

ĐÁNH GIÁ ỨNG XỬ ĐÂM VA VÀ ĐỘ BỀN DƯ CỦA KẾT CẤU TÀU VỎ COMPOSITE KHI BỊ TÀU ĐÂM VA

Nguyễn Công Chánh^a, Đinh Đức Tiến^a, Trương Đắc Dũng^b, Đỗ Quang Thắng^{b,*}

^a*Viện nghiên cứu chế tạo Tàu thủy, Trường Đại học Nha Trang,*

Số 44 Hòn Rớ, phường Nam Nha Trang, Khánh Hòa, Việt Nam

^b*Khoa Kỹ thuật Giao thông, Trường Đại học Nha Trang,*

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

Nhận ngày 26/8/2025, Sửa xong 23/10/2025, Chấp nhận đăng 20/11/2025

Tóm tắt

Nghiên cứu này trình bày kết quả mô phỏng số về ứng xử và độ bền dư của kết cấu tàu vỏ composite khi bị đâm va bởi tàu khác với các kịch bản đâm khác nhau. Đầu tiên, phương pháp mô phỏng số được xây dựng trên phần mềm thương mại ABAQUS. Để kiểm nghiệm độ chính xác và tin cậy của phương pháp mô phỏng số đã xây dựng, các kết quả mô phỏng số được so sánh với các dữ liệu thí nghiệm và phân tích lý thuyết đã được công bố cho các bài toán va chạm trên tấm composite. Tiếp theo, các nghiên cứu khảo sát tham số được thực hiện trên mô hình tàu vỏ composite thực tế để đánh giá mức độ sụt giảm độ bền kết cấu trong hai trường hợp nguy hiểm là tàu trên đỉnh sóng và tàu trên đáy sóng. Sự ảnh hưởng của các tham số như tốc độ, khối lượng, vị trí va chạm cũng như hình dạng mũi tàu đâm va tới ứng xử đâm va và độ bền dư của kết cấu đã được khảo sát và đánh giá chi tiết. Các kết quả nghiên cứu này không chỉ có thể áp dụng để dự báo độ bền dư của các tàu thực tế sau sự cố đâm va mà còn là dữ liệu ban đầu vào quan trọng cho giai đoạn thiết kế sơ bộ nhằm nâng cao khả năng chống va chạm cho kết cấu tàu composite.

Từ khoá: độ bền dư; tàu vỏ composite; mô phỏng số; tàu đâm va; tiêu chuẩn phá hủy Hashin.

ASSESSMENT OF IMPACT RESPONSE AND RESIDUAL STRENGTH OF COMPOSITE SHIP STRUCTURES UNDER SHIP COLLISION

Abstract

This study presents the numerical simulation results of the behavior and residual strength of a composite ship structure when it collides with service vessel under various scenarios. Initially, a numerical simulation method is developed using the commercial software ABAQUS. To validate the accuracy and reliability of the developed simulation methodology, the numerical results are compared with experimental data and theoretical analyses for composite plate impact problems published by other researchers. Subsequently, parametric studies are conducted on a realistic composite ship hull model to assess the degradation of structural strength under two critical conditions: hogging and sagging. The effects of parameters such as collision speed, mass, impact location, and the geometry of the striking ship's bow on the collision behavior and residual strength of the structure have been thoroughly investigated and evaluated. The results from the study not only provide a predictive method for evaluating the residual strength of actual composite ships but also valuable input data for optimizing design, facilitating improved collision performance of composite ship structures.

Keywords: residual strength; composite ship hull; numerical simulation; ship collision; Hashin failure criterion.

[https://doi.org/10.31814/stee.huce2025-19\(4V\)-09](https://doi.org/10.31814/stee.huce2025-19(4V)-09) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Đặt vấn đề

Trong những năm gần đây, sự phát triển nhanh chóng của vật liệu composite trong ngành đóng tàu đã mở ra nhiều cơ hội cho việc thiết kế và chế tạo các kết cấu tàu biển nhẹ, bền và hiệu quả hơn. So với vật liệu kim loại truyền thống như thép hoặc nhôm, vật liệu composite đặc biệt là các loại cốt sợi như sợi thủy tinh gia cường nhựa nền polymer (GFRP) đã mang lại nhiều lợi thế vượt trội như khối lượng riêng thấp, khả năng chống ăn mòn cao, đặc tính giảm chấn tốt, thời gian bảo dưỡng định kỳ dài và linh hoạt trong thiết kế hình học [1–3]. Những ưu điểm này khiến composite (GFRP) trở thành lựa chọn tối ưu cho các loại tàu nhỏ, tàu tuần tra, tàu cao tốc, tàu cá, tàu dịch vụ gần bờ hoặc các tàu nghiên cứu chuyên dụng [4, 5].

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

Trong thực tiễn vận hành, tàu vỏ composite thường xuyên đối mặt với các nguy cơ va chạm từ tàu khác, đặc biệt là tàu dịch vụ, tàu cá hoặc vật thể trôi nổi trong khu vực cảng và vùng ven bờ nơi mà tần suất và cường độ va chạm có thể gây ra các hư hỏng nghiêm trọng cho kết cấu thân tàu. Các vụ va chạm tàu thường gây ra các thiệt hại nghiêm trọng như phá hủy kết cấu thân tàu tại vị trí va chạm gây ra sự cố tràn dầu, chìm tàu, ô nhiễm môi trường dẫn tới thiệt hại kinh tế và thậm chí tính mạng con người [6]. Đặc biệt, vỏ tàu composite có cơ chế phá hủy khá phức tạp khi chịu tác động đột ngột từ tải trọng va chạm hoặc đâm va. Không giống như vật liệu kim loại vốn có khả năng biến dạng dẻo hấp thụ năng lượng va chạm, composite thường trải qua quá trình hư hỏng giòn với các cơ chế như nứt ma trận, bong tách lớp, đứt sợi và tách lớp vỏ ngoài, dẫn đến sự suy giảm nhanh chóng khả năng chịu tải sau va chạm [7].

Các va chạm giữa tàu dịch vụ và tàu vỏ composite hoặc vật thể trôi nổi có thể dẫn đến phá hủy cục bộ kết cấu, gây nguy cơ mất ổn định và ảnh hưởng trực tiếp đến an toàn hàng hải. Trong nhiều tình huống, điều cấp thiết ngay sau va chạm là phải đánh giá nhanh tình trạng phá hủy kết cấu tại khu vực bị đâm va để xác định khả năng tiếp tục vận hành an toàn của tàu, ví dụ như quay trở lại cảng để sửa chữa hoặc tiếp tục hành trình. Tuy nhiên, việc sửa chữa tức thời các hư hỏng trên biển thường gặp nhiều hạn chế do điều kiện thời tiết, vị trí hoạt động và cả yêu cầu kinh tế – kỹ thuật. Do đó, một đánh giá đáng tin cậy về độ bền dư sau va chạm của kết cấu tàu là điều kiện tiên quyết để hỗ trợ quyết định vận hành cũng như đề xuất phương án sửa chữa phù hợp [8–13].

Việc đánh giá ứng xử đâm va và dự đoán độ bền dư của kết cấu sau va chạm giúp tính toán, tối ưu chế tạo kết cấu có độ bền tốt hơn. Hiện nay, hai phương pháp chính nghiên cứu va chạm tốc độ thấp của kết cấu là kiểm tra cơ tính bằng thực nghiệm và mô phỏng số [14–21]. Do yêu cầu cao về kinh phí của phương pháp thực nghiệm, nhiều nghiên cứu sử dụng phương pháp số để mô phỏng quá trình va chạm tốc độ thấp của kết cấu. Hiện nay đã có một số nghiên cứu mô phỏng va chạm trên vật liệu composite. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu này chỉ tập trung vào tấm phẳng trong điều kiện lý tưởng hóa hoặc cấu kiện riêng lẻ với tải trọng đơn giản tại phòng thí nghiệm. Các nghiên cứu này đã giúp làm sáng tỏ quá trình hấp thụ năng lượng và cơ chế phá hủy vật liệu nhưng lại chưa phản ánh đầy đủ các tình huống thực tế, trong đó va chạm xảy ra trên kết cấu tàu khi đâm va với tàu khác hoặc vật rắn trôi nổi, có tải trọng biên phức tạp và tương tác với sóng biển. Đặc biệt, còn thiếu các nghiên cứu đánh giá hệ quả va chạm trong điều kiện làm việc điển hình của tàu khi tàu trên đỉnh sóng và đáy sóng. Cụ thể là phân tích chi tiết về mức giảm độ bền dư gắn với từng kịch bản va chạm như thay đổi vận tốc, vị trí va chạm hay hình dạng mũi tàu đâm.

Có một số các nghiên cứu tiên phong về độ bền giới hạn và ứng xử sau va chạm của tàu khi tàu trên đỉnh sóng và đáy sóng. Tiêu biểu như nghiên cứu của Tatsumi và cs. [22] về độ bền tàu container dưới tác động đồng thời của mô men uốn và tải trọng cục bộ, hay các phân tích của Qinghu Wang và cs. [23], George Jagite và cs. [24] trên các tàu container cỡ lớn 16,000 TEU. Gần đây hơn, Do và cs. [10] và Park và cs. [25] đã thực hiện thí nghiệm và mô phỏng số ứng xử va chạm và độ bền dư sau va chạm của box girder. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu trên đều tập trung vào đối tượng tàu vỏ thép. Các kết quả này không thể ngoại suy hoặc áp dụng cho tàu vỏ composite do sự khác biệt căn bản về đặc tính vật liệu và cơ chế phá hủy. Tới thời điểm hiện tại, chưa có nghiên cứu nào về độ bền dư của kết cấu tàu vỏ composite.

Với các khoảng trống nghiên cứu trên, nghiên cứu này được thực hiện nhằm phát triển một phương pháp mô phỏng số chính xác để đánh giá ứng xử va chạm và độ bền dư của kết cấu tàu vỏ composite trong các kịch bản đâm va đặc trưng bởi tàu dịch vụ. Mô hình số được xây dựng trên nền tảng phần mềm ABAQUS, có kiểm chứng thông qua so sánh với dữ liệu thực nghiệm và phân tích lý thuyết trên các mẫu composite của các công bố trước đây. Sau đó, nghiên cứu tiến hành khảo sát ảnh hưởng của

các yếu tố chính như tốc độ, khối lượng, vị trí và hình dạng mũi tàu va chạm đến ứng xử kết cấu và mức suy giảm độ bền còn lại trong hai trạng thái uốn nguy hiểm là đĩnh sóng (hogging) và đáy sóng (sagging).

2. Mô phỏng số

Để kiểm chứng độ tin cậy, mô phỏng được thực hiện trên Abaqus/Explicit và so sánh với dữ liệu công bố trước. Sai khác giữa hai kết quả được phân tích để đánh giá độ chính xác của phương pháp. Từ đó, mô hình mô phỏng số đáng tin cậy được xây dựng và áp dụng cho bài toán va chạm và đánh giá độ bền dư của tàu vỏ composite kích thước thực.

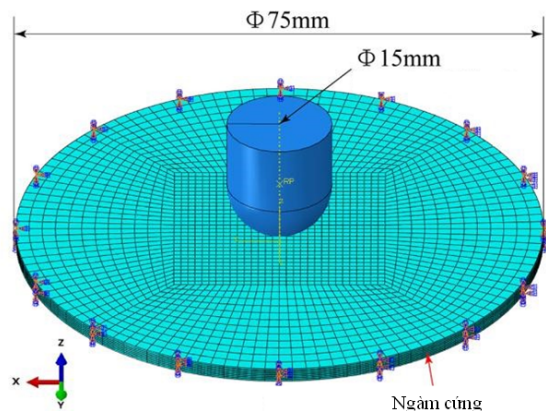
2.1. Giới thiệu các mô hình thí nghiệm

Mô hình số được kiểm chứng dựa trên thí nghiệm va chạm của Shi và cs. [26] đối với tấm composite nhiều lớp. Các thông số chính của mẫu thí nghiệm gồm cấu trúc xếp lớp, đặc tính cơ học của vật liệu, điều kiện biên và dạng tải va chạm được tóm tắt trong Bảng 1. Các kết quả chi tiết của thí nghiệm được trình bày đầy đủ trong công trình gốc theo tiêu chuẩn của ASTM D7136/D7136M-07 [27]. Mục đích sử dụng các kết quả này để đối chiếu nhằm kiểm chứng độ tin cậy của mô hình số.

Bảng 1. Thuộc tính vật liệu của lớp composite sợi carbon/epoxy

Tỉ trọng (kg/m^3)	1600
Mô đun đàn hồi (GPa)	$E_{11} = 153; E_{22} = E_{33} = 10,3$
Hệ số Poisson	$\nu_{12} = \nu_{13} = 0,3; \nu_{23} = 0,4$
Mô đun cắt (GPa)	$G_{12} = G_{13} = 6; G_{23} = 3,7$
Độ bền kéo và độ bền nén của sợi (MPa)	$X_T = 2537; X_C = 1580$
Độ bền kéo và độ bền nén của ma trận (MPa)	$Y_T = 82; Y_C = 236$
Độ bền cắt (MPa)	$S_{12} = S_{13} = 90; S_{23} = 40$
Năng lượng phá hủy kéo và nén của sợi (N/mm)	$G_{1c}^T = 91,6; G_{1c}^C = 79,9$
Năng lượng phá hủy kéo và nén của ma trận (N/mm)	$G_{2c}^T = 0,22; G_{2c}^C = 1,1$

2.2. Xây dựng mô hình mô phỏng số



Hình 1. Mô hình mô phỏng và va chạm trong phần mềm Abaqus

Mô phỏng được thực hiện trên Abaqus/Explicit với đầu va chạm dạng trụ đường kính 75 mm. Mẫu gồm tám lớp composite $[0/90]_2S$, mỗi lớp dày 0,25 mm (tổng 2,0 mm). Biên tấm tròn được ngàm cố

định như trong thí nghiệm. Mô hình sử dụng phần tử vỏ S4R, vật va chạm giả định là vật rắn tuyệt đối với vận tốc 3,83 m/s, như minh họa ở Hình 1.

Đối với mô hình vật liệu composite, tiêu chuẩn phá hủy Hashin 2D được áp dụng. Vật liệu composite là hệ nhiều pha gồm sợi gia cường và ma trận, tuy nhiên các tiêu chuẩn đánh giá phá hủy truyền thống như Tsai-Wu hoặc Tsai-Hill chỉ xem xét ứng suất và biến dạng tương đương ở cấp độ vĩ mô mà không phân biệt cơ chế phá hủy riêng của từng thành phần. Để khắc phục hạn chế này, tiêu chuẩn hư hỏng Hashin (Hashin Failure Criteria) do Zvi Hashin đề xuất [28] được áp dụng.

2.3. Đánh giá độ tin cậy của mô hình mô phỏng số đã đề xuất

Giá trị lực va chạm cực đại từ mô phỏng được so sánh với kết quả thí nghiệm và mô phỏng của Shi và cs. [26], như trình bày trong Bảng 2. Kết quả cho thấy mô phỏng đạt độ chính xác chấp nhận được, với sai số dưới 12,2% và xu hướng phù hợp với dữ liệu thực nghiệm. Điều này khẳng định thông số vật liệu, thứ tự xếp lớp và hướng sợi trong mô hình được thiết lập hợp lý, chứng minh tính khả thi của phương pháp mô phỏng cho các bài toán liên quan đến vật liệu composite.

Bảng 2. So sánh kết quả giữa mô phỏng và thực nghiệm

Thông số	Lực va chạm (N)		
	Mẫu 1	Mẫu 2	Mẫu 3
Kết quả thực nghiệm [26]	3230	3765	4605
Kết quả mô phỏng số	3605	4222	4287
Sai khác giữa kết quả mô phỏng số/thực nghiệm	11,60%	12,14%	6,91%

3. Mô phỏng khảo sát ảnh hưởng của các tham số tới ứng xử đâm va và độ bền dư của kết cấu tàu composite

3.1. Giới thiệu thông số cơ bản của tàu vỏ composite

Mô hình tàu bị đâm va là tàu vỏ composite, được thiết kế chuyên dụng để vận chuyển thủy sản từ vùng khai thác về bờ. Quá trình nghiên cứu, thiết kế và thi công tàu được thực hiện tại Viện Nghiên cứu Chế tạo Tàu Thủy - Trường Đại học Nha Trang, như được trình bày trong Hình 2. Tàu được chế tạo từ vật liệu FRP với cốt sợi thủy tinh dạng Mat và vải xen kẽ, nền là nhựa Polyester không no. Kết cấu thân tàu dạng hỗn hợp, chiều dài vỏ và các chi tiết được thiết kế theo QCVN 56:2013/BGTVT. Thông số chi tiết được trình bày trong Bảng 3. Các thông số chính của tàu bao gồm:

- Chiều dài thiết kế: $L = 16,03$ (m);
- Chiều rộng thiết kế: $B = 5,09$ (m);
- Chiều chìm: $T = 1,42$ (m);
- Chiều cao mạn: $H = 2,1$ (m);
- Lượng chiếm nước: $D = 89,67$ (tấn).

Kịch bản mô phỏng mô tả va chạm giữa mũi tàu và mạn giữa của tàu bị đâm. Để giảm chi phí tính toán, chỉ mô hình hóa một bên mạn và phần mũi va chạm. Kết cấu tàu bị đâm gồm sườn, đà ngang, xà boong và nẹp vách được thiết lập theo thông số Bảng 3 và được thể hiện trong Hình 3. Mũi tàu



Hình 2. Tàu vỏ composite hạ thủy tại Viện NCCT tàu thủy

va chạm được giả định dạng quả lê, đường kính 1,0 m, và coi là vật rắn tuyệt đối để đơn giản hóa phân tích.

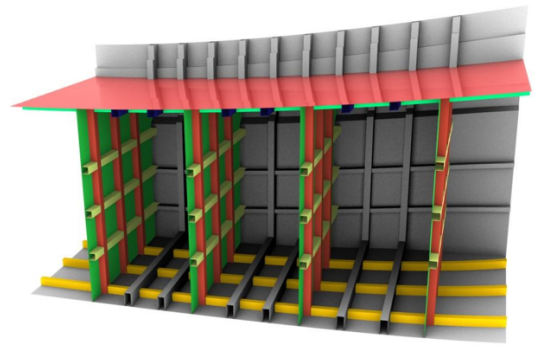
Bảng 3. Thông số kết cấu của tàu

Chiều dày vỏ	Mạn	13,0	mm
	Đáy	15,0	mm
	Boong	6,0	mm
	Vách ngang	8,0	mm
Quy cách kết cấu	Sườn	$80 \times 90 \times 5$	mm
	Đà ngang đáy	$80 \times 160 \times 6$	mm
	Dầm dọc đáy, dọc mạn	$50 \times 90 \times 3$	mm
	Xà boong, nẹp vách	$80 \times 80 \times 4$	mm

3.2. Vật liệu kết cấu thân tàu

Kết cấu tàu là dạng tấm composite nhiều lớp, được tạo thành bởi các lớp cốt sợi thủy tinh dạng Mat và vải, loại thường sử dụng trong lĩnh vực hàng hải. Các thuộc tính cơ học của vật liệu được trình bày chi tiết trong Bảng 4, trong đó CSM300 đại diện cho vật liệu Mat với định lượng 300 g/m² và WR400 là vật liệu vải dệt với định lượng 400 g/m².

Cấu trúc lớp composite của kết cấu tàu được thiết kế dựa trên các thông số chiều dày được trình bày trong Bảng 3, kết hợp với chiều dày của từng lớp vật liệu. Trình tự xếp lớp của kết cấu tàu được xác định và trình bày chi tiết trong Bảng 5, trong đó ký hiệu M đại diện cho vật liệu CSM300 và ký hiệu V đại diện cho vật liệu WR400.



Hình 3. Mô hình kết cấu khu vực giữa tàu của tàu bị đâm

Bảng 4. Thông số vật liệu kết cấu thân tàu

Thông số vật liệu	Vật liệu	
	CSM300	WR400
E_{11} (MPa)	13600	25600
E_{22} (MPa)	13600	7120
E_{33} (MPa)	10700	7120
ν_{12}	0,321	0,237
ν_{13}	0,127	0,237
ν_{23}	0,105	0,332
G_{12} (MPa)	7760	2473
G_{13} (MPa)	5200	2473
G_{23} (MPa)	5200	2011
X_T (MPa)	192	830
X_C (MPa)	260	490
Y_T (MPa)	192	63

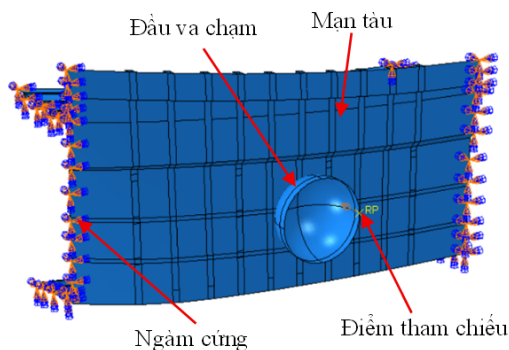
Thông số vật liệu	Vật liệu	
	CSM300	WR400
Y_C (MPa)	260	160
Z_T (MPa)	76	63
Z_C (MPa)	320	160
S_{12} (MPa)	103	65
S_{13} (MPa)	66	65
S_{23} (MPa)	66	53
ρ (kg/m ³)	1500	1800
h (mm)	0,55	0,5

Bảng 5. Thứ tự xếp lớp của các chi tiết kết cấu

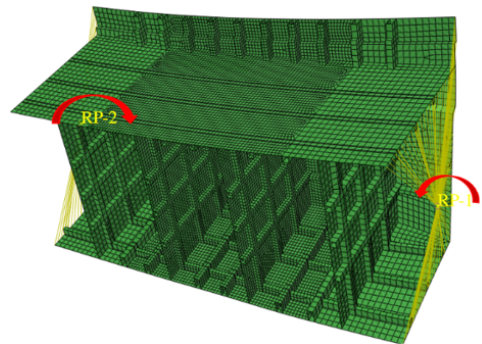
Chi tiết kết cấu	Trình tự xếp lớp
Mạn	[1M/[V ₀ /V ₉₀] ₃ /1M/[V ₀ /V ₉₀] ₄ /1M/[V ₀ /V ₉₀] ₄ /1M]
Đáy	[1M/[V ₀ /V ₉₀] ₄ /1M/[V ₀ /V ₉₀] ₄ /1M/[V ₀ /V ₉₀] ₅ /1M]
Boong	[2M/[V ₀ /V ₉₀] ₂ /1M/[V ₀ /V ₉₀] ₃ /1M]
Vách ngang	[2M/[V ₀ /V ₉₀] ₄ /1M/[V ₀ /V ₉₀] ₄ /1M]
Sườn	[1M/[V ₀ /V ₉₀] ₄ /1M]
Đà ngang đáy	[1M/[V ₀ /V ₉₀] ₅ /1M]
Xà dọc mạn, dọc đáy	[1M/[V ₀ /V ₉₀] ₂ /1M]
Xà boong, nẹp vách	[1M/[V ₀ /V ₉₀] ₃ /1M]

3.3. Xây dựng mô hình mô phỏng số

Thiết lập mô hình mô phỏng số cho bài toán va chạm được thể hiện như Hình 4. Dựa trên một loạt các phân tích hội tụ lưới, kích thước lưới tối ưu được chọn là 45 mm × 45 mm tại vùng va chạm và 80 mm × 80 mm ở các khu vực còn lại. Như vậy tổng số phần tử được chia là 30698 phần tử. Tàu va chạm trong trường hợp này được giả định có khối lượng 10,75 tấn và có phần mũi hình quả lê, tốc độ va chạm 5,1 m/s. Vị trí va chạm được thiết lập ở giữa hai vách.



Hình 4. Thiết lập mô hình bài toán va chạm



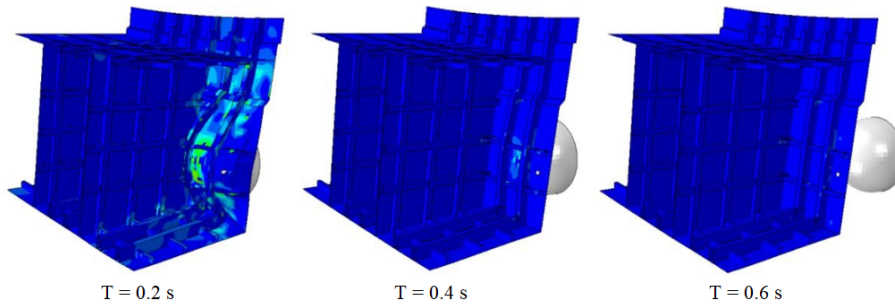
Hình 5. Mô hình phân tích bài toán độ bền sau va chạm

Đối với mô phỏng đánh giá độ bền sau va chạm, giải thuật Dynamic/Explicit được áp dụng. Thuật toán này chuyên dùng để tìm độ bền tới hạn của kết cấu. Thiết lập mô hình mô phỏng được thể hiện trên Hình 5. Các phần tử ở điều kiện biên được ràng buộc bởi hai điểm tham khảo RP-1 và RP-2 trên

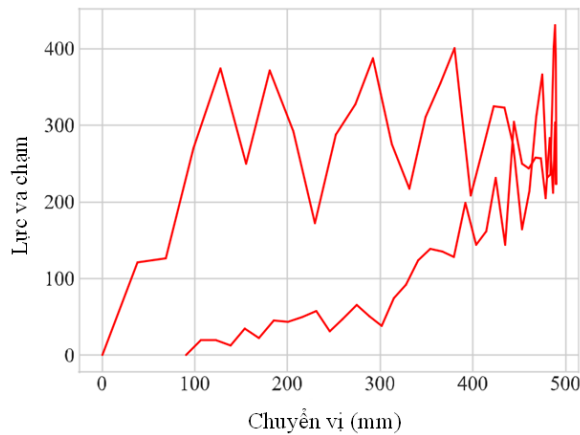
cơ sở thuật toán coupling. Tại hai điểm tham khảo này được đặt tương ứng với hai mô men uốn có cùng độ lớn và ngược chiều nhau.

3.4. Kết quả mô phỏng số

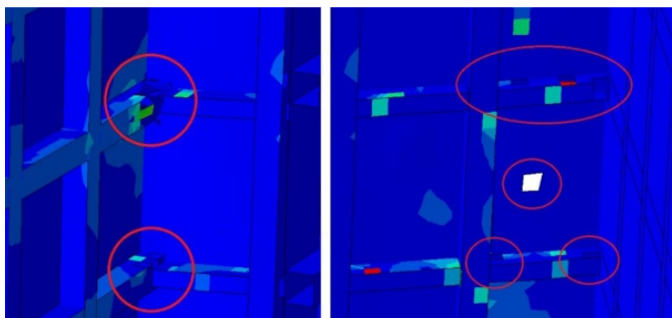
Kết quả mô phỏng số do quá trình đâm va của tàu composite được thể hiện trên Hình 6. Sau khi bị va chạm với mũi tàu quả lê có tốc độ 5,1 m/s, khu vực va chạm khôi phục hình dạng gần như ban đầu nhờ vào tính đàn hồi của vật liệu. Quan sát đường cong lực va chạm và chuyển vị được trình bày trong Hình 7 có thể thấy rằng kết cấu hấp thụ một lượng lớn năng lượng va chạm từ đó gây ra phá hủy tại một số vị trí cục bộ của kết cấu như được thể hiện trong các Hình 8 và 9. Độ sâu biến dạng vĩnh viễn là 95 mm.



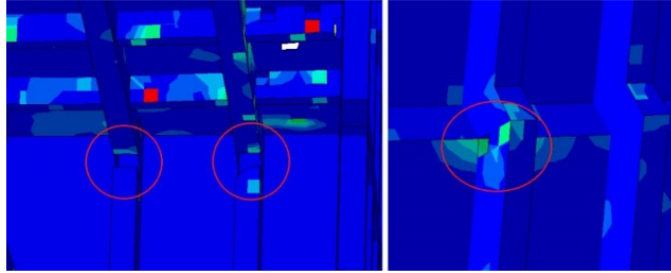
Hình 6. Biến dạng của kết cấu trong quá trình va chạm



Hình 7. Đường cong lực va chạm – chuyển vị

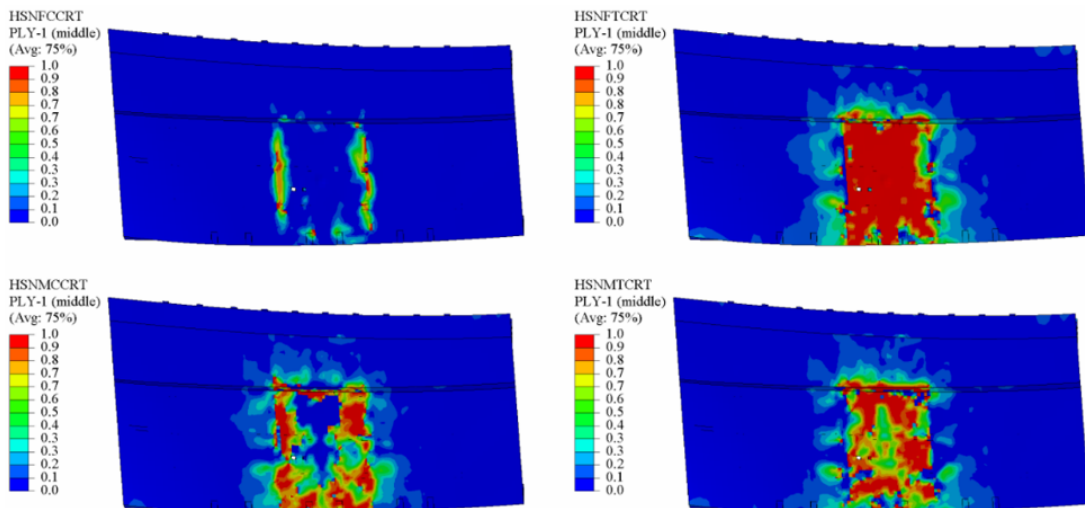


Hình 8. Hư hỏng kết cấu tại dầm dọc và vùng giao nhau với vách ngang



Hình 9. Hư hỏng tại vị trí đà ngang đáy và gân mạn

Ngoài các hư hỏng bề mặt như thể hiện trên Hình 8 và Hình 9, vật liệu composite còn xuất hiện hư hỏng bên trong khó quan sát. Nhờ mô phỏng FEM và tiêu chuẩn Hashin trong Abaqus, bốn cơ chế phá hủy gồm sợi và ma trận do kéo – nén được xác định chi tiết. Kết quả cho thấy lớp CSM đầu tiên (Ply 1) hấp thụ trực tiếp năng lượng va chạm nên gần như mất khả năng chịu tải, trong khi các lớp giữa gần trục trung hòa chịu hư hỏng nhỏ nhất, giữ độ bền cao hơn ($\approx 1,1$), như thể hiện trong Hình 10.

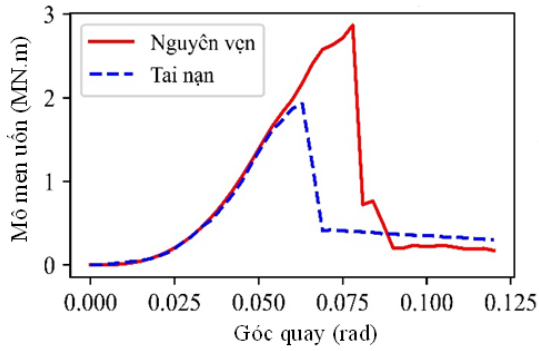


Hình 10. Bốn chế độ hư hỏng của Ply 1

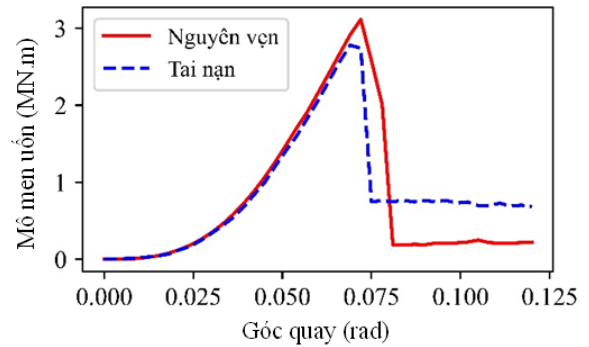
Độ bền thân tàu sau va chạm được đánh giá qua mô men uốn giới hạn ở hai trạng thái khắc nghiệt: tàu trên đỉnh sóng và đáy sóng. Kết quả trong Bảng 6 cho thấy mô men uốn ở đỉnh sóng luôn thấp hơn đáy sóng, giảm 7,91% ở trạng thái nguyên vẹn và 30,58% sau va chạm. Mức suy giảm sau va chạm đạt 32,71% ở đỉnh sóng, so với 10,75% ở đáy sóng, cho thấy đỉnh sóng là trạng thái nguy hiểm nhất đối với độ bền kết cấu. Hình 11 và Hình 12 minh họa đường cong mô men uốn và biến dạng tương ứng.

Bảng 6. Mô men giới hạn của tàu trước và sau va chạm

	Mô men uốn giới hạn (MN.m)	
	Đỉnh sóng	Đáy sóng
Tàu nguyên vẹn	2,87	3,11
Tàu bị đâm va	1,93	2,78
Mức độ sụt giảm mô men (%)	32,71	10,75

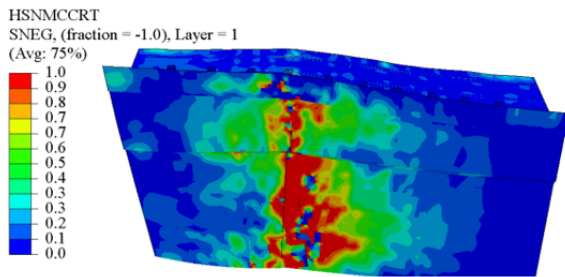


(a) Tàu nằm trên đỉnh sóng

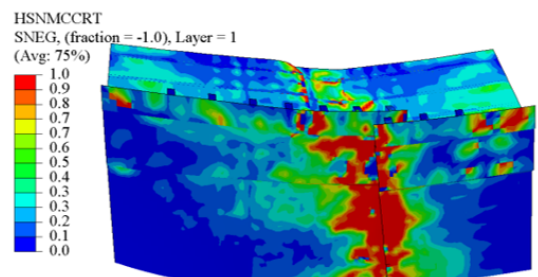


(b) Tàu nằm trên đáy sóng

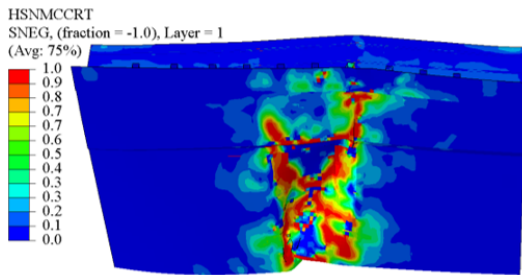
Hình 11. Đường cong mô men - góc quay của từng trạng thái tàu



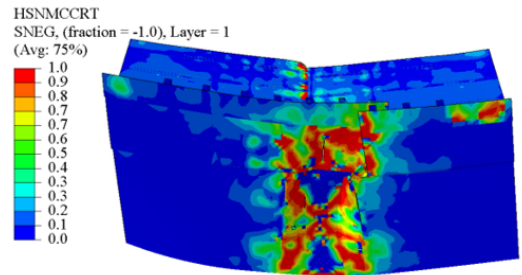
(a) Tàu nguyên vẹn – Đỉnh sóng



(b) Tàu nguyên vẹn – Đáy sóng



(c) Tàu sau va chạm – Đỉnh sóng



(d) Tàu sau va chạm – Đáy sóng

Hình 12. Biến dạng của tàu do uốn của từng trạng thái tàu

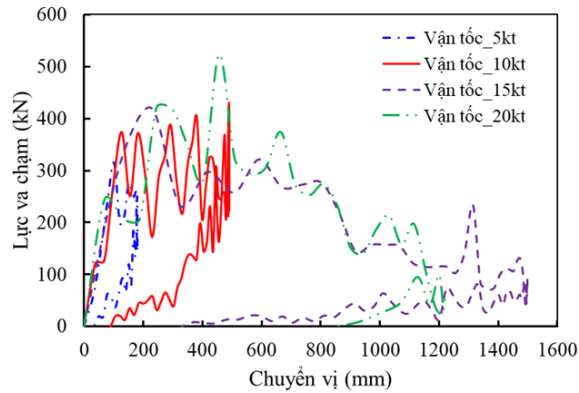
4. Mô phỏng khảo sát ảnh hưởng của các tham số

4.1. Ảnh hưởng của tốc độ va chạm

Trong nghiên cứu này, các điều kiện mô phỏng được giữ nguyên, chỉ thay đổi vận tốc va chạm từ 2,6 m/s ($\approx 5,0$ kt) đến 10,3 m/s ($\approx 20,0$ kt) để đánh giá ảnh hưởng của tốc độ đến độ bền kết cấu. Theo lý thuyết động năng, khi vận tốc tăng, năng lượng va chạm tăng, kéo theo chuyển vị và năng lượng hấp thụ của kết cấu tăng như thể hiện trong Hình 13 và Bảng 7. Tuy nhiên, tại 20,0 kt, chuyển vị giảm mạnh do kết cấu vượt giới hạn chịu tải và mất khả năng hấp thụ năng lượng qua biến dạng. Mức độ phá hủy tương ứng được minh họa trong Hình 14.

Quan sát Hình 15 và Bảng 8 cho thấy vận tốc va chạm tăng làm giảm đáng kể mô men uốn giới hạn sau va chạm. Khi tàu uốn tại đỉnh sóng, mô men giảm từ 6,56% xuống 57,81% khi vận tốc tăng từ 5,0 kt lên 15,0 kt, sau đó ổn định quanh 56%. Ngược lại, khi tàu uốn tại đáy sóng, mức giảm nhỏ

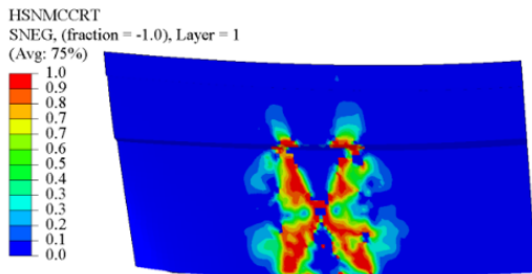
hơn, chỉ từ 0,47% đến 15,88% trong cùng dải vận tốc. Đáng chú ý, mô men uốn giới hạn dao động quanh giá trị tại vận tốc 15,0 kt và không tăng dù vận tốc tiếp tục tăng. Điều này cho thấy kết cấu đã hư hỏng nghiêm trọng ở ngưỡng này, nên việc tăng vận tốc không gây thêm thiệt hại đáng kể. Biểu dạng kết cấu khi chịu uốn trên sóng được minh họa trong Hình 16 và 17.



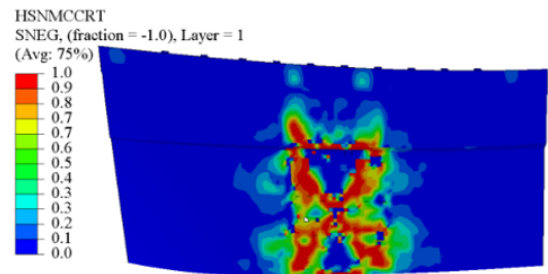
Hình 13. Đường cong lực - chuyển vị của từng vận tốc khảo sát

Bảng 7. Chuyển vị tại vị trí va chạm theo vận tốc

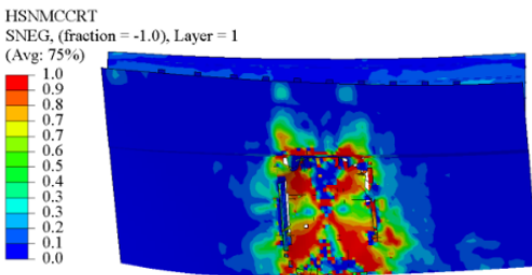
Vận tốc va chạm (kt)	Chuyển vị lớn nhất (mm)
5,0	180,4
10,0	489,7
15,0	1498,4
20,0	1219



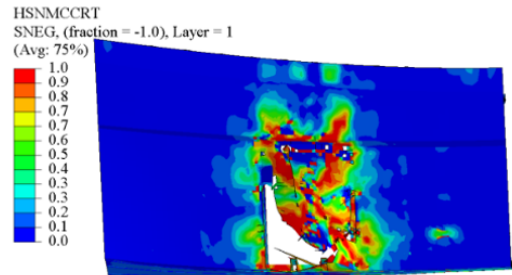
(a) Vận tốc va chạm 5,0 kt



(b) Vận tốc va chạm 10,0 kt



(c) Vận tốc va chạm 15,0 kt

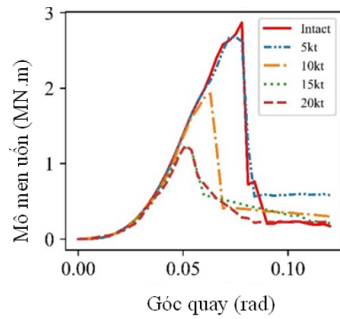


(d) Vận tốc va chạm 20,0 kt

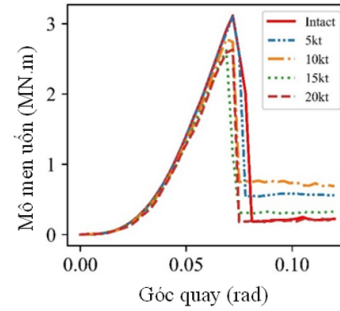
Hình 14. Hư hỏng kết cấu tàu ứng với từng vận tốc va chạm

Bảng 8. Mô men uốn giới hạn của kết cấu sau va chạm với các vận tốc khác nhau

Trạng thái khảo sát	Mô men uốn giới hạn (MN.m)		Mức độ giảm mô men uốn (%)	
	Đỉnh sóng	Đáy sóng	Đỉnh sóng	Đáy sóng
Tàu nguyên vẹn	2,87	3,11	-	-
5,0 kt	2,68	3,10	6,56	0,47
10,0 kt	1,93	2,78	32,71	10,75
15,0 kt	1,21	2,62	57,81	15,88
20,0 kt	1,24	2,63	56,77	15,56

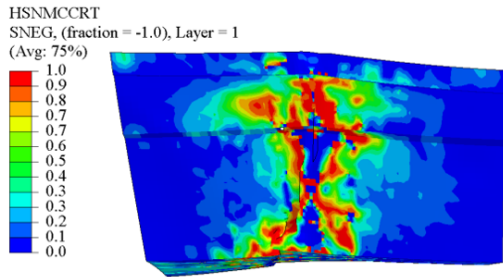


(a) Tàu trên đỉnh sóng

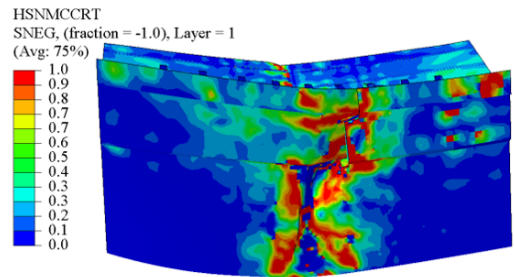


(b) Tàu trên đáy sóng

Hình 15. Đường cong mô men – góc quay của từng vận tốc khảo sát khi tàu bị uốn

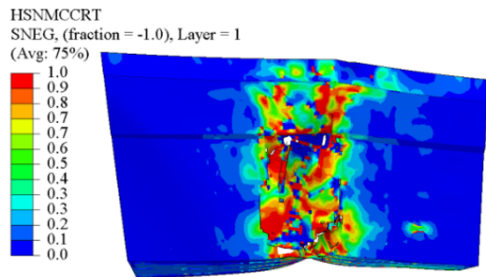


(a) Tàu trên đỉnh sóng

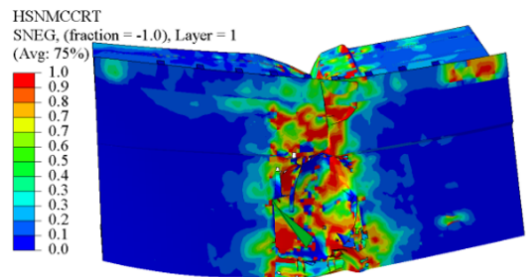


(b) Tàu trên đáy sóng

Hình 16. Biến dạng của tàu do uốn sau khi va chạm với vận tốc 5,0 kt



(a) Tàu trên đỉnh sóng



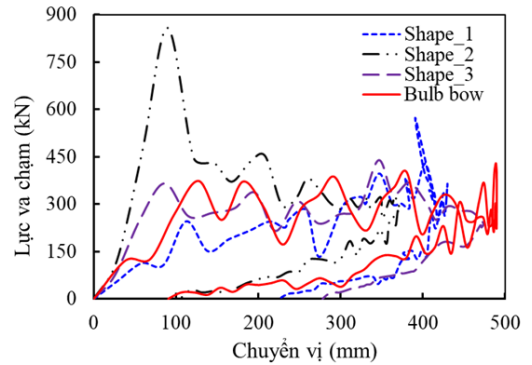
(b) Tàu trên đáy sóng

Hình 17. Biến dạng của tàu do uốn sau khi va chạm với vận tốc 20,0 kt

4.2. Ảnh hưởng của các kiểu hình dạng mũi tàu đâm va

Trong quá trình hoạt động, tàu composite thường phải đối mặt với nguy cơ va chạm với các loại mũi tàu có hình dạng đa dạng. Nghiên cứu này tập trung đánh giá ảnh hưởng của hình dạng mũi tàu điển hình và thông dụng ngoài thực tế bao gồm: (1) mũi tàu dạng tứ diện (shape_1) mô phỏng dạng mũi nhọn, (2) mũi tàu dạng chữ nhật có bo góc (shape_2), và (3) mũi tàu dạng lưỡi dao (shape_3), và (4) dạng mũi quả lê như đã trình bày phần trên.

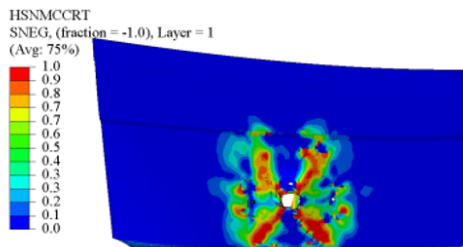
Phân tích Hình 18 và Bảng 9 cho thấy hình dạng mũi tàu ảnh hưởng rõ rệt đến ứng xử kết cấu khi va chạm. Mũi chữ nhật bo tròn tạo lực lớn ban đầu nhưng nhanh phân tán, cho chuyển vị cực đại nhỏ nhất. Mũi tứ diện và lưỡi dao có diện tích tiếp xúc nhỏ, tập trung ứng suất cao, gây phá hủy cục bộ nhanh. Trong khi đó, mũi quả lê với bề mặt trơn hấp thụ năng lượng qua biến dạng, dẫn đến chuyển vị cực đại lớn nhất. Hình 19 minh họa hư hỏng kết cấu tương ứng từng dạng mũi tàu.



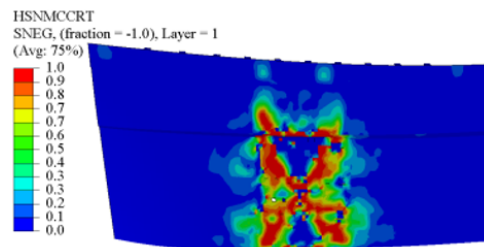
Hình 18. Đường cong lực đâm va - chuyển vị đối với các hình dạng mũi tàu đâm va khác nhau

Bảng 9. Độ sâu đâm va đối với các hình dạng mũi tàu khác nhau

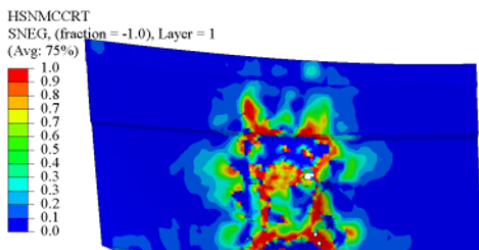
Hình dạng va chạm	Chuyển vị lớn nhất (mm)
Shape-1	430,0
Shape-2	371,5
Shape-3	473,0
Bulb Bow	489,7



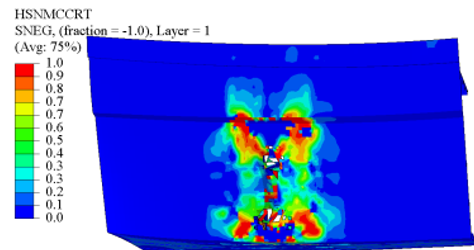
(a) Mũi tàu hình tứ diện



(b) Mũi tàu hình quả lê



(c) Mũi tàu hình chữ nhật



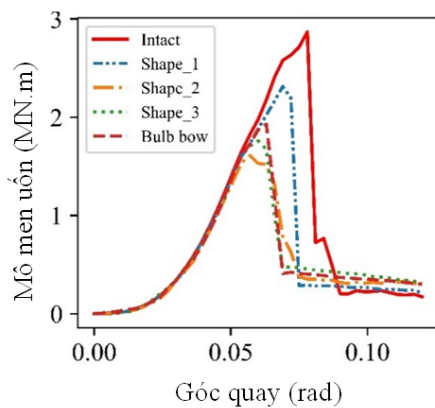
(d) Mũi tàu hình lưỡi dao

Hình 19. Hư hỏng kết cấu tàu ứng với từng mũi tàu va chạm

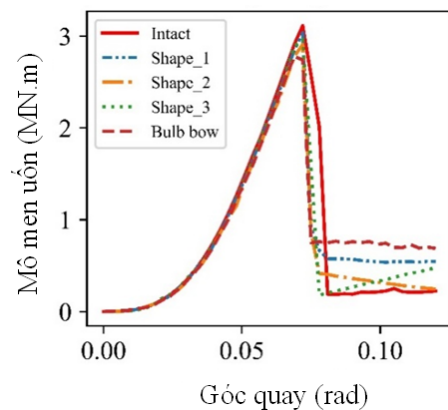
Từ số liệu Bảng 10 cho thấy mũi tứ diện tập trung ứng suất vào vùng nhỏ, gây phá hủy cục bộ nhanh nhưng giới hạn trong phạm vi hẹp, nên suy giảm mô men uốn thấp nhất trong bốn dạng, chỉ 19,32% ở đỉnh sóng và 2,40% ở đáy sóng. Ngược lại, mũi chữ nhật (Shape-2) có diện tích tiếp xúc lớn, phân bố lực rộng, làm giảm mô men uốn đáng kể tới 43,87% khi uốn tại đỉnh sóng và 6,57% tại đáy sóng. Điều này khẳng định hình dạng mũi tàu ảnh hưởng mạnh đến phân bố ứng suất và mức độ hư hỏng. Biến dạng kết cấu sau va chạm được minh họa trong Hình 20–23.

Bảng 10. Giá trị mô men uốn giới hạn sau va chạm theo hình dạng mũi tàu

Trạng thái khảo sát	Mô men uốn giới hạn (MN.m)		Suy giảm mô men (%)	
	Đỉnh sóng	Đáy sóng	Đỉnh sóng	Đáy sóng
Nguyên vẹn	2,87	3,11	-	-
Shape_1	2,31	3,04	19,32	2,40
Shape_2	1,61	2,91	43,87	6,57
Shape_3	1,76	2,96	38,65	4,85
Bulb Bow	1,93	2,78	32,71	10,75

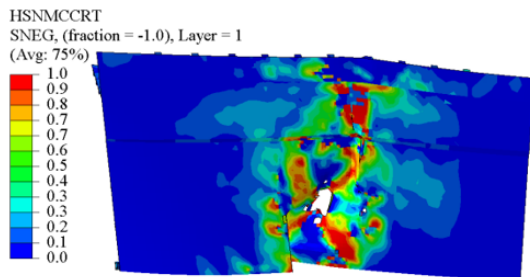


(a) Tàu trên đỉnh sóng

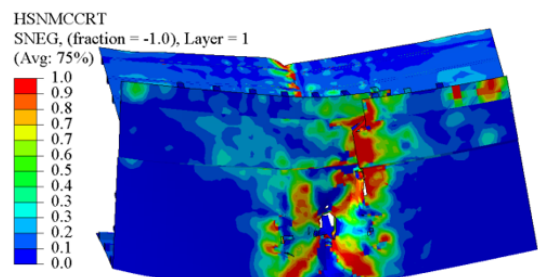


(b) Tàu trên đáy sóng

Hình 20. Đường cong mô men uốn – góc uốn với các mũi tàu đâm va khác nhau

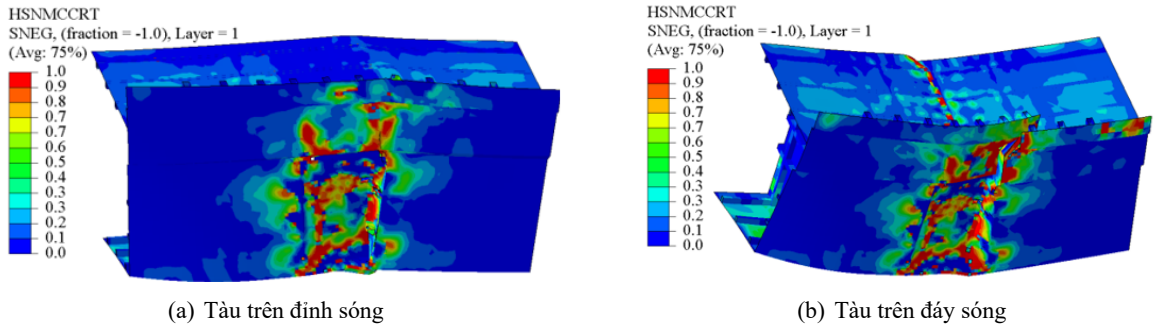


(a) Tàu trên đỉnh sóng

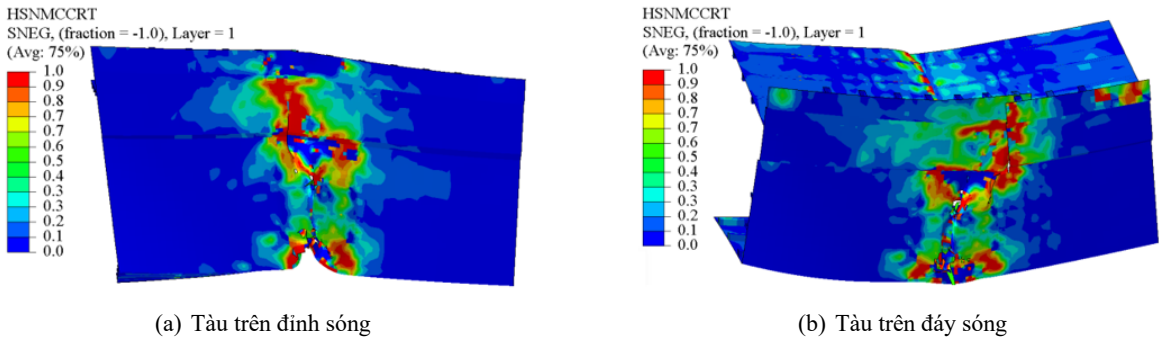


(b) Tàu trên đáy sóng

Hình 21. Biến dạng của tàu do uốn sau khi va chạm bởi Shape-1



Hình 22. Biến dạng của tàu do uốn sau khi va chạm bởi Shape-2



Hình 23. Biến dạng của tàu do uốn sau khi va chạm bởi Shape-3

5. Kết luận

Trên cơ sở các kết quả mô phỏng số đã thực hiện, nghiên cứu đã cung cấp cái nhìn toàn diện về ứng xử đâm va và mức độ giảm độ bền uốn giới hạn của kết cấu tàu vỏ composite trong các điều kiện tải trọng thực tế. Một số kết luận chính có thể rút ra như sau:

- Phương pháp mô phỏng trên Abaqus tích hợp tiêu chuẩn Hashin cho thấy hiệu quả cao trong đánh giá cơ chế phá hủy và độ bền dư của tàu composite sau va chạm. Sai lệch dưới 12,2% so với thực nghiệm chứng minh độ tin cậy và khả năng ứng dụng rộng rãi của mô hình.

- Trong quá trình đâm va, lớp vật liệu ngoài, đặc biệt là lớp CSM đầu tiên, chịu hư hỏng nghiêm trọng nhất do trực tiếp hấp thụ năng lượng va chạm. Trong khi đó, các lớp ở gần trục trung hòa ít bị phá hủy hơn nhờ chịu ít ứng suất uốn, cho thấy vai trò quan trọng của trình tự xếp lớp và cấu trúc laminate trong việc kiểm soát phá hủy.

- Trong các trường hợp tải trọng thực tế thì tải trọng uốn khi tàu trên đỉnh sóng là điều kiện nguy hiểm nhất, với mô men uốn giới hạn sau va chạm giảm đến 32,71%. Ngược lại, trong trạng thái tàu trên đáy sóng, mức độ giảm chỉ là 10,75%. Điều này cho thấy ảnh hưởng rõ rệt của điều kiện làm việc đến khả năng chịu tải còn lại của tàu trong mỗi trường hợp khai thác.

- Tốc độ va chạm ảnh hưởng lớn đến độ bền dư của kết cấu thân tàu. Khi vận tốc tăng từ 5,0 kt đến 15,0 kt, mô men uốn giới hạn giảm gần 60% ở trạng thái tàu trên đỉnh sóng. Tuy nhiên, khi vượt qua ngưỡng tới hạn này, khả năng hấp thụ năng lượng thông qua biến dạng bị suy giảm rõ rệt, do kết cấu tại vị trí đâm va đã phá hủy hoàn toàn.

- Hình dạng mũi tàu ảnh hưởng mạnh đến ứng xử va chạm và độ bền dư của kết cấu. Mũi quả lê tạo biến dạng sâu nhưng phân bố ứng suất đều; mũi nhọn và lưỡi dao gây phá hủy cục bộ nhanh trong phạm vi hẹp; còn mũi chữ nhật có diện tích tiếp xúc lớn, làm suy giảm mô men uốn nhiều nhất.

- Nghiên cứu sử dụng một số giả thiết nhằm đơn giản hóa mô hình và tập trung vào cơ chế hư hỏng cục bộ: (i) mũi tàu được coi là cứng tuyệt đối; (ii) tàu bị đâm gần như đứng yên do va chạm ngắn; (iii) áp dụng tiêu chí Hashin mô tả hư hỏng ply vật liệu composite; và (iv) mô hình tiếp xúc trong Abaqus. Các giả thiết này phổ biến trong nghiên cứu quốc tế, đảm bảo tính khả thi và độ tin cậy của kết quả. Tuy nhiên, các nghiên cứu tiếp theo nên mở rộng mô phỏng chuyển động tương đối và hiện tượng tách lớp để phản ánh thực tế chính xác hơn.

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] Li, X., Zhu, Z., Li, Y., Hu, Z. (2020). [Design and mechanical analysis of a composite t-type connection structure for marine structures](#). *Polish Maritime Research*, 27(2):145–157.
- [2] Ferenc, T., Mikulski, T. (2020). [Validation process for computational model of full-scale segment for design of composite footbridge](#). *Polish Maritime Research*, 27(2):158–167.
- [3] Li, X., Zhu, Z., Li, Y., Hu, Z., Dai, L. (2020). A review on ultimate strength of composite-metal hybrid ships. *Journal of Ship Mechanics*, 24(05):681–692.
- [4] Niksa-Rynkiewicz, T., Landowski, M., Szalewski, P. (2020). [Application of algorithm in the lamination process in yacht production](#). *Polish Maritime Research*, 27(3):59–70.
- [5] Ang Qiu, C. Z., Fu, K., Tang, Y. (2013). Numerical understanding the impact behaviors of marine composite laminates. *1st International Conference on Advanced Composites for Marine Engineering*.
- [6] Cho, S.-R., Shin, H. K., Do, Q. T. (2018). *Collision response of cylindrical structures and their residual strengths*. PhD Thesis, University of Ulsan.
- [7] Thorsson, S. I., Waas, A. M., Rassaian, M. (2018). [Numerical investigation of composite laminates subject to low-velocity edge-on impact and compression after impact](#). *Composite Structures*, 203:648–658.
- [8] Thắng, Đ. Q., Vũ, N. H., Tuyền, V. V. (2022). [Đánh giá độ bền dọc của tàu container khi bị tàu đâm va](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXDHN*, 16(5V):181–205.
- [9] Thắng, 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.
- [10] Do, Q. T., Xuan-Phuong, D., Tra, T. H., Tuyen, V. V., Prabowo, A. R., Hung, T. D. (2024). [Parametric study of side collision-induced denting failures on the ultimate strength of a handy-size containership under vertical bending](#). *Ocean Engineering*, 309:118534.
- [11] 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 (STCE) - NUCE*, 14(3):96–109.
- [12] Do, Q. T., Huynh, V. V., Vu, M. T., Tuyen, V. V., Pham-Thanh, N., Tra, T. H., Vu, Q.-V., Cho, S.-R. (2020). [A new formulation for predicting the collision damage of steel stiffened cylinders subjected to dynamic lateral mass impact](#). *Applied Sciences*, 10(11):3856.
- [13] Nguyen, H. V., Do, Q. T. (2023). [Dynamic impact response and residual strength of container ship under dropped object](#). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1278(1):012020.
- [14] Nguyen, H. V., Huynh, V.-V., Cho, S.-R., Park, S.-H., Prabowo, A. R., Tuyen, V. V., Vu, M. T., Tuswan, T., Do, Q. T. (2025). [Residual ultimate strength of a container ship under dropped object impact: numerical simulations and empirical formulations](#). *Ocean Engineering*, 341:122732.
- [15] Ferreira, G. F. O., Ribeiro, M. L., Mendes Ferreira, A. J., Tita, V. (2019). [Computational analyses of composite plates under low-velocity impact loading](#). *Materials Today: Proceedings*, 8:778–788.
- [16] Thorsson, S. I., Waas, A. M., Rassaian, M. (2018). [Low-velocity impact predictions of composite laminates using a continuum shell based modeling approach part A: Impact study](#). *International Journal of Solids and Structures*, 155:185–200.

- [17] Panettieri, E., Fanteria, D., Montemurro, M., Froustey, C. (2016). [Low-velocity impact tests on carbon/epoxy composite laminates: A benchmark study](#). *Composites Part B: Engineering*, 107:9–21.
- [18] Shi, Y., Pinna, C., Soutis, C. (2014). [Modelling impact damage in composite laminates: A simulation of intra- and inter-laminar cracking](#). *Composite Structures*, 114:10–19.
- [19] Xu, Y., Zuo, H., Lu, X., Shao, C., Li, X. (2019). Numerical analysis and tests for low-velocity impact damage evaluation of composite material. *Journal of Vibration and Shock*, 38(03):149–155.
- [20] Gliszczynski, A., Kubiak, T., Wawer, K. (2019). [Barely visible impact damages of GFRP laminate profiles – An experimental study](#). *Composites Part B: Engineering*, 158:10–17.
- [21] Gliszczynski, A. (2018). [Numerical and experimental investigations of the low velocity impact in GFRP plates](#). *Composites Part B: Engineering*, 138:181–193.
- [22] Tatsumi, A., Fujikubo, M. (2020). [Ultimate strength of container ships subjected to combined hogging moment and bottom local loads part 1: Nonlinear finite element analysis](#). *Marine Structures*, 69:102683.
- [23] Wang, Q., Wang, D. (2020). [Ultimate strength envelope of a 10,000TEU large container ship subjected to combined loads: From compartment model to global hull girder](#). *Ocean Engineering*, 213:107767.
- [24] Jagite, G., Bigot, F., Malenica, S., Derbanne, Q., Le Sourne, H., Cartraud, P. (2022). [Dynamic ultimate strength of a ultra-large container ship subjected to realistic loading scenarios](#). *Marine Structures*, 84: 103197.
- [25] 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):76.
- [26] Shi, Y., Swait, T., Soutis, C. (2012). [Modelling damage evolution in composite laminates subjected to low velocity impact](#). *Composite Structures*, 94(9):2902–2913.
- [27] ASTM D7136/D7136M-15 (2015). *Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-weight Impact Event*. ASTM International.
- [28] Hashin, Z. (1980). [Failure criteria for unidirectional fiber composites](#). *Journal of Applied Mechanics*, 47 (2):329–334.