VẬT LIỆU & XÂY DỰNG
Tạp chí Vật liệu và Xây dựng
ISSN 1859 - 381X
Website: www. jomc.vn

Hiệu chỉnh hệ số alpha trong công thức Verheij & Bogaerts (1989) dự báo chiều cao sóng thứ cấp do tàu thuyền gây ra trên sông hậu

Đinh Văn Duy[1*], Trần Văn Tỷ[1], Nguyễn Quốc Bằng[2], Phạm Phú An[1], Lê Huỳnh Dương[1]

[1] Trường Bách Khoa, Đại học Cần Thơ

[2] Công ty TNHH TB

TỪ KHOÁ

Sóng thứ cấp
Sóng tàu
Hệ số alpha
Công thức Verheij & Bogaerts
ADCP Sentinel V20
Sông Hậu
Xói lở bờ sông

TÓM TẮT

Sóng thứ cấp (secondary wave/Kelvin wave) do tàu, ghe chạy qua là một trong những tác nhân gây xói lở bờ trên các tuyến sông có mật độ giao thông thủy cao như sông Hậu. Công thức Verheij & Bogaerts (1989), dạng $Hmax = \alpha \cdot h \cdot (x/h)^{-1/3} \cdot Frh^4$, thường được dùng để dự báo chiều cao sóng thứ cấp phục vụ thiết kế bảo vệ bờ, trong đó hệ số α mang tính thực nghiệm và cần hiệu chỉnh theo từng vùng/loại phương tiện. Nghiên cứu này trình bày kết quả đo đạc thực địa sóng tàu trên sông Hậu bằng ADCP Sentinel V20 kết hợp ước lượng vận tốc tàu qua video, từ đó hiệu chỉnh hệ số α cho nhóm phương tiện ghe máy nhỏ dựa trên 7 lượt đo. Kết quả hồi quy bình phương tối thiểu ép qua gốc tọa độ cho $\alpha = 0{,}84$ (khoảng tin cậy 95%: 0,73–0,96; $R^2 = 0{,}98$), khá gần với giá trị mặc định thường dùng ($\alpha \approx 1$) của công thức gốc, cho thấy công thức có thể áp dụng tương đối phù hợp cho điều kiện ghe máy nhỏ trên sông Hậu. Bài báo cũng phân tích các nguồn sai số của phương pháp đo gián tiếp chiều cao sóng bằng ADCP và đề xuất hướng mở rộng số liệu cho các nhóm phương tiện khác trên sông Hậu.

KEYWORDS

Secondary wave
Ship-induced wave
Alpha coefficient
Verheij & Bogaerts formula
Sentinel V20 ADCP
Hau River
Riverbank erosion

ABSTRACT

Ship-induced secondary waves (Kelvin waves) are a recurring cause of riverbank erosion along waterways with heavy vessel traffic, such as the Hau River in Vietnam's Mekong Delta. The formula of Verheij & Bogaerts (1989), $Hmax = \alpha \cdot h \cdot (x/h)^{-1/3} \cdot Frh^4$, is widely used to predict maximum secondary wave height for bank protection design, with the empirical coefficient α requiring site- and vessel-specific calibration. This study presents field measurements of ship-induced waves on the Hau River using a Sentinel V20 ADCP combined with video-based vessel speed estimation, and calibrates the coefficient α for the small motorboat vessel class based on seven measured passes. An origin-forced least-squares regression yields $\alpha = 0.84$ (95% confidence interval: 0.73–0.96; $R^2 = 0.98$), close to the default value ($\alpha \approx 1$) commonly assumed when applying the original formula, suggesting reasonable applicability of the formula to small-motorboat conditions on the Hau River. The paper also discusses sources of uncertainty in the indirect ADCP-based wave height measurement method and proposes directions for extending the dataset to other vessel classes.

1. Mở đầu

Sông Hậu là một trong hai phân lưu chính của sông Mê Công tại Việt Nam, đóng vai trò huyết mạch giao thông thủy và đồng thời chịu áp lực xói lở bờ ngày càng nghiêm trọng tại nhiều đoạn qua các tỉnh, thành khu vực Đồng bằng sông Cửu Long. Bên cạnh các nguyên nhân đã được ghi nhận như thay đổi chế độ dòng chảy, thiếu hụt bùn cát do các đập thượng nguồn, khai thác cát lòng sông và biến đổi hình thái lòng dẫn, sóng do tàu thuyền gây ra (ship-induced waves) là một tác nhân xói lở cục bộ nhưng có tính lặp lại cao tại các đoạn sông có mật độ giao thông thủy lớn.

Sóng do tàu tạo ra thường được phân thành hai thành phần: sóng sơ cấp (primary wave), gắn với dao động mực nước do khối nước bị tàu choán chỗ khi di chuyển, và sóng thứ cấp (secondary wave), là hệ sóng phân kỳ dạng Kelvin lan truyền từ mũi và đuôi tàu ra hai bên bờ. Đối với các sông, kênh nội địa có mật độ ghe, tàu nhỏ hoạt động thường xuyên như sông Hậu, sóng thứ cấp thường là thành phần gây tác động trực tiếp và lặp lại nhiều lần lên mái bờ.

Trên thế giới, sóng do tàu thuyền gây ra đã được nghiên cứu khá rộng rãi ở nhiều tuyến sông, kênh có mật độ giao thông thủy cao. Bhowmik và ctv. (1991) đo đạc sóng do tàu du lịch, ghe máy nhỏ gây ra trên sông Mississippi (Mỹ), xây dựng quan hệ hồi quy giữa chiều cao sóng với vận tốc và khoảng cách quan trắc. Chakraborty và ctv. (2022) tiến hành đo đạc sóng sơ cấp và thứ cấp do 20 lượt tàu hàng gây ra tại sông Hooghly (Ấn Độ), sử dụng cảm biến siêu âm đo mực nước liên tục và phân tích tách sóng tàu khỏi dao động triều. Qian và ctv. (2023) kết hợp đo đạc thực địa và mô hình hóa sóng tàu gây xói lở bờ tại tuyến đường thủy Sabine–Neches (Texas, Mỹ), tập trung

*Liên hệ tác giả: dvduy19@gmail.com
Nhận ngày 27/07/2026, sửa xong ngày 29/09/2026, chấp nhận đăng ngày 30/09/2026
Link DOI: https://doi.org/10.54772/jomc.05.2026.1447

phân tích cơ chế xói lở mái bờ dưới tác động sóng tàu. Fenton và ctv. (2023) tổng hợp và đánh giá các tiêu chí môi trường cũng như phương pháp phân tích số liệu đo sóng tàu trên các tuyến sông ở châu Âu, nhấn mạnh vai trò của vận tốc dòng chảy bề mặt bên cạnh chiều cao sóng. Mares-Nasarre và ctv. (2024) áp dụng phương pháp thống kê xác suất để mô tả tính phụ thuộc không gian - thời gian của sóng do tàu gây ra trên sông Savannah (Mỹ). Seemann & Melling (2025) công bố bộ số liệu đo sóng tàu dài hạn (1998-2022) tại các tuyến đường thủy ven biển Đức, phục vụ hiệu chỉnh các công thức dự báo sóng tàu theo thời gian. Về mặt phương pháp đo vận tốc tàu, Tan (2012) đã phát triển kỹ thuật ước lượng vận tốc và kích thước tàu từ video camera kết hợp đo đồng thời sóng bằng thiết bị đo sóng dưới nước (AWAC). Huang và ctv. (2023) đề xuất phương pháp dự báo chiều cao sóng tàu lớn nhất dựa trên thí nghiệm máng sóng và phân tích thứ nguyên kết hợp thuật toán tối ưu hóa (PSOA), áp dụng cho sông kênh tại Trung Quốc.

Tại Đồng bằng sông Cửu Long, sóng tàu đã được xác định là một trong các nguyên nhân gây sạt lở bờ sông. Thang và ctv. (2020) đánh giá ảnh hưởng của sóng tàu đến xói lở bờ sông tại tỉnh An Giang. Nguyen và ctv. (2021) phân tích cơ chế xói lở bờ do sóng tàu dọc luồng tàu vào sông Hậu. Trần Văn Tỷ và ctv. (2022) đo đạc sóng tàu bằng thiết bị Levelogger phục vụ đánh giá ổn định bờ sông Chà Và (Vĩnh Long). Trên sông Cần Thơ, Giang Trọng Toàn và ctv. (2025) sử dụng ADCP Sentinel V20 đo sóng tàu để hiệu chỉnh mô hình số mô phỏng sóng do sà lan gây ra, và Trần Văn Hừng và ctv. (2026) xác định hệ số thực nghiệm cho các công thức tính toán sóng tàu thuyền. Tuy nhiên, cho đến nay chưa có nghiên cứu nào hiệu chỉnh hệ số α của công thức Verheij & Bogaerts (1989) bằng số liệu thực đo trên sông Hậu.

Công thức bán thực nghiệm được đề xuất bởi Hiệp hội Hạ tầng Giao thông Thủy Thế giới (PIANC, 1987) và được Verheij & Bogaerts (1989) áp dụng, hiệu chỉnh cho bài toán ổn định lớp phủ bảo vệ mái bờ, là một trong những công cụ được sử dụng phổ biến nhất để dự báo chiều cao sóng thứ cấp lớn nhất tại một điểm quan trắc, với dạng:

$$H\left(\frac{x}{h}\right)^{-1/3^4}_{h_{max}} \qquad (1)$$

Với

$$Fr_h = \frac{V}{\sqrt{gh}} \qquad (2)$$

trong đó H_{max} là chiều cao sóng thứ cấp lớn nhất đo được tại điểm quan trắc (m), h là độ sâu nước (m), x là khoảng cách từ tàu đến vị trí đặt thiết bị đo sóng tại thời điểm tàu đi qua điểm quan trắc (m), V là vận tốc tàu (m/s), g là gia tốc trọng trường, và α là hệ số thực nghiệm phụ thuộc chủ yếu vào hình dạng vỏ tàu/ghe, chế độ chảy quanh thân tàu và điều kiện địa phương của tuyến luồng.

Hệ số α trong công thức gốc thường được lấy mặc định gần bằng 1 khi chưa có số liệu hiệu chỉnh riêng, tuy nhiên nhiều nghiên cứu ứng dụng công thức này ở các vùng khác nhau đều cho thấy α có thể lệch đáng kể so với giá trị mặc định tùy theo loại phương tiện và đặc điểm luồng lạch. Cho đến nay, hệ số α cho điều kiện các sông ở Đồng bằng sông Cửu Long nói chung và sông Hậu nói riêng, chưa được hiệu chỉnh bằng số liệu thực đo.

Mục tiêu của nghiên cứu này là: (i) trình bày phương pháp đo đạc sóng thứ cấp do tàu, ghe gây ra trên sông Hậu bằng thiết bị ADCP Sentinel V20 kết hợp ước lượng vận tốc tàu qua video; (ii) hiệu chỉnh hệ số α theo công thức Verheij & Bogaerts (1989) cho nhóm phương tiện ghe máy nhỏ dựa trên bộ số liệu thu thập được; và (iii) đánh giá sơ bộ độ tin cậy, sai số của kết quả hiệu chỉnh, làm cơ sở mở rộng cho các nhóm phương tiện khác trong các nghiên cứu tiếp theo.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Khu vực nghiên cứu

Số liệu được thu thập trên sông Hậu vào ngày 24/7/2026, tại vị trí có tọa độ (9°59'57,30"B; 105°49'22,30"Đ). Độ sâu nước tại điểm đo dao động trong khoảng 7,93-8,43 m trong suốt thời gian khảo sát (khoảng 11h37 - 14h10), phản ánh một phần dao động mực nước theo triều trong thời gian đo.



Hình 1. Khu vực nghiên cứu với vị trí đặt thiết bị đo sóng tàu ADCP Sentinel V20.

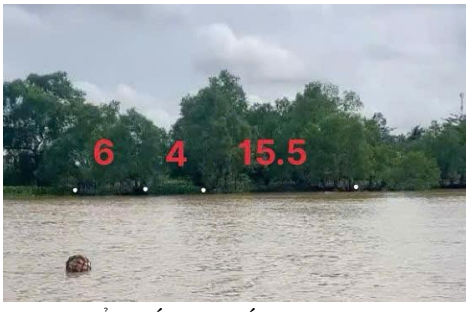
2.2. Đo chiều cao sóng tàu

Chiều cao sóng thứ cấp được đo bằng ADCP Sentinel V20 (Hình **2**), sử dụng đầu đo beam thẳng đứng (vertical beam), cấu hình 31 cell dày 0,25 m, cell đầu tiên cách đầu đo 0,58 m, tần số lấy mẫu 2 Hz. Chiều cao sóng tại mỗi lượt tàu qua được xác định gián tiếp từ tín hiệu vận tốc thẳng đứng (vertical velocity) tại cell gần đầu đo nhất, theo trình tự: (1) lọc chất lượng số liệu dựa trên hệ số tương quan (correlation), loại bỏ ping có correlation < 64 và giá trị vọt bất thường; (2) lọc dải tần Butterworth bậc 4 trong băng 0,05-1,0 Hz nhằm giữ lại dải chu kỳ sóng đặc trưng của sóng tàu; (3) tích phân theo thời gian tín hiệu vận tốc đã lọc để thu chuyển vị mực nước η(t); (4) lọc high-pass Butterworth bậc 2 ở ngưỡng 0,03 Hz để khử trôi (drift) tích lũy trong quá trình tích phân; (5) phân tích zero up-crossing trên η(t) để tách từng con sóng và xác định chiều cao sóng lớn nhất (H_{max}) ứng với thời điểm mỗi lượt tàu đi qua.



Hình 2. Thiết bị đo sóng ADCP Sentinel V20.

2.3. Ước lượng vận tốc tàu và khoảng cách tàu tới điểm đo



Hình 3. Điểm mốc đánh dấu khoảng cách dọc bờ.

Vận tốc tàu tại thời điểm đi qua điểm quan trắc được ước lượng bằng phương pháp quay video: hai (hoặc nhiều) mốc tham chiếu có khoảng cách đã biết được cắm cố định dọc theo bờ trong tầm quan sát của camera; thời gian tàu di chuyển giữa hai mốc được xác định từ dấu thời gian (timestamp) của video, từ đó tính vận tốc trung bình V = quãng đường/thời gian di chuyển giữa hai mốc.

Khoảng cách x từ tàu đến vị trí đặt thiết bị đo sóng và độ sâu nước h tại điểm đo tại thời điểm tàu qua được xác định bằng máy đo khoảng cách laser cầm tay.

2.4. Xử lý số liệu và hồi quy hệ số alpha

Với mỗi lượt tàu qua, các đại lượng không thứ nguyên $Fr_h = V/\sqrt{(g \cdot h)}$, x/h, và $X = h \cdot (x/h)^{-1/3} \cdot Fr_h^4$ được tính toán. Điều kiện áp dụng công thức gốc ($Fr_h < 0,8$ và $x/h > 1$) (Verheij & Bogaerts, 1989) được kiểm tra cho từng mẫu đo. Hệ số α được hiệu chỉnh cho từng nhóm phương tiện bằng hồi quy bình phương tối thiểu ép qua gốc tọa độ (không có hệ số tự do), phù hợp với bản chất tỷ lệ thuận thuần túy của công thức gốc ($H_{max} \to 0$ khi $X \to 0$):

$$\alpha = \frac{\sum H_{max\,i} \cdot X_i}{\sum X_i^2} \qquad (3)$$

3. Kết quả

Bảng *1* trình bày toàn bộ 7 lượt đo thu được cho nhóm phương tiện ghe máy nhỏ trên sông Hậu, cùng các đại lượng tính toán trung gian (Fr_h, x/h, X). Vận tốc tàu tại các lượt đo dao động trong khoảng 3,57-4,75 m/s, độ sâu nước tại điểm đo dao động 7,93-8,43 m, khoảng cách x từ tàu đến vị trí đặt thiết bị đo sóng trong khoảng 10-67 m. Số Froude Fr_h của cả 7 lượt đo nằm trong khoảng 0,39-0,54, đều nhỏ hơn 0,8, thỏa điều kiện áp dụng công thức Verheij & Bogaerts (1989) cho chế độ dưới tới hạn (subcritical). Tỷ số x/h dao động từ 1,19 đến 8,29, trong đó hai lượt đo (Tàu 5, Tàu 7) có x/h ≈ 1,19, khá sát ngưỡng áp dụng x/h > 1 của công thức gốc.

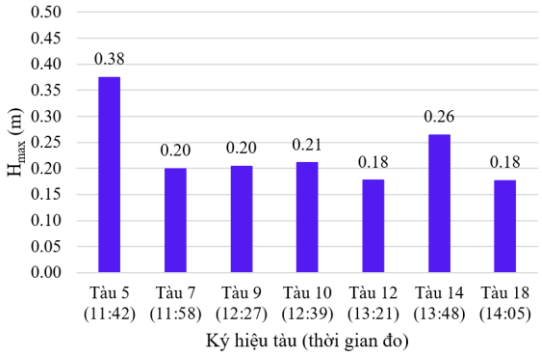
Hình **4** thể hiện chiều cao sóng thứ cấp lớn nhất (H_{max}) đo được theo từng lượt tàu qua. Giá trị H_{max} dao động trong khoảng 0,18-0,38 m. Lượt đo cho H_{max} lớn nhất là Tàu 5 (0,38 m), tương ứng với khoảng cách đo gần nhất (x = 10 m) và vận tốc tàu tương đối lớn (4,40 m/s); các lượt đo còn lại có H_{max} dao động tương đối đồng đều quanh 0,18-0,26 m.

Hình **4** thể hiện chiều cao sóng thứ cấp lớn nhất (H_{max}) đo được theo từng lượt tàu qua. Giá trị H_{max} dao động trong khoảng 0,18-0,38 m. Lượt đo cho H_{max} lớn nhất là Tàu 5 (0,38 m), tương ứng với khoảng cách đo gần nhất (x = 10 m) và vận tốc tàu tương đối lớn (4,40 m/s); các lượt đo còn lại có H_{max} dao động tương đối đồng đều quanh 0,18-0,26 m.

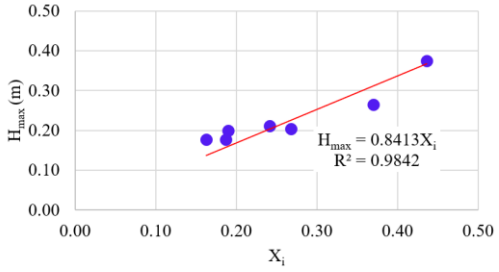
Bảng 1. Số liệu đo sóng tàu trên sông Hậu - nhóm ghe máy nhỏ.

STT	Tên/ký hiệu	Giờ đo	V (m/s)	h (m)	x (m)	Fr_h	x/h	X	H_{max} đo (m)	$\alpha_i = H_{max}/X$
1	Tàu 5	11:42	4,40	8,43	10	0,48	1,19	0,44	0,38	0,86
2	Tàu 7	11:58	3,57	8,42	10	0,39	1,19	0,19	0,20	1,05
3	Tàu 9	12:27	4,40	8,20	45,7	0,49	5,58	0,27	0,20	0,76
4	Tàu 10	12:39	4,00	8,17	20	0,45	2,45	0,24	0,21	0,87
5	Tàu 12	13:21	4,00	8,09	67	0,45	8,29	0,16	0,18	1,09

6	Tàu 14	13:48	4,75	8,01	45,7	0,54	5,71	0,37	0,26	0,72
7	Tàu 18	14:05	4,00	7,93	45,7	0,45	5,76	0,19	0,18	0,94



Hình 4. Chiều cao sóng thứ cấp (H_{max}) đo được theo từng lượt tàu qua.



Hình 5. Quan hệ H_{max} - X và kết quả hồi quy hệ số α (ép qua gốc tọa độ).

Hình **5** thể hiện quan hệ giữa H_{max} đo được và biến $X = h\cdot(x/h)^{-1/3}\cdot Frh^4$ của 7 lượt đo, cùng đường hồi quy tuyến tính ép qua gốc tọa độ. Kết quả hồi quy cho phương trình $H_{max} = 0{,}8413\cdot X$ với hệ số xác định $R^2 = 0{,}9842$, cho thấy mức độ phù hợp rất cao giữa số liệu đo và dạng quan hệ tỷ lệ thuận của công thức gốc.

Bảng 2 tổng hợp kết quả hiệu chỉnh hệ số α cho nhóm ghe máy nhỏ: $\alpha = 0{,}84$ theo hồi quy ép qua gốc tọa độ ($R^2 = 0{,}98$, $n = 7$), so với giá trị trung bình cộng đơn giản của các α_i riêng lẻ là 0,899 (độ lệch chuẩn 0,139). Hai cách tính cho kết quả khá tương đồng (0,84 và 0,899) phản ánh chất lượng số liệu đầu vào. Đáng chú ý, giá trị $\alpha = 0{,}84$ hiệu chỉnh được cho sông Hậu khá gần với giá trị mặc định thường dùng trong các nghiên cứu ứng dụng công thức Verheij & Bogaerts (1989) khi chưa có số liệu hiệu chỉnh riêng ($\alpha \approx 1$).

Sai số chuẩn của α theo hồi quy ép qua gốc tọa độ được xác định theo $SE(\alpha) = [s^2/\Sigma X_i^2]^{1/2}$, với $s^2 = \Sigma(H_i - \alpha\cdot X_i)^2/(n-1)$. Với $n = 7$, $\alpha = 0{,}84 \pm 0{,}05$ (SE), khoảng tin cậy 95 % của α là 0,73–0,96 (phân phối Student, $n - 1 = 6$ bậc tự do, $t = 2{,}447$). Kiểm tra bằng phương pháp bootstrap (20 000 lần lấy mẫu lại) cho khoảng tin cậy 95 % là 0,76–0,95. Sai số căn quân phương của mô hình RMSE = 0,035 m. Cần lưu ý rằng R^2 của hồi quy ép qua gốc tọa độ được tính so với giá trị 0 thay vì giá trị trung bình nên thường cao hơn R^2 thông thường; do đó khoảng tin cậy và RMSE phản ánh sát hơn mức độ tin cậy của α. Khoảng tin cậy tương đối rộng (khoảng ±14 % quanh giá trị ước lượng) do cỡ mẫu nhỏ, vì vậy $\alpha = 0{,}84$ nên được xem là giá trị ước lượng bước đầu cho nhóm ghe máy nhỏ. Cận trên của khoảng tin cậy (0,96) nhỏ hơn 1, cho thấy với nhóm ghe máy nhỏ tại vị trí đo, việc sử dụng giá trị mặc định $\alpha = 1$ có xu hướng dự báo H_{max} lớn hơn thực đo, tức thiên về an toàn khi áp dụng cho thiết kế.

Bảng 2. Kết quả hiệu chỉnh hệ số α - nhóm ghe máy nhỏ.

Nhóm phương tiện	n	α (fit qua gốc)	R^2 (qua gốc)	α trung bình cộng	Độ lệch chuẩn
Ghe máy nhỏ	7	0,84	0,98	0,899	0,139

4. Thảo luận

4.1. Các nguồn sai số có thể ảnh hưởng đến kết quả

Chiều cao sóng H_{max} được xác định thông qua ADCP Sentinel V20 theo trình tự xử lý tín hiệu đã trình bày ở Mục 2.2 (lọc correlation, lọc dải tần, tích phân vận tốc, zero up-crossing). Đây là phương pháp đo gián tiếp, dựa trên giả thiết sóng tuyến tính, và chưa được đối chiếu với một phương pháp đo trực tiếp độc lập (đầu đo áp suất hoặc range-to-surface chuyên dụng), nên độ lớn tuyệt đối của Hmax có thể còn sai số hệ thống chưa được định lượng, dù hệ số xác định của mô hình hồi quy đạt mức cao ($R^2 = 0{,}98$).

Cỡ mẫu còn nhỏ ($n = 7$) và chỉ giới hạn ở một nhóm phương tiện (ghe máy nhỏ), trong khi sông Hậu có phổ phương tiện đa dạng hơn nhiều (tàu đẩy/lai dắt, tàu hàng một thân, tàu hàng hai thân/hai chân vịt, tàu khách...). Với $n < 10$, hệ số α hiệu chỉnh, dù có R^2 cao, vẫn chưa đủ vững về mặt thống kê để áp dụng trực tiếp cho thiết kế.

Vận tốc tàu (3,57-4,75 m/s) được ước lượng bằng phương pháp video và mốc khoảng cách trên bờ, có thể chịu sai số do: độ chính xác đọc thời gian trên khung hình, đường di chuyển thực tế của tàu không hoàn toàn song song với đường nối hai mốc, và chỉ tính được vận tốc trung bình giữa hai mốc chứ không phải vận tốc tức thời tại điểm đo.

Tín hiệu sóng nền (sóng gió, nhiễu động dòng chảy) chưa được tách khỏi tín hiệu sóng do tàu gây ra trong quá trình phân tích zero up-crossing, có thể làm lệch giá trị Hmax quan trắc so với thành phần sóng thứ cấp thuần túy.

Toàn bộ 7 mẫu có Fr_h trong khoảng 0,39-0,54, nằm trong vùng dưới tới hạn (subcritical, $Fr_h < 0{,}8$) phù hợp điều kiện áp dụng công

thức, nhưng cũng có nghĩa là kết quả hiệu chỉnh này chưa được kiểm chứng ở dải tốc độ gần tới hạn, nơi công thức Verheij & Bogaerts (1989) được ghi nhận là kém chính xác hơn.

4.2. So sánh với các nghiên cứu trước

Giá trị $\alpha = 0{,}84$ (hồi quy ép qua gốc, $R^2 = 0{,}98$, $n = 7$) thu được trong nghiên cứu này khá gần với giá trị mặc định thường được sử dụng khi áp dụng công thức Verheij & Bogaerts (1989) trong các nghiên cứu và công cụ tính toán sóng tàu, nơi hệ số này (thường ký hiệu Ap) mặc định lấy xấp xỉ bằng 1 khi chưa có số liệu hiệu chỉnh riêng cho từng vùng/loại phương tiện.

Mức độ phù hợp cao giữa α hiệu chỉnh cho sông Hậu và giá trị mặc định của công thức gốc là một tín hiệu tích cực, cho thấy công thức Verheij & Bogaerts (1989), vốn được xây dựng chủ yếu từ số liệu tàu, sà lan trên các tuyến đường thủy châu Âu/Bắc Mỹ, có thể áp dụng tương đối phù hợp cho điều kiện ghe máy nhỏ trên sông Hậu mà không cần hiệu chỉnh lớn. Tuy nhiên, do phương pháp đo Hmax gián tiếp chưa được kiểm chứng độc lập và cỡ mẫu còn nhỏ, chưa nên kết luận rằng $\alpha = 0{,}84$ là giá trị ổn định, đại diện cho toàn bộ nhóm ghe máy nhỏ trên sông Hậu; cần thêm số liệu để khẳng định mức độ phù hợp này có tính hệ thống.

5. Kết luận

Nghiên cứu đã trình bày phương pháp đo đạc sóng thứ cấp do tàu, ghe gây ra trên sông Hậu bằng ADCP Sentinel V20 kết hợp ước lượng vận tốc tàu qua video, và hiệu chỉnh hệ số α trong công thức Verheij & Bogaerts (1989) cho nhóm phương tiện ghe máy nhỏ. Kết quả hồi quy bình phương tối thiểu ép qua gốc tọa độ cho $\alpha = 0{,}84$ (khoảng tin cậy 95 %: 0,73–0,96; $n = 7$), khá gần với giá trị mặc định thường dùng của công thức gốc ($\alpha \approx 1$), cho thấy công thức Verheij & Bogaerts (1989) có thể áp dụng tương đối phù hợp cho điều kiện ghe máy nhỏ trên sông Hậu. Tuy nhiên, cỡ mẫu hiện tại còn nhỏ, nên kết quả này chỉ nên xem là bước đầu, chưa đủ cơ sở để áp dụng trực tiếp vào thiết kế bảo vệ bờ.

Trên cơ sở các hạn chế đã phân tích, nhóm nghiên cứu đề xuất một số hướng tiếp theo:

- Mở rộng số lượng mẫu đo cho nhóm ghe máy nhỏ lên tối thiểu 15–20 lượt, đồng thời bổ sung số liệu cho các nhóm phương tiện còn lại (tàu đẩy/lai dắt, tàu hàng một thân, tàu hàng hai thân/hai chân vịt, tàu khách) theo cấu trúc thu thập số liệu đã thiết lập.

- Kiểm tra độ nhạy của α khi loại các điểm đo có x/h gần ngưỡng áp dụng ($x/h \approx 1$, cụ thể là Tàu 5 và Tàu 7) khỏi tập hồi quy, để đánh giá mức độ ảnh hưởng của các điểm này đến hệ số hồi quy chung.

- Lượng hóa sai số của phương pháp ước lượng vận tốc tàu bằng video (khoảng cách giữa các mốc tham chiếu, độ phân giải thời gian của video, sai số xác định thời điểm tàu qua mốc); đây là nguồn sai số quan trọng do H_{max} tỷ lệ với V^4, và cần xem xét kết hợp các phương pháp đo vận tốc độc lập (GPS/AIS, flycam) trong các đợt đo tiếp theo.

- Sau khi có đủ số liệu cho từng nhóm phương tiện với cỡ mẫu thống kê phù hợp, xem xét đề xuất bộ hệ số α riêng theo từng nhóm phương tiện cho sông Hậu, phục vụ thiết kế công trình bảo vệ bờ trong điều kiện giao thông thủy đặc thù của Đồng bằng sông Cửu Long.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo, mã số: B2026-TCT-06.

Tài liệu tham khảo

[1]. Bhowmik, N. G., Soong, T. W., Reichelt, W. F., & Seddik, N. M. (1991). Waves generated by recreational traffic on the Upper Mississippi River System. *ISWS RR-117*.

[2]. Chakraborty, M., Sriram, V., & Murali, K. (2022). Field measurement and analysis of ship generated waves in Hooghly river, India. *Applied Ocean Research*, *128*, 103337.

[3]. Fenton, J. D., Huber, B., Klasz, G., & Krouzecky, N. (2023). Ship waves in rivers: Environmental criteria and analysis methods for measurements. *River Research and Applications*, *39*(4), 629-647.

[4]. Giang Trọng Toàn, Đinh Văn Duy, Trần Văn Tỷ, Phạm Hữu Hà Giang, Cù Ngọc Thắng, & Đoàn Khánh Hiển (2025). Đánh giá ảnh hưởng của giao thông thủy đến sạt lở bờ sông Cần Thơ. *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng*, 15(02), 238–243. https://doi.org/10.54772/jomc.02.2025.885

[5]. Huang, W., Li, S., Lu, Y., Zhang, R., & Wang, H. (2023). A new method for predicting the maximum wave height of ship-generated onshore slopes in restricted channel. *Frontiers in Marine Science*, *10*, 1220975.

[6]. Mares-Nasarre, P., Muscalus, A., Haas, K., & Morales-Nápoles, O. (2024). The probabilistic dependence of ship-induced waves is preserved spatially and temporally in the Savannah River (USA). *Scientific Reports*, *14*(1), 28154.

[7]. Nguyen, S. H., Huynh, T. T., Bui, V. T., & Dau, N. V. (2021). The mechanism of riverbank erosion caused by ship-generated waves along Hau river's entrance navigation channel, Southern Vietnam. In *Advances in Sustainable Construction and Resource Management* (pp. 897–904). Springer.

[8]. PIANC (1987). *Guidelines for the design and construction of flexible revetments incorporating geotextiles for inland waterways* (Report of Working Group 4, PTC I, Supplement to Bulletin No. 57). PIANC. https://www.pianc.org/publication/guidelines-for-the-design-and-construction-of-flexible-revetments-incorporating-geotextiles-for-inland-waterways/

[9]. Qian, Q., Su, L., Zaloom, V., Jao, M., Wu, X., & Wang, K. H. (2023). Field Measurements and Modelling of Vessel-Generated Waves and Caused Bank Erosion—A Case Study at the Sabine–Neches Waterway, Texas, USA. *Water*, *15*(1), 35.

[10]. Seemann, A., & Melling, G. (2025). Measurement of ship-generated waves in German coastal waterways from 1998–2022. *Scientific Data*, *12*(1), 54.

[11]. Tan, S. W. (2012). *Predicting boat-generated wave heights: A quantitative analysis through video observations of vessel wakes* (No. USNATSPR409).

[12]. Thang, C., Hino, T., Quang, C. N., & Lam, L. (2020). Effects of ship waves on riverbank erosion in the Mekong delta: A case study in An Giang province. *Lowland Technology International*, 22(3).

[13]. Trần Văn Hừng, Bùi Trần Việt Bắc, Đinh Văn Duy, & Nguyễn Nhật Anh (2026). Xác định hệ số thực nghiệm cho công thức tính toán các loại sóng tàu thuyền trên sông Cần Thơ. *Tạp chí Vật liệu và Xây dựng*, 16(02).

[14]. Trần Văn Tỷ, Phạm Hồng Tiến, Lâm Văn Thịnh, Huỳnh Thị Cẩm Hồng, Cù Ngọc Thắng, Đinh Văn Duy, Nguyễn Thái An, Lưu Quốc Anh, & Nguyễn Thành Liêm (2022). Phân tích các yếu tố ảnh hưởng đến ổn định bờ sông: Trường hợp nghiên cứu tại đoạn sông Chà Và, tỉnh Vĩnh Long. *Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 58(5A), 14–21. https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2022.229

[15]. Verheij, H. J., & Bogaerts, M. P. (1989). *Ship Waves and Stability of Armour Layers Protecting Slopes*. Delft Hydraulics.