

LỰA CHỌN CHIỀU CAO ĐÁP ỨNG HIỆU QUẢ TIÊU TÁN SÓNG ĐƠN CỦA ĐÊ CHẮN SÓNG TƯỜNG ĐỨNG KẾT CẤU RỖNG

DETERMINATION OF VERTICAL POROUS BREAKWATER HEIGHT ADAPTING DISSIPATION EFFICIENCY FOR SOLITARY WAVES

PHẠM VĂN KHÔI

Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: khoipv.ctt@vimaru.edu.vn

Tóm tắt

Đê chắn sóng tường đứng kết cấu rỗng là một trong số các loại đê rỗng được thử nghiệm phát huy hiệu quả giảm sóng, bảo vệ bờ biển đồng bằng sông Cửu Long. Tuy nhiên, việc xác định chiều cao của đê chắn sóng đáp ứng hiệu quả tiêu tán sóng chưa được chỉ ra trong các nghiên cứu gần đây. Bài báo này dùng mô hình số Flow 3D để mô phỏng tương tác của đê chắn sóng tường đứng kết cấu rỗng với sóng đơn cho 36 kịch bản. Từ đó xác định hiệu quả tiêu tán sóng đơn dựa vào đặc trưng của đê rỗng và các thông số sóng tới, sóng phản xạ và sóng truyền qua đê. Phương pháp phân tích hệ số tiêu tán sóng được sử dụng để xác định chiều cao tối ưu của đê cho từng trường hợp tính toán cụ thể.

Từ khóa: Mô hình số, mô hình Flow 3D, sóng đơn, đê chắn sóng tường đứng kết cấu rỗng, hệ số tiêu tán.

Abstract

The vertical porous breakwater is one of several applied breakwaters which reveal the dissipation efficiency of breakwater structures at the Mekong river delta. However, determining the breakwater height adapting the dissipation efficiency has not been recently implemented yet. This paper uses the Flow 3D model to simulate the interactions between the vertical porous breakwater and the solitary waves in 36 simulating scenarios. Furthermore, the dissipation efficiency of the vertical porous breakwater for solitary waves depends on the characteristics of the incident, reflected and transmitted waves. The dissipation coefficient analysis method is used to investigate the optimization breakwater height for each specific case.

Keywords: numerical model, Flow 3D model, solitary wave, vertical porous breakwater, dissipation coefficient.

1. Giới thiệu

Hiện nay, tuyến bờ biển đồng bằng sông Cửu Long vẫn đang bị sạt lở nghiêm trọng do tác dụng của sóng biển, đe dọa an ninh lương thực quốc gia và thế giới. Để khắc phục hiện tượng xâm thực trên, một số kết cấu dạng rỗng mới được áp dụng thử nghiệm cho thấy phát huy tác dụng chống xói [1], điển hình có thể kể đến kết cấu đê tường đứng dạng rỗng bằng hàng rào tre [2, 3, 4]. Các nghiên cứu [2, 3, 4] chỉ ra hiệu quả giảm sóng mà chưa đưa ra được cách xác định chiều cao tối ưu của loại đê chắn sóng tường đứng kết cấu rỗng. Vì thế, bài báo này sử dụng mô hình số Flow 3D để xác định chiều cao tối ưu của đê chắn sóng tường đứng kết cấu rỗng đáp ứng hiệu quả tiêu tán sóng đơn. Mô hình Flow 3D đã được chứng minh cho kết quả mô phỏng chính xác cho các dạng kết cấu công trình thủy lợi [5, 6] cũng như kết cấu đê chắn sóng dạng rỗng phức tạp [7]. Trong nghiên cứu này, mô hình Flow 3D được kiểm chuẩn với điều kiện biên sóng đơn và dòng chảy qua kết cấu rỗng để khẳng định độ tin cậy của mô hình tính toán. Các điều kiện biên sóng đơn và các đặc trưng của đê kết cấu rỗng được xây dựng trong thí nghiệm vật lý với 36 kịch bản mô phỏng, từ đó xác định chiều cao tối ưu của đê đáp ứng hiệu quả tiêu tán sóng đơn.

2. Mô hình Flow 3D

Trong nghiên cứu này, mô hình Flow 3D được sử dụng để mô phỏng tương tác giữa sóng đơn với đê chắn sóng tường đứng kết cấu rỗng.

2.1. Hệ phương trình chủ đạo áp dụng cho kết cấu rỗng

Hệ phương trình chủ đạo được áp dụng là hệ phương trình ba chiều Navier-Stokes, phương trình liên tục và phương trình động lượng trong kết cấu rỗng như sau:

$$\nabla \cdot (\mathbf{A}\mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \nabla \cdot (\mathbf{A}\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \nabla \cdot \mathbf{p} + \mathbf{G} + \mathbf{f}_v - \mathbf{f}_p \quad (2)$$

Trong đó: $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ là toán tử vi phân, $\mathbf{u} = (u, v, w)$ tương ứng là vận tốc dòng chảy theo các phương x, y, z ; ρ là khối lượng riêng nước; p là áp suất; G là gia tốc bản thân; f_v là gia tốc nhớt; và f_p là tổn thất dòng chảy trong kết cấu rỗng. Với mô hình Flow 3D, đường lưới sẽ nhận diện kích thước hình học kết cấu rỗng bằng phương pháp tỷ lệ. Do đó, A là tỷ lệ diện tích nước chiếm chỗ và V_F là tỷ lệ thể tích nước chiếm chỗ trong hệ tọa độ Đề các.

Kỹ thuật chuyển đổi thể tích chất lỏng VOF (volume of fluid) để phân biệt các pha lỏng và khí được thể hiện qua phương trình:

$$\frac{\partial V_w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \nabla \cdot (V_w \mathbf{A} \mathbf{u}) = 0 \quad (3)$$

Trong đó: V_w là tỷ lệ thể tích chất lỏng (nước) trong lưới tính toán, $V_w = 0, 0 < V_w < 1$ và $V_w = 1$ tương ứng thể hiện các pha khí, giao diện và nước.

Véc tơ gia tốc nhớt f_v thể hiện lực cản do tính nhớt của chất lỏng trong hệ tọa độ Đề các ba chiều được trình bày chi tiết trong [8]. Thành phần tổn thất dòng chảy trong kết cấu rỗng f_p được xác định theo nguyên lý lực kéo bão hòa Forchheimer [9] được xác định như sau:

$$f_p = F_D \frac{\mathbf{u}}{\lambda} \quad (4)$$

Trong đó: λ là độ lỗ rỗng, F_D là thành phần lực kéo bão hòa Forchheimer được phân tích từ thành phần tuyến tính và phi tuyến:

$$F_D = \alpha_l \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{1-\lambda}{\lambda} \right)^2 + \alpha_t \frac{1-\lambda}{\lambda} \frac{|\mathbf{u}|}{\lambda} \quad (5)$$

Trong đó: α_l và α_t tương ứng là hệ số sức cản do chảy tầng và chảy rối.

Mô hình chảy rối sử dụng hệ số nhớt động lực μ và hai phương trình tổn thất năng lượng $k - \varepsilon$, được thể hiện như sau [10]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial k}{\partial x} + v A_y \frac{\partial k}{\partial y} + w A_z \frac{\partial k}{\partial z} \right) \\ = P_T + G_T + D_k - \varepsilon \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \\ = \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon}{k} (P_T + C_{3\varepsilon} G_T) + D_\varepsilon - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (7)$$

Trong đó P_T là thành phần năng lượng động học rối; G_T là thành phần lực đẩy nổi; D_k và D_ε tương ứng là các thành phần khuếch tán với các biến k và ε , và $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ là các hệ số được sử dụng.

2.2. Điều kiện biên sóng đơn

Mô hình Flow 3D sử dụng lý thuyết sóng đơn của McCowan [11]:

$$\eta = h \frac{N}{M} \frac{\sin \left[M \left(1 + \frac{\eta}{h} \right) \right]}{\cos \left[M \left(1 + \frac{\eta}{h} \right) \right] + \cosh \left[M \frac{x-ct}{h} \right]} \quad (8)$$

Trong đó: η là tung độ bề mặt, h là chiều sâu nước tĩnh. c là vận tốc sóng được xác định theo:

$$c = \bar{u} + c_0 \quad (9)$$

$$c_0 = \sqrt{g(h+H)} \quad (10)$$

Trong đó: \bar{u} là vận tốc dòng chảy trong sóng, c_0 là vận tốc sóng tại mực nước tĩnh, H là chiều cao sóng.

Vận tốc phần tử sóng được tính toán theo:

$$u = \bar{u} + c_0 N \frac{1 + \cos \left(\frac{Mz}{h} \right) \cosh \left(M \frac{x-ct}{h} \right)}{\left[\cos \left(\frac{Mz}{h} \right) + \cosh \left(M \frac{x-ct}{h} \right) \right]^2} \quad (11)$$

$$w = c_0 N \frac{\sin \left(\frac{Mz}{h} \right) \sinh \left(M \frac{x-ct}{h} \right)}{\left[\cos \left(\frac{Mz}{h} \right) + \cosh \left(M \frac{x-ct}{h} \right) \right]^2} \quad (12)$$

Trong đó đại lượng N và M thỏa mãn hai phương trình sau:

$$\frac{H}{h} = \frac{N}{M} \tan \left[\frac{1}{2} M \left(1 + \frac{H}{h} \right) \right] \quad (13)$$

$$N = \frac{2}{3} \sin^2 \left[M \left(1 + \frac{2}{3} \frac{H}{h} \right) \right] \quad (14)$$

Phương pháp thử dần Newton-Raphson được sử dụng để giải các phương trình trên. Giá trị ban đầu của M và N tương ứng là $(3H/h)^{1/2}$ và $2H/h$.

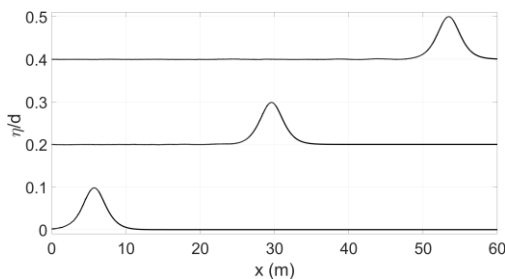
Giá trị ban đầu của tung độ mặt sóng đơn được xác định theo:

$$\eta_0 = H \operatorname{sech}^2 \left[\sqrt{\frac{3}{4}} \frac{H}{h} \left(\frac{x-ct}{h} \right) \right] \quad (15)$$

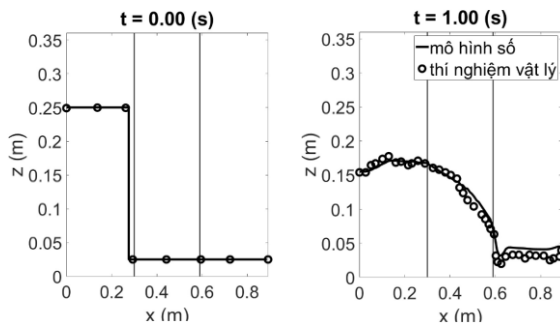
3. Kiểm chuẩn mô hình số

Do mục tiêu của bài báo là mô phỏng tương tác sóng đơn với đê chắn sóng tường đứng kết cấu rỗng, mô hình số Flow 3D được kiểm chuẩn cho bài toán lan truyền sóng đơn và tương tác dòng chảy với kết cấu rỗng.

Ở bài toán kiểm chuẩn thứ nhất, sự lan truyền của sóng đơn được mô phỏng với những bước thời gian khác nhau được thể hiện trên Hình 1. Theo đó, biên độ sóng đơn không thay đổi, hình dạng sóng đơn dọc theo miền tính toán (dài đến 60m) vẫn giữ được độ ổn định. Từ đó, mô hình Flow 3D mô phỏng ổn định lan truyền của sóng đơn.



Hình 1. Kiểm chuẩn lan truyền ổn định của sóng đơn



Hình 2. Kiểm chuẩn sự làm việc của kết cấu rỗng

Bài toán kiểm chuẩn thứ hai mô phỏng bài toán dòng chảy sau vỡ đập qua kết cấu rỗng [12], có chiều rộng từ $x = 0,3\text{m}$ tới $x = 0,59\text{m}$, như trên Hình 2. Ở thời điểm ban đầu ($t = 0\text{s}$), mực nước thượng lưu là $0,25\text{m}$, mực nước hạ lưu là $0,025\text{m}$ và cột nước chênh lệch cách bề mặt kết cấu rỗng 2cm . Kích thước lưới tính toán của mô hình số được lựa chọn là $dx = dy = 1\text{cm}$, $dz = 0,5\text{cm}$. Hệ số lực cản chảy tầng là 10000 và hệ số lực cản chảy rối là 80 . Sau khi vỡ đập, nước sẽ chảy từ thượng lưu xuống hạ lưu, một phần chảy

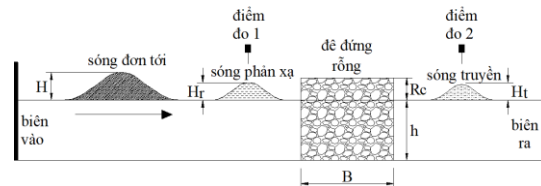
truyền qua kết cấu rỗng, một phần phản xạ lại thượng lưu. Tại thời điểm $t = 1\text{s}$, kết quả từ mô hình ba chiều được xem là khá phù hợp với kết quả từ thí nghiệm vật lý. Điều này cho thấy mô hình Flow 3D mô phỏng tốt bài toán dòng chảy qua kết cấu rỗng.

Từ hai bài toán kiểm chuẩn trên, có thể áp dụng mô hình Flow 3D để mô phỏng bài toán sóng đơn tương tác với đê tường đứng kết cấu rỗng.

4. Kết quả mô phỏng và cách xác định chiều cao tối ưu đê rỗng

4.1. Thiết lập mô hình

Mô hình số mô phỏng tương tác sóng đơn với đê tường đứng rỗng được thiết lập theo Hình 3.



Hình 3. Thiết lập mô hình mô phỏng tương tác sóng đơn với đê chắn sóng tường đứng kết cấu rỗng

Theo Hình 3, sóng đơn tới (chiều cao H) được lan truyền từ biển vào gặp mặt đê tường đứng rỗng phản xạ lại một phần và truyền qua đê một phần. Bằng cách đặt các điểm đo thích hợp ở mặt trước và mặt sau đê, chiều cao sóng phản xạ (H_r) và chiều cao sóng truyền (H_t) qua đê sẽ được xác định. Từ đó, xác định được các hệ số phản xạ $k_r (=H_r/H)$ và hệ số truyền $k_t (=H_t/H)$. Hệ số tiêu tán sóng k_d được xác định theo công thức:

$$k_d = \sqrt{1 - k_r^2 - k_t^2} \quad (16)$$

Bảng 1. Các thông số được sử dụng để mô phỏng

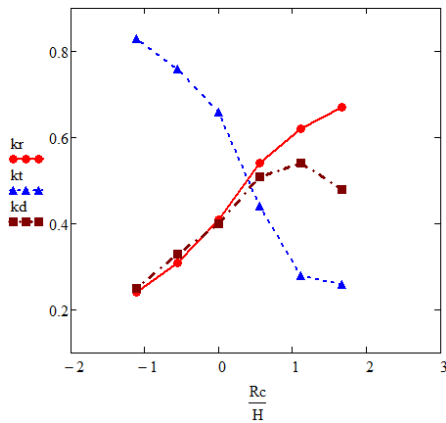
B (cm)	20					
λ	0,45	0,55				
Rc (cm)	-10	-5	0	5	10	15
h (cm)	35	40	45	50	55	
H (cm)	6	9	12			
d (cm)	5					

Trong thí nghiệm số này, với mục đích tìm ra đặc trưng tương tác sóng đơn với đê tường đứng kết cấu rỗng, 36 kịch bản được thiết lập dựa trên các thông số như trong Bảng 1. Hệ số lực cản chảy tầng và chảy rối lấy như kết quả trong phần kiểm chuẩn mô hình. Đê rỗng có bề rộng 20cm và đường kính viên đá 5cm .

Mức nước tĩnh thay đổi dẫn tới sự thay đổi của chiều sâu nước h (5 giá trị) và chiều cao lưu không R_c (6 giá trị). Có 2 trường hợp $R_c < 0$ (đê ngầm) và 4 trường hợp $R_c \geq 0$ (đê nổi) tạo thành 6 trường hợp khác nhau của chiều cao lưu không. 6 trường hợp trên được kiểm tra với 3 chiều cao sóng tới và 2 giá trị độ rộng đại diện [2, 4] tạo nên tổng cộng 36 kịch bản.

4.2. Kết quả mô phỏng tương tác sóng đơn với đê chắn sóng tường đứng rộng

Do khuôn khổ nội dung bài báo có giới hạn, tác giả lựa chọn thể hiện kết quả mô phỏng đại diện cho trường hợp chiều cao sóng tới là 9cm và độ rộng là 0,45. Giá trị các hệ số phản xạ, truyền và tiêu tán được mô phỏng cho 6 giá trị của chiều cao lưu không tương đối R_c/H được thể hiện trên Hình 4.



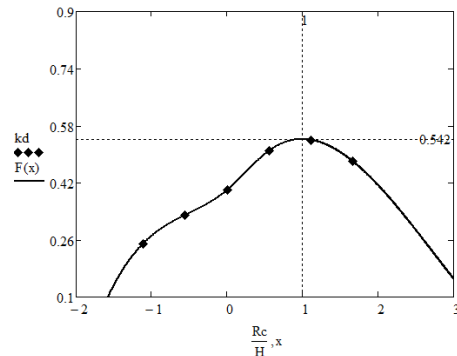
Hình 4. Hệ số phản xạ, hệ số truyền và hệ số tiêu tán sóng đơn cho trường hợp $H = 9\text{cm}$; $\lambda = 0,45$.

Trên Hình 4, với trường hợp đê ngầm ($R_c/H < 0$), sức cản sóng của đê nhỏ, thành phần sóng truyền qua đê lớn hơn thành phần sóng phản xạ ($kt > kr$). Ngược lại, với trường hợp đê nổi ($R_c/H > 0$), sức cản sóng của đê lớn, thành phần sóng phản xạ lớn hơn thành phần sóng truyền qua đê ($kr > kt$). Điều này hoàn toàn phù hợp với bản chất vật lý tự nhiên. Đặc trưng năng lượng tiêu tán sóng cũng tăng dần từ trường hợp đê ngầm tới trường hợp đê nổi. Điều đặc biệt, khi chiều cao lưu không tương đối R_c/H lớn ($R_c/H > 1$), hệ số tiêu tán có khuynh hướng giảm. Điều này cho thấy chiều cao đê đáp ứng hiệu quả tiêu tán sóng sẽ đạt tới một giá trị tối đa nào đó, và vượt qua giá trị tối đa đó, hiệu quả tiêu tán sóng sẽ bị giảm.

4.3. Phương pháp phân tích hệ số tiêu tán sóng xác định chiều cao tối ưu đê chắn sóng tường đứng rộng

Trong phần này, tác giả đi sâu vào phân tích xác định giá trị tối đa đáp ứng hiệu quả tiêu tán sóng, từ đó xác định được chiều cao lưu không tối ưu R_c cho

trường hợp phân tích ở phần 4.2. Hình 5 thể hiện kết quả xác định giá trị tối đa của hệ số tiêu tán sóng kd , từ đó xác định chiều cao lưu không R_c theo tỷ số R_c/H .



Hình 5. Xác định chiều cao đê cho trường hợp $H = 9\text{cm}$; $\lambda = 0,45$.

Trên Hình 5, hàm $F(x)$ là đường cong trơn được xác định từ 6 điểm có tọa độ $(R_c/H, kd)$ và dùng để nội suy giá trị cực trị của kd . Từ đó, điểm cực trị được xác định là $(R_c/H, kd) = (1, 0.542)$. Như vậy, giá trị chiều cao lưu không tối ưu được xác định $R_c = 1H$. Tương tự, tác giả tính toán với trường hợp đê có độ rộng $\lambda = 0,55$ sẽ được giá trị tương ứng của R_c . Mở rộng ra tính toán tương tự cho trường hợp chiều cao sóng tới 6cm và 12 cm, sẽ thu được tổng cộng 6 giá trị của R_c tương ứng như kết quả thể hiện ở Bảng 2.

Bảng 2. Kết quả xác định chiều cao tối ưu của đê

H	6cm		9cm		12cm	
λ	0,45	0,55	0,45	0,55	0,45	0,55
R_c/H	0,7	0,8	1	1	1	1,3

Theo kết quả từ Bảng 2, người sử dụng có thể lựa chọn chiều cao tối ưu của đê chắn sóng tường đứng kết cấu rộng tùy theo từng trường hợp cụ thể của đặc trưng sóng đơn tới và cấu tạo đê rộng. Có thể thấy tổng quát, chiều cao tĩnh không đê rộng bằng chiều cao sóng tới thì hiệu quả tiêu tán sóng là lớn nhất.

5. Kết luận

Trong bài báo này, tác giả đã trình bày cách xác định chiều cao tối ưu đê chắn sóng tường đứng kết cấu rộng đáp ứng hiệu quả tiêu tán sóng đơn. Tác giả lựa chọn mô hình Flow 3D để mô phỏng số tương tác giữa sóng đơn và đê chắn sóng tường đứng kết cấu rộng. Mô hình Flow 3D sử dụng hệ phương trình Navier-Stokes được xem là phù hợp khi mô phỏng đồng thời lan truyền của sóng đơn và kết cấu đê rộng qua các thí nghiệm kiểm chuẩn. Mô hình số được thiết lập để mô phỏng 36 kịch bản khác nhau của các thông số sóng

đơn và dề rộng. Kết quả mô phỏng thể hiện được các đặc trưng phân xạ, truyền và tiêu tán sóng của dề rộng đối với sóng đơn. Tác giả đã chỉ ra phương pháp và xác định cụ thể 6 giá trị tối ưu của chiều cao dề đáp ứng hiệu quả tiêu tán sóng đơn. Kết quả của bài báo có thể áp dụng cho mô hình thực nghiệm của dề chắn sóng tường đứng kết cấu rộng với nhiều điều kiện biên khác nhau trong thực tế.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT22-23.72**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Hung P. Đ., Hòa T. Đ., and Nam N. N. (2021), *Đề cọc rộng mặt cắt hình móng ngựa - giải pháp công nghệ mới trong bảo vệ bờ biển*, Tạp Chí Khoa học và Công nghệ Thủy Lợi, No.69, pp.1-6.
- [2] T. Dao, M. J. F. Stive, B. Hofland, and T. Mai (2018), *Wave Damping due to Wooden Fences along Mangrove Coasts*, J. Coast. Res., Vol.34, No.6, pp.1317-1327, doi: 10.2112/JCOASTRES-D-18-00015.1.
- [3] T. Mai, T. Dao, A. Ngo, and C. Mai (2019), *Porosity Effects on Wave Transmission Through a Bamboo Fence*, Proceedings of the 10th International Conference on Asian and Pacific Coasts, Springer Nature Singapore Pte Ltd., pp.1413-1418.
- [4] T. Thieu Quang and L. Mai Trong (2020), *Monsoon wave transmission at bamboo fences protecting mangroves in the lower mekong delta*, Appl. Ocean Res., Vol.101, p.102259, doi: 10.1016/j.apor.2020.102259.
- [5] P. Văn Khôi and V. Văn Nghi (2021), *Mô hình dòng chảy ba chiều: lý thuyết, kiểm chuẩn và ứng dụng mô phỏng đập tràn kiểu xi phông*, Tạp Chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 67 (8/2021), tr.73-77.
- [6] P. V. Khôi, P. T. Ngà, and Đ. T. H. Ngọc (2022), *Mô hình dòng chảy ba chiều: công cụ van khí và ứng dụng điều chỉnh lưu lượng xả nước đập tràn xi phông*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 69 (01/2022), tr.57-61.
- [7] A. Gomes, J. L. S. Pinho, T. Valente, J. S. Antunes do Carmo, and A. V. Hegde (2020), *Performance Assessment of a Semi-Circular Breakwater through CFD Modelling*, J. Mar. Sci. Eng., Vol.8, No.3, p.226, doi: 10.3390/jmse8030226.
- [8] E. Zhao, Y. Dong, Y. Tang, and X. Xia (2021), *Performance of submerged semi-circular breakwater under solitary wave in consideration of porous media*, Ocean Eng., Vol.223, p.108573, doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108573.
- [9] S. Ergun (1952), *Fluid flow through packed columns*, Chem. Eng. Prog., Vol.48, pp.89-94.
- [10] F. H. Harlow (1967), *Turbulence Transport Equations*, Phys. Fluids, Vol.10, No.11, p.2323, doi: 10.1063/1.1762039.
- [11] J. McCowan (1891), *VII. On the solitary wave*, Lond. Edinb. Dublin Philos. Mag. J. Sci., Vol.32, No.194, pp.45-58, doi: 10.1080/14786449108621390.

Ngày nhận bài:	20/12/2022
Ngày nhận bản sửa:	28/12/2022
Ngày duyệt đăng:	30/12/2022