



DETERMINATION OF THE WIDTH OF SUBMERGED VERTICAL POROUS BREAKWATERS ADAPTING SOLITARY WAVE TRANSMISSION EFFICIENT USING NUMERICAL MODEL AND QUADRATIC REGRESSION EXPRESSION

Van Khoi Pham

Faculty of Civil Engineering, Vietnam Maritime University, No 484 Lach Tray Street, Haiphong City, Viet Nam

ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 01/11/2023

Revised: 03/03/2024

Accepted: 10/04/2024

Published online: 15/04/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.3.12>

* *Corresponding author*

Email: khoipv.ctt@vimaru.edu.vn

Abstract. Due to the effects of climate change, coastal lines, beaches, and islands have been eroded seriously. The submerged vertical porous breakwater is used to actively protect coastlines from far away, while it can ensure a clear view for tourists' activities. However, waves may propagate inside the porous structures as well as over the breakwater crest. Then, the wave transmission resistance efficiency is not really high enough. This paper proposes the method to increase the breakwater width and gives the procedure to determine the breakwater width for wave transmission resistance efficiency of solitary waves. The Flow-3D numerical model is employed to simulate and determine the wave transmission coefficients for 48 scenarios of breakwater crest, breakwater width and incident solitary wave heights. The results show the good agreements of wave transmission coefficients for the increases of breakwater crests as well as breakwater widths. The points of breakwater width - wave transmission coefficients relation are utilized to make the quadratic regression expression. The wave transmission coefficients and the quadratic regression expression systems are used to practically calculate the widths of submerged vertical porous breakwater for solitary wave transmission resistance efficiencies.

Keywords: Vertical porous breakwater, submerged breakwater, solitary wave, wave transmission, Flow-3D model, quadratic regression.

@ 2024 University of Transport and Communications



XÁC ĐỊNH CHIỀU RỘNG ĐÊ TƯỜNG ĐỨNG RỖNG DẠNG NGẬP ĐÁP ỨNG HIỆU QUẢ CHIẾT GIẢM SÓNG ĐƠN DÙNG MÔ HÌNH SỐ VÀ PHƯƠNG TRÌNH HỒI QUY BẬC HAI

Phạm Văn Khôi

Khoa Công trình, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, Số 484 Lạch Tray, Hải Phòng, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 01/11/2023

Ngày nhận bài sửa: 03/03/2024

Ngày chấp nhận đăng: 10/04/2024

Ngày xuất bản Online: 15/04/2024

<https://doi.org/10.47869/tcsj.75.3.12>

* Tác giả liên hệ

Email: khoipv.ctt@vamaru.edu.vn

Tóm tắt. Dưới ảnh hưởng ngày càng lớn của biến đổi khí hậu, hàng loạt các bờ biển, bãi biển, hải đảo bị xói lở nghiêm trọng. Đê chắn sóng rỗng dạng ngập được sử dụng để giảm sóng tới một cách chủ động từ xa mà vẫn đảm bảo mỹ quan, không che chắn đối với các hoạt động tắm biển, du lịch. Tuy nhiên, do kết cấu đê rỗng và đỉnh ngập dưới mực nước tĩnh nên hiệu quả giảm sóng là không cao. Nghiên cứu này đề xuất biện pháp tăng bề rộng đê và chỉ dẫn cách thực hành tính toán xác định bề rộng đê tường đứng rỗng dạng ngập đáp ứng hiệu quả chiết giảm sóng đơn tới. Mô hình số Flow-3D được sử dụng để mô phỏng và xác định hệ số truyền sóng với 48 kịch bản khác nhau về chiều cao đê, bề rộng đê và chiều cao sóng đơn tới. Kết quả cho thấy sự phù hợp về hệ số truyền sóng đối với các trường hợp chiều cao đê và bề rộng đê ngập tăng dần. Các điểm quan hệ bề rộng đê - hệ số truyền sóng được sử dụng để thiết lập các đường hồi quy bậc hai. Hệ số truyền sóng và hệ thống đồ thị các đường hồi quy bậc hai được sử dụng để chỉ dẫn thực hành tính toán bề rộng đê tường đứng rỗng dạng ngập đáp ứng hiệu quả chiết giảm sóng đơn.

Từ khóa: Đê tường đứng rỗng, đê ngập, sóng đơn, sóng truyền, mô hình Flow-3D, hồi quy bậc hai.

@ 2024 Trường Đại học Giao thông vận tải

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Dưới tác dụng của biến đổi khí hậu và các hiện tượng địa chấn, sóng biển hình thành, lan truyền và phá hủy ngày càng nghiêm trọng các đường bờ biển trên toàn Thế giới [1-6]. Hàng loạt các biện pháp được đưa ra để ngăn chặn hoặc giảm thiểu ảnh hưởng của sóng tới bờ biển, có thể phân loại thành ba giải pháp: giải pháp bị động, giải pháp chủ động và kết hợp giải pháp

chủ động – bị động. Giải pháp chủ động được sử dụng đầu tiên với cách thức đơn giản là xây dựng các đê – tường chắn sóng nhằm mục tiêu ngăn sóng tác động trực tiếp vào đường bờ biển [7-10]. Trong trường hợp đường bờ biển có rừng ngập mặn, các công trình như bên cảng, khu đông dân cư, giải pháp chủ động áp dụng để xây dựng đê chắn sóng ở xa bờ làm giảm hoặc triệt tiêu sóng không cho lan truyền vào bờ [11], [12]. Đối với những khu vực hứng chịu những cơn sóng lớn hoặc có tính chất bảo vệ quan trọng như khu đông dân cư, khu quân sự thì giải pháp kết hợp chủ động – bị động được sử dụng [13]. Do đặc điểm có thể cho sóng truyền qua, đê chắn sóng rộng được sử dụng để chủ động giảm chiều cao sóng tới tác động lên đường bờ khu vực ven biển, đặc biệt hơn là những nơi không có che chắn như bán đảo, hải đảo [6], [11], [14-17]. Trong trường hợp cần đảm bảo mỹ quan, không che chắn phía sau để phục vụ cho bãi biển hay khu du lịch, đê chắn sóng rộng dạng ngập được sử dụng như phương án tối ưu về mặt kỹ thuật [14].

Đến nay, chưa có lý thuyết tổng quan cho kết cấu đê rộng mới này, các nghiên cứu về đê chắn sóng rộng tập trung vào việc phát triển mô hình vật lý [5], [6], [18], mô hình thực nghiệm [11], [12], [18], [19], [20] và mô hình toán [11], [16], [18], [21-26]. So với mô hình vật lý và mô hình thực nghiệm, mô hình toán là phương pháp được sử dụng rộng rãi hơn với ưu điểm tiết kiệm thời gian, chi phí thiết kế mà vẫn đảm bảo độ chính xác cho phép. Trong nghiên cứu này, mô hình số ba chiều Flow-3D được sử dụng để mô phỏng tương tác sóng với kết cấu đê tường đứng rộng dạng ngập [15], [27], [28].

Có thể nhận thấy, đê tường đứng kết cấu rộng dạng ngập có đặc điểm nổi bật là vừa cho sóng truyền qua thân đê, vừa cho sóng đi qua đỉnh đê một cách dễ dàng, đặc biệt là sóng đơn (solitary wave) có chiều cao sóng hoàn toàn nằm trên mực nước tĩnh [16], [22-23]. Vì thế, hiệu quả giảm sóng của đê tường đứng rộng dạng ngập là không lớn. Cho nên, tăng chiều rộng đê là biện pháp đơn giản nhất để làm tăng hiệu quả giảm sóng chủ động của đê tường đứng rộng dạng ngập [5], [11], [21]. Tuy nhiên, các nghiên cứu [5], [11], [21] đều thực hiện với điều kiện biên sóng tới là phổ sóng phụ thuộc vào điều kiện từng địa phương cụ thể mà không phải là sóng đơn. Thêm vào đó, nghiên cứu [5] thực hiện thí nghiệm mô hình vật lý đối với dạng cụ thể kết cấu đê chắn sóng tường cọc ống nhồi đá đổ vào giữa, nghiên cứu [11], [21] thực hiện mô hình thực nghiệm trên đê chắn sóng bằng hàng rào tre, cừ tràm nhồi bó tre vào giữa. Do đó, kết quả việc xác định bề rộng đê chắn sóng tường đứng rộng trên chỉ mang tính chất cục bộ địa phương với từng loại kết cấu rộng cụ thể. Nghiên cứu này có điều kiện biên sóng đơn, sử dụng mô hình số ba chiều Flow-3D mô phỏng tương tác sóng đơn tới với kết cấu đê tường đứng rộng dạng ngập tổng quát để xác định hệ số chiết giảm chiều cao sóng tới k_t ($k_t = H_t/H$, trong đó H_t là chiều cao sóng truyền qua đê, H là chiều cao sóng đơn tới). Kết quả của mô hình số được sử dụng kết hợp với phương trình đường hồi quy bậc hai [29] để thực hành tính toán xác định bề rộng đê chắn sóng tường đứng rộng dạng ngập theo chiều cao lưu không đê đáp ứng hiệu quả chiết giảm sóng đơn tới.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình Flow-3D và điều kiện biên sóng đơn

Mô hình Flow-3D là sản phẩm của hãng Flow Science (Mỹ) được ứng dụng rộng rãi trong mô phỏng dòng chảy nói chung và mô phỏng tương tác sóng với đê chắn sóng nói riêng. Vì là mô hình ba chiều nên mô hình Flow-3D có thể mô phỏng được gần đúng nhất các hiện tượng dòng chảy trong thực tế như dòng xoáy, dòng rối. Nhược điểm duy nhất của những mô hình ba chiều là chúng yêu cầu cấu hình máy tính cao và thời gian mô phỏng lâu. Tuy nhiên, sự phát triển công nghệ phần cứng máy tính hiện nay đã dần loại bỏ nhược điểm đó.

Hệ phương trình chủ đạo được sử dụng là hệ phương trình Navier-Stokes. Trong nghiên cứu này, phương trình liên tục và phương trình động lượng đối với kết cấu rỗng được thể hiện như sau:

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

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

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 (m/s) theo các phương x, y, z ; A là tỷ lệ diện tích nước chiếm chỗ (m^2); V_F là tỷ lệ thể tích nước chiếm chỗ (m^3); ρ là khối lượng riêng nước (kg/m^3); p là áp suất (Pa); G là gia tốc bản thân (m/s^2); f_v là gia tốc nhớt (m/s^2); và f_p là gia tốc do tổn thất dòng chảy trong kết cấu rỗng (m/s^2). Điểm riêng biệt trong nghiên cứu này là thành phần tổn thất dòng chảy trong kết cấu rỗng f_p được đưa vào phương trình động lượng. Thành phần này được xác định theo nguyên lý lực kéo bão hòa Forchheimer [30] như sau:

$$f_p = F_D \frac{\mathbf{u}}{\lambda} \quad (3)$$

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:

$$F_D = \alpha_l \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{1-\lambda}{\lambda} \right)^2 + \alpha_t \frac{1-\lambda}{\lambda} \frac{|\mathbf{u}|}{\lambda} \quad (4)$$

Trong đó: α_l và α_t tương ứng là hệ số sức cản do chảy tầng và chảy rối được xác định từ thí nghiệm kiểm chuẩn mô hình số với mô hình vật lý.

Mô hình chảy rối sử dụng hai phương trình $k-\varepsilon$ [31] được ứng dụng rộng rãi trong tính toán động lực học dòng rối và tương tác dòng rối với kết cấu. Với các kết cấu công trình thủy lợi, đê chắn sóng [27], mô hình Renormalization Group (RNG) đã được kiểm chứng về hiệu quả mô phỏng tương tác dòng chảy - kết cấu [32], [33] và được sử dụng trong nghiên cứu này.

Sóng đơn được thiết lập từ biên ngoài bên trái của mô hình số, lan truyền theo thời gian vào miền tính toán tương tác với kết cấu và được hấp thụ hoặc đi ra ngoài biên phải. Sóng đơn được coi là có chiều dài vô cùng lớn, hình dạng đơn giản chỉ có một con sóng, thông số thiết lập là chiều sâu nước và chiều cao sóng nên được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu để xác định đặc trưng của các kết cấu mà nó tương tác [16], [17]. Trong mô hình số Flow-3D được sử dụng trong nghiên cứu này, lý thuyết sóng đơn được phát triển bởi McCowan [34].

2.2. Phương trình hồi quy bậc hai

Trong thí nghiệm mô hình, kết quả thí nghiệm được thể hiện rời rạc dưới dạng các điểm ngẫu nhiên. Để tìm ra quy luật của các điểm đó, hồi quy là phương pháp được sử dụng phổ biến nhất. Đơn giản nhất là hồi quy bậc nhất, sau đó đến bậc hai và bậc cao hơn tùy theo tính chất của các điểm rời rạc. Trong tính toán đê chắn sóng, hồi quy bậc hai được sử dụng để thể hiện mối liên hệ giữa đặc tính sóng sau tương tác với kết cấu đê [29]. Việc thành lập phương trình

đường hồi quy dựa trên nguyên lý “bình phương tối thiểu”. Trong nghiên cứu này, phương trình hồi quy bậc hai được sử dụng có dạng như sau:

$$y = f(x) = ax^2 + bx + c = 0 \quad \text{với } a \neq 0 \quad (5)$$

Các hệ số a, b, c sau khi áp dụng nguyên lý “bình phương tối thiểu” là nghiệm hệ phương trình sau:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 \\ \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i y_i \\ \sum_{i=1}^N y_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

Trong đó: (x_i, y_i) là cặp số liệu rời rạc thứ i , N là tổng số cặp số liệu rời rạc tạo nên đường hồi quy.

Hệ số tương quan biểu thị sự phù hợp của phương trình đường hồi quy với các cặp số liệu rời rạc, được thể hiện như sau:

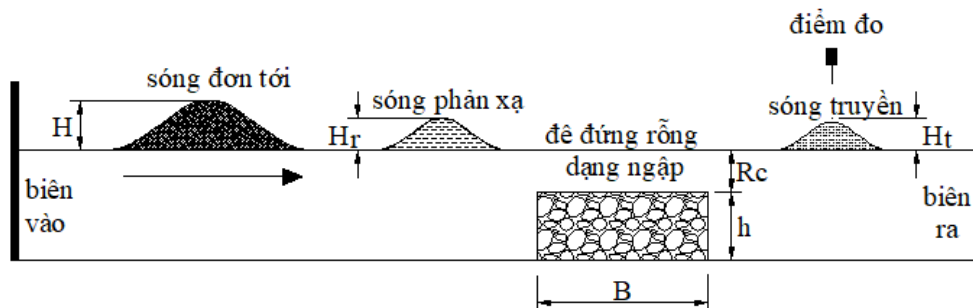
$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - ax_i^2 - bx_i - c)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

Trong đó \bar{y} là giá trị trung bình của các giá trị y_i . Khi hệ số tương quan $R^2 = 1$, đường hồi quy đi qua tất cả các điểm rời rạc, hệ số này càng xa 1 thể hiện các điểm rời rạc càng cách xa đường hồi quy.

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG SỐ

3.1. Thiết lập mô hình

Mô hình số mô phỏng tương tác sóng đơn với đê tường đứng rộng dạng ngập được thiết lập theo Hình 1.



Hình 1. Thiết lập mô hình mô phỏng sóng đơn truyền qua đê tường đứng rộng dạng ngập.

Theo Hình 1, sóng đơn tới (chiều cao H) được lan truyền từ biên trái vào gặp mặt đê tường đứng rộng dạng ngập 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. Trong nghiên cứu này, hệ số truyền sóng $k_t = H_t/H$ được sử dụng để biểu thị hiệu quả chiết giảm sóng ($1 - k_t$) của đê chắn sóng tường đứng rộng dạng ngập.

Trong thí nghiệm mô phỏng số này, với mục tiêu xác định ảnh hưởng của bề rộng đê tới đặc trưng giảm sóng của đê tường đứng rộng dạng ngập, 48 kịch bản được thiết lập dựa trên các thông số như trong Bảng 1. Hệ số lực cản chảy tầng $\alpha_1 = 10000$ và chảy rối $\alpha_2 = 80$ như kết quả trong phần kiểm chuẩn mô hình trong tài liệu [17]. Đê rộng có độ lỗ rỗng $\lambda = 0,5$ và đường kính viên đá $d = 5$ cm. Mực nước tĩnh được điều chỉnh thay đổi dẫn tới chiều sâu nước h và chiều cao lưu không R_c thay đổi để tạo ra 4 trường hợp đê ngập khác nhau. 4 trường hợp trên được kiểm tra với 3 chiều cao sóng tới và 4 giá trị bề rộng đê khác nhau tạo nên tổng cộng 48 kịch bản. Máng sóng số có chiều dài 22 m, chiều rộng 1 m và chiều cao 1 m được sử dụng để mô phỏng cho các thí nghiệm trên mô vật lý đã được thực hiện phổ biến hiện nay [6], [35]. Biên trái là biên tạo sóng, biên phải là biên ra, biên dưới là tường, biên trên là áp suất tuyệt đối của không khí (101325 Pa). Các thông số thực tế sẽ được xác định dựa trên thông số mô hình và tỷ lệ mô hình đã định trước [35].

Bảng 1. Các thông số sử dụng trong mô phỏng ảnh hưởng của chiều rộng tới hiệu quả chiết giảm sóng đơn qua đê chắn sóng tường đứng rộng dạng ngập.

B (cm)	20	30	40	50
Rc (cm)	-15	-10	-5	0
h (cm)	45	50	55	60
H (cm)	6	9	12	

3.2. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của chiều cao với bề rộng đê tường đứng rộng dạng ngập

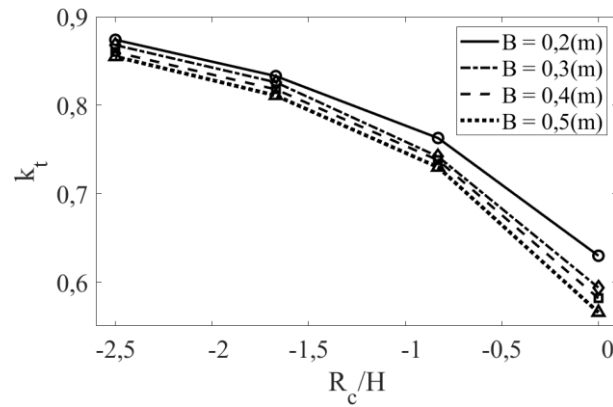
Bảng 2 thể hiện kết quả mô phỏng hệ số chiết giảm sóng đơn k_t cho 48 kịch bản mô phỏng tương tác sóng đơn với đê chắn sóng tường đứng rộng dạng ngập.

Bảng 2. Kết quả mô phỏng hiệu quả chiết giảm sóng đơn qua đê chắn sóng tường đứng rộng dạng ngập cho 48 kịch bản.

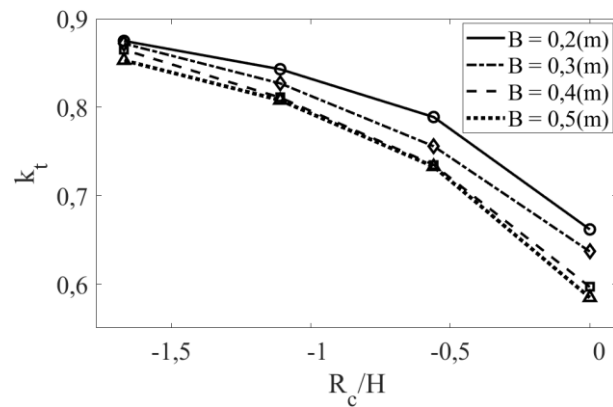
KB	B (m)	H (m)	h (m)	Rc (m)	k_t
1			0,45	0	0,630
2		0,06	0,5	-0,05	0,763
3			0,55	-0,1	0,833
4			0,6	-0,15	0,874
5			0,45	0	0,662
6	0,2	0,09	0,5	-0,05	0,789
7			0,55	-0,1	0,843
8			0,6	-0,15	0,875
9			0,45	0	0,672
10		0,12	0,5	-0,05	0,779
11			0,55	-0,1	0,835
12			0,6	-0,15	0,875
13	0,3	0,06	0,45	0	0,594
14			0,5	-0,05	0,742

15			0,55	-0,1	0,826
16			0,6	-0,15	0,868
17			0,45	0	0,637
18		0,09	0,5	-0,05	0,756
19			0,55	-0,1	0,827
20			0,6	-0,15	0,872
21			0,45	0	0,670
22		0,12	0,5	-0,05	0,765
23			0,55	-0,1	0,830
24			0,6	-0,15	0,876
25			0,45	0	0,582
26		0,06	0,5	-0,05	0,738
27			0,55	-0,1	0,818
28			0,6	-0,15	0,860
29			0,45	0	0,597
30	0,4	0,09	0,5	-0,05	0,735
31			0,55	-0,1	0,811
32			0,6	-0,15	0,865
33			0,45	0	0,620
34		0,12	0,5	-0,05	0,740
35			0,55	-0,1	0,812
36			0,6	-0,15	0,853
37			0,45	0	0,566
38		0,06	0,5	-0,05	0,730
39			0,55	-0,1	0,811
40			0,6	-0,15	0,855
41			0,45	0	0,585
42	0,5	0,09	0,5	-0,05	0,733
43			0,55	-0,1	0,808
44			0,6	-0,15	0,853
45			0,45	0	0,606
46		0,12	0,5	-0,05	0,737
47			0,55	-0,1	0,809
48			0,6	-0,15	0,850

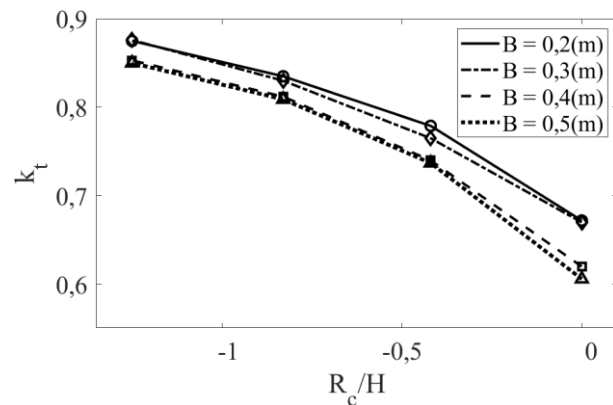
Kết quả mô phỏng hiệu quả chiết giảm sóng đơn theo chiều cao và bề rộng đê trong Bảng 2 được thể hiện trên Hình 2.



a) $H = 0,06$ m



b) $H = 0,09$ m



c) $H = 0,12$ m

Hình 2. Kết quả mô phỏng ảnh hưởng của chiều cao lưu không đê tới hiệu quả chiết giảm sóng đơn tương ứng với 04 chiều rộng đê tường đứng rộng dạng ngập và 03 chiều cao sóng tới: a) $H = 0,06$ m, b) $H = 0,09$ m, c) $H = 0,12$ m. Chú thích: các điểm hình tròn – hình thoi – hình vuông – hình tam giác tương ứng với các trường hợp bề rộng đê $B = 0,2$ m – $0,3$ m – $0,4$ m – $0,5$ m.

Trên Hình 2 (a, b, c), chiều cao lưu không đê tương đối của đê R_c/H càng tăng thì hệ số chiết giảm sóng k_t càng giảm. Kết quả trên chứng tỏ chiều cao đê ngập càng tăng, chiều cao sóng

truyền qua càng giảm, hiệu quả giảm sóng của đê càng tốt. Điều này chứng tỏ kết quả mô phỏng là phù hợp với quy luật động lực học sóng biển và bản chất vật lý của kết cấu đê chắn sóng. Mô hình cũng mô phỏng chính xác ảnh hưởng của chiều rộng đê rộng, khi tăng chiều rộng đê (từ $B = 0,2$ m tới $B = 0,5$ m) thì hệ số k_t giảm tương ứng đối với tất cả các trường hợp chiều cao đê và chiều cao sóng đơn tới. Điều này được thể hiện trên Hình 2a ($H = 0,06$ m) khi đường nét liền ($B = 0,2$ m) nằm trên cùng, sau đó lần lượt tới đường nét chấm – gạch ($B = 0,3$ m), đường nét gạch đứt ($B = 0,4$ m), đường nét chấm ($B = 0,5$ m). Khoảng cách giữa các đường trên Hình 2a khá đồng đều, thể hiện quan hệ tuyến tính giữa chiều rộng đê và chiều cao sóng truyền qua đê. Khi chiều cao sóng tới tăng lên $H = 0,09$ m (Hình 2b) và $H = 0,12$ m (Hình 2c), tính phi tuyến của sóng thể hiện rõ hơn thì khoảng cách giữa các đường là không đều, nhưng không bị xáo trộn quy luật vị trí các đường với nhau. Nhận thấy quy luật phi tuyến trong mối quan hệ giữa bề rộng đê B và hệ số chiết giảm sóng k_t , tương quan hồi quy bậc hai giữa $B \sim k_t$ được sử dụng để thực hành xác định bề rộng đê đáp ứng hiệu quả chiết giảm sóng đơn.

4. XÁC ĐỊNH CHIỀU RỘNG ĐÊ ĐÁP ỨNG HIỆU QUẢ CHIẾT GIẢM SÓNG ĐƠN

4.1. Thiết lập phương trình hồi quy bậc hai và hệ số tương quan

Từ kết quả trong Bảng 2, mối liên hệ giữa $B \sim k_t$ với 4 điểm rời rạc (x_i, y_i), $i = 1 \div 4$, được thể hiện trong các công thức (6), (7) được sử dụng để thiết lập phương trình đường hồi quy (hệ số a, b, c và hệ số tương quan R^2). Với mỗi chiều cao sóng đơn tới, có 4 đường hồi quy được thiết lập tương ứng với 4 chiều cao đê ngập khác nhau (đường hồi quy chính) và 3 đường hồi quy nội suy trung bình của 4 đường hồi quy chính tương ứng với 3 chiều cao đê nội suy. Vậy, tổng cộng có 12 đường hồi quy chính và 9 đường hồi quy nội suy được thiết lập với các hệ số thể hiện trên Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả xác định các hệ số phương trình hồi quy bậc hai và hệ số tương quan cho quan hệ $B \sim k_t$ với 4 trường hợp chiều cao đê ngập và 3 trường hợp chiều cao sóng đơn tới khác nhau, chữ thẳng đứng tương ứng 12 đường hồi quy chính, chữ in nghiêng tương ứng 9 đường hồi quy nội suy.

TT	H (m)	R_c (m)	a	b	c	R^2	Ghi chú
1		0	0,5	-0,554	0,719	0,982	Hồi quy chính
2		-0,025	0,413	-0,442	0,767	-	Hồi quy nội suy
3		-0,05	0,325	-0,33	0,815	0,963	Hồi quy chính
4	0,06	-0,075	0,163	-0,202	0,832	-	Hồi quy nội suy
5		-0,1	$1,65 \cdot 10^{-15}$	-0,074	0,848	0,999	Hồi quy chính
6		-0,125	0,013	-0,078	0,869	-	Hồi quy nội suy
7		-0,15	0,025	-0,082	0,89	0,991	Hồi quy chính
8		0	0,325	-0,498	0,751	0,976	Hồi quy chính
9		-0,025	0,55	-0,615	0,828	-	Hồi quy nội suy
10	0,09	-0,05	0,775	-0,731	0,905	0,998	Hồi quy chính
11		-0,075	0,55	-0,54	0,903	-	Hồi quy nội suy
12		-0,1	0,325	-0,348	0,9	0,989	Hồi quy chính
13		-0,125	0,05	-0,132	0,884	-	Hồi quy nội suy

14		-0,15	-0,225	0,085	0,867	0,997	Hồi quy chính
15		0	-0,3	-0,038	0,696	0,898	Hồi quy chính
16		-0,025	-0,013	-0,191	0,767	-	Hồi quy nội suy
17		-0,05	0,275	-0,343	0,838	0,955	Hồi quy chính
18	0,12	-0,075	0,163	-0,237	0,85	-	Hồi quy nội suy
19		-0,1	0,05	-0,131	0,861	0,921	Hồi quy chính
20		-0,125	-0,025	-0,08	0,874	-	Hồi quy nội suy
21		-0,15	-0,1	-0,028	0,887	0,833	Hồi quy chính

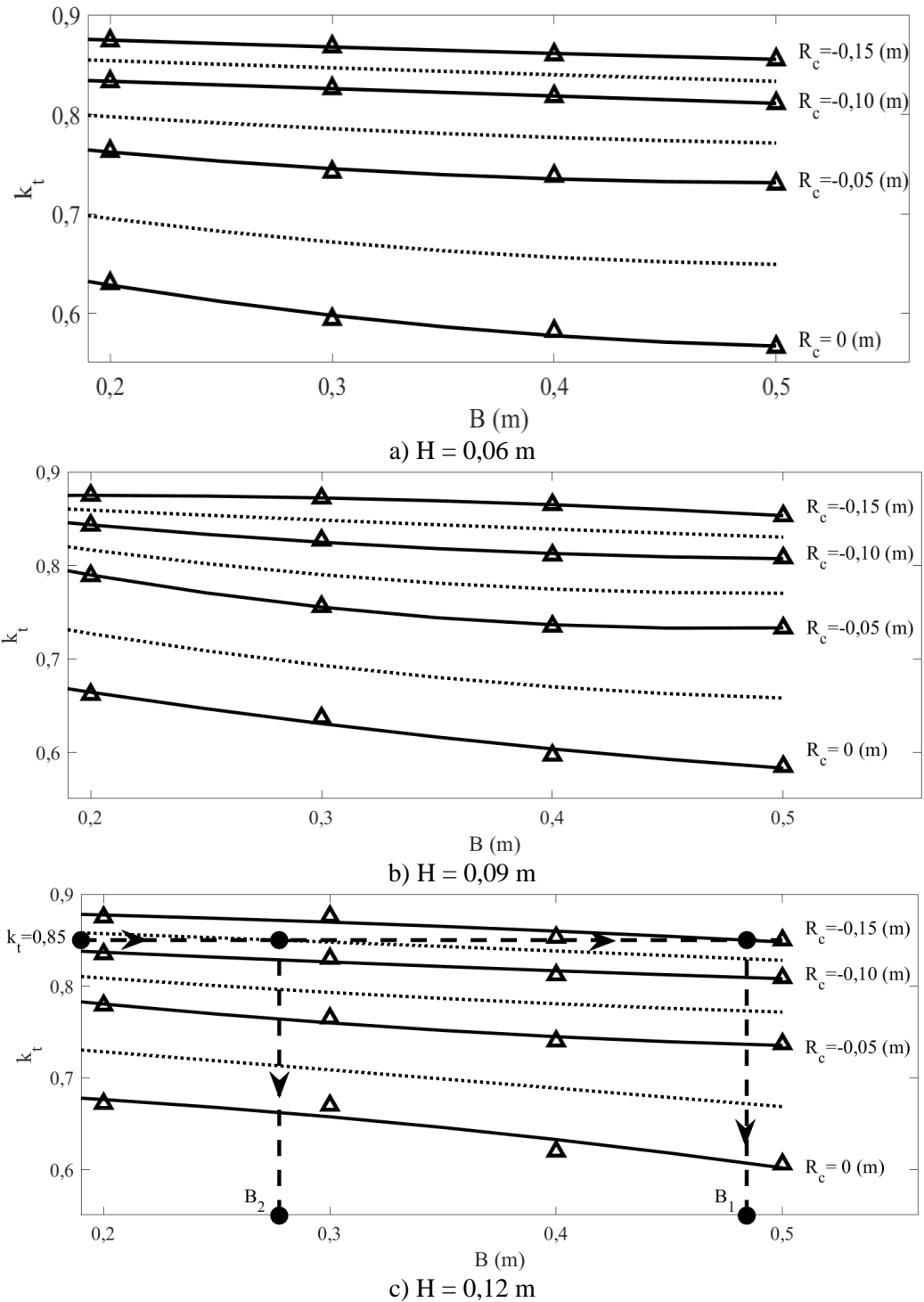
Từ kết quả trong Bảng 3, có thể thấy đường hồi quy tương ứng với $R_c = -0,1$ m, $H = 0,06$ m có dạng gần như đường thẳng (hồi quy bậc nhất) qua 4 điểm rời rạc, nên tương quan rất “chặt” ($R^2 = 0,999$). Với $R_c = -0,15$ m và chiều cao sóng tăng lên $H = 0,12$ m (tính phi tuyến của sóng tăng lên), đường hồi quy qua 4 điểm rời rạc có hệ số tương quan nhỏ nhất $R^2 = 0,833$ nhưng vẫn đảm bảo tương quan khá “chặt”. Giữa các đường tương quan tương ứng với 4 chiều cao đê, hoàn toàn nội suy được các đường tương quan tương ứng với chiều cao đê khác nhau. 12 đường hồi quy chính và 9 đường hồi quy nội suy được thể hiện trên đồ thị Hình 3.

4.2. Thực hành xác định chiều rộng đê đáp ứng hiệu quả chiết giảm sóng đơn

Các điểm quan hệ $B \sim k_t$ là rời rạc nên khó có thể xác định bề rộng đê theo một giá trị bất kỳ của hệ số chiết giảm sóng. Mục tiêu của nghiên cứu này là có thể lựa chọn bất kỳ hệ số chiết giảm sóng mong muốn, từ đó thực hành xác định bề rộng đê tương ứng với chiều cao lưu không đê và chiều cao sóng đơn tới. Do đó, phương trình hồi quy bậc hai được thiết lập để đảm bảo tính liên tục của quan hệ $B \sim k_t$. 48 điểm quan hệ rời rạc $B \sim k_t$ (Bảng 2), 12 đường hồi quy chính và 9 đường hồi quy nội suy (Bảng 3) được thể hiện trong hệ thống đồ thị thực hành tính toán trên Hình 3.

Hình 3a, Hình 3b, và Hình 3c thể hiện 16 điểm rời rạc, 4 đường hồi quy chính, 3 đường hồi quy nội suy tương ứng với chiều cao sóng đơn tới $H = 0,06$ m, $H = 0,09$ m, và $H = 0,12$ m. Khi xác định được phương trình đường hồi quy, nếu cho trước giá trị hệ số chiết giảm sóng mong muốn, hoàn toàn xác định được chiều cao và bề rộng đê bằng phép nội suy hoặc ngoại suy. Giá trị bề rộng đê (B) là nghiệm của phương trình $f(x) = k_t$, trong đó $f(x)$ là phương trình đường hồi quy, k_t là giá trị hệ số chiết giảm sóng đơn đầu vào mong muốn. Như trên Hình 3c là một ví dụ về việc thực hành xác định bề rộng đê ngập. Giá trị mong muốn $k_t = 0,85$ (chiều cao sóng truyền qua đê giảm 15% so với chiều cao sóng tới) thể hiện bằng đường nét đứt ngang mũi tên hướng sang phải. Có thể thấy rằng có 02 chiều cao đê đáp ứng được hệ số chiết giảm sóng $k_t = 0,85$ là $R_c = -0,15$ m (ứng với đường hồi quy chính $f_1(x) = -0,1x^2 - 0,028x + 0,887$) và $R_c = -0,125$ m (ứng với đường hồi quy nội suy $f_2(x) = -0,025x^2 - 0,08x + 0,874$). Giá trị bề rộng đê $B_1 = 0,484$ m ứng với chiều cao đê $R_c = -0,15$ m là nghiệm có nghĩa của phương trình $-0,1x^2 - 0,028x + 0,887 = 0,85$ và giá trị bề rộng $B_2 = 0,278$ m ứng với chiều cao đê $R_c = -0,125$ m là nghiệm có nghĩa của phương trình $-0,025x^2 - 0,08x + 0,874 = 0,85$. Vậy, để giảm chiều cao sóng tới ($H = 0,12$ m) đi 15%, hoặc là chọn chiều cao lưu không đê $R_c = -0,15$ m và chiều rộng đê $B = 0,484$ m, hoặc là chọn chiều cao lưu không đê $R_c = -0,125$ m và chiều rộng đê $B = 0,277$ m. Có thể nhận thấy quy tắc chọn là, đê ngập thấp thì đi với chiều rộng lớn, đê ngập cao thì đi với chiều rộng nhỏ. Điều này cũng hoàn toàn hợp lý về mặt bản chất vật lý. Với các chiều cao sóng tới khác không có ở Hình 3, các thông số chiều cao – bề rộng đê được xác định bằng phép nội suy

từ những giá trị chiều cao sóng tới sẵn có. Khi đã xác định được thông số sóng đơn tới và kích thước đê chắn sóng tường đứng rộng dạng ngấp của mô hình vật lý được trình bày trong nghiên cứu này, hoàn toàn có thể xác định được thông số sóng và kích thước đê thực tế bằng hệ số tỷ lệ mô hình.



Hình 3. Đồ thị xác định bề rộng đê B theo hiệu quả chiết giảm sóng k_t và chiều cao lưu không đê R_c cho các trường hợp chiều cao sóng đơn tới: a) $H = 0,06$ (m), b) $H = 0,09$ (m), c) $H = 0,12$ (m). Ký tự tam giác là mối liên hệ $B \sim k_t$, đường nét liền là đường hồi quy bậc hai chính, đường nét đứt là đường hồi quy bậc hai nội suy.

5. KẾT LUẬN

Bài báo xác định chiều rộng đê chắn sóng tường đứng rộng dạng ngập theo chiều cao lưu không đê ngập đáp ứng hiệu quả chiết giảm sóng đơn. Nghiên cứu đã bổ sung tính toán cho đê chắn sóng tường đứng rộng dạng ngập, một loại kết cấu đê chủ động giảm sóng mới. Tác giả sử dụng mô hình số để xây dựng 48 kịch bản về thông số sóng đơn tới, chiều cao lưu không đê ngập và bề rộng đê ngập rồi tiến hành mô phỏng xác định hệ số chiết giảm sóng. Kết quả mô phỏng đáp ứng quy luật về bản chất vật lý của sóng đơn truyền qua đê tường đứng rộng dạng ngập. Để thực hành tính toán xác định bề rộng đê đáp ứng hệ số chiết giảm sóng, phương trình hồi quy bậc hai được sử dụng để tìm ra quy luật của các điểm rời rạc. Khi đưa ra được hệ số chiết giảm sóng, hoàn toàn xác định được bề rộng đê tương ứng trong nghiên cứu này bằng cách giải phương trình toán học một cách chính xác. Nghiên cứu hiện tại chỉ thực hiện với chiều sâu nước không đổi, có thể mở rộng tính toán với địa hình thực tế có chiều sâu nước thay đổi trong miền tính toán.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT23-24.73.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Y. Fujii, K. Satake, Tsunami Source of the 2004 Sumatra–Andaman Earthquake Inferred from Tide Gauge and Satellite Data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97 (2007) 192–207. <https://doi.org/10.1785/0120050613>
- [2]. Y. Liu, H. Li, Analysis of wave performance through pile–rock breakwaters, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime*, 228 (2014) 284–292.
- [3]. D. R. Tappin, S. T. Grilli, J. C. Harris, R. J. Geller, T. Masterlark, J. T. Kirby, F. Shi, G. Ma, K. K. S. Thingbaijam, P. M. Mai, Did a submarine landslide contribute to the 2011 Tohoku tsunami?, *Marine Geology*, 357 (2014) 344–361. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.09.043>
- [4]. S. T. Grilli, C. O’Reilly, J. C. Harris, T. T. Bakhsh, B. Tehranirad, S. Banihashemi, J. T. Kirby, C. D. P. Baxter, T. Eggeling, G. Ma, F. Shi, Modeling of SMF tsunami hazard along the upper US East Coast: detailed impact around Ocean City, MD, *Nat Hazards*, 76 (2015) 705–746. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1522-8>
- [5]. N.-M. Nguyen, Duong Do Van, Tu Le Duy, Nhat Truong Pham, Thanh Duc Dang, Ahad Hasan Tanim, David Wright, Phong Nguyen Thanh, Duong Tran Anh, The Influence of Crest Width and Working States on Wave Transmission of Pile–Rock Breakwaters in the Coastal Mekong Delta, *JMSE*, 10 (2022) 1762-1783. <https://doi.org/10.3390/jmse10111762>
- [6]. N.-M. Nguyen, Duong Do Van, Duy Tu Le, San Dinh Cong, Le Thanh Chuong, Thuan Duong Hai, Thanh Cong Nguyen, David Wright, Ahad Hasan Tanim, Nhat Truong Pham, Phong Nguyen Thanh, Duong Tran Anh, Experimental and numerical modeling of pile-rock breakwater gap arrangement for optimal coastal erosion protection in deltaic coasts, *Ocean Engineering*, 280 (2023) 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114625>
- [7]. T. Q. Tuan, H. Oumeraci, A numerical model of wave overtopping on seadikes, *Coastal Engineering*, 57 (2010) 757–772. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.04.007>
- [8]. M. Tonelli, M. Petti, Numerical simulation of wave overtopping at coastal dikes and low-crested structures by means of a shock-capturing Boussinesq model, *Coastal Engineering*, 79 (2013) 75–88. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.04.007>

- [9]. S. D. Finis, Numerical and laboratory analysis of post-overtopping wave impacts on a storm wall for a dike-promenade structure, *Coastal Engineering*, 155 (2020) 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103598>
- [10]. L. Wang, Q. Jiang, C. Zhang, Numerical simulation of solitary waves overtopping on a sloping sea dike using a particle method, *Wave Motion*, 95 (2020) 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2020.102535>
- [11]. T. Thieu Quang, L. Mai Trong, Monsoon wave transmission at bamboo fences protecting mangroves in the lower mekong delta, *Applied Ocean Research*, 101 (2020) 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102259>
- [12]. C. Mai Van, A. Ngo, T. Mai, H. T. Dao, Bamboo Fences as a Nature-Based Measure for Coastal Wetland Protection in Vietnam, *Front. Mar. Sci.*, 8 (2021) 1-9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.756597>
- [13]. Hai Van Dang, Hyoungsu Park, Sungwon Shin, Tori Tomiczek, Daniel T. Cox, Eunju Lee, Dayeon Lee, Pedro Lomonaco, Physical model comparison of gray and green mitigation alternatives for flooding and wave force reduction in an idealized urban coastal environment, *Coastal Engineering*, 184 (2023) 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2023.104339>
- [14]. E. Pradjoko, I. Bachtiar, N. Matalatta, G. Sugihartono, The Submerged Breakwater as Prototype of Coastal Protection in Gili Trawangan, Lombok, Indonesia, *Procedia Engineering*, 125 (2015) 284–290. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.041>
- [15]. Tiếng T. V., Khánh N. V., Dung N. P., Nghiên cứu hiệu quả giảm sóng của kết cấu đê chắn sóng rỗng bằng phương pháp mô phỏng số, *Xây dựng*, 68 (2021) 68–75
- [16]. V. N. Vu, V. K. Pham, Numerical simulation of wave overtopping of a vertical porous detached breakwater, *GEOMATE*, 23 (2022) 1-9. <https://doi.org/10.21660/2022.98.3447>
- [17]. V. K. Pham, Lựa chọn chiều cao đáp ứng hiệu quả tiêu tán sóng đơn của đê chắn sóng tường đứng kết cấu rỗng, *Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải*, 73 (2023) 47–51
- [18]. T. Albers, D. C. San, K. Schmitt, *Shoreline Management Guidelines: Coastal Protection in the Lower Mekong Delta*, Project Report GIZ Soc Trang Coastal Zone Management, Vietnam, 2013.
- [19]. H. T. Dao, B. Hofland, T. Suzuki, M. J. F. Stive, T. Mai, L. X. Tuan, Numerical and small-scale physical modelling of wave transmission by wooden fences, *Journal of Coastal and Hydraulic Structures*, 1 (2021) 1-21. <https://doi.org/10.48438/JCHS.2021.0004>
- [20]. T. Dao, M. J. F. Stive, B. Hofland, T. Mai, Wave Damping due to Wooden Fences along Mangrove Coasts, *Journal of Coastal Research*, 34 (2018) 1317-1327. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-18-00015.1>
- [21]. T. Mai, H. T. Dao, T. T. A. Ngo, H. H. Pham, Y. Liu, Effect analysis of wooden fence width on wave transmission by SWASH model, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 1294 (2023) 1-10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1294/1/012026>
- [22]. E. Zhao, Y. Dong, Y. Tang, X. Xia, Performance of submerged semi-circular breakwater under solitary wave in consideration of porous media, *Ocean Engineering*, 223 (2021) 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108573>
- [23]. Y.-T. Wu, C.-L. Yeh, S.-C. Hsiao, Three-dimensional numerical simulation on the interaction of solitary waves and porous breakwaters, *Coastal Engineering*, 85 (2014) 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.12.003>
- [24]. S.-C. Hsiao, K.-C. Hu, H.-H. Hwung, Extended Boussinesq Equations for Water-Wave Propagation in Porous Media, *J. Eng. Mech.*, 136 (2010) 625–640. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000098](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000098)
- [25]. V. N. Vu, C. Lee, T.-H. Jung, Extended Boussinesq equations for waves in porous media, *Coastal Engineering*, 139 (2018) 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.04.023>
- [26]. V. N. Vu, M. Kazolea, V. K. Pham, C. Lee, A hybrid FV/FD scheme for a novel conservative form of extended Boussinesq equations for waves in porous media, *Ocean Engineering*, 269 (2023) 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113491>
- [27]. P. Văn Khôi, V. Văn Nghi, 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*, 67 (2021) 73–77.

- [28]. Khôi P. V., Nghi V. V., Nghiên cứu ứng dụng mô hình dòng chảy ba chiều mô phỏng hiệu quả tiêu tán sóng đơn cho đê chắn sóng tường đứng kết cấu rỗng, Tạp chí Giao thông vận tải, 3/2023 (2023) 116–118.
- [29]. Tuấn Đ. V., Khôi P. V., Nghiên cứu sóng phản xạ lên đê tường đứng có buồng tiêu sóng, Tạp chí Giao thông vận tải, 732 (2023) 70–73.
- [30]. S. Ergun, Fluid flow through packed columns, Chemical Engineering Progress, 48 (1952) 89–94.
- [31]. F. H. Harlow, Turbulence Transport Equations, Phys. Fluids, 10 (1967) 2323–2332. <https://doi.org/10.1063/1.1762039>.
- [32]. Khánh Đ. X., Nga L. T. T., Hùng H. V., Ứng dụng phần mềm Flow-3D tính toán vận tốc và áp suất trên đập tràn thực dụng mặt cắt hình cong, Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường, 61 (2018) 99–106.
- [33]. Hiền L. T. T., Đức D. H., Đăng Đ. H., Phú N. Đ., Nghiên cứu dòng chảy qua tràn xả lũ Tà Rục - Khánh Hòa bằng mô hình dòng rối kết hợp trộn khí, Khoa học kỹ thuật Thủy lợi và Môi trường, 70 (2020) 25–32.
- [34]. J. McCowan, On the solitary wave, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 32 (1891) 45–58. <https://doi.org/10.1080/14786449108621390>.
- [35]. G. Tripepi, F. Casella, F. Aristodemo, P. Filianoti, The solitary wave run-up on sloped beaches protected by submerged rigid breakwaters, Ocean Engineering, 282 (2023) 115003-115024. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115003>.