



DOI:10.22144/ctujos.2023.190

TÍNH TOÁN CHIỀU CAO SÓNG Ý NGHĨA BẰNG PHƯƠNG PHÁP THAM SỐ

Dương Thanh Nga*, Trà Nguyễn Quỳnh Nga và Lê Song Giang

Khoa Kỹ Thuật Xây Dựng, Trường Đại học Bách khoa Tp.HCM

Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): dthnga@hcmut.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 25/04/2023

Sửa bài (Revised): 16/05/2023

Duyệt đăng (Accepted): 17/05/2023

Title: Prediction of significant wave height transformation by parametric wave approach

Author(s): Duong Thanh Nga*, Tra Nguyen Quynh Nga and Le Song Giang

Affiliation(s): Vietnam National University Ho Chi Minh City

TÓM TẮT

Sóng đại diện và tham số là hai phương pháp phổ biến tính chiều cao sóng biển. Phương pháp sóng đại diện có độ chính xác thấp khi tính chiều cao sóng ý nghĩa. Tuy nhiên, phương pháp tham số cho kết quả tốt khi tính chiều cao sóng căn quân phương. Do đó, nghiên cứu này sẽ kiểm tra tính khả thi của việc sử dụng phương pháp tham số để tính chiều cao sóng ý nghĩa. Số lượng lớn số liệu sóng và sáu công thức của phương pháp tham số được thu thập để kiểm tra khả năng tính chiều cao sóng ý nghĩa và hiệu chỉnh hệ số để nâng cao khả năng tính. Kết quả cho thấy, sai số tính chiều cao sóng từ 9,9% đến 19,6%. Tuy nhiên, sai số chỉ còn từ 6,4% đến 9,5% sau khi hiệu chỉnh hệ số và công thức DT23 cho sai số tốt nhất. Để kiểm tra lại khả năng tính toán, bộ số liệu kiểm tra được sử dụng và kết quả cho thấy sai số đã giảm đáng kể khi hiệu chỉnh hệ số. Do đó, DT23 được đề xuất để tính chiều cao sóng ý nghĩa.

Từ khóa: Chiều cao sóng vỡ, chiều cao sóng ý nghĩa, năng lượng tiêu tán, phương pháp tham số, phương pháp sóng đại diện

ABSTRACT

Representative wave and parametric wave approaches are popular methods for computing wave height. However, the representative wave method showed low accuracy for computing significant wave height. In contrast, the parametric wave approach performs well in root-mean-square wave height transformation. Therefore, this paper investigates feasibility of applying a parametric wave model to calculate significant wave height. Six parametric wave models are collected to examine their accuracy for modeling considerable wave height, and these models are modified to improve prediction performance. A large amount of wave data is gathered for examination and calibration. The results show that the existing models predict significant wave height with a root-mean-square relative error of 9,9%-16,6%. After modifying them, the error ranges from 6,4%-9,5%. Among the six models, DT23 performs the best result for significant wave height transformation prediction. These six models are tested with other data to verify the wave height estimation capacity. The verification results indicate a significant decrease in error. Therefore, DT23 with modification is recommended for computing significant wave height transformation.

Keywords: Breaker height, energy dissipation, parametric approach, representative wave approach, significant wave height

1. GIỚI THIỆU

Trong lĩnh vực kỹ thuật biển, tính toán chiều cao sóng biển đóng vai trò vô cùng quan trọng trong nghiên cứu biến dạng bờ biển, chuyển tải bùn cát và thiết kế các công trình ven biển. Vì vậy, nhiều nhà khoa học đã tập trung vào nghiên cứu chiều cao sóng biển như chiều cao sóng căn quân phương, chiều cao sóng vỡ, chiều cao sóng ý nghĩa (Nuntakamol & Rattanapitikon; 2011; Rattanapitikon et al., 2015; Duong et al., 2023). Hiện nay, có nhiều phương pháp tính chiều cao sóng khác nhau, trong đó phương pháp tham số và phương pháp sóng đại diện là hai phương pháp phổ biến. Cả hai phương pháp này đều sử dụng định luật bảo toàn năng lượng để tính chiều cao sóng, trong đó năng lượng sóng tiêu tán là một tham số quan trọng để tính chiều cao sóng biển.

Phương pháp sóng đại diện được sử dụng để tính toán các loại chiều cao sóng như chiều cao sóng căn quân phương, chiều cao sóng trung bình, chiều cao sóng ý nghĩa, và nhiều loại khác (Nuntakamol & Rattanapitikon, 2011). Phương pháp này áp dụng trực tiếp công thức tính năng lượng tiêu tán của sóng đều để tính toán chiều cao của sóng không đều. Do đó, phương pháp này có nhược điểm là sai số tính chiều cao sóng lớn (Rattanapitikon et al., 2003). Đối với phương pháp tham số, năng lượng tiêu tán sóng không đều bằng tích phân của tích của năng lượng tiêu tán sóng đều và hàm phân bố xác suất của sóng vỡ (Baldock, et al., 1998; Alsina & Baldock, 2007). Ưu điểm của phương pháp này là xem xét tới bản chất ngẫu nhiên của sóng, do đó độ chính xác cao. Tuy nhiên, nó chỉ được dùng để tính chiều cao sóng căn quân phương.

Do đó, mục tiêu của nghiên cứu này là đánh giá tính khả thi của việc áp dụng phương pháp tham số để tính toán chiều cao sóng ý nghĩa. Các công thức tính chiều cao sóng căn quân phương của phương pháp tham số được thu thập và kiểm tra khả năng tính chiều cao sóng ý nghĩa của những công thức đã thu thập. Sau đó, các công thức sẽ được hiệu chỉnh để cải thiện sai số khi tính toán chiều cao sóng ý nghĩa.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp tính chiều cao sóng

Chiều cao sóng là thông số rất phức tạp phụ thuộc vào nhiều yếu tố và việc xác định chiều cao sóng một cách chính xác là vô cùng khó. Chiều cao sóng không đều có thể được tính toán từ phương trình bảo toàn năng lượng như công thức (1).

$$\frac{\partial}{\partial x}(Ec_g) = -D_B \quad (1)$$

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (2)$$

$$c_g = \frac{L}{T_p} \left(\frac{1}{2} + \frac{kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (3)$$

Trong đó, x là khoảng cách từ gốc tọa độ tới vị trí đang tính toán (m), E là năng lượng sóng tính theo công thức (2) (J/m^2), g là gia tốc trọng trường (m/s^2), ρ là mật độ nước biển (kg/m^3), H là chiều cao sóng biển (m), c_g là vận tốc nhóm được tính theo công thức (3) (m/s), L là chiều dài sóng (m), T_p là chu kỳ sóng (s), h là độ sâu đáy biển đo từ mực nước biển trung bình tại vị trí tính toán (m), k là số lượng sóng, và D_B (W/m^2) là năng lượng sóng tiêu tán. Trong đó, các giá trị của x , h và giá trị ban đầu của T_p và H của mỗi con sóng là giá trị đầu vào được lấy từ số liệu thu thập, các giá trị của L và k được tính từ lý thuyết sóng Airy. Từ công thức (1), chiều cao sóng (H) được tính bằng cách phương pháp số.

Trong công thức (1), năng lượng sóng tiêu tán là thông số phức tạp và khó xác định nhất. Do đó, các công thức tính năng lượng tiêu tán được phát triển dựa trên phương pháp thực nghiệm từ số liệu thí nghiệm và đo đạc hoặc bán thực nghiệm dựa vào cả lý thuyết và số liệu sóng thu thập được. Để phát triển công thức tính năng lượng tiêu tán, phương pháp tham số là phương pháp rất phổ biến. Trong phương pháp này, năng lượng tiêu tán của sóng không đều được tính bằng cách tích phân tích của năng lượng tiêu tán của sóng đều và hàm phân bố mật độ xác suất sóng vỡ từ vùng nước nông đến vùng nước sâu. Như vậy, năng lượng tiêu tán của sóng không đều được phát triển từ công thức tính năng lượng tiêu tán của sóng đều. Hiện nay, các nhà khoa học sử dụng 2 lý thuyết là lý thuyết sóng Bore và lý thuyết năng lượng ổn định để phát triển công thức tính năng lượng tiêu tán sóng đều. Lý thuyết sóng Bore được đưa ra dựa trên sự tương đồng trong cơ chế diễn ra của hiện tượng nước nhảy và sóng vỡ để tính năng lượng tiêu tán (Le Mehaute, 1962). Đối với lý thuyết năng lượng ổn định, lý thuyết này giả thiết rằng năng lượng sóng tiêu tán sẽ tỉ lệ với hiệu số giữa năng lượng sóng tại một vị trí trên đường truyền sóng và tại vị trí năng lượng sóng đã ổn định (Dally et al., 1985).

Trong nghiên cứu này, 6 công thức tiêu tán năng lượng của sóng không đều được thu thập, trong đó có hai công thức phát triển từ lý thuyết năng lượng ổn định và bốn công thức phát triển từ lý thuyết sóng

Bore. Sáu công thức được sử dụng trong bài báo này như sau:

Battjes & Janssen (1978) (BJ78) tính năng lượng tiêu tán bằng cách nhân tỉ số sóng vỡ với năng lượng tiêu tán của một cơn sóng vỡ. Tiêu tán năng lượng của sóng vỡ được phát triển dựa trên lý thuyết Bore với giả thiết rằng chiều cao của tất cả sóng vỡ bằng chiều cao sóng vỡ. Công thức của BJ78 như sau:

$$D_B = K_1 Q_b \frac{\rho g H_b^2}{4T_p} \quad (4)$$

$$\frac{1-Q_b}{-\ln Q_b} = \left(\frac{H}{H_b}\right)^2 \quad (5)$$

$$H_b = 0.14L \tanh(0.91kh) \quad (6)$$

Trong đó, K_1 là hệ số với $K_1 = 1$, Q_b là tỉ lệ sóng vỡ được tính từ công thức (5) và H_b là chiều cao sóng vỡ (m) được tính từ công thức của Miche (1944) (6).

Southgate & Nairn (1993) (SN93) hiệu chỉnh công thức của BJ78 bằng cách thay công thức tính năng lượng tiêu tán của BJ78 bằng công thức được phát triển bởi Thornton & Guza (1983) (TG83). Công thức như sau:

$$D_B = K_2 Q_b \frac{\rho g H_b^3}{4T_p h} \quad (7)$$

$$\frac{1-Q_b}{-\ln Q_b} = \left(\frac{H}{H_b}\right)^2 \quad (8)$$

$$H_b = h \left[0.39 + 0.56 \tanh\left(33 \frac{H_0}{L_0}\right) \right] \quad (9)$$

Trong đó, $K_2 = 1$, H_b được tính từ công thức của (Nairn, 1990) (công thức (9)), H_0 và L_0 là chiều cao và chiều dài sóng tại vùng nước sâu (m) được tính từ các giá trị đầu vào thu thập được.

Baldock et al. (1998) phát triển công thức tính năng lượng sóng tiêu tán bằng cách tích phân từ chiều cao sóng vỡ tới vô cùng của tích hàm mật độ xác suất và năng lượng sóng tiêu tán của BJ78. Sau đó, Alsina & Baldock (2007) (AB07) hiệu chỉnh công thức tiêu tán năng lượng của Baldock et al. (1998) bằng cách thay biểu thức tính năng lượng tiêu tán của BJ78 bằng công thức của TG83. Ngoài ra, AB07 tính H_b bằng công thức của Battjes & Stive (1985) (BS85). Công thức tính năng lượng tiêu tán và chiều cao sóng vỡ được AB07 hiệu chỉnh như sau:

$$D_B = K_3 \frac{\rho g H^3}{4T_p h} \left\{ \left[\left(\frac{H_b}{H}\right)^3 + \frac{3 H_b}{2 H} \right] \exp\left[-\left(\frac{H_b}{H}\right)^2\right] + \frac{3}{4} \sqrt{\pi} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{H_b}{H}\right) \right] \right\} \quad (10)$$

$$H_b = 0.14L \tanh\left\{ \left[0.57 + 0.45 \tanh\left(33 \frac{H_0}{L_0}\right) \right] kh \right\} \quad (11)$$

Trong công thức này, $K_3 = 1$

Janssen & Battjes (2007) (JB07) khác với AB07 ở công thức tính chiều cao sóng vỡ. Thay vì sử dụng công thức của BS85 như AB07 thì JB07 đã sử dụng công thức tính chiều cao sóng vỡ của Nairn (1990). Công thức tính năng lượng tiêu tán và chiều cao sóng vỡ như sau:

$$D_B = K_4 \frac{\rho g H^3}{4T_p h} \left\{ \left[\left(\frac{H_b}{H}\right)^3 + \frac{3 H_b}{2 H} \right] \exp\left[-\left(\frac{H_b}{H}\right)^2\right] + \frac{3}{4} \sqrt{\pi} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{H_b}{H}\right) \right] \right\} \quad (12)$$

$$H_b = h \left[0.39 + 0.56 \tanh\left(33 \frac{H_0}{L_0}\right) \right] \quad (13)$$

Với $K_4 = 1$

Rattanapitikon & Shibayama (1998) (RS98) đã hiệu chỉnh công thức tính năng lượng sóng tiêu tán của BJ78 bằng cách sử dụng biểu thức năng lượng sóng tiêu tán dựa trên lý thuyết năng lượng ổn định thay vì sử dụng biểu thức cho sóng đều của BJ78 (công thức (14 và 15) với $K_5 = 0,1$). Ngoài ra, nghiên cứu đã sử dụng công thức của Goda (1970) để tính chiều cao sóng vỡ (16).

$$D_B = K_5 Q_b \frac{c \rho g}{8h} \left[H^2 - \left(\operatorname{hexp}(-0.58 - 2.0 \frac{h}{\sqrt{LH}}) \right)^2 \right] \quad (14)$$

$$\frac{1-Q_b}{-\ln Q_b} = \left(\frac{H}{H_b}\right)^2 \quad (15)$$

$$H_b = 0.1L_0 \left\{ 1 - \exp\left[-1.5 \frac{\pi h}{L_0} (1 + 15m_b^{4/3})\right] \right\} \quad (16)$$

Tran et al. (2023) (DT23) đã phát triển công thức tính năng lượng sóng tiêu tán bằng cách tích phân từ chiều cao sóng vỡ tới vô cùng tích của hàm phân phối Rayleigh và năng lượng sóng tiêu tán của Dally et al. (1985) (công thức (17) với $K_6 = 0,15$). Dựa trên số lượng số liệu thí nghiệm lớn, công thức tính chiều cao sóng vỡ phù hợp được tìm ra để tính toán trong công thức tính tiêu tán năng lượng. Nghiên cứu đã

chỉ ra rằng công thức năng lượng tiêu tán có độ chính xác cao khi tính chiều cao sóng trong trường hợp chiều cao sóng vỡ được tính từ công thức của Miche (18).

$$D_B = K_6 \exp \left[- \left(\frac{H_b}{H} \right)^2 \right] \frac{\rho g c_g [H_b^2 + H^2 - (0.4h)^2]}{8h} \quad (17)$$

$$H_b = 0.14L \tanh(0.9kh) \quad (18)$$

Cả sáu công thức trên đều được sử dụng để tính chiều cao sóng căn quân phương. Trong nghiên cứu này, khả năng tính toán chiều cao sóng ý nghĩa của các công thức được kiểm tra bằng cách sử dụng trực tiếp các công thức để tính chiều cao sóng ý nghĩa. Sau đó, để cải tiến các công thức này góp phần tăng độ chính xác cho việc tính chiều cao sóng ý nghĩa, hệ số của các công thức tính năng lượng tiêu tán sẽ được hiệu chỉnh để tối ưu sai số trong việc tính toán chiều cao sóng. Các hệ số từ K_1 đến K_6 sẽ được hiệu chỉnh để các công thức đạt sai số nhỏ nhất khi tính chiều cao sóng. Ngoài ra, để đảm bảo khả năng tính toán của các công thức, một bộ số liệu riêng (khác với bộ số liệu được dùng để hiệu chỉnh hệ số) được sử dụng để đánh giá lại sai số của các công thức đã được hiệu chỉnh.

2.2. Phương pháp tính sai số

Để đánh giá khả năng tính toán chiều cao sóng của các công thức, sai số căn quân phương tương đối được sử dụng theo công thức (19).

$$E_{all} = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (H_{ti} - H_{di})^2}{\sum_{i=1}^N H_{di}^2}} \quad (19)$$

Với N là tổng số lượng số liệu chiều cao sóng, H_{ti} là chiều cao sóng tính toán thứ i, H_{di} là chiều cao sóng đo đạc thứ i. CT (19) được sử dụng để tính sai số cho từng nguồn số liệu thí nghiệm và cho toàn bộ số liệu thí nghiệm. Đối với từng nguồn thí nghiệm, N là tổng số lượng số liệu chiều cao sóng của nguồn sử dụng, H_{ti} và H_{di} là chiều cao sóng tính toán và thu thập thứ i của nguồn số liệu đó. Đối với trường hợp sử dụng toàn bộ số liệu thí nghiệm để tính sai số (E_{all}), N là tổng số lượng số liệu chiều cao sóng của tất cả các nguồn ($N=2386$), H_{ti} và H_{di} là chiều cao sóng tính toán và thu thập thứ i của toàn bộ số liệu.

2.3. Thu thập số liệu sóng biển

Trong nghiên cứu này, để đánh giá và cải thiện khả năng dự đoán chiều cao sóng của các công thức, số liệu của 120 con sóng được thu thập. Đối với mỗi con sóng, số liệu chiều cao sóng được thu thập tại nhiều vị trí khác nhau trên đường sóng truyền từ vùng nước sâu tới vùng nước nông. Tổng số 2386 số liệu chiều cao sóng cho 120 con sóng được thu thập từ 5 nguồn bao gồm Hotta et al. (1982) (H82), Kraus & Smith (1994) (KS94), Smith & Kraus (1990) (SK90), Dette et al. (1998) (D98) và Katayama (1991) (K91). Trong đó, thí nghiệm của SK90 và K91 được thực hiện với tỉ lệ thí nghiệm nhỏ, thí nghiệm của SK94 và D98 được thực hiện với tỉ lệ thí nghiệm lớn. Số liệu của H82 được đo đạc thực tế tại biển Ajigaura nằm ở phía Bắc của Tokyo Nhật bản và cách Tokyo 200 km. Đối với trường hợp kiểm tra sai số và hiệu chỉnh hệ số, 6 công thức sử dụng ba nguồn số liệu bao gồm Hotta et al. (1982), Kraus & Smith (1994), Smith & Kraus (1990). Hai nguồn số liệu gồm Dette et al. (1998), Katayama (1991) được sử dụng để kiểm tra lại khả năng tính toán chiều cao sóng của 6 công thức đã hiệu chỉnh. Số liệu sóng sử dụng trong nghiên cứu này được thống kê tại Bảng 1.

Bảng 1. Thống kê số liệu sóng biển được sử dụng

Nguồn	Số lượng con sóng	Số lượng số liệu chiều cao sóng	Độ dốc con sóng tại nước sâu (H_0/L_0)	Tỉ lệ thí nghiệm
SK90	5	40	0,04-0,08	Nhỏ
K91	2	16	0,04-0,05	Nhỏ
KS94	50	800	0,001-0,065	Lớn
D98	60	1512	0,009-0,02	Lớn
H82	3	18	0,008-0,012	Thực tế
Tổng	120	2386	0,001-0,08	

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Độ chính xác của công thức tính đã công bố

Bảng 2 trình bày hệ số và sai số của các công thức tính chiều cao sóng được phát triển từ lý thuyết

sóng Bore và lý thuyết năng lượng đã thu thập được. Kết quả cho thấy, đối với lý thuyết năng lượng sóng ổn định, công thức DT23 cho kết quả tính toán tốt hơn công thức RS98. Cụ thể, sai số của công thức DT23 khi sử dụng bộ số liệu của SK90, KS94, và H82 lần lượt là 10,2%, 8,8% và 16,3%. Đối với công

thức RS98, sai số là 25,5% cho SK90, 15,6% cho KS94 và 23,2% cho H82. Do đó, khi xem xét theo từng bộ số liệu thí nghiệm, DT23 luôn cho sai số nhỏ hơn RS98 khi tính chiều cao sóng. Đối với toàn bộ số liệu thí nghiệm, DT23 với sai số là 9,9% thấp hơn rất nhiều so với RS98 (16,7%).

Bảng 2 cũng trình bày sai số của công thức phát triển dựa trên lý thuyết sóng Bore. Kết quả cho thấy JB07, SN93 và BJ78 dự đoán chiều cao sóng ý nghĩa với sai số thấp nhất cho số liệu thí nghiệm tương ứng của SK90 (14,7%), KS94 (8,7%) và H82 (16%). Sai số khi dùng toàn bộ số liệu thí nghiệm của nhóm

công thức Bore nằm trong khoảng từ 11,1% đến 16,6%. Công thức tính chiều cao sóng có sai số thấp nhất trên toàn bộ số liệu là SN93 (11,1%).

Từ kết quả cho thấy, khi so sánh với công thức phát triển từ lý thuyết sóng Bore, công thức DT23 phát triển từ lý thuyết năng lượng ổn định cho sai số nhỏ nhất ở thí nghiệm SK90. Đồng thời DT23 cũng là công thức tốt nhất cho việc tính chiều cao sóng khi sử dụng toàn bộ số liệu. Sai số của DT23 (9,9%) thấp hơn 1,2% so với công thức tốt nhất của lý thuyết sóng Bore là SN93 (11,1%).

Bảng 2. Sai số tính chiều cao sóng của sáu công thức khi dùng hệ số cũ

Công thức	Hệ số (K)	SK90 (%)	KS94 (%)	H82 (%)	E _{all} (%)
RS98	0,1	25,5	15,6	23,2	16,7
DT23	0,15	10,2	8,8	16,3	9,9
BJ78	1,0	21,3	16,6	16,0	16,6
SN93	1,0	17,5	8,7	22,2	11,1
AB07	1,0	37,8	14,5	23,0	15,8
JB07	1,0	14,7	11,7	24,9	13,8

3.2. Cải thiện độ chính xác của các công thức

Sáu công thức thu thập được là công thức dùng để tính chiều cao sóng cân quân phương, do đó để cải thiện độ chính xác của các công thức khi tính chiều cao sóng ý nghĩa, hệ số của các công thức sẽ được hiệu chỉnh. Sau khi hiệu chỉnh hệ số của sáu công thức, hệ số mới và sai số khi tính toán chiều cao sóng ý nghĩa được trình bày ở Bảng 3. Kết quả cho thấy, để giảm sai số khi tính toán chiều cao sóng ý nghĩa, tất cả các hệ số đều giảm đáng kể. Trong đó, hệ số của công thức RS98 giảm 70% là công thức có hệ số giảm nhiều nhất.

Đối với sai số tính toán chiều cao sóng, hầu hết các sai số đều giảm đáng kể sau khi hiệu chỉnh hệ số. Khi xem xét từng thí nghiệm, giảm sai số nhiều nhất là sai số của công thức AB07 khi tính toán đối với số liệu của SK90 (giảm 26,4%) và KS94 (giảm 12,8%) và RS98 đối với H82 (giảm 13,3%). Đối với sai số khi dùng toàn bộ số liệu thí nghiệm, sai số đã giảm từ 2,7% đến 8,4% khi hiệu chỉnh hệ số.

Sai số của các công thức phát triển từ lý thuyết sóng Bore sau khi hiệu chỉnh hệ số là từ 7,4% đến 9%. Thứ tự các công thức theo thứ tự tăng dần của sai số là AB07, JB07, SN93 và cuối cùng là BJ78. Khi so sánh các công thức của lý thuyết Bore và năng lượng ổn định, sai số DT23 (6,4%) thấp hơn hẳn công thức của lý thuyết Bore. Tuy nhiên, RS98 (9,5%) lại cho sai số cao hơn các công thức của lý thuyết Bore.

Khả năng dự đoán chiều cao sóng của sáu công thức được cũng được thể hiện ở Hình 1. Trong số 4 công thức của lý thuyết Bore, công thức AB07 và JB07 có tỉ lệ số điểm nằm trong vùng 20% (trong vùng giữa 2 đường nét đứt) là cao hơn công thức SN93 và BJ78. Đối với lý thuyết năng lượng sóng ổn định, tỉ lệ số điểm nằm trong vùng 20% của DT23 là lớn hơn hẳn RS98. Hình 1 cho thấy tỉ lệ điểm trong vùng 20% của DT23 cũng lớn hơn cả 4 công thức của Bore. Quan sát này là minh chứng trực quan cho khả năng tính toán chiều cao sóng rất tốt của DT23 rút ra từ Bảng 3.

Bảng 3. Hệ số mới và sai số tính chiều cao sóng của sáu công thức

Công thức	Hệ số mới (K)	SK90 (%)	KS94 (%)	H82 (%)	E _{all} (%)
RS98	0,03	17,4	9,4	9,9	9,5
DT23	0,08	13,4	5,7	10,0	6,4
BJ78	0,35	16,4	9,2	7,3	9,0
SN93	0,63	15,1	6,7	16,1	8,4
AB07	0,32	11,4	6,9	10,2	7,4
JB07	0,41	12,1	6,3	14,0	7,6

3.3. Kiểm tra lại độ chính xác của công thức mới

Khả năng dự đoán chiều cao sóng của 6 công thức sau khi hiệu chỉnh được kiểm chứng lại với bộ số liệu riêng được thể hiện ở Bảng 4. Kết quả cho thấy, đối với hệ số cũ, sai số của các công thức đối với từng bộ số liệu là vô cùng cao từ 13,2% tới 35% và sai số khi dùng toàn bộ số liệu thí nghiệm là từ 13,2% đến 20,6%. Trong khi đó, sau khi hiệu chỉnh hệ số, sai số khi xét từng bộ số liệu là từ 6% đến 20,3% và sai số tương đối khi dùng toàn bộ số liệu thí nghiệm từ 6,1% đến 9,2%. Như vậy, việc hiệu chỉnh hệ số của công thức từ phương pháp tham số là vô cùng hiệu quả trong việc làm giảm sai số khi áp dụng để tính toán chiều cao sóng ý nghĩa.

Đối với công thức phát triển từ lý thuyết năng lượng ổn định, DT23 vẫn là công thức cho sai số thấp hơn RS98 đối với từng bộ số liệu dù là trước hay sau khi hiệu chỉnh hệ số. Khi xem xét sai số của toàn bộ số liệu thí nghiệm, sau khi hiệu chỉnh hệ số, sai số của DT23 là 6,1% cũng thấp hơn RS98 là 7,4%.

Đối với công thức phát triển từ lý thuyết sóng Bore, sau khi hiệu chỉnh hệ số thì AB07 là công thức tính toán chiều cao sóng với độ chính xác cao nhất cho từng thí nghiệm (6% cho D98 và 8,2% cho

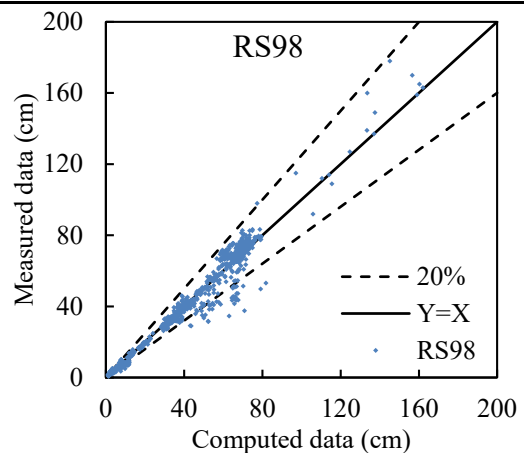
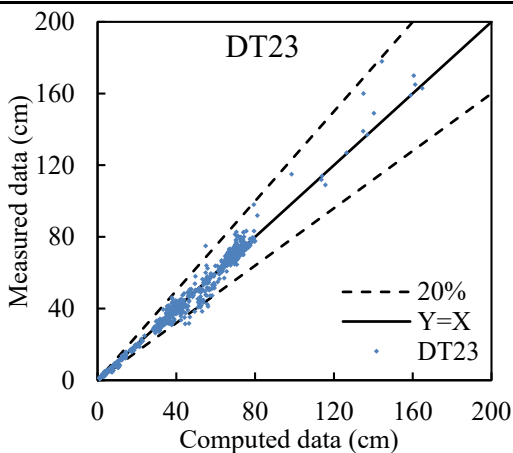
K91). SN93 có độ chính xác thấp nhất khi tính toán chiều cao sóng của từng thí nghiệm (9,2% cho D98 và 20,3% cho K91). Do đó, AB07 và SN93 cũng là 2 công thức tốt nhất và tệ nhất để tính chiều cao sóng với sai số khi dùng toàn bộ số liệu thí nghiệm tương ứng là 6% và 9,2%. Công thức xếp thứ 2 và thứ 3 là BJ78 (6,3%) và JB07 (7,2%).

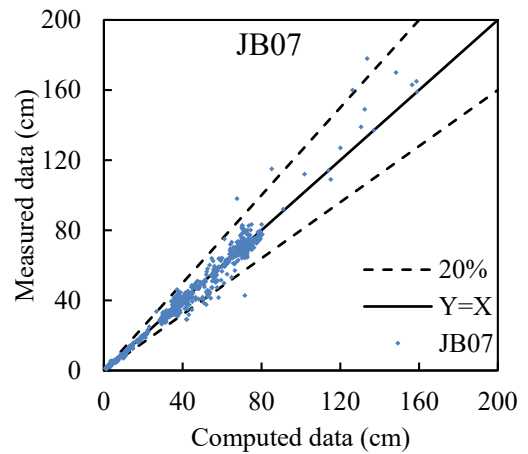
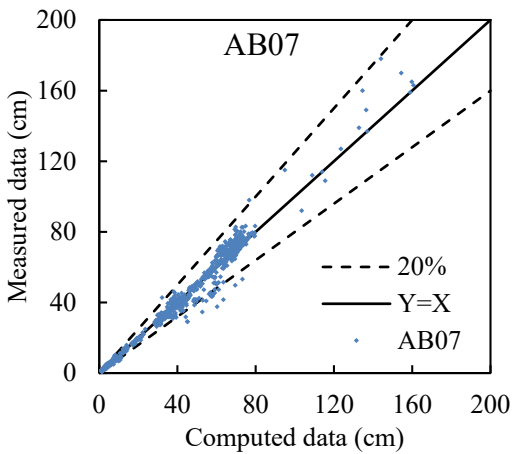
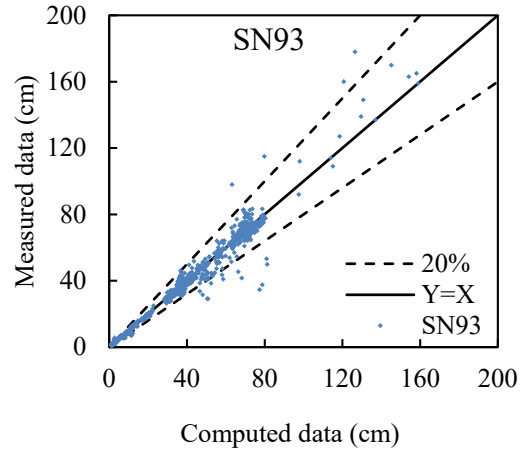
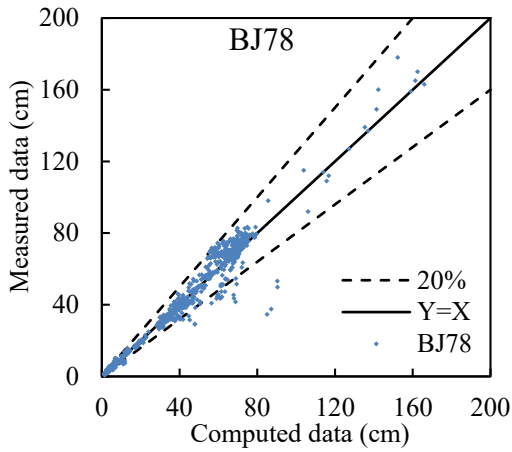
Hình 2 thể hiện khả năng tính toán chiều cao sóng của sáu công thức sau khi hiệu chỉnh hệ số một cách trực quan. Nhìn chung, AB07 và DT23 là hai công thức có tỉ lệ số điểm nằm trong vùng 20% và nằm gần đường $X=Y$ là cao nhất trong số các công thức của lý thuyết sóng Bore và lý thuyết năng lượng ổn định. Như vậy, kết quả quan sát từ Hình 2 cũng giống với kết quả tính toán từ Bảng 4.

Kết quả quan sát và tính toán cho thấy, sau khi hiệu chỉnh hệ số, AB07 và DT23 là hai công thức có độ chính xác cao trong việc tính toán chiều cao sóng ý nghĩa và chênh lệch sai số của AB07 và DT23 là tương đối nhỏ 0,1%. Ngoài ra, khi xem xét kết quả cho trường hợp số liệu thí nghiệm để hiệu chỉnh hệ số thì DT23 là công thức cho sai số nhỏ hơn AB07 một cách đáng kể (Bảng 3). Do đó, DT23 phát triển từ lý thuyết năng lượng ổn định là công thức tính toán chiều cao sóng ý nghĩa có độ chính xác ổn định hơn và tốt hơn các công thức còn lại.

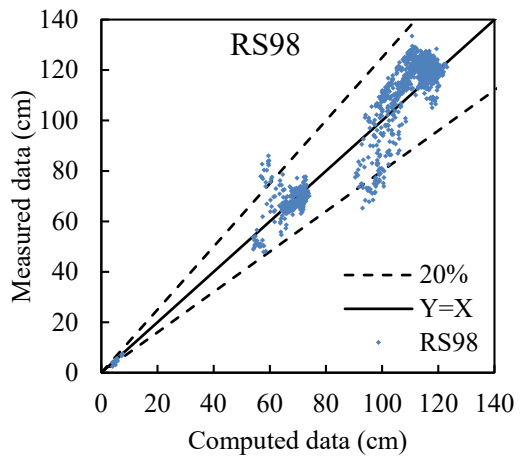
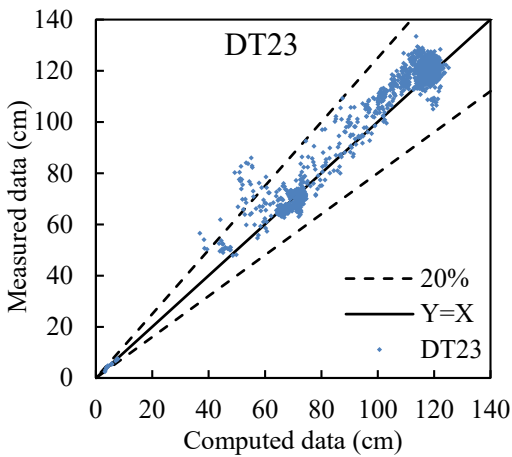
Bảng 4. Sai số tính toán chiều cao sóng đối với bộ số liệu kiểm tra

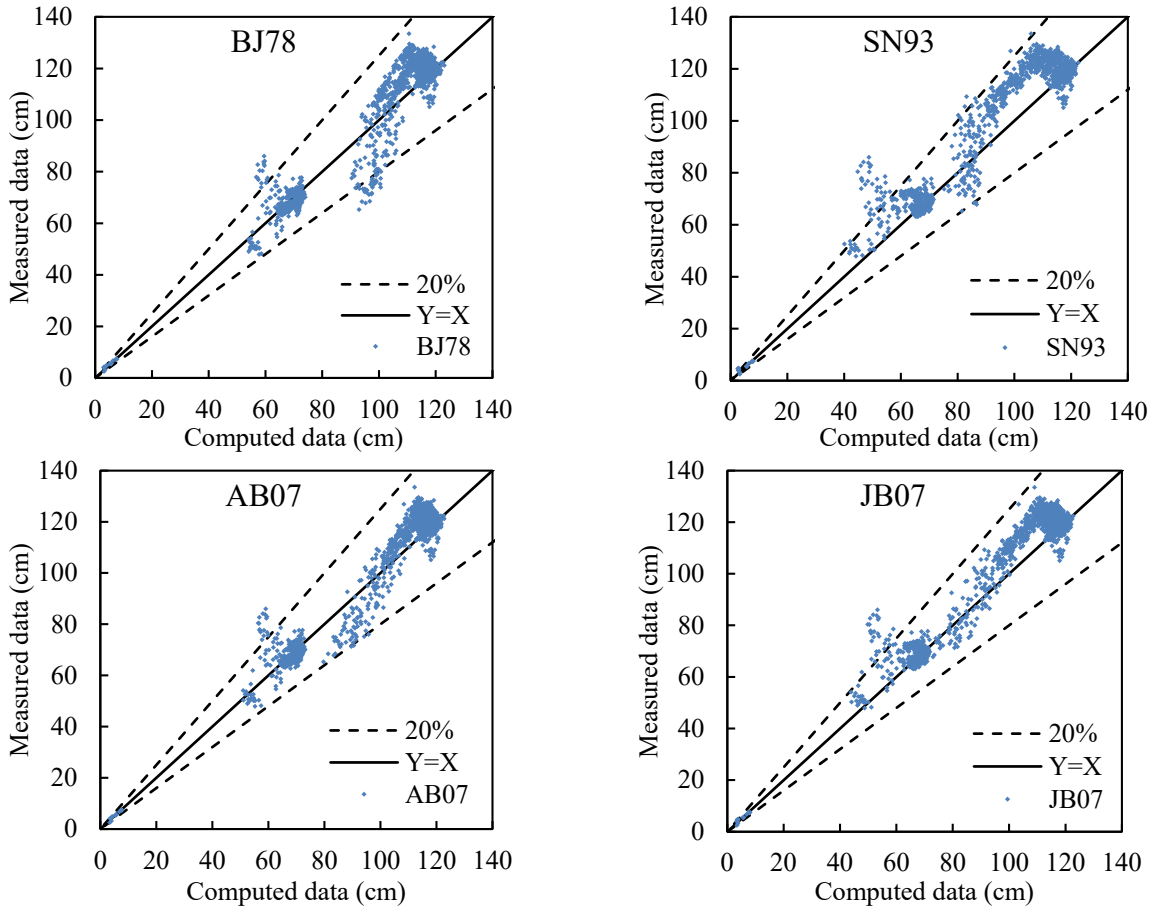
Công thức	Hệ số cũ (K)			Hệ số mới (K)		
	D98 (%)	K91 (%)	E _{all} (%)	D98 (%)	K91 (%)	E _{all} (%)
RS98	20,6	35,0	20,6	7,4	12,9	7,4
DT23	13,2	27,5	13,2	6,1	6,4	6,1
BJ78	14,4	29,1	14,4	6,3	11,8	6,3
SN93	14,8	18,8	14,8	9,2	20,3	9,2
AB07	18,1	27,1	18,1	6,0	8,2	6,0
JB07	17,8	21,5	17,8	7,2	11,8	7,2





Hình 1. Mối quan hệ giữa chiều cao sóng tính toán và chiều cao sóng đo đạc trong trường hợp số liệu hiệu chỉnh hệ số





Hình 2. Mối quan hệ giữa chiều cao sóng tính toán và chiều cao sóng đo đạc trong trường hợp số liệu kiểm tra

4. KẾT LUẬN

Kết quả nghiên cứu cho thấy chiều cao sóng ý nghĩa có thể được tính bằng phương pháp tham số với độ chính xác cao. Đặc biệt là sau khi hiệu chỉnh hệ số, sai số tính chiều cao sóng giảm đáng kể trên hầu hết các bộ số liệu thí nghiệm. Từ kết quả tính toán cho thấy, không có công thức nào có thể tính chiều cao sóng với độ chính xác cao cho tất cả các nguồn số liệu thí nghiệm. Tuy nhiên, DT23 là công thức cho kết quả tính toán chiều cao sóng với sai số khi dùng toàn bộ số liệu thí nghiệm thấp nhất và ổn định nhất trong số sáu công thức. Do đó, DT23 được khuyến khích sử dụng để tính chiều cao sóng ý

nghĩa. Việc áp dụng thành công công thức của phương pháp tham số để tính chiều cao sóng ý nghĩa là tiền đề cho những nghiên cứu tiếp theo để tính toán các chiều cao sóng đại diện khác (chiều cao trung bình, chiều cao 1/10,...) bằng phương pháp tham số.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu được tài trợ bởi Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM trong khuôn khổ **đề tài mã số T-KTXD-2023-03**. Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Alsina, J. M., & Baldock, T. E. (2007). Improved representation of breaking wave energy dissipation in parametric wave transformation models. *Coastal Engineering*, 54(10), 765–769. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.05.005>

Baldock, T. E., Holmes, P., Bunker, S., & Van Weert, P. (1998). Cross-shore hydrodynamics within an unsaturated surf zone. *Coastal Engineering*, 34(3–4), 173–196. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(98\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(98)00017-9)

- Baldock, T. E., Holmes, P., Bunker, S., & Weert, P. Van. (1998). Cross-shore hydrodynamics within an unsaturated surf zone. *Coastal Engineering*, 34, 173–196.
- Battjes, J. A., & Janssen, J. P. F. M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference, 1*(16), 569–587. <https://doi.org/10.9753/icce.v16.32>
- Battjes, J. A., & Stive, M. J. F. (1985). Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C5), 9159–9167. <https://doi.org/10.1029/JC090IC05P09159>
- Dally, W. R., Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1985). Wave Height Variation Across Beaches of Arbitrary Profile. *Journal of Geophysical Research*, 90(6), 11917–11927.
- Dette, H. ., Peters, K., & Newe, J. (1998). *MAST III - SAFE Project: Data Documentation, Large Wave Flume Experiments '96/97*.
- Duong, N. T., Tran, K. Q., Luu, L. X., & Tran, L. H. (2023). Prediction of breaking wave height by using artificial neural network-based approach. *Ocean Modelling*, 102177. <https://doi.org/10.1016/J.OCEMOD.2023.102177>
- Goda, Y. (1970). A synthesis of breaker indices. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, 1970(180), 39–49. https://doi.org/10.2208/jscej1969.1970.180_39
- Hotta, S., Mizuguohi, M., & Isobe, M. (1982). A Field Study of Waves in the Nearshore Zone. *Coastal Engineering Proceedings*, 38–57. <https://doi.org/https://doi.org/10.9753/icce.v18.3>
- Janssen, T. T., & Battjes, J. A. (2007). A note on wave energy dissipation over steep beaches. *Coastal Engineering*, 54(9), 711–716. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.05.006>
- Katayama, H. (1991). Cross-shore Velocity Distribution due to Breaking of Irregular Waves on a Bar-Type Beach. *Bachelor Thesis. Department of Civil Engineering, Yokohama National University, Japan Thesis, Department of Civil Engineering, Yokohama National University, Japan*. <https://doi.org/10.22144/CTU.JVN.2018.131>
- Kraus, N. C., & Smith, M. J. (1994). SUPERTANK laboratory data collection project. *Technical Report CERC-94-3, WES, US Army Corps of Engineers, Vols. 1 and 2*.
- Le Mehaute, B. (1962). On Non-Saturated Breakers and the Wave Run-Up. *Proc. 8th Coastal Engineering Conference, ASCE*, 77–92. <https://doi.org/10.9753/icce.v8.6>
- Miche, M. (1944). Mouvements ondulatoires des mers en profondeur constante ou d'croissante. *Annales Des Ponts et Chaussées*, 114, 369–406. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:%3A6fcef55-d71b-4e3e-a94f-98ff17cb8f91>
- Nairn, R. B. (1990). *Prediction of cross-shore sediment transport and beach profile evolution, Ph.D thesis, Imperial College, London*.
- Nuntakamol, P., & Rattanapitikon, W. (2011). Transformation of mean and highest one-tenth wave heights using representative wave approach. *Kasetsart Journal - Natural Science*, 45(6), 1171–1181.
- Rattanapitikon, W., Karunchintadit, R., & Shibayama, T. (2003). Irregular wave height transformation using representative wave approach. *Coastal Engineering Journal*, 45(3), 489–510. <https://doi.org/10.1142/S0578563403000865>
- Rattanapitikon, W., & Shibayama, T. (1998). Energy dissipation model for irregular breaking waves. *Coastal Engineering Journal*, 40(4), 327–346. <https://doi.org/10.1061/9780784404119.007>
- Rattanapitikon, W., Tran, K. Q., & Shibayama, T. (2015). Estimation of Maximum Possible Wave Heights in Surf Zone. *Coastal Engineering Journal*, 57(2), 1550001-1-1550001–1550019. <https://doi.org/10.1142/S0578563415500011>
- Smith, E. R., & Kraus, N. C. (1990). Laboratory study on macro-features of wave breaking over bars and artificial reefs. In *Technical Report CERC-90-12, WES, US Army Corps of Engineers*. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA225689>
- Southgate, H. N., & Nairn, R. B. (1993). Deterministic profile modelling of nearshore processes. Part 1. Waves and currents. *Coastal Engineering*, 19, 27–56.
- Thornton, E. B., & Guza, R. T. (1983). Transformation of wave height distribution. *Journal of Geophysical Research*, 88(C10), 5925–5938. <https://doi.org/10.1029/JC088iC10p05925>
- Tran, K. Q., Duong, N. T., Luu, L. X., Tran, L. H., & Rattanapitikon, W. (2023). Development of novel parametric wave model for irregular wave height transformation. *Ocean Engineering*, 278(March), 114493. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114493>