

ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA HÌNH DẠNG MŨI TÀU TỐI ƯNG XỬ ĐÂM VÀ VÀ ĐỘ BỀN TỐI HẠN CỦA CHÂN ĐỂ TUABIN GIÓ NGOÀI KHƠI KIỂU CỐ ĐỊNH DẠNG MONOPILE

Nguyễn Văn Hân^a, Trần Doãn Hùng^a, Đỗ Quang Thắng^{b,*}

^aKhoa Cơ khí, Trường Đại học Nha Trang,

số 02 Nguyễn Đình Chiểu, phường Bắc Nha Trang, tỉnh Khánh Hòa, Việt Nam

^bKhoa Kỹ thuật biển, Trường Đại học Nha Trang,

số 02 Nguyễn Đình Chiểu, phường Bắc Nha Trang, tỉnh Khánh Hòa, Việt Nam

Nhận ngày 23/12/2025, Sửa xong 16/3/2026, Chấp nhận đăng 30/3/2026

Tóm tắt

Sự gia tăng hoạt động của tàu dịch vụ trong các khu vực điện gió ngoài khơi làm gia tăng nguy cơ đâm va với chân đế tuabin gió, ảnh hưởng trực tiếp đến an toàn khai thác và khả năng chịu lực còn lại của kết cấu. Bài báo này nghiên cứu ảnh hưởng của hình dạng mũi tàu tối ứng xử đâm va và độ bền uốn tới hạn còn lại của chân đế tuabin gió ngoài khơi kiểu cố định dạng monopile thông qua mô phỏng số phi tuyến bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Ba dạng hình học mũi tàu phổ biến được sử dụng bao gồm mũi quả lê, mũi chữ V và mũi hình chữ nhật được xem xét trong cùng điều kiện va chạm. Kết quả cho thấy hình dạng mũi tàu có ảnh hưởng đáng kể đến mức độ hư hỏng cục bộ và khả năng chịu lực sau va chạm của kết cấu; trong đó mũi tàu dạng quả lê gây biến dạng đâm va lớn nhất và làm suy giảm độ bền uốn tới hạn lên tới khoảng 31,2%, trong khi mũi dạng chữ V và hình chữ nhật làm giảm độ bền tương ứng khoảng 27,4% và 21,2% so với kết cấu chân đế nguyên vẹn. Các kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ cơ chế ảnh hưởng của hình học va chạm đến độ bền còn lại của chân đế monopile, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học cho công tác đánh giá an toàn, kiểm định sau va chạm và đề xuất giải pháp thiết kế, khai thác bền vững các công trình tuabin gió ngoài khơi.

Từ khóa: tuabin gió ngoài khơi; chân đế monopile; va chạm tàu; hình dạng mũi tàu; độ bền uốn tới hạn.

ASSESSMENT OF SHIP BOW GEOMETRY EFFECTS ON COLLISION RESPONSE AND RESIDUAL ULTIMATE STRENGTH OF FIXED OFFSHORE WIND TURBINE MONOPILE FOUNDATIONS

Abstract

The increasing activity of service vessels in offshore wind farm areas has increased the risk of collisions with wind turbine foundations, posing direct threats to operational safety and the residual load-carrying capacity of the structures. This study investigates the effects of ship bow geometry on collision response and the residual ultimate bending strength of fixed offshore wind turbine monopile foundations using nonlinear finite element simulations. Three representative bow geometries, namely bulbous, V-shaped, and rectangular bows, are considered under identical collision conditions. The results indicate that ship bow geometry has a significant influence on local damage characteristics and post-collision structural capacity. In particular, the bulbous bow induces the most severe collision-induced deformation and results in a reduction of the ultimate bending strength of up to approximately 31,2%. In contrast, the V-shaped and rectangular bows lead to strength reductions of about 27,4% and 21,2%, respectively, compared to the intact monopile foundation. These findings provide valuable insights into the underlying mechanisms by which collision geometry affects the residual strength of monopile foundations and offer a scientific basis for post-collision safety assessment, inspection, and the development of design and operational strategies for sustainable offshore wind turbine structures.

Keywords: offshore wind turbine; monopile foundation; ship collision; ship bow geometry; residual ultimate bending strength.

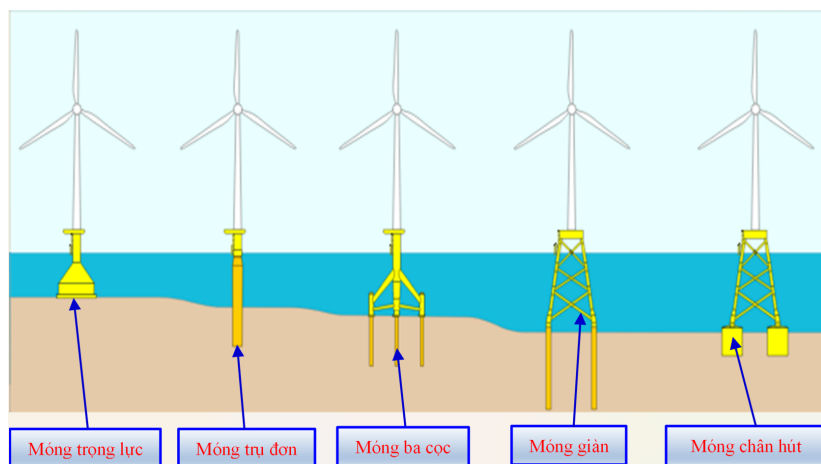
[https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20\(2V\)-05](https://doi.org/10.31814/stce.huce2026-20(2V)-05) © 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Đặt vấn đề

Trong những năm gần đây, điện gió ngoài khơi đã trở thành một trong những nguồn năng lượng tái tạo quan trọng, đóng góp tích cực vào chiến lược phát triển năng lượng bền vững và giảm phát thải khí nhà kính trên phạm vi toàn cầu [1]. Trong số các dạng chân đế được sử dụng cho tuabin gió ngoài

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: thangdq@ntu.edu.vn (Thắng, Đ. Q.)

khởi, chân đế kiểu cố định kiểu monopile được ứng dụng rộng rãi nhờ ưu điểm về kết cấu đơn giản, khả năng chịu tải tốt và hiệu quả kinh tế, đặc biệt đối với các khu vực có độ sâu nước nông nhỏ hơn 50 m. Một số mẫu chân đế tuabin gió kiểu cố định được thể hiện trên Hình 1.



Hình 1. Các mẫu chân đế tuabin gió kiểu cố định [2]

Cùng với sự gia tăng nhanh chóng về số lượng và quy mô các trang trại điện gió ngoài khơi, mật độ hoạt động của tàu thuyền trong khu vực này, bao gồm tàu dịch vụ, tàu bảo trì và tàu vận tải, ngày càng gia tăng [3]. Thực tế này làm tăng nguy cơ xảy ra va chạm giữa tàu và chân đế tuabin gió, có thể gây ra hư hỏng cục bộ nghiêm trọng, làm suy giảm khả năng chịu lực còn lại của kết cấu và ảnh hưởng trực tiếp đến an toàn khai thác cũng như tuổi thọ công trình [4–8]. Một số sự cố va chạm điển hình được minh họa trong Hình 2 và Hình 3 [9, 10]. Do đó, việc nghiên cứu ứng xử đâm va và đánh giá độ bền còn lại của chân đế monopile sau va chạm là một vấn đề có ý nghĩa khoa học và thực tiễn quan trọng.



Hình 2. Tàu dịch vụ va chạm với chân đế tuabin gió [9]



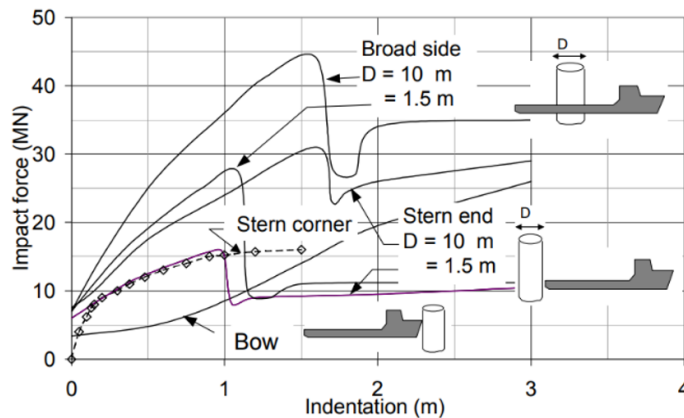
Hình 3. Vị trí hư hỏng của chân đế khi bị đâm va bởi tàu dịch vụ ở vùng biển Hollandse Kust Zuid, Hà Lan [10]

Trong thời gian qua, nhiều nhà khoa học đã nghiên cứu về đâm va giữa tàu và các kết cấu ngoài khơi thông qua thí nghiệm và mô phỏng số, tập trung xem xét ảnh hưởng của vận tốc va chạm, khối lượng tàu, điều kiện tiếp xúc và đặc tính vật liệu đến mức độ hư hỏng của kết cấu [11–18]. Điển hình như Biehl [11] đã mô phỏng va chạm giữa các loại tàu chở dầu, tàu hàng với móng cọc đơn sử dụng phần mềm thương mại LS-DYNA. Le Sourne và cs. [12] tập trung vào va chạm giữa tàu dịch vụ và móng dạng giàn (jacket). Moulas và cs. [13] phân tích va chạm giữa tàu dịch vụ và móng trụ đơn, tập trung vào dạng biến dạng và mức độ hư hỏng trong nhiều điều kiện va chạm. Bela và cs. [14] nghiên cứu va chạm tàu với móng trụ đơn, xem xét ảnh hưởng của vị trí va chạm, tác động gió và khả năng

biến dạng của tàu. Pire và cs. [15] xây dựng công thức dự đoán năng lượng và chạm hấp thụ tại chân móng jacket.

Trong phần lớn các nghiên cứu nêu trên, hình dạng mũi tàu đâm va thường được giả định đơn giản hoặc chưa được xem xét một cách hệ thống. Trên thực tế, hình dạng mũi tàu có ảnh hưởng trực tiếp đến đặc trưng tiếp xúc, cơ chế phân bố ứng suất, biến dạng và khả năng hấp thụ năng lượng trong quá trình va chạm, từ đó quyết định mức độ hư hỏng cục bộ và sự suy giảm độ bền còn lại của kết cấu [16–18]. Bên cạnh đó, theo khuyến nghị DNV-RP-C204 [19], khi đánh giá va chạm tàu với kết cấu công trình biển cần xem xét hình dạng và vị trí phần tử va chạm (mũi, mạn hoặc đuôi tàu) do ảnh hưởng trực tiếp đến diện tích tiếp xúc, mức độ tập trung ứng suất và năng lượng hấp thụ, chi tiết xem trên Hình 4. Vì vậy, trong nghiên cứu này các dạng mũi tàu điển hình được lựa chọn để khảo sát so sánh. Cho đến nay, các nghiên cứu định lượng và có tính so sánh hệ thống về ảnh hưởng của hình dạng mũi tàu đến ứng xử đâm va và độ bền uốn tới hạn còn lại của chân đế tuabin gió ngoài khơi kiểu cố định dạng monopile vẫn còn hạn chế.

Trên cơ sở các khoảng trống nghiên cứu nêu trên, bài báo này phân tích ảnh hưởng của hình dạng mũi tàu đến ứng xử đâm va và độ bền uốn tới hạn còn lại của chân đế tuabin gió ngoài khơi dạng monopile thông qua mô phỏng số phi tuyến bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Ba dạng mũi tàu phổ biến (quả lê, chữ V và chữ nhật) được xem xét trong cùng điều kiện va chạm nhằm đánh giá có hệ thống mức độ hư hỏng và sự suy giảm khả năng chịu lực của kết cấu. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho đánh giá an toàn, kiểm định sau va chạm và đề xuất các giải pháp thiết kế, khai thác bền vững cho tuabin gió ngoài khơi.



Hình 4. Đường cong lực đâm va và chuyển vị với các kiểu hình dạng đâm va khác nhau theo đề xuất của tiêu chuẩn DNV-RP-C204 [19]

2. Mô phỏng số

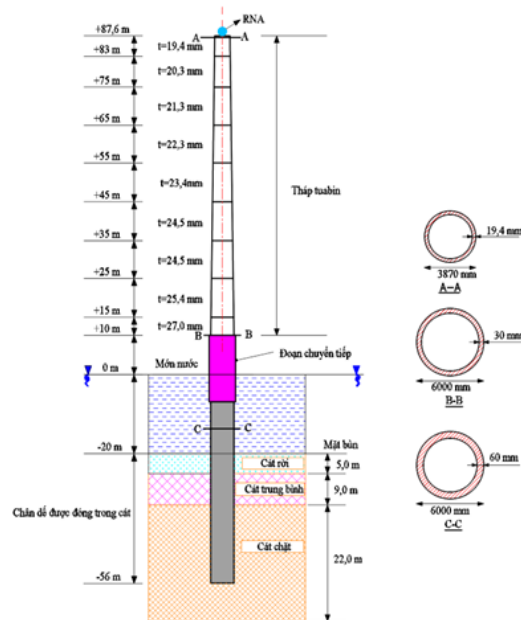
Phần này trình bày phương pháp xây dựng mô hình mô phỏng số nhằm phân tích quá trình đâm va và đánh giá độ bền còn lại của chân đế tuabin gió ngoài khơi công suất 5,0 MW theo mô hình NREL. Độ tin cậy của mô hình đã được kiểm chứng thông qua so sánh với kết quả thí nghiệm trên mô hình thu nhỏ, cho thấy sai lệch trung bình không vượt quá 5,0%. Trên cơ sở đó, mô hình số được áp dụng trực tiếp cho bài toán kết cấu thực mà không cần thực hiện thêm bước kiểm định bổ sung. Trình tự xây dựng mô hình, thiết lập điều kiện biên và các bước phân tích được tham khảo và trình bày chi tiết trong các nghiên cứu đã công bố [4–8, 20–24].

2.1. Giới thiệu các thông số cơ bản của tuabin gió ngoài khơi 5,0 MW NREL

Mô phỏng số được tiến hành trên mô hình tuabin gió ngoài khơi công suất 5,0 MW theo cấu hình tham chiếu của NREL. Kiểu kết cấu tuabin gió này hiện đang được ứng dụng rộng rãi trong thực tế tại nhiều quốc gia châu Âu như Hà Lan, Thụy Điển, Na Uy và Đức, cũng như tại một số quốc gia châu Á, điển hình là Hàn Quốc và Nhật Bản. Các thông số hình học và đặc trưng kết cấu chính của tuabin được tổng hợp trong Bảng 1, trong khi kích thước chi tiết của các bộ phận kết cấu được trình bày trong Hình 5.

Bảng 1. Thông số cơ bản của tuabin gió 5,0 MW NREL

Thông số cơ bản	Đơn vị	Giá trị
Công suất	MW	5,0
Đường kính của rotor	m	126
Tốc độ quay của rotor	rpm	12,1
Số cánh		3
Đường kính của tower tại chân đế	m	6,0
Đường kính của tower tại đỉnh	m	3,9
Độ dày tại chân đế và đỉnh của tower (phân bố tuyến tính)	mm	60; 19,4
Khối lượng của Nacell	tấn	240
Khối lượng của rotor (blade + hub)	tấn	110
Mô đun đàn hồi	MPa	210000
Ứng suất chảy	MPa	355
Ứng suất tối hạn	MPa	490

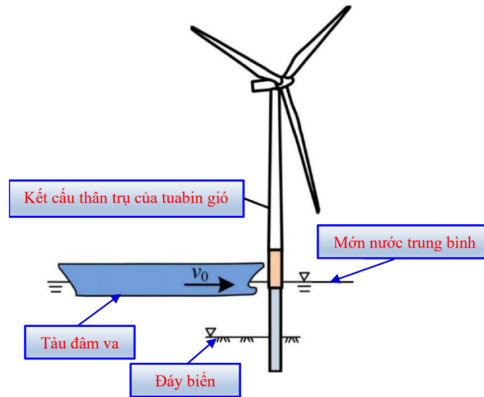


Hình 5. Sơ đồ kích thước chi tiết của tuabin gió được nghiên cứu

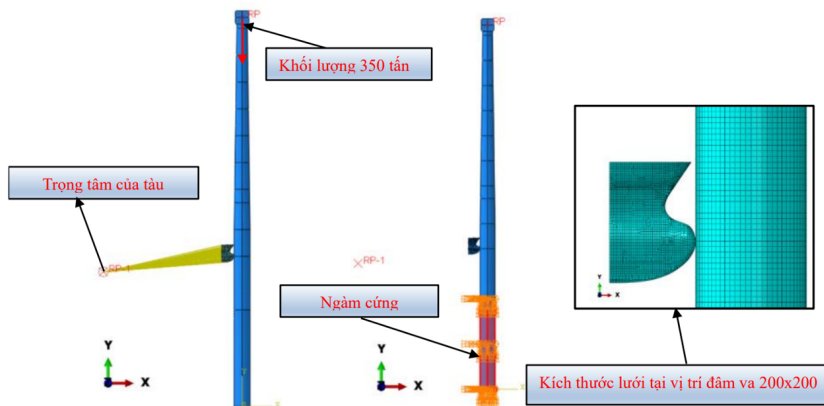
2.2. Thiết lập mô hình mô phỏng số

Sơ đồ mô phỏng kích bản đằm và giữa tàu thủy và chân đế tuabin gió kiểu cố định được thể hiện trong Hình 6. Vị trí đằm và là phần thân ống của chân đế tuabin gió tại khu vực món nước. Thiết lập

mô hình mô phỏng số được minh họa trong Hình 7. Kết cấu được rời rạc hóa bằng phần tử tấm S4R với kích thước lưới 200×200 mm, lựa chọn trên cơ sở phân tích hội tụ lưới. Tại đỉnh tháp, một điểm tham chiếu được thiết lập để gán khối lượng tương đương 350 tấn của cụm nacelle-rotor. Tàu đâm va được giả thiết là vật rắn tuyệt đối nhằm giảm số bậc tự do và tối ưu thời gian tính toán; mũi tàu được liên kết với trọng tâm hệ thống qua thuật toán coupling tại điểm tham chiếu, như trình bày trong Hình 8. Trong các kịch bản khảo sát, vận tốc đâm va được lấy bằng 5,0 m/s và lượng chiếm nước của tàu là 4000 tấn.



Hình 6. Sơ đồ mô phỏng kịch bản đâm va giữa tàu thủy và chân đế tuabin gió kiểu cố định



Hình 7. Mô hình mô phỏng số được sử dụng trong phân tích đâm va

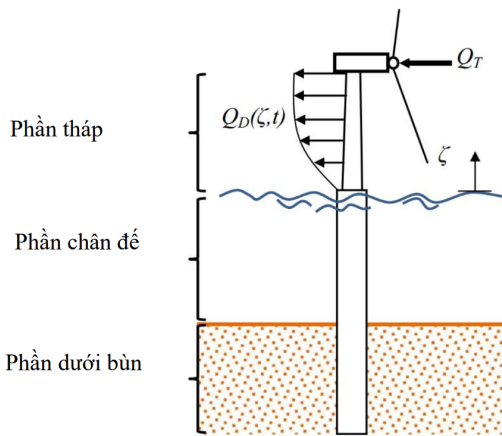


Hình 8. Mô hình tàu đâm va và mũi quả lê

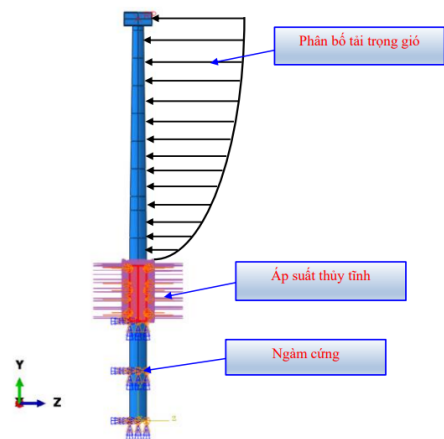
Trong phân tích độ bền sau đâm va, mô hình mô phỏng số được xây dựng cho hai trạng thái gồm kết cấu nguyên vẹn và kết cấu bị đâm va, nhằm đánh giá mức suy giảm độ bền tới hạn do tác động và chạm gây ra thông qua so sánh kết quả giữa hai trường hợp. Đối với mô hình nguyên vẹn, ảnh hưởng

của biến dạng ban đầu phát sinh trong quá trình chế tạo được xét đến, bao gồm ứng suất dư do uốn nguội các đoạn ống và do hàn nối. Trong nghiên cứu này, độ lớn của biến dạng ban đầu được xác định theo khuyến nghị của quy phạm API [24] đối với kết cấu ống ngoài khơi, với giá trị bằng 0,5% đường kính ống. Ứng suất dư sinh ra trong quá trình hàn được bỏ qua.

Trong đánh giá độ bền giới hạn của tuabin gió ngoài khơi, tải trọng gió đóng vai trò chi phối đối với nguy cơ mất ổn định và phá hủy kết cấu. Tải trọng này có đặc trưng phân bố không đều theo chiều cao tháp, với giá trị lớn nhất tập trung tại vùng rotor và nhỏ nhất gần mực nước biển. Mô hình phân bố tải trọng gió được xác định dựa trên diện tích chắn gió hiệu dụng, trong đó cụm cánh quạt là thành phần chi phối, như minh họa ở Hình 9. Mô hình mô phỏng số cho bài toán độ bền tối hạn sau đâm va được trình bày trong Hình 10. Đối với bài toán mô phỏng đâm va thì mô hình động phi tuyến theo thời gian (dynamic explicit/Abaqus) được áp dụng, trong khi bài toán mô phỏng độ bền sau đâm va thì mô hình tĩnh phi tuyến (Static Riks/Abaqus) được áp dụng.



Hình 9. Mô hình tải trọng gió



Hình 10. Mô hình mô phỏng số cho bài toán độ bền tối hạn sau đâm va

2.3. Định nghĩa vật liệu

Trong mô phỏng va chạm, các đặc trưng vật liệu được xác định theo các công thức đã được đề xuất trong các nghiên cứu trước đây [6–9]. Khi năng lượng va chạm vượt quá một ngưỡng nhất định, hiện tượng nứt gãy của vật liệu có thể xảy ra, trong nghiên cứu này mô hình phá hủy Hosford–Coulomb được áp dụng để mô phỏng quá trình phá hủy. Mô hình này đã được chứng minh có độ tin cậy cao trong phân tích phá hủy của các kết cấu công trình biển. Quy trình xây dựng và triển khai mô hình Hosford–Coulomb được trình bày chi tiết trong các tài liệu tham khảo [21, 23, 25].

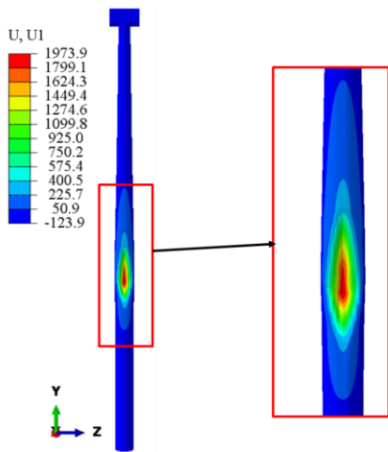
3. Kết quả mô phỏng số

3.1. Mô phỏng đâm va

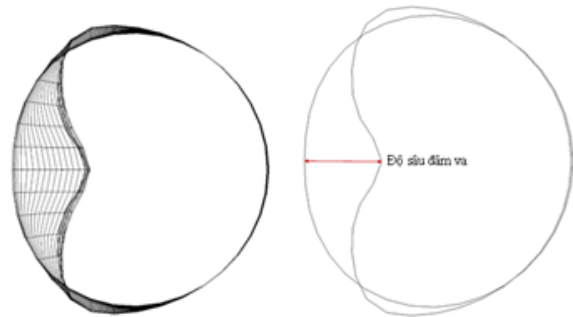
Phân bố biến dạng của chân tuabin gió sau va chạm được minh họa trong Hình 11. Kết quả mô phỏng cho thấy biến dạng lõm theo phương trục OX xuất hiện rõ ràng tại khu vực chịu tác động trực tiếp của mũi tàu dạng quả lê. Giá trị biến dạng lớn nhất, thể hiện bằng các dải màu từ vàng đến đỏ, tập trung tại vùng tiếp xúc và giảm dần theo cả phương dọc trục OZ và phương chu vi OY . Dạng phân bố này cho thấy cơ chế lan truyền biến dạng đặc trưng của kết cấu ống chịu tải động cục bộ, trong đó biến dạng dẻo bắt đầu tại vùng đâm va và phát triển đối xứng ra các khu vực xung quanh.

Hình 12 minh họa mặt cắt ngang của chân tuabin tại cao độ chịu tác động va chạm, qua đó làm rõ cơ chế suy giảm tiết diện sau va chạm. Kết quả cho thấy tiết diện tròn ban đầu bị biến dạng đáng kể

và chuyển sang dạng elip, trong đó trục ngắn định hướng theo phương tác dụng của lực va chạm. Độ sâu biến dạng lớn nhất tại tâm vùng lõm, ký hiệu là d , đạt giá trị 1974 mm tương ứng với vận tốc va chạm 5,0 m/s.

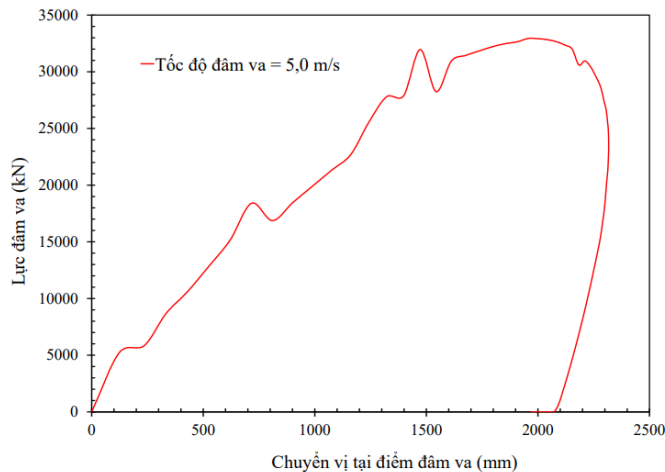


Hình 11. Kết quả mô phỏng độ sâu biến dạng ứng với vận tốc đâm va 5,0 m/s



Hình 12. Mặt cắt ngang của tại vị trí đâm va có độ sâu biến dạng lớn nhất

Đường cong quan hệ giữa lực đâm va và chuyển vị trong Hình 13 phản ánh rõ tính phi tuyến của quá trình va chạm. Ở giai đoạn đầu, lực tăng nhanh tương ứng với ứng xử đàn hồi của kết cấu, sau đó xuất hiện các dao động do tương tác giữa biến dạng dẻo cục bộ và rung động đàn hồi. Khi lực đạt giá trị cực đại, sự suy giảm đột ngột xảy ra, cho thấy hiện tượng mất ổn định cục bộ của kết cấu.

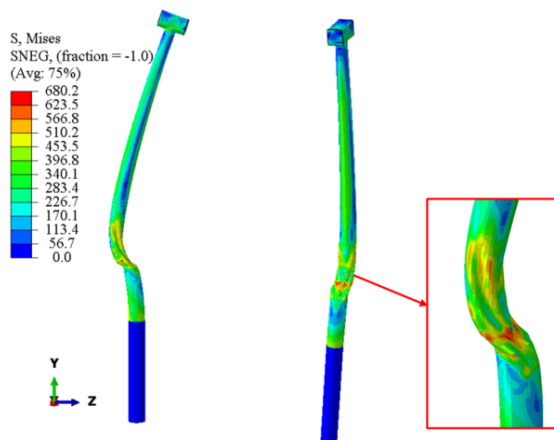


Hình 13. Quan hệ lực va chạm và chuyển vị tại vận tốc 5,0 m/s

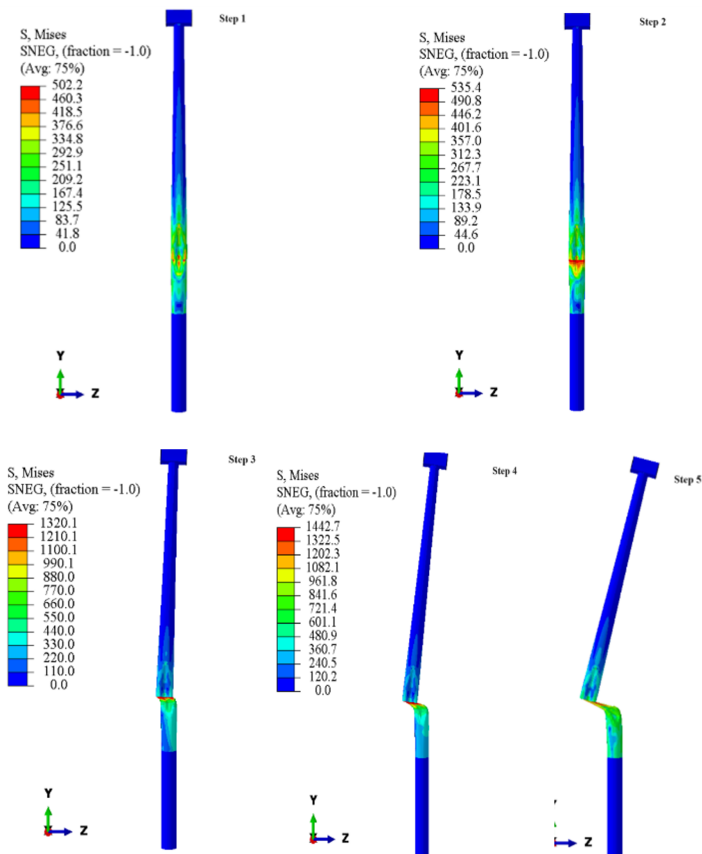
3.2. Mô phỏng độ bền uốn tới hạn sau đâm va

Trong trạng thái nguyên vẹn, phân bố tải trọng gió theo chiều cao tháp tạo ra mô men uốn tăng dần và đạt cực đại tại khu vực gần môn nước, được xác định là tiết diện nguy hiểm của monopile. Như minh họa ở Hình 14, kết cấu làm việc tương tự dầm console, với ứng suất và biến dạng von Mises phát triển mạnh tại vị trí này. Ứng suất lớn nhất đạt khoảng 680,2 MPa, cho thấy kết cấu làm việc gần ngưỡng chịu lực. Quá trình phá hủy diễn ra theo cơ chế mất ổn định, bắt đầu từ biến dạng uốn lớn, tiếp theo là mất ổn định cục bộ tại vùng môn nước và kết thúc bằng sụp đổ toàn cục khi vượt quá mô

men uốn tới hạn. Mô men giới hạn thu được là 863,0 GN.m và được sử dụng làm giá trị tham chiếu để đánh giá ảnh hưởng của va chạm.



Hình 14. Kết quả mô phỏng biến dạng uốn của mô hình nguyên vẹn

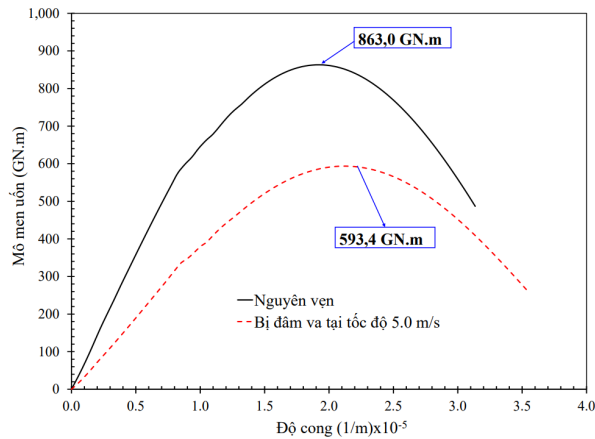


Hình 15. Quá trình phá hủy của kết cấu tuabin gió đã bị đâm và dưới tải trọng uốn

Sau khi chịu hư hỏng do va chạm, trường ứng suất và biến dạng dư tại vùng lõm làm thay đổi đáng kể cơ chế chịu uốn của kết cấu. Quá trình phá hủy minh họa trong Hình 15 cho thấy quá trình mất ổn định khởi phát từ biến dạng cục bộ tại vị trí va chạm. Ở giai đoạn đầu, ứng suất tập trung lớn xuất hiện tại vùng lõm, khi tải trọng uốn tăng, khu vực này trở thành điểm khởi phát mất ổn định, làm suy

giảm khả năng phân bố ứng suất theo phương dọc thân ống. So với mô hình nguyên vẹn, mất ổn định cục bộ phát triển nhanh hơn và vị trí phá hủy dịch chuyển từ vùng môn nước về đúng vị trí va chạm. Khi tải trọng tiến gần giá trị tới hạn, vùng lõm ban đầu phát triển thành nứt cục bộ, dẫn đến sụp đổ toàn bộ thân ống, cho thấy ảnh hưởng đáng kể của va chạm đến độ bền kết cấu.

Kết quả so sánh mô men uốn tới hạn của mô hình nguyên vẹn và mô hình bị đâm va được thể hiện trong Hình 16. Tại vận tốc va chạm 5,0 m/s, mô men uốn tới hạn của kết cấu bị hư hỏng chỉ đạt 593,4 GN.m, thấp hơn đáng kể so với giá trị 863,0 GN.m của mô hình nguyên vẹn, tương ứng mức suy giảm độ bền tới hạn là 31,2%. Đáng chú ý, sự suy giảm lớn này xảy ra trong khi độ sâu biến dạng do va chạm chỉ khoảng 1974 mm, cho thấy biến dạng cục bộ dù nhỏ vẫn có thể gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến khả năng chịu lực tổng thể của kết cấu. Kết quả này khẳng định đâm va là dạng tải trọng đặc biệt nguy hiểm đối với các kết cấu tuabin gió ngoài khơi kiểu monopile.

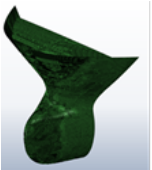
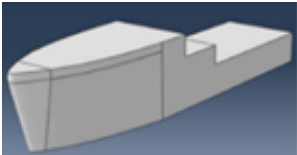
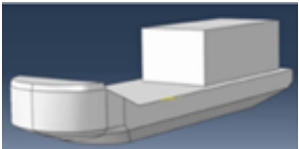


Hình 16. Quan hệ mô men uốn và độ cong của mô hình nguyên vẹn và mô hình bị đâm va

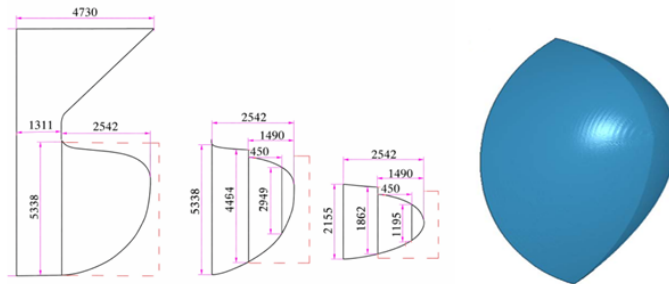
4. Ảnh hưởng của hình dạng mũi tàu khi đâm va

Hình dạng mũi tàu là một trong những yếu tố quan trọng quyết định đến diện tích tiếp xúc giữa hai đối tượng đâm va, mức độ tập trung ứng suất và khả năng hấp thụ năng lượng trong quá trình đâm va giữa tàu thủy và chân đế tuabin gió ngoài khơi. Để làm rõ ảnh hưởng của yếu tố này, nghiên cứu tiến hành so sánh ba dạng hình học mũi tàu phổ biến, bao gồm mũi quả lê, mũi chữ V và mũi hình chữ nhật, trong cùng điều kiện va chạm về vận tốc, khối lượng tàu và vị trí đâm va.

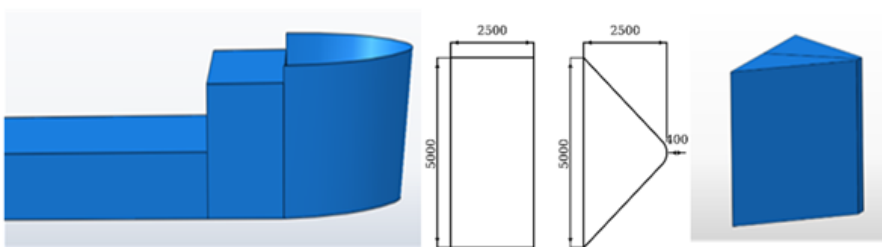
Bảng 2. Kích thước cơ bản của các tàu đâm va

			
	Tàu chở hàng rời	Tàu dịch vụ công trình	Sà lan dịch vụ công trình
Chiều dài lớn nhất (m)	76,0	65,0	71,0
Chiều rộng (m)	16,0	14,4	20,0
Chiều chìm (m)	4,2	4,0	3,5
Lượng giãn nước (tấn)	4000	4000	4000

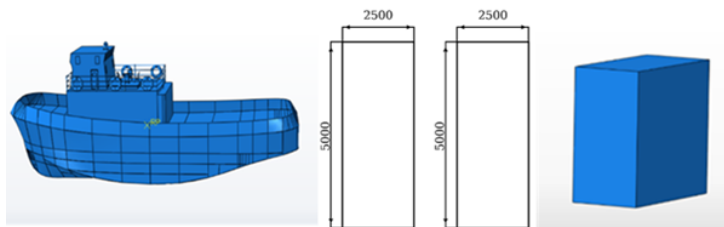
Bảng 2 trình bày tóm tắt các thông số chính của các tàu va chạm được sử dụng trong nghiên cứu này. Tổng khối lượng va chạm của tàu đại diện được giả định bằng 4000 tấn. Vận tốc va chạm được giữ cố định ở mức 5,0 m/s, đồng thời các góc sắc của mũi chữ V và mũi hình chữ nhật được bo tròn nhằm mô phỏng sát hơn hình học thực tế của tàu. Hai kịch bản đầu tiên mô phỏng va chạm tại khu vực mũi tàu, trong khi kịch bản thứ ba đại diện cho các trường hợp va chạm tại đuôi tàu hoặc mạn tàu, điển hình cho tình huống cập bến của sà lan ngoài khơi. Các hình dạng mũi tàu đơn giản hóa được mô tả trong Hình 17.



(a) Mũi quả lê



(b) Mũi hình chữ V



(c) Mũi hình chữ nhật

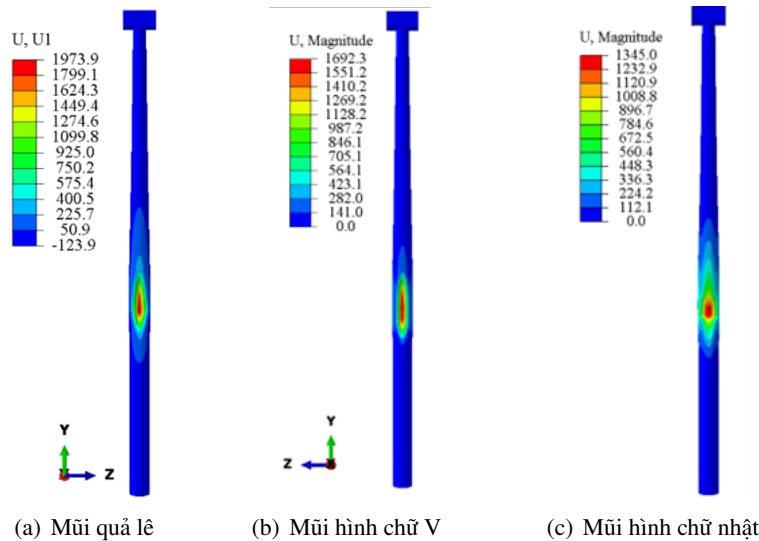
Hình 17. Các hình dạng mũi tàu đơn giản hóa của tàu đấm va

4.1. Ứng xử đấm va và đặc trưng biến dạng cục bộ

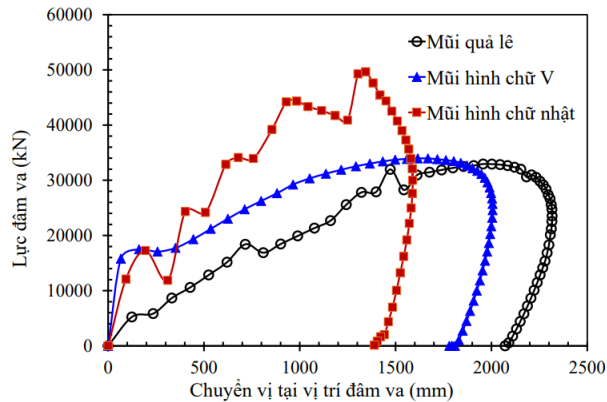
Hình 18 trình bày các dạng biến dạng thu được của kết cấu monopile ứng với các kiểu mũi tàu đấm va khác nhau. Kết quả mô phỏng cho thấy hình dạng mũi tàu có ảnh hưởng rõ rệt đến cơ chế tiếp xúc và sự phát triển biến dạng cục bộ của chân đế monopile. Đối với mũi tàu dạng quả lê, tiếp xúc ban đầu xảy ra trên một diện tích nhỏ, dẫn đến sự tập trung ứng suất cao và hình thành biến dạng lõm sâu tại vùng va chạm. Biến dạng dẻo phát triển mạnh theo phương xuyên tâm, đồng thời lan truyền đối xứng theo chu vi và chiều cao thân ống. Ngược lại, mũi tàu dạng chữ V tạo ra tiếp xúc dạng đường, làm phân tán một phần tải trọng va chạm theo phương chu vi, nhờ đó mức độ tập trung ứng suất và độ sâu biến dạng giảm so với trường hợp mũi quả lê. Trong khi đó, mũi tàu hình chữ nhật có diện tích

tiếp xúc lớn nhất, dẫn đến sự phân bố ứng suất đều hơn và mức độ biến dạng cục bộ nhỏ nhất trong ba trường hợp khảo sát.

Sự khác biệt về hình dạng mũi tàu dẫn đến sự khác biệt đáng kể trong cơ chế hấp thụ năng lượng va chạm. Mũi quả lê, do gây ra biến dạng dẻo tập trung mạnh, làm tăng tỷ lệ năng lượng va chạm được tiêu tán thông qua biến dạng không hồi phục của kết cấu monopile. Trong khi đó, đối với mũi chữ V và mũi chữ nhật, một phần năng lượng va chạm được phân tán thông qua biến dạng đàn hồi và lan truyền dao động, làm giảm mức độ tổn thất năng lượng do biến dạng dẻo cục bộ.



Hình 18. Kết quả mô phỏng biến dạng dẻo và của các hình dạng mũi tàu khác nhau



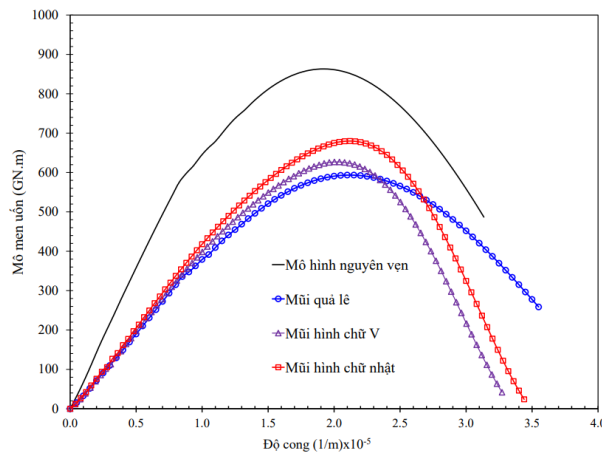
Hình 19. Quan hệ lực va chạm và chuyển vị với các kiểu mũi đâm và khác nhau

Hình 19 thể hiện các đường cong quan hệ lực va chạm và chuyển vị ứng với từng hình dạng mũi tàu. Khi phân tích riêng từng trường hợp, mũi tàu dạng quả lê (bán cầu) tạo ra mức tải cục bộ lớn nhất lên thành ống. Chuyển vị gây ra bởi mũi quả lê vượt quá các giá trị tương ứng của mũi chữ V và mũi hình chữ nhật lần lượt là 14,0% và 35,11%. Ngược lại, trường hợp va chạm bằng mũi hình chữ nhật tạo ra biến dạng nhỏ nhất do lực va chạm được phân bố trên một diện tích tiếp xúc rộng hơn.

4.2. Độ bền uốn tới hạn còn lại sau đâm va

So sánh mức độ sụt giảm độ bền uốn tới hạn khi bị đâm va bởi các kiểu mũi tàu khác nhau được thể hiện trên Hình 20. Sự khác biệt về mức độ hư hỏng cục bộ do hình dạng mũi tàu gây ra dẫn đến sự suy giảm khác nhau về độ bền uốn tới hạn còn lại của chân đế monopile. Kết quả phân tích độ bền sau va chạm cho thấy trường hợp mũi tàu dạng quả lê gây suy giảm độ bền lớn nhất, với mô men uốn tới hạn giảm khoảng 31,2% so với mô hình nguyên vẹn. Đối với mũi chữ V, mức suy giảm tương ứng khoảng 27,4%, trong khi mũi chữ nhật chỉ làm giảm khoảng 21,2%, như tổng hợp trong Bảng 3. Do đó, có thể khẳng định rằng tàu được trang bị mũi bán cầu gây ra mức độ hư hỏng nghiêm trọng nhất đối với khả năng chịu lực của chân đế tuabin gió ngoài khơi dạng monopile.

Từ các kết quả phân tích, có thể khẳng định rằng hình dạng mũi tàu là một trong những yếu tố có ảnh hưởng lớn đến ứng xử đâm va và độ bền còn lại của chân đế tuabin gió ngoài khơi kiểu monopile. Các mũi tàu có hình dạng tập trung lực cao, điển hình là mũi quả lê, gây ra mức độ hư hỏng cục bộ và suy giảm độ bền lớn hơn đáng kể so với các dạng mũi có diện tích tiếp xúc lớn. Do đó, việc xét đến hình dạng mũi tàu trong các kịch bản va chạm là cần thiết nhằm đánh giá chính xác mức độ rủi ro và đề xuất các giải pháp thiết kế, kiểm định và quản lý an toàn phù hợp cho các công trình tuabin gió ngoài khơi.



Hình 20. Quan hệ mô men uốn và độ cong với các hình dạng mũi đâm va khác nhau

Bảng 3. Tổng hợp kết quả mô phỏng số đối với các hình dạng mũi đâm va khác nhau

Các mô hình	Độ sâu đâm va, d_{max} (mm)	Mô men uốn giới hạn, $M_{u,max}$ (GN.m)
Mô hình nguyên vẹn	–	863
Mũi quả lê	1968	593,4 (–31,2 %)
Mũi hình chữ V	1692 (–14,0 %)	626,8 (–27,4 %)
Mũi hình chữ nhật	1277 (–35,11 %)	680 (–21,2 %)

5. Kết luận

Nghiên cứu này đã phân tích một cách toàn diện ảnh hưởng của hình dạng mũi tàu đến ứng xử đâm va và độ bền uốn tới hạn còn lại của chân đế tuabin gió ngoài khơi dạng monopile thông qua mô phỏng số phi tuyến bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Trên cơ sở mô hình tuabin gió ngoài khơi 5,0 MW NREL, ba dạng mũi tàu phổ biến gồm mũi quả lê, mũi chữ V và mũi hình chữ nhật được phân tích trong cùng điều kiện va chạm, cho phép đánh giá định lượng và so sánh có hệ thống mức

độ hư hỏng cũng như khả năng chịu lực còn lại của kết cấu. Từ các kết quả thu được, một số kết luận chính được rút ra như sau:

- Kết quả mô phỏng cho thấy hình dạng mũi tàu có ảnh hưởng lớn tới cơ chế tiếp xúc và sự phát triển biến dạng cục bộ của thân ống monopile trong quá trình đâm va. Các mũi tàu có hình dạng tập trung lực cao, điển hình là mũi quả lê, gây ra ứng suất cục bộ lớn và biến dạng lõm sâu tại vùng va chạm, trong khi mũi chữ V và mũi hình chữ nhật giúp phân tán tải trọng va chạm trên diện tích tiếp xúc lớn hơn, từ đó làm giảm mức độ tập trung ứng suất và hạn chế sự phát triển của biến dạng dẻo cục bộ. Sự khác biệt này phản ánh rõ vai trò của hình học va chạm trong cơ chế hấp thụ và phân bổ năng lượng.

- Phân tích độ bền uốn tới hạn sau va chạm chỉ ra rằng các hư hỏng cục bộ, dù có biên độ hình học tương đối nhỏ, vẫn có thể gây ra sự suy giảm đáng kể khả năng chịu lực tổng thể của chân đế monopile. Trong điều kiện vận tốc va chạm 5,0 m/s, mô men uốn tới hạn của kết cấu bị suy giảm lần lượt khoảng 31,2%, 27,4% và 21,2% đối với các trường hợp mũi quả lê, mũi chữ V và mũi hình chữ nhật so với mô hình nguyên vẹn. Điều này cho thấy mối liên hệ phi tuyến rõ rệt giữa biến dạng cục bộ do va chạm và khả năng mất ổn định uốn toàn cục của kết cấu, đồng thời khẳng định rằng hình dạng mũi tàu là một tham số then chốt trong đánh giá độ bền còn lại sau va chạm.

- Nghiên cứu đã làm sáng tỏ cơ chế ảnh hưởng của hình học mũi tàu đến chuỗi tương tác từ đâm va cục bộ đến suy giảm độ bền uốn tới hạn của chân đế tuabin gió ngoài khơi dạng monopile, qua đó góp phần thu hẹp khoảng trống nghiên cứu trong lĩnh vực đánh giá độ bền còn lại sau va chạm của các kết cấu tuabin gió ngoài khơi. Các kết quả thu được không chỉ có ý nghĩa đối với bài toán va chạm tàu và kết cấu chân đế tuabin gió mà còn có thể mở rộng cho các kết cấu ống ngoài khơi chịu tác động của tải trọng động cục bộ như các kiểu giàn khoan, công trình biển kiểu cylinder.

- Các phát hiện của nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học đáng tin cậy cho công tác đánh giá an toàn sau va chạm, kiểm định kết cấu và xây dựng các kịch bản rủi ro thực tế cho các trang trại điện gió ngoài khơi. Kết quả cũng nhấn mạnh sự cần thiết phải xem xét đến hình dạng mũi tàu trong các tiêu chí thiết kế, đánh giá rủi ro và quản lý vận hành, thay vì chỉ dựa trên các tham số va chạm truyền thống như vận tốc hay khối lượng tàu.

- Trong các nghiên cứu tiếp theo, việc mở rộng mô hình để xem xét ảnh hưởng của tương tác đất-kết cấu, các điều kiện va chạm xiên, và tải trọng môi trường sẽ góp phần nâng cao hơn nữa độ tin cậy và tính toàn diện của các đánh giá về độ bền còn lại của chân đế tuabin gió ngoài khơi trong điều kiện khai thác thực tế.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.01-2023.22.

Tài liệu tham khảo

- [1] Global Wind Energy Council (2022). Global Wind Report 2022 - Annual market update. Technical report, GWEC, pp. 1–154.
- [2] Hakai Magazine. *Designing against disaster*. Truy cập ngày 20/12/2024.
- [3] Caithness Windfarm Information Forum. *Wind turbine accident data*. Truy cập ngày 20/12/2024.
- [4] Do, Q. T., Huynh, V. N., Tran, D. T. (2020). [Numerical studies on residual strength of dented tension leg platforms under compressive load](#). *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*, 14(3): 96–109.
- [5] Do, Q. T., Huynh, V. V., Cho, S.-R., Vu, M. T., Vu, Q. V., Thai, D. K. (2021). [Residual ultimate strength formulations of locally damaged steel stiffened cylinders under combined loads](#). *Ocean Engineering*, 225: 108802.

- [6] Do, Q. T., Muttaqie, T., Nhut, P.-T., Vu, M. T., Khoa, N. D., Prabowo, A. R. (2022). [Residual ultimate strength assessment of submarine pressure hull under dynamic ship collision](#). *Ocean Engineering*, 266: 112951.
- [7] Do, Q. T., Huynh, V. V., Vu, M. T., Tuyen, V. V., Pham, T. N., Tra, T. H., Vu, Q. V., Cho, S.-R. (2020). [A new formulation for predicting the extent damage of steel stiffened cylinders subjected to dynamic lateral mass impact](#). *Applied Sciences*, 10(11):3856.
- [8] Do, Q. T., Muttaqie, T., Shin, H. K., Cho, S.-R. (2018). [Dynamic lateral mass impact on steel stringer-stiffened cylinders](#). *International Journal of Impact Engineering*, 116:105–126.
- [9] Offshore Wind (2022). [Vattenfall shows damage caused by cargo ship adrift at Hollandse Kust Zuid offshore wind farm](#). Truy cập ngày 20/12/2024.
- [10] Offshore Energy. [Cargo ship strikes Orsted's Gode Wind 1 offshore wind farm, suffers massive damage](#). Truy cập ngày 20/12/2024.
- [11] Biehl, F. (2005). Collision safety analysis of offshore wind turbines. *Proceedings of the 4th LS-DYNA European Conference*, 3:27–34.
- [12] Le Sourne, H., Barrera, A., Maliakel, J. (2015). Numerical crashworthiness analysis of an offshore wind turbine jacket impacted by a ship. *Journal of Marine Science and Technology*, 23(5):694–704.
- [13] Moulas, D., Shafiee, M., Mehmanparast, A. (2017). [Damage analysis of ship collisions with offshore wind turbine foundations](#). *Ocean Engineering*, 143:149–162.
- [14] Bela, A., Le Sourne, H., Buldgen, L., Rigo, P. (2017). [Ship collision analysis on offshore wind turbine monopile foundations](#). *Marine Structures*, 51:220–241.
- [15] Pire, T., Le Sourne, H., Echeverry, S., Rigo, P. (2018). [Analytical formulations to assess the energy dissipated at the base of an offshore wind turbine jacket impacted by a ship](#). *Marine Structures*, 59: 192–218.
- [16] Song, M., Jiang, Z., Yuan, W. (2021). [Numerical and analytical analysis of a monopile supported offshore wind turbine under ship impacts](#). *Renewable Energy*, 172:988–1002.
- [17] Liu, X., Jiang, D., Liufu, K., Fu, J., Liu, Q., Li, Q. (2022). [Numerical investigation into impact responses of an offshore wind turbine jacket foundation subjected to ship collision](#). *Ocean Engineering*, 248:110825.
- [18] Ha, K., Kim, J. B. (2022). [Collision analysis and residual longitudinal strength evaluation of a 5 MW spar floating offshore wind turbine impacted by a ship](#). *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 9(3):841–858.
- [19] DNV-RP-C204 (2017). *Design against accidental loads*. DNV GL, Høvik, Norway.
- [20] Do, Q. T., Dang, X.-P., Tran, H. T., Tuyen, V. V., Prabowo, A. R., Tran, D. H. (2024). [Parametric study of side collision-induced denting failures on the ultimate strength of a handy-size container ship under vertical bending](#). *Ocean Engineering*, 309:118534.
- [21] Park, S.-H., Yoon, S.-H., Muttaqie, T., Do, Q. T., Cho, S.-R. (2023). [Effects of local denting and fracture damage on the residual longitudinal strength of box girders](#). *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(1):1–23.
- [22] Do, Q. T., Ghanbari-Ghazijahani, T., Rio, A. (2023). [Developing empirical formulations to predict residual strength and damages in tension-leg platform hulls after a collision](#). *Ocean Engineering*, 286: 115668.
- [23] Thăng, Đ. Q., Chí, L. X., Quân, N. V. (2021). [Nghiên cứu độ bền của kết cấu chân giàn khoan biển cố định bằng thép khi bị tàu đâm va](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 15(2V): 79–97.
- [24] Nguyen, H. V., Huynh, V. V., Cho, S.-R., Park, S.-H., Prabowo, A. R., Vu, V. T., Mai, T. V., Do, Q. T. (2025). [Residual ultimate strength of a container ship under dropped object impact: numerical simulations and empirical formulations](#). *Ocean Engineering*, 341:122732.
- [25] API RP 2A-WSD (2014). *Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms – working stress design, 22nd edition*. American Petroleum Institute, Washington D.C.