê duyệt Chiến lược phát triển năng lượng*

quốc gia Việt Nam đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045.

CNES & ISRO. (2013). *SARAL/AltiKa mission overview*. CNES Publications.

Cornett, A. M. (2008). A global wave energy resource assessment. In *Proceedings of the 18th International Conference on Offshore and Polar Engineering*. International Society of Offshore and Polar Engineers.

Curto, D., Doan, V. B., Franzitta, V., & Sanseverino, E. R. (2020). Wave and wind energy systems integration in Vietnam: Analysis of energy potential and economic feasibility. In *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*.

Đặng, N. C., Nguyễn, X. B., Bùi, T. H. T., Trần, T. T. T., & Ninh, T. K. A. (2015). *Giáo trình lý thuyết sai số*. Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội.

Do, V. M., Nguyen, V. S., Tran, T. D., Nguyen, T. L., Khuong, V. L., Nguyen, D. H., … Tran, T. D. (2023). Evaluation of the precision of some new global Earth gravitational models in the East Vietnam Sea. *Vietnam Journal of Marine Science and Technology*, 23(3), 265-277. https://doi.org/10.15625/1859-3097/18635.

Gauss, C. F. (1823). *Theoria combinationis observationum erroribus minimis obnoxiae*. In *Carl Friedrich Gauss Werke* (Vol. 4, pp 1-60).

Guan, Y. (2011). *Study on feasibility evaluation of wave energy in China* (Master's thesis). Ocean University of China, Qingdao.

Iglesias, G., López, M., & Carballo, R. (2009). Wave energy potential in Galicia (NW Spain). *Renewable Energy*, 34(11), 2323-2333.

Ince, E. S., Barthelmes, F., Reißland, S., Elger, K., Förste, C., Flechtner, F., & Schuh, H. (2019). ICGEM-15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services, and future plans. *Earth System Science Data*, 11(2), 647-674. https://doi.org/10.5194/essd-11-647-2019.

Leon, S., Restano, M., & Benveniste, J. (2023). Assessment of Wave Power Density Using Sea State Climate Change Initiative Database in the French Façade. *Journal of Marine Science and Engineering*, *11*(10), 1970. https://doi.org/10.3390/jmse11101970.

Leon, S., Orejarena-Rondón, A., Panfilova, M., Restano, M., Benveniste, J., & Sabia, R. (2025). Wave energy potential in the Mediterranean: Insights from high-resolution satellite altimetry, in-situ data and the ERA5 reanalysis. In *Proceedings of the European Wave and Tidal Energy Conference* (EWTEC 2025). https://doi.org/10.36688/ewtec-2025-732.

Li, C., Liao, W., & Wang, Y. (2010). Research progress of ocean wave energy power technology in the world. *The Magazine on Equipment Machine*, 2, 68-73.

Li, R. (2007). *Research on various periods of sea waves* (Master's thesis). Ocean University of China, Qingdao.

Miao, H., Ren, H., Zhou, X., và nnk. (2012). Study on altimeter-based inversion model of mean wave period. *Journal of Applied Remote Sensing*, 6(1), 063591.

Nguyen, S. V., Nguyen, H. T. T., & Le, T. C. (2025). Assessment of the accuracy of significant wave heights derived from satellite altimetry data in the East Sea (in Vietnamese). *Journal of Mining and Earth Sciences*, 66(5), 79-88. https://doi.org/10.46326/JMES.2025.66(5).07.

Nguyễn, V. S., Đỗ, V. M., & Nguyễn, T. T. H. (2023). Đánh giá độ chính xác của mô hình độ sâu toàn cầu GEBCO2022 và TOPO-V25.1 trên biển Đông. *Tạp chí Khoa học Đo đạc và Bản đồ*, 56, 1-8. https://doi.org/10.54491/jgac.2023.56. 679.

Pontes, M. T. (1998). Assessing the European wave energy resource. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 120(4), 226-231.

Pontes, M. T., & Bruck, M. (2008). Using remote sensed data for wave energy resource assessment. In *Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (1-9). ASME.

Pontes, M. T., Aguiar, R., & Oliveira Pires, H. (2005). A nearshore wave energy atlas for

Portugal. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 127(3), 249-255.

Quayle, R. G., & Changery, M. J. (1981). Estimates of coastal deepwater wave energy potential for the world. In *Proceedings of Conference Oceans 1981* (903-907). IEEE.

Shepard, D. (1968). A two-dimensional interpolation function for irregularly spaced data. In *Proceedings of the 1968 ACM National Conference* (pp. 517-524). https://doi.org/10.1145/800186.810616

Verron, J., Sengenes, P., Lambin, J., Noubel, J., Steunou, N., Guillot, A., … Gupta, P. K. (2015). The SARAL/AltiKa altimetry satellite mission. *Marine Geodesy*, 38(sup1), 2-21. https://doi.org/10.1080/01490419.2014.1000471.

Wan, Y., Zhang, J., Meng, J., & Wang, J. (2015). A wave energy resource assessment in China's seas based on multi-satellite merged radar altimeter data. *Acta Oceanologica Sinica*, 34(3), 115-124. https://doi.org/10.1007/s13131-015-0627-6.

Wang, C., & Lu, W. (2009). *Analysis methods and reserves evaluation of ocean energy resources* (61-62). China Ocean Press.

Wang, X. (2006). *Research on retrieving wave period from satellite altimeters* (Master's thesis). Ocean University of China, Qingdao.

Wen, S., & Yu, Z. (1985). *Ocean wave theory and calculation principle*. China Science Press.

Zheng, C., Chen, H., & Zheng, Y. (2011). Research on wave energy resources in the northern China Sea during recent 10 years using SWAN wave model. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 6(2), 54-59.

Zheng, C., Li, X. (2011). Wave energy resources assessment in the China Sea during the last 22 years by using WAVEWATCH-III wave model. *Periodical of Ocean University of China*, 41(11), 5-12.

Zheng, C., Pan, J. (2014). Assessment of the global ocean wind energy resource. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 382-391.

Zheng, C., Pan, J., & Li, J. (2013). Assessing the China Sea wind energy and wave energy resources from 1988 to 2009. *Ocean Engineering*, 65, 39-48.

Zheng, C., Zhuang, H., Li, X., và nnk. (2012). Wind energy and wave energy resources assessment in the East China Sea. *Science China Technological Sciences*, 55(1), 163-173.