

TẠP CHÍ **VẬT LIỆU**
& XÂY DỰNG

TẠP CHÍ CỦA VIỆN VẬT LIỆU XÂY DỰNG - BỘ XÂY DỰNG

TẬP 12 SỐ 2 | 04 - 2022



ISSN 1859-381X



VIỆN VẬT LIỆU XÂY DỰNG

VIETNAM INSTITUTE FOR BUILDING MATERIALS

Trụ sở chính: Số 235 đường Nguyễn Trãi, phường Thanh Xuân Trung, quận Thanh Xuân, TP. Hà Nội
Điện thoại: 024.3858.1111 * Fax: 024.3858.1112 * Email: vienvlxd@vibm.vn * Website: www.vibm.vn
Phân viện Vật liệu xây dựng miền Nam: Lô I- 3b-5, đường N6, Khu Công nghệ cao, phường Tân Phú, Tp. Thủ Đức, Tp. Hồ Chí Minh
Điện thoại: 028.37402343 * Fax: 028.37402343
Cơ sở 2 Hà Nam: Khu Tiểu thủ công nghiệp, xã Trung Lương, huyện Bình Lục, tỉnh Hà Nam



Trụ sở chính của VIBM tại Hà Nội

Viện Vật liệu xây dựng (VIBM) trực thuộc Bộ Xây dựng, được thành lập ngày 4/11/1969, là viện nghiên cứu khoa học và công nghệ Quốc gia về vật liệu xây dựng và các lĩnh vực khác bao gồm: cơ khí xây dựng, hạ tầng kỹ thuật và môi trường xây dựng; phục vụ công tác quản lý Nhà nước và phát triển ngành công nghiệp vật liệu xây dựng trên phạm vi toàn quốc.

Chức năng nhiệm vụ:

- Xây dựng chiến lược, quy hoạch, kế hoạch, chính sách phát triển, quy chuẩn, tiêu chuẩn;
- Nghiên cứu khoa học – công nghệ;
- Phân tích, thí nghiệm, kiểm định, chứng nhận hợp chuẩn – hợp quy;
- Khảo sát, thăm dò tài nguyên khoáng sản;
- Tư vấn đầu tư sản xuất, thẩm định, thiết kế và chuyển giao công nghệ;
- Sản xuất, xuất – nhập khẩu; đầu tư sản xuất, kinh doanh;
- Tổ chức thi công xây dựng;
- Đào tạo, bồi dưỡng kỹ thuật viên, công nhân vận hành; phổ biến tiêu chuẩn, quy chuẩn và văn bản pháp quy;
- Nghiên cứu thị trường, xúc tiến thương mại.

Đơn vị thành viên:

- Phân viện Vật liệu xây dựng miền Nam
- Trung tâm Nghiên cứu chiến lược phát triển VLXD
- Trung tâm Tư vấn và Dịch vụ kỹ thuật xây dựng
- Văn phòng chứng nhận chất lượng sản phẩm VLXD
- Trung tâm Xi măng và Bê tông
- Trung tâm Vật liệu chịu lửa và Chống cháy
- Trung tâm Gốm sứ – Thủy tinh
- Trung tâm Thiết bị, môi trường và An toàn lao động
- Trung tâm Vật liệu hữu cơ và Hóa phẩm xây dựng
- Trung tâm Kiểm định VLXD
- Trung tâm Vật liệu xây dựng công trình giao thông



Viện trưởng Lê Trung Thành báo cáo Tổng Bí thư Nguyễn Phú Trọng, Phó Thủ tướng Trịnh Đình Dũng và Bộ trưởng Bộ Xây dựng Phạm Hồng Hà về một số hoạt động nghiên cứu khoa học trọng điểm của Viện Vật liệu xây dựng



Thừa ủy quyền của Thủ tướng Chính phủ, Bộ trưởng Phạm Hồng Hà trao Bằng khen của Thủ tướng Chính phủ cho Viện Vật liệu xây dựng



Phó Thủ tướng Trịnh Đình Dũng và Đoàn công tác của Chính phủ đến thăm và làm việc tại Viện VLXD về Chiến lược phát triển VLXD thời kỳ 2021-2030, định hướng đến năm 2050

- 5 Nghiên cứu một số tính chất của tro xỉ đốt chất thải rắn sinh hoạt ở Việt Nam và tiềm năng sử dụng làm vật liệu xây dựng
Cao Tiến Phú, Hoàng Lê Anh, Nguyễn Thị Kim, Lê Văn Quang
- 12 Nghiên cứu ảnh hưởng của xi lò cao hạt hóa, tro trấu đến một số tính chất của hỗn hợp bê tông và bê tông cát mịn cường độ cao
Ngô Văn Toàn
- 22 Phân tích ứng xử động của dầm chữ I thẳng có bản bụng lượn sóng hình thang chịu tải trọng di động
Nguyễn Hồng Ân, Tô Bảo Quốc, Đào Minh Tiến
- 27 Tối ưu kết cấu dàn thép sử dụng thuật toán bầy sói xám
Nguyễn Hữu Kỳ, Lê Minh Hoàng
- 33 Gia cố nền đất yếu bằng trụ đất xi măng cho móng công trình dân dụng ở Tiền Giang
Nguyễn Ngọc Thắng, Nguyễn Trung Hiếu
- 38 Lan truyền sóng lên đảo ngầm có thềm trước dốc lớn
Nguyễn Quang Tạo, Hồ Đức Đạt, Nguyễn Trung Dũng, Phạm Thị Hằng
- 45 Phân tích ứng xử hố đào sâu sử dụng ringbeam đường kính lớn
Võ Nhật Hoàng, Huỳnh Quốc Thiện, Huỳnh Thị Thúy Thùy, Lại Văn Quý
- 53 Nghiên cứu kết cấu mặt đường bê tông xi măng rỗng có khả năng thoát nước mặt theo hướng phát triển bền vững
Nguyễn Thị Hồng, Lê Thanh Hà
- 64 Nghiên cứu ứng dụng vật liệu Neo – Web trong thi công tường chắn
Tạ Thị Huệ, Lê Thị Thu Thủy
- 70 Nghiên cứu ổn định chất lượng lớp phủ UHPC liên hợp cầu Thăng Long
Trần Bá Việt, Lương Văn Hùng, Bùi Xuân Chiến
- 80 Yếu tố gây mâu thuẫn giữa chủ đầu tư và nhà thầu gây chậm trễ trong xây dựng ở Thành phố Hồ Chí Minh
Nguyễn Trí Minh, Lê Hoài Long
- 85 Tường bê tông chịu lực đúc sẵn - giải pháp mới cho chung cư cao tầng - ứng dụng tại Việt Nam
Đông Trần Phước, Nguyễn Tâm
- 91 Nghiên cứu về nguyên nhân và tác động của sụt lún, sạt lở đất công trình giao thông vào mùa khô hạn ở đồng bằng sông Cửu Long
Lê Châu Tuấn
- 96 Giải pháp giảm thiểu phát thải CO₂ trong đổi mới công nghệ sản xuất xi măng của công ty xi măng INSEE Việt Nam
Nguyễn Văn Tuấn

Tổng biên tập
TS. Lưu Thị Hồng
Phó Tổng biên tập
TS. Vũ Văn Dũng

Hội đồng khoa học
PGS.TS. Lê Trung Thành
(Chủ tịch)
GS.TS. Nguyễn Việt Anh
PGS.TS. Huỳnh Đăng Chính
PGS.TS. Tạ Ngọc Dũng
GS.TS. Thái Hoàng
TS. Ứng Quốc Hùng
GS.TS.NCVCC. Trần Đại Lâm
GS.TS. Nguyễn Tố Lăng
PGS.TS. Lương Đức Long
GS.TS. Bùi Công Quang

PGS.TS. Nguyễn Văn Tuấn
GS.TS. Ngô Tuấn
TS. Trần Bá Việt
TS. Dirk Schwede
GS.TS. E.B.Королев
GS.TS. Ippei Maruyam
GS.TS. Johann Plank
GS.TS. Marios Soutsos
TS. Michael A. Waibel
GS.TS. Shunsuke Hanehara

Tòa soạn và trị sự
235 Nguyễn Trãi, Thanh Xuân, Hà Nội
Tel: 024 3 8582217
Fax: 024 3 8581112
E-mail: contact@jomc.vn
Website: <https://jomc.vn>
Giấy phép xuất bản:
Số 564/GP-BTTTT ngày 13/12/2020

- 5 Characteristics of municipal solid waste incineration ashes in Vietnam and potential used as construction material
Cao Tien Phu, Hoang Le Anh, Nguyen Thi Kim, Le Van Quang
- 12 Studying the effects of grain blast furnace slag, rice husk ash on some properties of high-strength fine sand concrete and concrete mixture
Ngo Van Toan
- 22 Dynamic analysis of steel I – girders with trapezoidal web corrugations due to moving load
Nguyen Hong An, To Bao Quoc, Dao Minh Tien
- 27 Sizing steel truss structures using grey wolf optimizer
Nguyen Huu Ky, Le Minh Hoang
- 33 Ground improvement using deep cement mixing columns under construction foundation in Tien Giang province
Nguyen Ngoc Thang, Nguyen Trung Hieu
- 38 Wave propagation on steep slope of submerged reefs
Nguyen Quang Tao, Ho Duc Dat, Nguyen Trung Dung, Phạm Thi Hang
- 45 Behavior analysis of deep excavation employing large diameter ringbeam
Vo Nhat Hoang, Huynh Quoc Thien, Huynh Thi Thuy Thuy, Lai Van Qui
- 53 Research on porous concrete pavement construction for sustainable drainage
Nguyen Thi Hong, Le Thanh Ha
- 64 Research on the application of Neoweb materials in wall construction
Tạ Thi Hue, Le Thi Thu Thuy
- 70 Research on stabilizing quality of UHPC composite overlays on OSDs Thang long Bridge Deck Repair Project
Tran Ba Viet, Luong Van Hung, Bui Xuan Chien
- 80 Factors of conflict between owner and contractor leading to project delay in Ho Chi Minh City
Nguyen Tri Minh, Le Hoai Long
- 85 Load bearing concrete precast panels new method for high-rise apartments case study in Vietnam
Dong Tran Phuoc, Nguyen Tam
- 91 Long Research on the causes and impacts of sideduction, landroids and traffic works in dry summer in Cuu Long river delta
Le Chau Tuan
- 96 Solutions to minimize CO₂ emission in cement production technology innovation of INSEE cement company in Vietnam
Nguyen Van Tuan

Editor-in-Chief

DR. Luu Thi Hong

Deputy Editor-in-Chief

Dr. Vu Van Dzung

Science Committee

Assoc. Prof. Dr. Le Trung Thanh
(Chairman of Science Committee)

Prof. Dr. Nguyen Viet Anh

Assoc. Prof. Dr. Huynh Dang Chinh

Assoc. Prof. Dr. Ta Ngoc Dung

Prof. Dr. Thai Hoang

Dr. Ung Quoc Hung

Prof. Dr. Tran Dai Lam

Prof. Dr. Nguyen To Lang

Assoc. Prof. Dr. Luong Duc Long

Prof. Dr. Bui Cong Quang

Assoc. Prof. Dr. Nguyen Van Tuan

Prof. Dr. Ngo Tuan

Dr. Tran Ba Viet

PhD. Dirk Schwede

Prof. Dr. E.B.Королев

Prof. Dr. Ipei Maruyam

Prof. Dr. Johann Plank

Prof. Dr. Marios Soutsos

Dr. Michael A. Waibel

Prof. Dr. Shunsuke Hanehara

Address

235 Nguyen Trai, Thanh Xuan, Hanoi

Tel: +8424 38582217

Fax: +8424 38581112

E-mail: contact@jomc.vn

Website: <https://jomc.vn>

License No. 564/ GP - BTTTT

13.12.2020

Lan truyền sóng lên đảo ngầm có thềm trước dốc lớn

Nguyễn Quang Tạo^{1,2*}, Hồ Đức Đạt^{1,2}, Nguyễn Trung Dũng¹, Phạm Thị Hằng²

¹ Khoa Xây dựng Công trình biển và Dầu khí, Đại học Xây dựng Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

² Viện Xây dựng Công trình biển, Đại học Xây dựng Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

TỪ KHOÁ

Mô phỏng số
Lan truyền sóng
Đảo ngầm
Thềm dốc lớn
Độ sâu nước nhỏ

TÓM TẮT

Địa hình chủ yếu của các đảo ở quần đảo Trường Sa là các rạn san hô với đặc điểm phía thềm trước đảo là mái dốc lớn sau đó đến bãi ngầm. Độ sâu nước trên bãi ngầm của một số đảo thay đổi theo thủy triều từ 2 m đến 6 m (tùy từng vùng đảo). Trên thế giới và ở Việt Nam đã có nhiều các nghiên cứu về lan truyền sóng lên các đảo ngầm, tuy nhiên vẫn còn nhiều vấn đề chưa nghiên cứu hết. Bài báo này trình bày nghiên cứu về mô phỏng lan truyền sóng lên đảo ngầm có độ dốc thềm trước là 1/5 và độ sâu nước trên bãi ngầm nhỏ (phù hợp với thực tế ở Quần đảo Trường Sa) bằng phần mềm mô phỏng số (Ansys Fluent) và có so sánh với kết quả mô hình thí nghiệm vật lý. Kết quả nghiên cứu chính cho thấy khi chiều cao sóng tới lớn hơn độ sâu nước trên bãi ngầm thì sóng sẽ vỡ ngay trên đỉnh thềm dốc và chiều cao sóng giảm dần nhưng có thể lớn hơn độ sâu nước trên bãi ngầm khi lan truyền vào trong đảo. Trong trường hợp chiều cao sóng tới nhỏ hơn hoặc bằng độ sâu nước trên bãi ngầm thì sóng không bị vỡ trên thềm, chiều cao sóng bị giới hạn bởi tỷ số 0,78 d (d là độ sâu nước).

KEYWORDS

Numerical modelling
Wave propagation
Submerged reefs
Steep slope
Shallow water

ABSTRACT

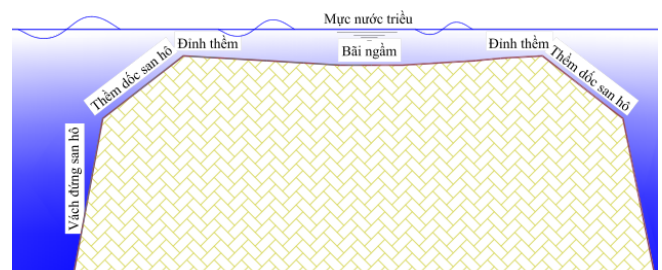
The main topography of the islands in the Truong Sa archipelago is coral reefs with the feature that reef face is a steep slope, then the reef. The water depth on the reef of some islands varies with the tide from 2 m to 6 m (depending on the island region). In the world and in Vietnam, there have been many studies on wave transmission across submerged reefs, but there are still many issues that have not been fully studied. This paper presents a study on the simulation of wave transmission across submerged reefs which have a steeply slope of 1/5 and a small water depth on the reef (suitable for reality in the Truong Sa Islands) using numerical modelling (Ansys Fluent) and compared with the results of the physical experimental model. The main research results show that the incident wave height is greater than the water depth on the reef, the wave will break at the top of the slope and the height will decrease but it can be greater than the water depth when propagating into the island. In case the incident wave height is less than or equal to the water depth on the reef, the wave will not break on the reef, the wave height is limited by the ratio 0.78 d (d is the water depth).

1. Đặt vấn đề

Vùng biển Việt Nam bao gồm hàng nghìn đảo, quần đảo. Các đảo này đóng vai trò đặc biệt trong việc phát triển kinh tế và bảo vệ chủ quyền quốc gia. Đặc biệt hai quần đảo xa bờ là Trường Sa và Hoàng Sa. Các đảo ở khu vực quần đảo Hoàng Sa, Trường Sa và vùng DK1 gồm hai loại : đảo chìm, đảo nổi.

Đặc điểm địa hình chủ của các đảo ngầm ở quần đảo Trường Sa và vùng DK1 là các rạn san hô thường chìm ngập dưới nước, các rạn ngầm này thường rất rộng có khi lên đến hàng chục kilômét như các đảo Đá Tây, Thuyền Chài, Đá Lát... Phần mặt đảo là bãi ngầm với bề rộng khá lớn, thành phần cấu tạo địa chất chủ yếu là các mảnh vụn san hô kết hợp san hô cục kích thước nhỏ. Phía xung quanh đảo là vùng thềm dốc. Các thềm dốc này thường chia làm hai phần. Phần phía trên là thềm san hô có độ dốc lớn, đây là một dải địa hình tương đối hẹp và là phần kéo dài tự nhiên của các đảo từ độ sâu vài mét đến hàng trăm

mét, cấu tạo địa chất dạng cành và đá san hô. Phần phía dưới là vách dựng đứng có độ cao tới hàng nghìn mét, cấu tạo địa chất là đá san hô.



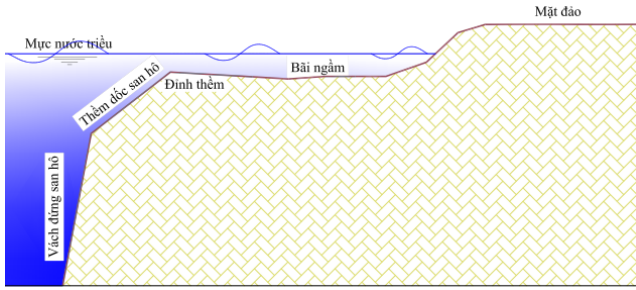
Hình 1. Mặt cắt ngang đảo ngầm điển hình ở quần đảo Trường Sa.

Đặc điểm địa hình chủ của các đảo nổi ở quần đảo Hoàng Sa, Trường Sa cũng tương tự như đảo ngầm, tuy nhiên mặt đảo là các rạn san hô nổi trên mặt nước.

*Liên hệ tác giả: taonq@nuce.edu.vn

Nhận ngày 15/11/2021, sửa xong ngày 21/12/2021, chấp nhận đăng 04/04/2022

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2022.322>



Hình 2. Mặt cắt ngang điển hình đảo nổi ở quần đảo Trường Sa.

Hiện nay công tác xây dựng các công trình trên các đảo, bãi ngầm phục vụ nhu cầu củng cố an ninh quốc phòng và phát triển kinh tế trên khu vực này là cấp bách và đang được triển khai mạnh mẽ. Một trong các khó khăn khi tính toán thiết kế xây dựng các công trình trên vùng thềm ngập nước của đảo, bãi ngầm là việc xác định chiều cao sóng ở khu vực thềm dốc quanh đảo.

Như trên giới thiệu, các đảo san hô thực chất là các núi ngầm, thường có địa hình ven đảo có độ dốc lớn. Những nghiên cứu lan truyền sóng lên địa hình dốc lớn còn khá hạn chế. Khi sóng lan truyền vào vùng địa hình có độ dốc lớn và độ sâu nước nhỏ thì sóng thường bị vỡ. Quá trình lan truyền sóng từ vùng nước sâu lên thềm các đảo có độ dốc lớn thường rất phức tạp. Sự khác biệt cơ bản của quá trình lan truyền sóng lên thềm có độ dốc lớn của các đảo, bãi ngầm với quá trình lan truyền sóng thông thường vào vùng nước nông là sự biến đổi đột ngột của địa hình thềm san hô từ vùng nước sâu hàng trăm mét đến vùng nước nông trên thềm có độ sâu một vài mét được tạo ra bởi vách dốc ngăn cách đứng của đảo. Sóng nước sâu trong quá trình truyền vào, khi gặp vách dốc của đảo thường bị vỡ tại đỉnh thềm hoặc sau đỉnh thềm (khi chiều cao sóng tới là đáng kể so với độ sâu nước trên bãi ngầm). Khi đó sóng sẽ bị tiêu hao phần lớn năng lượng và hình thành sóng mới tiếp tục lan truyền vào trong đảo.



Hình 3. Sóng vỡ ở đỉnh thềm đảo Thuyền Chài (TS-12/2020).

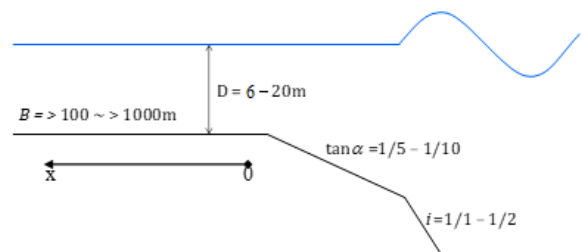
Vấn đề nghiên cứu này còn ít ở Việt Nam và trên thế giới. Các công thức trong các tiêu chuẩn và các mô hình toán dùng để xác định chiều cao sóng lan truyền lên bãi ngầm có độ dốc lớn đều là gần đúng [1].

Ở Việt Nam, liên quan đến vấn đề này các nghiên cứu có thể nói chỉ là mới bắt đầu, việc vận dụng các mô hình toán hiện đại hoặc các

tiêu chuẩn hiện hành để tính toán truyền sóng qua vách dốc đứng trên thềm san hô còn nhiều khó khăn do hạn chế của các mô hình toán cũng như các hướng dẫn tính toán trong các tiêu chuẩn. Hiện nay việc tính toán xác định thông số chiều cao sóng khi thiết kế các công trình kè bảo vệ bờ tại các đảo san hô như khu vực quần đảo Trường Sa thường được xác định gần đúng [2], tuy nhiên cách làm đó không phù hợp do sự hạn chế của tiêu chuẩn. Tiêu chuẩn Việt Nam [3] quy định: Chiều cao sóng tính toán không lớn hơn 78 % độ sâu nước (d) và trong giai đoạn thiết kế sơ bộ có thể lấy chiều cao sóng đáng kể $H1/3 = 0,6 d$. Theo tiêu chuẩn tải trọng do sóng và do tàu tác dụng lên công trình thủy [4], chiều cao sóng vỡ trên mái dốc đều cũng được xác định bằng cách tra đồ thị và giới hạn tính toán là độ dốc bãi $i = 0.2$.

Nghiên cứu của nhóm tác giả do PGS.TS. Đinh Quang Cường (Viện Xây dựng công trình biển - ĐH Xây dựng) cùng với PGS.TS. Trịnh Việt An (Phòng thí nghiệm trọng điểm quốc gia về động lực học sóng biển - Viện khoa học thủy lợi Việt Nam) thực hiện thí nghiệm trên mô hình vật lý về lan truyền sóng lên đảo Trường Sa Lớn bằng phương pháp sử dụng mô hình vật lý trong bể sóng thuộc (Phòng thí nghiệm trọng điểm quốc gia về động lực học sóng biển - Viện khoa học thủy lợi Việt Nam [5].

Nghiên cứu của nhóm tác giả PGS.TS. Đinh Quang Cường (Viện Xây dựng công trình biển - ĐH Xây dựng) và GS.TS. Thiệu Quang Tuấn (ĐH Thủy Lợi) cùng các cộng sự thực hiện nghiên cứu lan truyền sóng qua đảo ngầm vùng DKI cũng dựa trên mô hình thí nghiệm vật lý [6]. Các kết quả cho thấy có xu hướng suy giảm chiều cao sóng khi sóng lan truyền từ vùng nước sâu vào vùng thềm dốc và sau đó chiều cao sóng giảm mạnh ở khu vực đỉnh thềm, hầu hết các sóng bị vỡ ở khu vực đỉnh thềm. Khi sóng lan truyền đến khu vực đỉnh thềm, do có sự chuyển tiếp đột ngột về độ sâu từ vùng nước sâu phía trước đến vùng nước nông ở dải ngầm nên dẫn tới sự khác biệt của sóng trên dải ngầm so với sóng trên bãi biển thông thường, đặc biệt là về tính chất phân bố theo thống kê của chiều cao sóng [7].



Hình 4. Đặc trưng hình học cơ bản của đảo ngầm trong thí nghiệm [7].

Trên thế giới, việc nghiên cứu quá trình lan truyền và vỡ của sóng khi gặp các vách dốc đứng như dạng đảo san hô cho đến nay cũng không nhiều: sớm nhất có thể kể đến là nghiên cứu của Bikini Atoll by Munk và Sargent 1948 và sau đó là của Suhyada & Robert 1977 ÷ 1983, Kono và Tsukiyama 1980, Ahrens 1987...vv [1]. Trong những năm gần đây có nhiều tác giả nghiên cứu về vấn đề này.

Morten Sand Jensen (2004), đã nghiên cứu thực hiện thí nghiệm

trên mô hình vật lý về lan truyền sóng lên bãi ngầm có độ dốc thềm trước lớn ví dụ như các rạn san hô hay các công trình chắn sóng ngầm. Nghiên cứu tập trung vào quá trình biến dạng sóng cũng như sự suy giảm năng lượng sóng trên bãi ngầm có độ dốc thềm trước lớn với 04 mô hình có các độ dốc 1:0.5; 1:1; 1:2 và dạng chữ S. Độ sâu nước trên bãi ngầm là đáng kể so với độ sâu nước trước thềm (từ 0,205 m đến 0.325 m). Các kết quả cho thấy Khi sóng lan truyền vào khu vực đỉnh thềm, năng lượng sóng đạt đỉnh tại vị trí đỉnh bãi ngầm, sau đó giảm nhanh chóng và hình thành sóng mới; Chiều cao sóng lớn nhất trên bãi ngầm xấp xỉ 0.8 lần độ sâu nước của bãi ngầm [8].

Mark L. Buckley and Ryan J. Lowe (2015), đã nghiên cứu mô phỏng ảnh hưởng của độ nhám san hô đáy đến lan truyền sóng trên mô hình đảo nổi có thềm trước rộng và mái dốc lớn. Nội dung chính của nghiên cứu là mô phỏng lan truyền sóng lên mô hình dạng đảo ngầm với độ dốc thềm trước là 1:5 và kể đến độ nhám đáy trong trường hợp độ sâu nước trên thềm là khá nhỏ từ 0,0 m đến 3,2 m ứng với chiều cao sóng tới từ 1,1 m đến 3,2 m. Các kết quả cho thấy khi sóng lan truyền vào khu vực đỉnh thềm và bãi ngầm thì chiều cao sóng có xu hướng giảm đồng thời có sự gia tăng đường mực nước trung bình đáng kể trên bãi ngầm và ảnh hưởng của độ nhám đến lan truyền sóng trong thí nghiệm là không đáng kể [9].

2. Mô phỏng lan truyền sóng lên đảo ngầm

2.1. Ansys Fluent và lý thuyết tính toán

Ansys fluent thực hiện tính toán mô phỏng các dòng chảy bằng cách giải các hệ phương trình bảo toàn khối lượng và động lượng của dòng chảy. Khi mô hình hóa tất cả các loại dòng chất lỏng, ANSYS FLUENT giải các phương trình từ hệ phương trình Navier-Stokes về bảo toàn khối lượng và động lượng [10].

Phương trình bảo toàn khối lượng:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

trong đó S_m là khối lượng được thêm vào pha liên tục từ pha thứ hai phân tán; \vec{v} là vectơ vận tốc; ∇ là toán tử đạo hàm riêng; ρ là mật độ chất lỏng; t là thời gian.

Phương trình bảo toàn động lượng:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

trong đó p là áp suất tĩnh; $\vec{\tau}$ là tenso ứng suất, phụ thuộc độ nhớt của chất lỏng; $\rho \vec{g}$ và \vec{F} là trọng lực và ngoại lực tác dụng.

Dòng rối là dòng đặc trưng bởi sự biến đổi của trường vận tốc theo thời gian và không gian. Thực tế, việc mô phỏng dòng chảy rối thường rất phức tạp vì trong các phương trình biểu diễn có chứa nhiều giá trị đại lượng như vận tốc, ứng suất... Trong thực tế, lan truyền sóng biển có thể coi là dòng chảy rối (ứng với chất lỏng nhớt không nén được). Các thành phần vận tốc và áp suất tại một điểm có độ lớn, phương chiều biến đổi liên tục theo thời gian và không gian. Hiện tại có nhiều mô hình mô phỏng hiện tượng chảy rối, các mô hình rối đều xuất phát từ hệ phương trình Navier-Stokes về bảo toàn khối lượng và bảo toàn động lượng của chất lỏng. Hệ phương trình trung bình

Reynolds Navier-Stokes (RANS) là dạng được sử dụng để mô phỏng mô hình dòng chảy rối. Trong hệ phương trình trung bình Reynolds, các biến nghiệm trong phương trình Navier-Stokes tức thời (chính xác) được phân tách thành giá trị trung bình (trung bình cộng hoặc trung bình theo thời gian) và các thành phần mạch động.

Các thành phần vận tốc được tách theo phương trình:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (3)$$

trong đó: \bar{u}_i là vận tốc trung bình; u'_i là thành phần mạch động vận tốc ($i=3$).

Các thành phần áp suất được tách theo phương trình:

$$p_i = \bar{p}_i + p'_i \quad (4)$$

trong đó: \bar{p}_i là áp suất trung bình; p'_i là thành phần mạch động áp suất.

Khi đó có hệ phương trình RANS có dạng:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (6)$$

trong đó: $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ là ứng suất Reynolds.

Hệ phương trình RANS là hệ không kín, không đủ để giải cho 10 ẩn số bao gồm vận tốc u_i ; áp lực p và các ứng suất Reynolds. Ansys Fluent đã tích hợp một số mô hình như: Mô hình Spalart-Allmaras; mô hình tiêu chuẩn k-ε; mô hình k-ω mô hình SST... để thêm vào cùng với hệ phương trình RANS để giải bài toán.

- Mô hình tiêu chuẩn k-ε: Đây là mô hình hai phương trình đơn giản nhất, được đề xuất bởi (Launder và Spalding, 1972). Nó có khả năng mô hình hóa hiệu quả dòng chảy hỗn loạn hoàn toàn với độ chính xác chấp nhận được.

- Mô hình Re-Normalization Group (RNG) k-ε: Mô hình này nâng cao mô hình k-ε để mô phỏng các hiệu ứng xoáy trên nhiễu loạn một cách chính xác hơn. Mô hình dựa trên các phương trình Navier-Stokes làm cho nó chính xác và đáng tin cậy hơn đối với nhiều loại dòng chảy.

- Mô hình Realizable k-ε: Mô hình này có thể thực hiện được phương thức mới cho độ nhớt hỗn loạn và tốc độ phân tán. Mô hình này thỏa mãn các ràng buộc toán học nhất định của ứng suất Reynolds.

- Mô hình tiêu chuẩn k-ω: Mô hình này được thiết kế với mục đích dự đoán chính xác dòng chảy xa, trộn, dòng chảy bao thành và dòng cắt tự do.

- Mô hình vận chuyển ứng suất cắt (SST) k-ω: Mô hình này kết hợp độ chính xác của mô hình k-ω tiêu chuẩn tại các vùng gần biên cứng với khả năng độc lập trường xa của mô hình k-ε. Ưu điểm bao gồm độ nhớt hỗn loạn được hiệu chỉnh để hỗ trợ chuyển đổi ứng suất cắt hỗn loạn. Điều này cải thiện độ chính xác của mô hình trong các dòng chảy nơi có áp suất âm.

- Mô hình chuyển tiếp SST: Mô hình này kết hợp mô hình SST k-ω với các phương trình vận chuyển cho các tiêu chí bắt đầu chuyển tiếp và khả năng chuyển tiếp, xét về số Reynolds của động lượng.

Mô hình tiêu chuẩn k-ε:

Mô hình k-ε nói chung được dựa theo giả thiết Boussinesq về quan hệ giữa ứng suất Reynolds với gradient vận tốc trung bình theo phương trình:

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (7)$$

Năng lượng rối động học k (động năng rối) và hệ số tổn thất (phân tán) của nó ε được xác định theo các phương trình:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (9) \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \\ & + S_\varepsilon \end{aligned}$$

trong đó: G_k là hằng số thể hiện sự phụ thuộc của sự hình thành năng lượng rối động học (k) vào sự biến thiên của vận tốc trung bình xác định theo phương trình số 10; G_b là thể hiện sự nhiễu động do lực nổi xác định theo phương trình số 11; μ_t là hệ số nhớt rối xác định theo phương trình 12; Y_M là hệ số sự biến thiên của quá trình giãn nở so với giá trị trung bình xác định theo phương trình 13; $C_{3\varepsilon}$ xác định theo phương trình 14; S_k và S_ε là thành phần nguồn thêm vào; các hằng số $C_{1\varepsilon} = 1,44$; $C_{2\varepsilon} = 1,92$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

$$G_k = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (10)$$

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (11)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (12)$$

$$Y_M = 2\rho\varepsilon \frac{k}{a^2} \quad (13)$$

$$C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right| \quad (14)$$

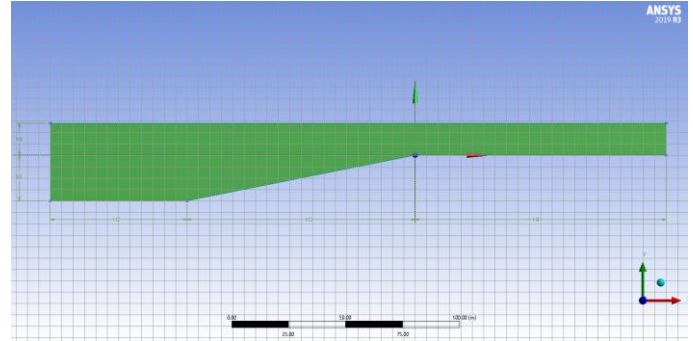
trong đó β là hệ số giãn nở nhiệt của môi trường; g_i là thành phần gia tốc trọng trường theo phương i; μ_t là hệ số nhớt rối; Pr_t là hằng số Prantl; hệ số $C_\mu = 0,09$; a là vận tốc âm thanh; v là thành phần của vận tốc dòng chảy song song với vectơ trọng trường; u là thành phần của vận tốc dòng chảy vuông góc với vectơ trọng trường.

Kết hợp các phương trình số 8 và số 9 với hai phương trình cơ bản là phương trình liên tục và phương trình động lượng sẽ được một hệ phương trình khép kín đủ để giải ra trường phân bố vận tốc. Mô hình k-ε là có thể áp dụng với hầu hết các bài toán thông thường với độ chính xác khá tốt đồng thời có thể cải thiện tốc độ tính toán cũng như tiết kiệm tài nguyên [11].

2.2. Mô phỏng số bằng phần mềm Ansys Fluent

Sử dụng phần mềm Ansys để thực hiện mô phỏng 2D cho trường hợp sóng lan truyền lên đảo ngầm có các kích thước hình học tương tự như nguyên hình của mô hình MH5 trong thí nghiệm vật lý đã được thực hiện trong dự án [6], các thông số chính như sau: Độ sâu nước trước đảo ngầm là 26,0 m, độ sâu nước trên bãi ngầm là 6,0 m, độ dốc thêm trước là 1/5. Theo các kết quả thí nghiệm vật lý, vùng sóng vỡ thường trong khoảng 1/2 chiều dài sóng tới. Do tập trung vào các hiện tượng biến đổi sóng tại vùng thêm dốc và phần trước bãi ngầm đồng thời để giảm thời gian tính toán nên trong mô hình chỉ mô phỏng một phần bãi ngầm với chiều dài $L_b = 120$ m (gần bằng chiều dài sóng tới),

phần sau thêm dốc được coi là biên vô hạn, gốc tọa độ đặt tại đỉnh thêm. Các thông số chi tiết của mô hình trong Bảng 1.



Hình 5. Mô hình 2D toàn miền.

Bảng 1. Các thông số mô hình.

STT	Thông số	Kí hiệu	Giá trị	Đơn vị	Ghi chú
1	Chiều cao mô hình	H	35	m	
2	Chiều cao bãi ngầm	V5	20	m	
3	Chiều cao lưu không bãi ngầm	V6	14	m	
4	Chiều dài mô hình	L	210	m	
5	Chiều dài bãi ngầm	H4	120	m	
6	Chiều dài thêm trước	H3	100	m	
7	Chiều dài đáy	H2	60	m	
8	Độ dốc thêm trước	i	1/5		
9	Độ ngập sâu của bãi ngầm	dn	6	m	

Thực hiện mô phỏng lan truyền sóng theo mô hình CFD ứng với bài toán dòng chảy. Do có sự hạn chế về công suất tính toán của máy tính, nên kích thước phần tử được chọn là 0,2 m (tương đương 1/70 đến 1/30 chiều cao sóng). Tổng cộng có 154643 nút và 153159 phần tử. Điều kiện biên đầu vào được mô phỏng là sóng đơn Stock bậc 5 với các chiều cao sóng khác nhau. Biên đầu ra là dạng áp suất đầu ra (thoát nước không phản xạ), biên bề mặt thoáng là dạng áp suất khí quyển, biên đáy là dạng trơn nhẵn. Số lượng kịch bản thực hiện là 04 với các thông số chi tiết cho trong Bảng 2.

Chọn thuật giải (Solver): Segregated (Giải các phương trình liên tục, phương trình bảo toàn động lượng và năng lượng đã được số hoá) với các thông tin chính như sau: Phương pháp nội suy: Implicit; Mô hình tính (Chiều): 2D; Mô hình thời gian: Transient; Mô hình rối: Sử dụng mô hình dòng chảy rối k-ε; Trao đổi nhiệt: không; Vật liệu lưu chất: chất lỏng là nước biển $\rho = 1025$ (kg/m3).

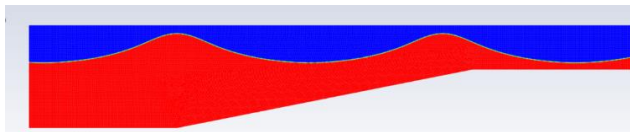
Trích xuất kết quả tại các vị trí trước, giữa thêm dốc, đỉnh thêm, và trên bãi ngầm như Hình 7, các vị trí cơ bản tương tự như các điểm đo của MH5 trong thí nghiệm mô hình vật lý.

Bảng 2. Các kịch bản tính toán mô phỏng.

STT	Tên kịch bản	Thông số	Kí hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	KB1	Chiều cao sóng tới	Hs	6,0	m
		Chiều dài sóng tới	Ls	100,0	m
		Sóng tới áp dụng	St 5 th		
2	KB2	Chiều cao sóng tới	Hs	8,0	m
		Chiều dài sóng tới	Ls	130,0	m
		Sóng tới áp dụng	St 5 th		
3	KB3	Chiều cao sóng tới	Hs	10,0	m
		Chiều dài sóng tới	Ls	145,0	m
		Sóng tới áp dụng	St 5 th		
4	KB4	Chiều cao sóng tới	Hs	14,0	m
		Chiều dài sóng tới	Ls	160,0	m
		Sóng tới áp dụng	St 5 th		



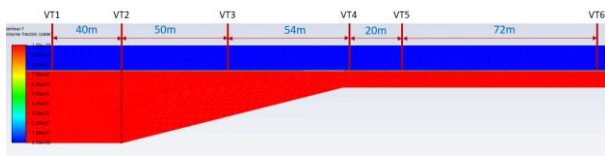
Hình 6. Hình dạng đường mặt nước tĩnh



Hình 7. Hình dạng đường mặt sóng tới

Chọn thuật giải (Solver): Segregated (Giải các phương trình liên tục, phương trình bảo toàn động lượng và năng lượng đã được số hoá) với các thông tin chính như sau: Phương pháp nội suy: Implicit; Mô hình tính (Chiều): 2D; Mô hình thời gian: Transient; Mô hình rối: Sử dụng mô hình dòng chảy rối k-ε; Trao đổi nhiệt: không; Vật liệu lưu chất: chất lỏng là nước biển $\rho = 1025$ (kg/m³).

Trích xuất kết quả tại các vị trí trước, giữa thêm dốc, đỉnh thềm, và trên bãi ngầm như Hình 7, các vị trí cơ bản tương tự như các điểm đo của MH5 trong thí nghiệm mô hình vật lý.



Hình 8. Các vị trí khảo sát đường đỉnh sóng.

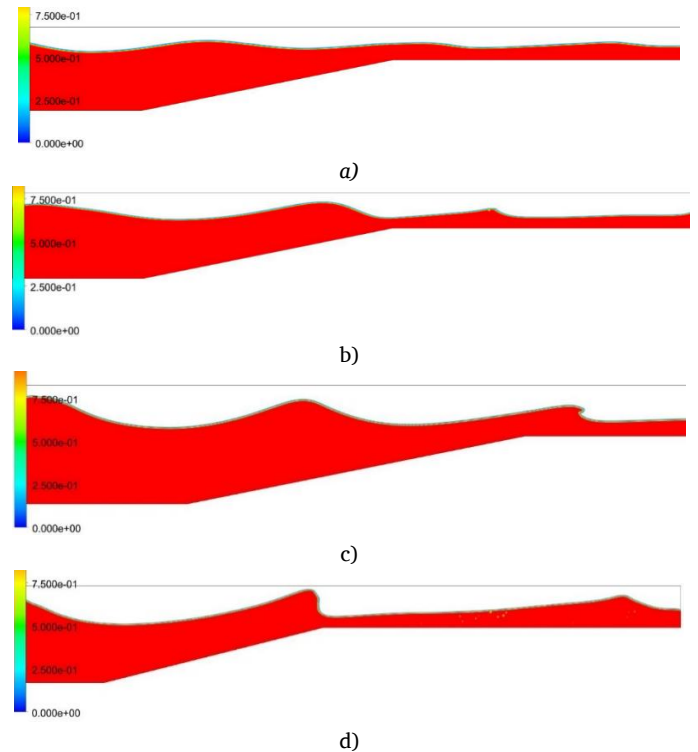
3. Kết quả tính toán mô phỏng và nhận xét

3.1 Chiều cao sóng trên thềm và trên bãi ngầm

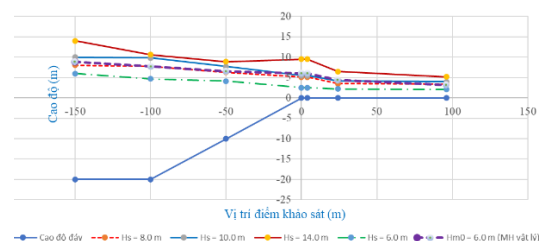
Thực hiện tính toán và trích xuất chiều cao sóng tại thời điểm sóng đã ổn định dọc theo mô hình. Các kết quả tính toán chiều cao sóng tại các điểm trích xuất ứng với các mô hình được cho trong Bảng 3.

Bảng 3. Chiều cao sóng lớn nhất tại các điểm khảo sát.

STT	Vị trí khảo sát	Chiều cao sóng tới KB1, KB2, KB3, KB4				Ghi chú
		Hs = 6 m	Hs = 8 m	Hs = 10 m	Hs = 14 m	
1	VT1	6,0	8,0	10,0	14,0	
2	VT2	4,7	7,7	9,8	10,6	
3	VT3	4,1	6,3	7,7	8,9	
4	VT4	2,5	5,1	5,4	9,5	
5	VT5	2,2	3,5	4,2	6,5	
6	VT6	2,1	3,4	4,0	5,2	



Hình 9. Một số hình ảnh lan truyền sóng a) KB1; b) KB2; c) KB3; d) KB4.



Hình 10. Chiều cao sóng trên đảo ngầm ứng với các kịch bản chiều cao sóng tới khác nhau và kết quả phân bố chiều cao sóng H_{m0} trong mô hình vật lý [6].

Các kết quả mô phỏng cho thấy:

- Xu hướng thay đổi chiều cao sóng, độ cao sóng trên bãi ngầm phù hợp với các kết quả trong thí nghiệm mô hình vật lý [6] đã thực hiện tại phòng thí nghiệm thủy lực trường ĐH Thủy Lợi.

- Khi sóng lan truyền đến khu vực thềm dốc, chiều cao sóng có xu hướng giảm tuy nhiên cao bụng sóng dâng lên đáng kể, điều đó đồng nghĩa đường mực nước trung bình cũng dâng cao hơn ở khu vực nước sâu. Với sóng tới ở vùng nước sâu có chiều cao nhỏ hơn hoặc bằng độ sâu nước trên bãi ngầm thì sự thay đổi chiều cao sóng tại khu vực đỉnh thềm không nhiều. Ngược lại chiều cao sóng tới càng lớn thì sự thay đổi chiều cao sóng sau đỉnh thềm càng lớn ;

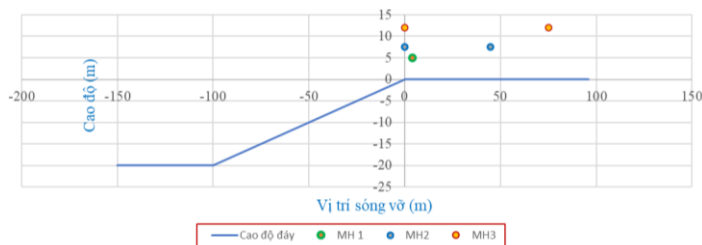
- Khu vực trên bãi ngầm cách đỉnh thềm khoảng 1/4 chiều dài sóng tới, chiều cao sóng lớn hơn đáng kể độ sâu nước do khu vực này bị ảnh hưởng mạnh của sóng đổ. Chiều cao sóng trong khu vực trên bãi ngầm cách đỉnh thềm khoảng 1/2 chiều dài sóng tới có thể đạt đến giới hạn 0,87 lần độ sâu nước;

- Sóng trong vùng cách đỉnh thềm từ 1/2 chiều dài sóng tới trở đi được định hình lại thành sóng nước nông và chịu ảnh hưởng của ma sát đáy.

3.2 Vị trí và số lần sóng vỡ trên bãi ngầm

Bảng 4. Vị trí sóng vỡ lần 1, lần 2, lần 3.

STT	Vị trí sóng vỡ (m)	Chiều cao sóng tới MH1, MH2, MH3, MH4				Ghi chú
		Hs = 6 m	Hs = 8 m	Hs = 10 m	Hs = 14 m	
1	Lần 1	--	5,0	0,0	0,0	
2	Lần 2	--	--	50	75	
3	Lần 3	--	--	--	--	



Hình 11. Đồ thị vị trí sóng vỡ lần 1, lần 2 ứng với các mô hình.

Các kết quả khảo sát cho thấy vị trí sóng vỡ và số lần sóng vỡ phụ thuộc chiều cao sóng tới:

- Với chiều cao sóng tới vùng nước sâu lớn hơn đáng kể độ sâu nước trên bãi ngầm ($H_s > 10,0$ m), sóng bị vỡ ngay trên đỉnh bãi ngầm sau đó hình thành sóng mới và sau đó tiếp tục vỡ thêm một lần nữa, dạng sóng vỡ là dạng sóng nhào (plunging). Vị trí sóng vỡ lần 1 nằm ngay khu vực đỉnh thềm, vị trí sóng vỡ lần 2 nằm trong giới hạn từ 1/4 đến 1/2 chiều dài sóng tới tính từ đỉnh thềm;

- Với chiều cao sóng tới vùng nước sâu lớn hơn độ sâu nước trên bãi ngầm ($H_s = 8,0$ m), sóng vỡ 01 lần ngay sau đỉnh thềm, dạng sóng vỡ là dạng sóng đổ (spilling);

- Với chiều cao sóng $H_s \leq d$ (độ sâu nước trên bãi ngầm), sóng không bị vỡ trên khu vực thềm.

4. Kết luận

- Quá trình lan truyền sóng từ vùng nước sâu lên đảo ngầm có thềm trước dốc lớn (1/5) là quá trình biến đổi liên tục của chiều cao sóng và bị ảnh hưởng bởi chiều cao sóng tới, độ ngập sâu của bãi ngầm. Khu vực bãi ngầm giới hạn bởi đỉnh thềm dốc và 1/2 chiều dài sóng từ đỉnh thềm có chiều cao sóng bị ảnh hưởng rất mạnh của hiện tượng sóng vỡ, chiều cao sóng trong vùng này lớn hơn nhiều so với độ sâu nước trên bãi ngầm. Vì vậy khi thiết kế các công trình trên đảo ngầm ở khu vực này cần phải có giải pháp phù hợp để mô phỏng xác định chiều cao sóng một cách hợp lý, không thể lấy giới hạn chiều cao sóng là 0,78d làm chiều cao sóng đầu vào để thiết kế;

- Việc ứng dụng các phương pháp số để mô phỏng lan truyền sóng lên đảo ngầm và các dạng địa hình phức tạp khác là cần thiết. Nói chung mô hình vật lý đáng tin cậy hơn mô hình toán, nhưng chi phí lớn, thời gian xây dựng mô hình cũng khá dài, các kịch bản thí nghiệm cũng hạn chế. Mô hình toán có ưu điểm là có khả năng tính toán với nhiều kịch bản khác nhau, thời gian thực hiện ngắn, chi phí thấp nhưng phụ thuộc rất nhiều vào số liệu đầu vào và khi kiểm định mô hình.

- Bài báo mới thực hiện mô phỏng 2D quá trình lan truyền sóng lên đảo ngầm với duy nhất một độ dốc và một độ sâu nước đồng thời đã bỏ qua ảnh hưởng của độ nhám đáy. Để có cái nhìn đầy đủ hơn về lan truyền sóng lên đảo ngầm cần thực hiện thêm nhiều các kịch bản mô phỏng với các độ dốc, độ nhám đáy và các mực nước khác nhau;

- Mặc dù về xu hướng biến đổi chiều cao sóng và giới hạn vùng sóng vỡ trên bãi ngầm trong mô hình toán phù hợp với mô hình vật lý, tuy nhiên vẫn cần thiết thực hiện mô phỏng mô hình vật lý với ít nhất một trường hợp sóng đơn để đánh giá mức độ chính xác và điều chỉnh các mô hình mô phỏng nếu cần.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn Trường Đại học Xây dựng Hà Nội đã cấp kinh phí cho đề tài “Nghiên cứu lan truyền sóng lên đảo ngầm có độ dốc thềm trước lớn”, mã số 03-2021/KHXD-TĐ.

Tài liệu tham khảo

[1]. Đinh Quang Cường, Trịnh Việt An, 2013. Nghiên cứu xác định chiều cao sóng lan truyền lên đảo Trường Sa Lớn trên mô hình vật lý. Tạp chí KHCN Xây dựng, 3/2013;
 [2]. Đinh Quang Cường, Nguyễn Quang Tạo, Hồ Đức Đạt, 2019. Một số sự cố công trình ven đảo san hô, nguyên nhân và giải pháp phòng tránh, khắc phục. Tạp chí Xây dựng, 12/2019;

- [3]. TCVN 9901 : 2014. *Công trình thủy lợi, yêu cầu thiết kế đê biển*. Bộ khoa học và công nghệ;
- [4]. 22 TCN 222-95. *Tải trọng và tác động (do sóng và do tàu) lên công trình thủy*. Bộ Giao thông vận tải;
- [5]. Đinh Quang Cường và nnk, 2013. “Nghiên cứu cơ sở khoa học để xây dựng quy phạm, tiêu chuẩn thiết kế; Xây dựng quy trình khảo sát, duy tu bảo dưỡng các công trình quốc phòng tại vùng KD1 và Trường Sa”. Báo cáo khoa học tổng kết nhánh Dự án KHCN cấp Nhà nước, mã số ĐTB11.4 - GD1.
- [6]. Đinh Quang Cường và nnk, 2019. “Nghiên cứu cơ sở khoa học để xây dựng quy phạm, tiêu chuẩn thiết kế; Xây dựng quy trình khảo sát, duy tu bảo dưỡng các công trình quốc phòng tại vùng KD1 và Trường Sa”. Báo cáo khoa học tổng kết nhánh Dự án KHCN cấp Nhà nước, mã số ĐTB11.4 - GD2.
- [7]. Thieu Quang Tuan & Dinh Quang Cuong. Distribution Of Wave Heights On Steep Submerged Reefs. *Ocean Engineering*, ISSN 0029-8018, SCIE-Q1, IF= 2,73;
- [8]. Morten Sand Jensen, 2004. *Breaking of wave over a steep bottom slope*. HCE Lab-Aalborg University, Denmark;
- [9]. Mark L. Buckley và các cộng sự (2016). Wave Setup over a Fringing Reef with Large Bottom Roughness. *Journal of Physical Oceanography*, American Meteorological Society (46):2317-2333.
- [10]. ANSYS, Inc. ANSYS Fluent Theory Guide (2013);
- [11]. Nguyễn Quốc Tuấn, 2018. Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số hình học (H/D và l/t) đến hiệu suất của tua bin trực giao phù hợp với dòng chảy trên sông và ven biển ở Việt Nam. Luận án tiến sĩ, trường Đại học Bách khoa Hà Nội.