

KIỂM CHỨNG MÔ HÌNH TÍNH TOÁN THAM SỐ TƯƠNG TÁC TÀU - NỀN ĐÁY LUỒNG TRÊN CƠ SỞ PHÂN TÍCH SO SÁNH VALIDATION OF A COMPUTATIONAL MODEL FOR SHIP-CHANNEL SEABED INTERACTION PARAMETERS BASED ON COMPARATIVE ANALYSIS

PHẠM TRUNG HIỆP*, NGUYỄN VIỆT HOÀN, LÃ VĂN ĐỒNG,
NGUYỄN VĂN KIÊN, PHÙNG VĂN LONG

Viện Thiết kế tàu quân sự

**Email liên hệ: phiepast07@gmail.com*

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.964>

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả kiểm chứng mô hình tính toán tham số tương tác giữa tàu - nền đáy thông qua so sánh với dữ liệu thực nghiệm và các nghiên cứu đã công bố. Mô hình được xây dựng dựa trên phương pháp bán tĩnh và hiện thực hóa trong phần mềm ShipGround, cho phép xác định các tham số đặc trưng bao gồm phản lực nền đáy, góc chúi tàu, quãng đường hãm và thời gian tương tác. Độ tin cậy của mô hình được đánh giá thông qua ba nguồn dữ liệu: thí nghiệm mô hình thu nhỏ, thử nghiệm thực địa quy mô toàn tàu và các kết quả tính toán từ các công trình nghiên cứu trước đây. Kết quả cho thấy sự phù hợp tốt với dữ liệu tham chiếu, khẳng định khả năng ứng dụng của phương pháp trong dự báo tương tác tàu-nền đáy.

Từ khóa: Tương tác tàu - nền đáy, mô hình bán tĩnh, rủi ro mắc cạn, thiết kế tàu.

Abstract

This paper presents validation results of a computational model for ship-bottom interaction parameters through comparison with experimental data and published research. The model is developed based on a quasi-static method and implemented in ShipGround software, enabling determination of characteristic parameters including bottom reaction force, trim angle, stopping distance, and interaction time. Model reliability is assessed using three data sources: scaled model experiments, full-scale field tests, and computational results from previous studies. Results show good agreement with reference data, confirming the method's applicability for predicting ship-bottom interaction parameters.

Keywords: Ship-ground interaction, quasi-static model, grounding risk, ship design.

1. Mở đầu

Tương tác giữa đáy tàu và nền đáy luồng là bài toán kỹ thuật phức tạp, đòi hỏi sự kết hợp kiến thức về kết cấu tàu, thủy động lực học và cơ học đất nền. Khi tàu hoạt động trong vùng nước nông, đặc biệt khi tiếp cận bờ hoặc luồng hẹp có nền yếu (bùn, cát mịn, đất sét pha), đáy tàu có thể va chạm hoặc tiếp xúc liên tục với nền đáy. Quá trình này ảnh hưởng trực tiếp đến chuyển động tàu và gây tích lũy ứng suất, dẫn đến biến dạng cục bộ nguy hiểm cho kết cấu đáy, đặc biệt trong khai thác kéo dài.

Theo báo cáo giám định kỹ thuật sau sự cố tàu chở hàng Kurilgeo tại quần đảo Kuril (Liên bang Nga, 2014), va chạm lặp lại với lớp bùn đáy trong điều kiện



Hình 1. Hư hỏng ở đáy tàu hàng Kurilgeo do tương tác với nền đáy biển

sóng động đã gây biến dạng nghiêm trọng kết cấu đáy và làm kẹt hệ thống bánh lái, dẫn đến mất khả năng điều khiển tàu. Sự cố này minh chứng rõ nét mức độ nguy hiểm của tương tác tàu-nền đáy trong khai thác thực tế (Hình 1) [1].

Để định lượng các yếu tố ảnh hưởng trong quá trình tương tác tàu-nền đáy, nghiên cứu [2] đã phát triển mô hình tính toán bán tĩnh dựa trên nguyên lý bảo toàn năng lượng, cho phép xác định phản lực nền, vận tốc giới hạn và quãng đường hãm trong các điều kiện địa hình và tải trọng khác nhau. Bài báo này trình bày kết quả kiểm chứng và hiệu chỉnh mô hình thông qua so sánh với dữ liệu thực nghiệm và các nghiên cứu độc lập, nhằm khẳng định tính khả thi của phương pháp đề xuất trong thiết kế và khai thác tàu.

2. Phương pháp tính toán

Phương pháp tính toán tham số tương tác tàu-nền đáy được xây dựng dựa trên phương pháp luận của Đăng kiểm Hàng hải Nga (RMRS) cho tàu chuyên dụng ký hiệu NAABSA (Not Always Afloat But Safely Aground) [3]. Bài toán được quy về phân tích phương trình bảo toàn năng lượng theo thời gian:

$$\frac{m \cdot (1 + \mu) \cdot v_N^2}{2} = \Delta_N \cdot \Delta d + E_T + E_C + \dots \quad (1)$$

Trong đó, μ - hệ số khối lượng nước kèm; $\Delta_N \cdot \Delta d$ - thế năng của tàu chuyển động theo phương thẳng đứng, N×m; E_T - năng lượng tiêu hao do ma sát, N×m; E_C - năng lượng ép lún bùn đất và những tiêu hao năng lượng khác, N×m, ví dụ như, năng lượng làm biến dạng thân tàu, năng lượng làm dịch chuyển bùn đất, những tiêu hao năng lượng này rất nhỏ và có thể bỏ qua trong quá trình tính toán.

Dựa trên phương pháp trên, nhóm nghiên cứu đã phát triển phần mềm ShipGround để xác định các tham số tương tác tàu-nền đáy (Hình 2). Một số ứng dụng và so sánh với các mô hình khác đã được trình



Hình 2. Giao diện phần mềm ShipGround

bày trong [2], nhưng phạm vi kiểm chứng còn hạn chế. Bài báo này mở rộng việc kiểm chứng bằng cách tổng hợp dữ liệu từ các nghiên cứu độc lập và phân tích so sánh nhằm đánh giá độ chính xác cũng như hiệu quả của phương pháp đề xuất.

3. So sánh với kết quả thí nghiệm mô hình

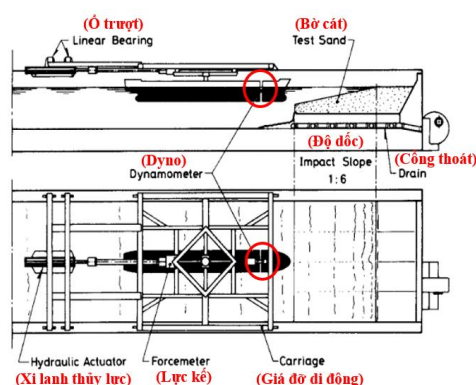
Các thí nghiệm mô hình về va chạm mềm được thực hiện vào năm 1994 và được công bố trong các tài liệu [4, 5]. Mục tiêu chính của thí nghiệm là nghiên cứu xung lực ban đầu (phản ứng động lực học) tác động lên mũi tàu trong quá trình tiếp xúc với nền đáy mềm (cát) trong điều kiện tiếp cận có kiểm soát.

Mô hình thí nghiệm được thiết kế dựa trên nguyên mẫu tàu chở dầu với tỷ lệ thu nhỏ hình học 1:60. Các thông số kỹ thuật chính của mô hình được tổng hợp trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số chính của thực nghiệm mô hình

Thông số	Giá trị
Chiều dài, m	2,57
Chiều rộng, m	0,378
Mớn nước ban đầu, m	0,117
Khối lượng, kg	78,4
Vận tốc va chạm, m/s	0,265-0,664
Góc nghiêng mặt cát	1:6 (9,5°)

Sơ đồ bố trí thí nghiệm được thể hiện trong Hình 3. Mô hình tàu được thiết kế với phần mũi tàu tách rời và kết nối với thân tàu thông qua cảm biến lực, cho phép đo lực cắt theo phương thẳng đứng tại mặt cắt ngang. Phản lực tiếp xúc giữa mũi tàu và nền cát trong quá trình mắc cạn được xác định dựa trên lực đo được, kết hợp với các thông số chuyển động và đặc tính thủy tĩnh của mô hình. Đồng thời, phản lực tiếp xúc theo phương ngang được xác định có độ lớn tương đương với lực cản khi đẩy tàu vào bãi cát.



Hình 3. Bố trí thí nghiệm mô hình tàu

Ba thí nghiệm được thực hiện với cùng cấu hình bố trí, khác biệt ở vận tốc ban đầu theo phương ngang:

0,265m/s; 0,464m/s và 0,664m/s. Khi quy đổi theo tỷ lệ mô hình (1:60), các vận tốc này tương ứng với 2,053; 3,594 và 5,143m/s ở quy mô thực tế. Kết hợp với độ nghiêng bờ cát $9,5^\circ$ (không phải điều kiện tiêu chuẩn), các thông số này cho thấy thí nghiệm được thiết kế để mô phỏng kích bản va chạm/sự cố, không phải điều kiện vận hành thông thường.

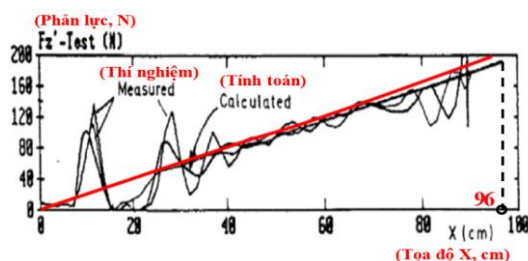
Một hạn chế quan trọng cần lưu ý là mô hình tàu không ở trạng thái tự do mà chịu chuyển động cưỡng bức từ xe đẩy. Điều này dẫn đến động năng không tự triệt tiêu hoàn toàn trong quá trình tương tác, làm tăng khoảng cách hãm so với trường hợp mắc cạn thực tế. Yếu tố này cần được tính đến khi hiệu chỉnh và so sánh kết quả mô phỏng số với dữ liệu thực nghiệm. Kết quả đo đạc chi tiết và phân tích được trình bày đầy đủ trong các tài liệu tham khảo [4, 5]:

$$R_{0N} \cong (1 + \mu) \frac{\Delta_N v_N^2}{8gd_N}, \quad (2)$$

Trong đó, Δ_N - lượng chiếm nước của tàu, tấn; v_N - vận tốc của tàu, m/s; g - gia tốc trọng trường, m/s² và d_N - mớn nước ở giữa thân tàu, m.

Phương pháp được đề xuất trong [2] được phát triển cho trường hợp tàu chuyển động tự do, trong đó động năng tự triệt tiêu hoàn toàn trong quá trình mắc cạn. Do đó, công thức (2) không thể áp dụng trực tiếp để tính phản lực tương tác trong điều kiện thí nghiệm với chuyển động cưỡng bức.

Khi tính toán với giả thiết tàu chuyển động tự do ở vận tốc 0,664m/s, mô hình tàu sẽ dừng lại sau khoảng cách 0,28m. Tuy nhiên, trong thí nghiệm thực tế, do ràng buộc từ xe đẩy, khoảng cách hãm đo được là 0,96m, vượt quá giá trị lý thuyết này hơn 3 lần (xem Hình 4). Sự khác biệt này chứng tỏ sự cần thiết phải điều chỉnh phương pháp tính toán để phù hợp với điều kiện thực nghiệm.



Hình 4. So sánh kết quả thực nghiệm [4] và tính toán theo công thức (3) ở vận tốc 0,664m/s

Để mô phỏng chính xác hơn điều kiện thí nghiệm mô hình, phản lực theo phương thẳng đứng tại vị trí

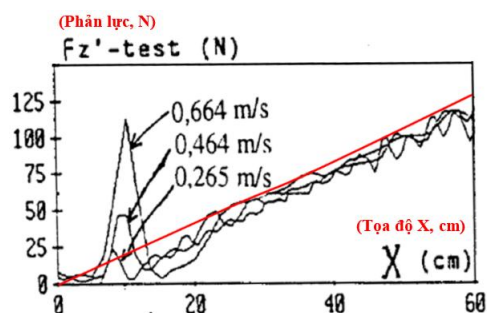
tiếp xúc ở mũi tàu được biểu diễn dưới dạng hàm theo tọa độ phương ngang, dựa trên phương pháp được đề xuất trong [2]:

$$R_Z(x) = m \cdot g \cdot (1 + \mu) \frac{x \cdot \tan \psi}{7 \cdot d} \quad (3)$$

Trong đó: m - khối lượng mô hình, kg; g - gia tốc trọng trường, m/s²; μ - hệ số khối lượng nước kèm theo; ψ - góc nghiêng của bề mặt đáy biển, độ; x - tọa độ theo phương ngang, cm và d - mớn nước của mô hình tại giữa tàu, cm.

Công thức (3) không tính đến các yếu tố: tính chất cơ học của nền đáy, hình dạng thân tàu tại vùng tiếp xúc và độ sâu xâm nhập của thân tàu vào đáy. Do đó, công thức có xu hướng đánh giá cao phản lực thực tế.

Hình 4 trình bày so sánh giữa ba bộ dữ liệu: phản lực tính theo công thức (3) (đường màu đỏ), kết quả thực nghiệm và kết quả tính toán từ nghiên cứu [4]. Có thể thấy rằng, ngoài vùng xung lực ban đầu, sự trùng khớp giữa các đường cong là khá tốt. Đặc biệt, kết quả tính toán động lực học từ [4] gần như tuyến tính trong khoảng $x \geq 50\text{cm}$, phản ánh đặc trưng của pha tiếp xúc ổn định. Dữ liệu thực nghiệm cho thấy hai cực đại tại vị trí $x=10\text{cm}$ và $x=25\text{cm}$, với giá trị lớn hơn khoảng 1,4 lần so với kết quả tính toán trong [4]. Sự chênh lệch này có thể giải thích bởi độ mềm dẻo cục bộ của kết cấu mũi tàu trong mô hình vật lý - yếu tố chưa được tính đến trong mô hình lý thuyết. Biến dạng đàn hồi cục bộ này dẫn đến sự gia tăng tức thời của phản lực trong giai đoạn va chạm ban đầu.



Hình 5. Kết quả các thí nghiệm [5] ở các vận tốc khác nhau và so sánh kết quả tính toán theo (3)

Hình 5 trình bày kết quả so sánh bổ sung giữa tính toán theo [5] và theo công thức (3) (đường màu đỏ). Một điểm đáng chú ý là các đỉnh lực thứ cấp tại vị trí $x \approx 25\text{cm}$ quan sát được trong dữ liệu thực nghiệm không xuất hiện trong các mô hình lý thuyết. Điều này xác nhận ảnh hưởng đáng kể của biến dạng đàn hồi cục bộ trong kết cấu mũi tàu mô hình - yếu tố chưa được mô hình hóa trong các phương pháp lý thuyết. Tại vận tốc thấp nhất (0,265m/s), biên độ xung lực

động giảm xuống mức không đáng kể, do đó có thể bỏ qua trong đánh giá tổng thể. Tuy nhiên, do hạn chế về dữ liệu đo và ràng buộc chuyển động cưỡng bức của mô hình, chưa thể phân tích chi tiết dao động nội tại của khối mũi tàu trong quá trình tương tác.

Tổng thể, kết quả so sánh cho thấy phương pháp đề xuất trong [2] cho độ chính xác chấp nhận được khi: Đánh giá phản lực tiếp xúc ở vận tốc thấp và phân tích pha tiếp xúc ổn định (ngoài vùng xung lực ban đầu). Điều này xác nhận tính khả dụng của phương pháp trong việc tính toán các tham số tương tác giữa tàu và đáy biển ở điều kiện vận tốc khai thác điển hình.

4. So sánh với kết quả thực nghiệm thực địa

Nhằm xác thực các mô hình toán học và kết quả từ thí nghiệm mô hình thu nhỏ, một chuỗi thí nghiệm thực địa quy mô lớn đã được triển khai tại Đan Mạch theo đơn đặt hàng của Great Belt Link Ltd. Thông tin chi tiết về điều kiện thí nghiệm và kết quả được trình bày trong tài liệu [6]. Đối tượng thử nghiệm là tàu đánh cá Charlotte Vest, có chiều dài 29,6 mét, lượng giãn nước 299 tấn, với dạng mũi hình chữ V đặc trưng cho loại tàu hoạt động ở vùng nước nông ven bờ.

Thí nghiệm được thực hiện bằng cách cho tàu tự do lao vào bờ tại nhiều vị trí khác nhau trong khu vực ven biển được chuẩn bị kỹ lưỡng, với vận tốc từ 2,0 đến 5,5m/s, tương ứng với điều kiện mắc cạn thực tế của phương tiện nổi tải trọng trung bình. Hệ thống đo đặc đồng bộ được lắp đặt trên tàu, bao gồm các cảm biến ghi nhận liên tục: Gia tốc theo các phương, vận tốc tức thời và góc nghiêng của tàu. Trước mỗi lượt thử nghiệm, địa hình đáy biển khu vực va chạm được khảo sát chi tiết, kết hợp với lấy mẫu đất để phân tích đặc tính cơ học. Một hạn chế đáng kể là dữ liệu về sức kháng của nền đất không được công bố trong [6], gây khó khăn cho việc hiệu chuẩn và so sánh với kết quả tính toán lý thuyết. Ngoài các đại lượng động lực học chính (gia tốc, vận tốc), các thông số phụ trợ quan trọng cũng được quan trắc đầy đủ, bao gồm: Biến dạng nền tại vùng tiếp xúc mũi tàu và khoảng cách hãm. Từ dữ liệu đo được và phương trình chuyển động của tàu, các đại lượng sau được xác định thông qua tính toán ngược: Lực tương tác giữa tàu và nền đất, hệ số ma sát hiệu dụng và quãng đường hãm. Các kết quả này giúp làm rõ cơ chế vật lý chi phối quá trình tương tác giữa tàu và nền đáy.

Hình 6 chụp vị trí tàu sau lượt thử nghiệm đầu tiên, cho thấy hệ thống đo đặc được bố trí cả trên tàu và trên bờ nhằm thu thập dữ liệu từ nhiều góc độ, đảm bảo tính đầy đủ và đáng tin cậy. Quá trình phân tích dữ liệu kéo dài gần 3 năm, phản ánh độ phức tạp và

tính khắt khe trong xử lý dữ liệu thực địa quy mô lớn. Theo đánh giá của nhóm tác giả, dữ liệu thực địa đã xác nhận nhất quán các đặc trưng tương tác được phát hiện từ thí nghiệm mô hình trước đó. Tuy nhiên, khác với thí nghiệm mô hình (Hình 4-5), báo cáo [6] không trình bày các biểu đồ lực tương tác theo thời gian hoặc vị trí, mà tập trung vào quãng đường hãm như tiêu chí đánh giá chính.



Hình 6. Vị trí của tàu sau lần thử nghiệm đầu tiên [6]



Hình 7. Hình dạng phần mũi tàu của tàu cá thuộc dự án 388, LB Nga

Việc so sánh kết quả thực địa với giá trị tính toán theo công thức lý thuyết (1) gặp khó khăn do thiếu thông tin chi tiết về hình học mũi tàu Charlotte Vest. Để khắc phục vấn đề này, một tàu có cấu trúc tương đương - tàu đánh cá thuộc Dự án 388 (Hình 7), được sử dụng làm tham chiếu. Góc nghiêng trung bình của đáy mũi tàu trong vùng từ khung sườn số 6 đến số 10 được xác định là 47°, và được sử dụng làm cơ sở cho việc tính toán các tham số tương tác.

Bảng 2. So sánh quãng đường hãm

Số TT	V (m/s)	Độ nghiêng đáy	Thực nghiệm [6] (m)	Tính toán [2] (m)	Tỷ số (I2)/I6)
1	2,5	1:12	9,6	10,2	1,06
2	4,1	1:4	8,1	9,0	1,11
3	4,1	1:10	16,6	17,7	1,06
4	5,0	1:8	17,3	19,3	1,12
5	5,1	1:4	12,1	11,7	0,97

Bảng 2 trình bày kết quả so sánh khoảng cách hãm giữa dữ liệu thực nghiệm [6] và kết quả tính toán theo

phương pháp đề xuất [2] cho 6 lượt thử nghiệm. Do thiếu dữ liệu đo đạc trực tiếp về đặc tính cơ học của nền đất, các thông số sau được sử dụng trong tính toán: Sức kháng của nền đất: 350kPa (giá trị trung bình ước tính); Hệ số ma sát: 0,714 (phù hợp với đặc điểm địa hình tự nhiên và bề mặt nền đáy ven biển); Độ dốc đáy: Giá trị cực đại đo được trong mỗi lượt thử nghiệm. Kết quả so sánh cho thấy phương pháp tính toán [2] có xu hướng dự báo khoảng cách hãm lớn hơn giá trị thực nghiệm khoảng 10,5% (Tính trung bình cột Tỷ số ([2]/[6]) của Bảng 2). Sai số giữa hai phương pháp lớn nhất lên đến 31% (Tỷ số [2]/[6] = 1,31) được ghi nhận ở vận tốc $v = 5,1$ m/s và độ nghiêng đáy 1:9. Mức sai lệch này được đánh giá là chấp nhận được, đặc biệt khi xét đến các yếu tố bất định:

1. Thiếu dữ liệu chính xác về sức kháng của nền đất (sử dụng giá trị ước tính 350kPa);
2. Biến động tự nhiên của địa hình đáy biển tại các vị trí thử nghiệm khác nhau;
3. Sự không đồng nhất về đặc tính cơ lý của nền cát ven biển.

Sai số nhỏ và ổn định trong phạm vi 10% khẳng định sự phù hợp tốt giữa mô hình toán học [2] và dữ liệu thực nghiệm quy mô thực [6]. Điều này xác nhận tính khả dụng và độ tin cậy của phương pháp đề xuất trong việc dự báo các tham số tương tác giữa tàu và đáy biển ở điều kiện mắc cạn.

5. So sánh với kết quả của các tính toán khác

Ngoài dữ liệu thực nghiệm, công trình [6] còn cung cấp kết quả tính toán lý thuyết về khoảng cách hãm, tạo điều kiện so sánh trực tiếp với phương pháp đề xuất [2].

Bảng 3 tổng hợp kết quả so sánh cho 6 trường hợp điển hình với các điều kiện địa hình và vận tốc khác nhau.

Bảng 3. So sánh kết quả tính quãng đường hãm

Số TT	V (m/s)	Độ nghiêng đáy	Theo [6] (m)	Theo [2] (m)	Tỷ số [2]/[6]
1	2,5	1:12	10,9	10,2	0,94
2	4,1	1:4	8,3	9,0	1,08
3	4,1	1:10	14,7	17,7	1,20
4	5,0	1:8	16,7	19,3	1,16
5	5,1	1:4	9,9	11,7	1,18
6	5,1	1:9	16,6	21,5	1,30

Kết quả thống kê cho thấy khoảng cách hãm trung bình tính theo phương pháp đề xuất [2] cao hơn khoảng 14% so với kết quả trong [6] (Tính trung bình cột Tỷ số ([2]/[6]) của Bảng 3). Mặc dù độ sai lệch

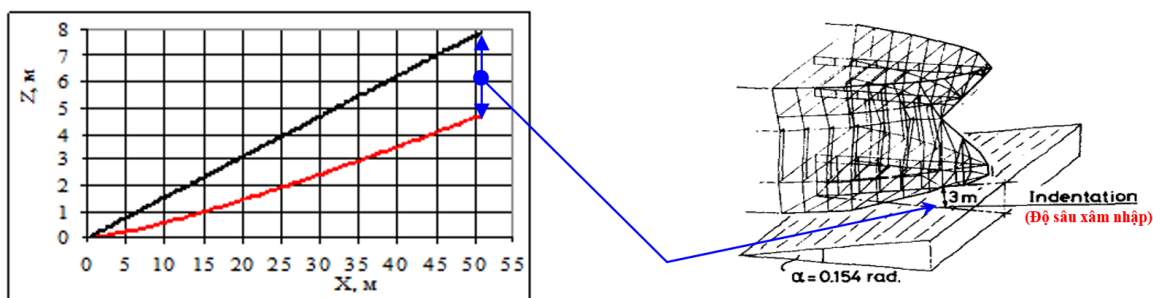
này vẫn nằm trong phạm vi chấp nhận được đối với các mô hình lý thuyết đơn giản hóa, cần lưu ý một điểm quan trọng về phương pháp lựa chọn thông số trong [6]. Trong công trình [6], hệ số ma sát được điều chỉnh riêng biệt cho từng trường hợp thử nghiệm, với giá trị biến thiên trong khoảng rộng từ 0,6 đến 0,8. Ngược lại, phương pháp đề xuất [2] sử dụng một giá trị hệ số ma sát cố định (0,714) cho tất cả các trường hợp. Cách tiếp cận điều chỉnh hệ số ma sát theo từng trường hợp trong [6] có thể được hiểu như một quá trình hiệu chuẩn nội tại, giúp giảm sai lệch giữa kết quả tính toán và dữ liệu thực nghiệm. Điều này giải thích phần nào sự khác biệt 14% giữa 2 phương pháp.

Hình 8 trình bày so sánh chi tiết về quá trình biến đổi động năng theo khoảng cách hãm của một tàu chở hàng (lượng giãn nước 4.400 tấn), sử dụng 2 phương pháp: Mô hình trong [6] (đường màu đen) và mô hình bán tĩnh trong [2] (đường màu đỏ). Các điều kiện biên được thiết lập giống nhau cho cả 2 phương pháp: Vận tốc ban đầu: 10 hải lý/giờ; độ nghiêng nền đáy: 1:6,5 ($\approx 8,8^\circ$) và hệ số ma sát: 0,6.

Theo mô hình [6], động năng sụt giảm đột ngột ngay tại pha tiếp xúc ban đầu, được giải thích bởi xung lực tác động lên phần mũi tàu di động (hiện tượng tương tự đã quan sát thấy trong Hình 4 và Hình 5). Sau giai đoạn xung lực này, động năng tiếp tục giảm dần khi tàu thâm nhập sâu hơn vào nền đất. Ngược lại, mô hình bán tĩnh [2] giả định động năng tiêu hao liên tục và đều theo quãng đường, tương ứng với cơ chế biến dạng dẻo của nền đất dưới tác dụng của lực kháng không đổi. Mặc dù hai mô hình có cơ chế tiêu hao động năng khác biệt rõ rệt (đột ngột/ liên tục), khoảng cách hãm cuối cùng chỉ sai lệch khoảng 8%. Độ chênh lệch nhỏ này cho thấy cả 2 phương pháp đều cho kết quả đáng tin cậy trong điều kiện giả định tương đương, bất chấp sự khác biệt về mô hình hóa chi tiết quá trình vật lý.

Để minh họa khả năng ứng dụng của mô hình [2] ở quy mô thực tế, Hình 9 trình bày kết quả mô phỏng cho một tàu chở dầu cỡ lớn với các thông số sau: Lượng giãn nước: 177.000 tấn; chiều dài: 274m; vận tốc va chạm: 7,5m/s; hệ số ma sát: 0,7; góc nghiêng đáy mũi: 10° và sức kháng nền đất: 600kPa. Trong Hình 9, đường màu đỏ thể hiện quỹ đạo chuyển động của mũi tàu, đường màu đen biểu diễn cao độ của bề mặt bùn đất.

Theo tính toán quỹ đạo mũi tàu, khoảng cách hãm đạt 51m, trong khi độ sâu xâm nhập của mũi tàu vào nền đất là 3,18m cao hơn 6% so với kết quả 3,0m được công bố trong tài liệu [4]. Mức chênh lệch 6%, dù không lớn, phản ánh độ nhạy của kết quả tính toán đối



Hình 9. So sánh kết quả tính toán theo [2] và theo [6] trường hợp tàu chở dầu cỡ lớn

với các thông số đầu vào. Điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc xác định chính xác các đặc trưng: Kết cấu thân tàu (hình học mũi tàu, khối lượng phân bố); đặc tính cơ học của nền đất đáy (sức kháng, góc ma sát). Kết quả này khẳng định khả năng áp dụng mô hình [2] cho các tàu có tải trọng lớn, đồng thời chỉ ra yêu cầu về độ chính xác của dữ liệu đầu vào để đảm bảo độ tin cậy của kết quả dự báo.

6. Kết luận

Bài báo đã trình bày kết quả so sánh và kiểm chứng mô hình tính toán tương tác giữa tàu và nền đáy được đề xuất trong [2] thông qua các trường hợp điển hình. Kết quả cho thấy mô hình có độ tin cậy phù hợp trong khuôn khổ các giả thiết nghiên cứu. Sai lệch của khoảng cách hãm so với dữ liệu thực nghiệm khoảng 10,5%, và so với các kết quả tính toán đã công bố khoảng 14%; trong khi độ xâm nhập của mũi tàu vào nền đáy chênh lệch khoảng 6% so với dữ liệu thu thập được. Các sai lệch này nằm trong giới hạn chấp nhận được của mô hình bán tĩnh, qua đó khẳng định khả năng áp dụng phương pháp cho đánh giá và dự báo sơ bộ quá trình tương tác giữa tàu và nền đáy. Tuy nhiên, mô hình hiện tại còn hạn chế trong việc mô tả giai đoạn tương tác phi tuyến ban đầu khi đáy tàu bắt đầu tiếp xúc nền đáy và diện tích tiếp xúc biến thiên nhanh kèm theo tải trọng động cục bộ lớn. Mặc dù giai đoạn này chiếm tỷ lệ nhỏ trong toàn bộ quá trình tương tác, song lại có ý nghĩa quan trọng đối với đánh giá độ bền kết cấu đáy tàu dưới tác dụng tải trọng động. Việc hoàn thiện mô hình nhằm xử lý giai đoạn này sẽ là hướng nghiên cứu tiếp theo của nhóm tác giả.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Буксировка аварийного «Курилгео» (2025), [Online] <https://www.korabli.eu/blogs/novosti/morskie-novosti/spasatelnyy-buksir-1>.
- [2] Phạm Trung Hiệp, Kulesh V.A. (2021), *Tính toán các thông số tương tác của tàu với nền đáy luồng trong môi trường bán tĩnh*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 67, tr.51-55.
- [3] Российский морской регистр судоходства. РМРС (2020), *Правила классификации и постройки морских судов*. Ч. 17, раздел 15, Требование к судам, эксплуатация которых предусматривает посадку на грунт (суда NAABSA), СПб., С.258-269.
- [4] Pedersen P.T. (1994), *Ship grounding and hull girder strength*, Marine Structures 7, pp.1-29.
- [5] Simonsen B.C. (1997), *Mechanics of Ship Grounding*, PhD. thesis, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Technical University of Denmark, 265 p.
- [6] Sterdorff M.J., Pedersen P.T., (1996), *Grounding experiment on soft bottoms*, J. Mar. Sci. Technol., pp.174-181.

Ngày nhận bài:	08/01/2026
Ngày nhận bản sửa:	11/05/2026
Ngày duyệt đăng:	13/05/2026