



Đánh giá hiệu quả của lớp vỏ bê tông cấu trúc TPMS-Primitive trong việc tăng cường khả năng chống va xô cho trụ cầu bằng phương pháp mô phỏng số

Performance Evaluation of a TPMS-Primitive Structured Concrete Shell for Enhancing the Impact Resistance of Bridge Piers by numerical simulation method

Nguyễn Tuấn Bình<sup>1</sup>, Lê Bá Anh<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Trường Đại học Giao Thông Vận Tải

Từ khóa: TÓM TẮT

Va xô tàu  
Bê tông cấu trúc  
TPMS Primitive  
Hấp thụ năng lượng  
Phân tích số

Va chạm tàu là nguy cơ nghiêm trọng, có thể gây phá hủy giòn cho trụ cầu. Nghiên cứu này sử dụng phương pháp mô phỏng số học để đánh giá hiệu quả của lớp vỏ bảo vệ bằng bê tông có cấu trúc Bề mặt tối thiểu tuần hoàn ba chiều (TPMS) loại Primitive. Phân tích so sánh phản ứng động học của hai trường hợp: trụ bê tông đặc không được bảo vệ và trụ tương tự được bao bọc bởi vỏ TPMS-Primitive. Cả hai cấu kiện đều sử dụng mô hình vật liệu Bê tông Phá hủy Đơn giản (SCDP). Kết quả cho thấy lớp vỏ TPMS hoạt động như một hệ thống hy sinh hiệu quả, hấp thụ khoảng 80% năng lượng va chạm thông qua cơ chế sụp đổ lũy tiến. Lớp vỏ đã chuyển đổi cơ chế phá hủy từ dạng giòn, tập trung sang dạng phân tán, có kiểm soát, qua đó bảo vệ gần như nguyên vẹn trụ lõi bên trong. Nghiên cứu chứng minh rằng việc cấu trúc hóa vật liệu giòn như bê tông thành dạng cấu trúc TPMS là một hướng đi khả thi để tạo ra các hệ thống hấp thụ năng lượng hiệu suất cao.

Keywords: ABSTRACT

Vessel Collision  
Structured Concrete  
TPMS Primitive  
Energy Absorption  
Numerical Analysis

Vessel collision poses a significant threat of catastrophic brittle failure to bridge piers. This study uses detailed numerical simulation to evaluate the effectiveness of a protective concrete shell structured as a Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) of the Primitive type. The analysis compares the dynamic response of two cases: an unprotected solid concrete pier and an identical pier encased in the TPMS-Primitive shell. The Simplified Concrete Damage Plasticity (SCDP) material model was applied to both components. Results show the TPMS shell acts as a highly effective sacrificial system, absorbing approximately 80% of the impact energy via a progressive crushing mechanism. The shell transformed the failure mode from brittle and localized to a distributed, controlled collapse, leaving the inner core pier almost undamaged. This research proves that structuring a brittle material like concrete into a TPMS metamaterial architecture is a viable approach for creating high-performance energy absorption systems.

\* Lê Bá Anh. Trường Đại học Giao Thông Vận Tải  
Email: [baanh.le@utc.edu.vn](mailto:baanh.le@utc.edu.vn)

<https://www.doi.org/10.55228/JTST140608>

Ngày nhận bài: 10/11/2025; Ngày nộp bài sửa: 13/11/2025; Ngày chấp nhận đăng: 15/11/2025

Ngày xuất bản trực tuyến: 15/11/2025

pISSN: 1859-4263; eISSN: 3030-4261

## 1. Giới thiệu

Các công trình thuộc hạ tầng giao thông đường thủy, như trụ cầu (vượt sông, vượt kênh), phải đối mặt với nguy cơ thường trực từ các tải trọng va xô. Những sự kiện va chạm này có khả năng gây ra hư hỏng nghiêm trọng, thậm chí dẫn đến sụp đổ kết cấu, gây thiệt hại to lớn về kinh tế và con người. Do đó, việc nghiên cứu và phát triển các công nghệ bảo vệ chuyên biệt để tăng cường khả năng chống chịu va đập cho các kết cấu này là một yêu cầu cấp thiết. Trong lịch sử, nhiều phương pháp gia cường kết cấu đã được áp dụng để giảm thiểu các tác động động học, bao gồm việc sử dụng tường chắn, gia cường bằng polyme gia cường sợi (FRPs), và các lớp vỏ bọc ngoài truyền thống. Tuy nhiên, các phương pháp truyền thống này thường đi kèm với những hạn chế đáng kể, chẳng hạn như trọng lượng nặng (đặc biệt đối với vỏ bọc thép), nguy cơ ăn mòn, chi phí lắp đặt cao, và nhu cầu về không gian lớn [1], [2]. Do đó, các nghiên cứu gần đây đang chuyển trọng tâm sang phát triển các vật liệu có khả năng hấp thụ năng lượng cao và trọng lượng nhẹ để tạo ra các hệ thống bảo vệ hiện đại [3], [4], [5].

Các vật liệu được lấy cảm hứng từ cấu trúc tế bào trong tự nhiên [6], [7] đã nổi lên như những giải pháp đầy hứa hẹn để chế tạo các lớp lõi hấp thụ năng lượng cho các kết cấu bảo vệ. Trong số này, Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS) là một lớp cấu trúc đặc biệt. TPMS là các vật liệu có cấu trúc có thể biểu diễn thông qua các phương trình toán học với bề mặt trơn và được kết nối một cách liên tục, tuần hoàn. Các cấu trúc này giúp cho vật liệu có những tính chất mới như tăng tính dẻo, độ bền cho vật liệu giòn như bê tông với tỷ lệ độ bền trên trọng lượng vượt trội so với các cấu trúc lưới và tổ ong thông thường [8], [9], [10]. Các cấu trúc TPMS, đặc biệt là loại dạng tấm như Primitive, đã được chứng minh là có độ cứng và độ bền cao hơn các dạng mạng lưới dạng khối tương đương [8], [11]. Khả năng thiết kế linh hoạt của TPMS (như điều chỉnh mật độ, độ xốp) cho phép chúng được tối ưu hóa để tăng cường khả năng hấp thụ năng lượng [9], [10].

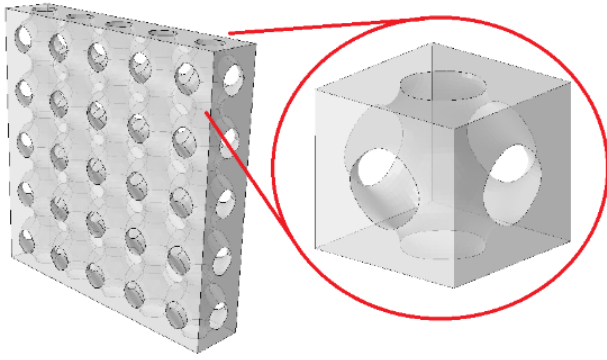
Trước đây, việc chế tạo các cấu trúc siêu vật liệu phức tạp như TPMS gặp nhiều thách thức đáng kể do các giới hạn của phương pháp sản xuất truyền thống. Tuy nhiên, với sự phát triển vượt bậc của công nghệ in 3D, các cấu trúc TPMS giờ đây đã có thể được chế tạo một cách dễ dàng và chính xác hơn rất nhiều, mở

ra tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong nghiên cứu và thực tế. Việc áp dụng các cấu trúc TPMS đã được nghiên cứu rộng rãi trong lĩnh vực y sinh, ứng dụng hàng không vũ trụ, và các hệ thống chống va đập/chống nổ [8], [10]. Trong ngành xây dựng, các cấu trúc TPMS đã có một số ứng dụng như là cốt gia cường cho các vật liệu composite xi măng/bê tông nhẹ, nhằm cải thiện độ dẻo và cường độ chịu nén [12], [13]. Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng việc gia cố bằng TPMS có thể nâng cao đáng kể khả năng chịu tải và hấp thụ năng lượng của dầm bê tông dưới tải trọng động [14]. Tuy nhiên, ứng dụng trực tiếp của các vật liệu có cấu trúc TPMS như một giải pháp lớp vỏ bảo vệ bên ngoài, đặc biệt để gia cường khả năng chống va xô cho trụ cầu bê tông cốt thép cũ vẫn còn là một khoảng trống cần được nghiên cứu.

Mục tiêu chính của nghiên cứu này là đề xuất và đánh giá một kết cấu TPMS mới, được sử dụng làm lớp vỏ ngoài gia cường khả năng chống va xô cho trụ cầu cũ. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã tiến hành đánh giá hiệu suất của hệ thống bảo vệ sử dụng bê tông cấu trúc TPMS-Primitive dưới tải trọng va xô mô phỏng. Kết quả so sánh cho thấy trụ cầu được bảo vệ thể hiện khả năng chống va xô vượt trội so với trụ cầu không được bảo vệ. Lớp vỏ bê tông TPMS đã hoạt động như một hệ thống bảo vệ, hấp thụ phần lớn năng lượng va chạm thông qua cơ chế sụp đổ lũy tiến có kiểm soát, qua đó bảo vệ an toàn cho trụ lõi bê tông bên trong. Nghiên cứu này chứng minh tính khả thi của việc "cấu trúc hóa" một vật liệu giòn như bê tông thành dạng TPMS, biến nó thành một giải pháp hiệu suất cao để bảo vệ cơ sở hạ tầng quan trọng khỏi các tải trọng cực đoan.

## 2. Cấu trúc TPMS

TPMS hay Bề mặt tối thiểu tuần hoàn ba chiều là một cấu trúc có hai đặc tính chính. "Bề mặt tối thiểu" về mặt toán học được định nghĩa là các bề mặt có độ cong trung bình bằng không tại mọi điểm trên bề mặt, giúp tối ưu hóa diện tích bề mặt trong một thể tích nhất định. Đặc tính "Tuần hoàn ba chiều" có nghĩa là các cấu trúc này được tạo nên thông qua sự lặp lại tuần hoàn của một khối hình học cơ sở, được gọi là ô đơn vị theo các hướng. Toàn bộ cấu trúc vĩ mô của vật liệu chính là một mạng lưới liên mạch được tạo thành từ nhiều ô đơn vị này xếp cạnh nhau (Hình 1).



**Hình 1.** Cấu trúc TPMS và một đơn vị của nó.

Cấu trúc liên kết phức tạp của bề mặt bên trong một ô đơn vị có thể được xác định chính xác thông qua các phương pháp khác nhau, trong đó phổ biến nhất là sử dụng phương trình xấp xỉ level-set  $\phi(x,y,z) = c$ . Phương trình này định nghĩa một bề mặt ngăn chia không gian của ô đơn vị thành hai vùng (rỗng và rỗng), và hằng số  $c$  cho phép điều khiển mật độ tương đối của cấu trúc. Với  $c=0$ , bề mặt chia không gian thành hai thể tích bằng nhau (mật độ 50%)

Các loại TPMS được nghiên cứu phổ biến nhất được biểu diễn thông qua các phương trình đặc trưng là:

- Primitive (P):

$$\cos(2\pi x) + \cos(2\pi y) + \cos(2\pi z) = c \quad (1)$$

- Gyroid (G):

$$\sin(2\pi x) * \cos(2\pi y) + \sin(2\pi y) * \cos(2\pi z) + \sin(2\pi z) * \cos(2\pi x) = c \quad (2)$$

- Diamond (D):

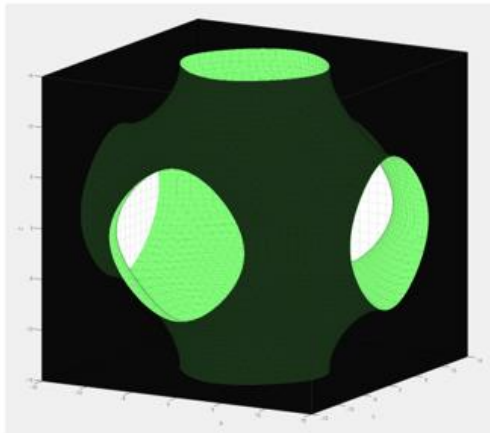
$$\cos(2\pi x) * \cos(2\pi y) * \cos(2\pi z) - \sin(2\pi x) * \sin(2\pi y) * \sin(2\pi z) = c \quad (3)$$

- I-WP:

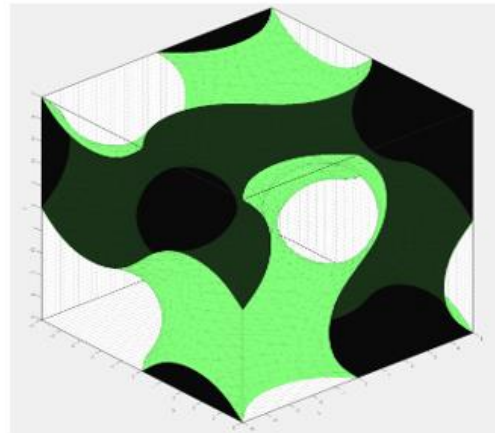
$$2[\cos(2\pi x) * \cos(2\pi y) + \cos(2\pi y) * \cos(2\pi z) + \cos(2\pi z) * \cos(2\pi x)] - [\cos(4\pi x) + \cos(4\pi y) + \cos(4\pi z)] = c \quad (4)$$

Đối với mỗi phương trình ở trên, giá trị  $x, y$  và  $z$  là tọa độ trong hệ tọa độ Descartes. Các ô đơn vị của từng loại cấu trúc này được biểu diễn trong Hình 2.

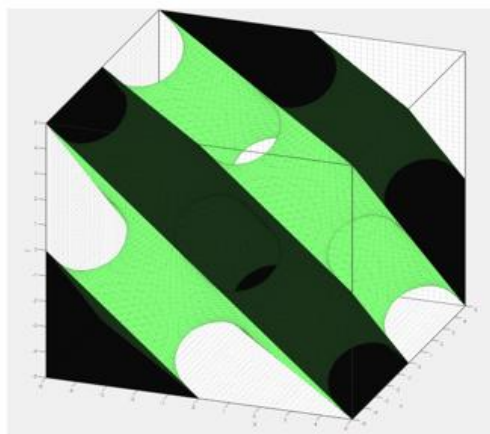
a)



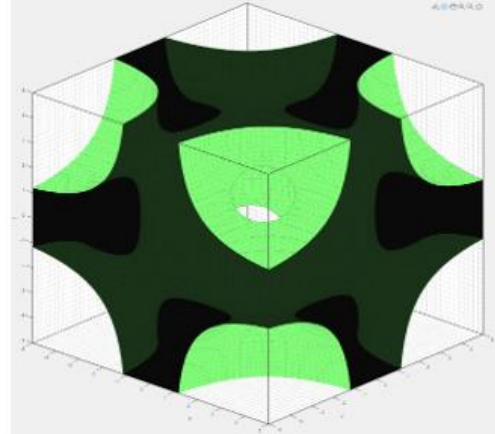
b)



c)



d)



**Hình 2.** Hình dạng của cấu trúc TPMS. (a) Primitive, (b) Gyroid, (c)Diamond, (d) I-WP.

### 3. Ứng xử động của cấu trúc mạng TPMS

Trong nghiên cứu này, hiệu suất động học của lớp vỏ bảo vệ bằng bê tông cấu trúc TPMS-Primitive được đánh giá chi tiết thông qua phương pháp mô phỏng số. Một kịch bản va xô tàu điển hình được sử dụng để phân tích và so sánh phản ứng của hai mô hình. Việc lựa chọn các tham số cho kịch bản va chạm này được căn cứ trên đối tượng nghiên cứu mục tiêu, vốn là các trụ cầu cũ trên hệ thống đường thủy nội địa. Các trụ này chủ yếu nằm trên các tuyến đường thủy có cấp kỹ thuật IV trở xuống. Theo TCVN 5664:2009, trọng tải của các tàu trên tuyến có cấp kỹ thuật IV được quy định là 100 tấn. Vận tốc khai thác thông thường của tàu lưu thông trong luồng nằm trong khoảng 3-5 m/s [15].

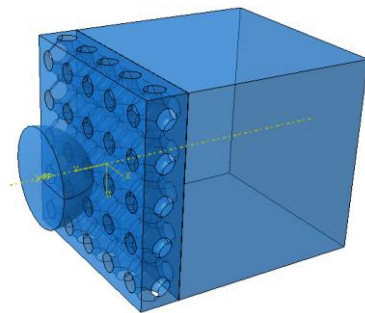
Đối tượng nghiên cứu chính là một trụ cầu bê tông, được mô hình hóa dưới dạng một khối đặc đồng nhất có kích thước hình học là 2,5m cao, 4,0m rộng, 2,5m dày. Kích thước được lựa chọn dựa trên khảo sát thực tế các trụ cầu phổ biến trên một số tuyến đường thủy nội địa cấp thấp. Việc mô phỏng một kết cấu có độ cứng tổng thể rất cao như vậy là một chủ đích. Điều này nhằm tạo ra một kịch bản thử nghiệm bất lợi, vì năng lượng va chạm sẽ ít bị tiêu tán qua biến dạng uốn tổng thể của kết cấu. Do đó, mô phỏng cho phép đánh giá trực diện hiệu quả hấp thụ năng lượng của vật liệu TPMS (thông qua sụp đổ lũy tiến) so với sự phá hủy giòn và đột ngột của bê tông đặc, thay vì để năng lượng bị tiêu tán qua sự uốn dẻo của một cây cột cao. Trong trường hợp tham chiếu, trụ cầu chịu tác động va chạm trực tiếp từ tàu. Trong trường hợp đề xuất, trụ lõi bê tông có cùng kích thước được bảo vệ bởi một lớp vỏ bên ngoài, lớp vỏ này cũng được làm bằng bê tông nhưng có cấu trúc dạng mạng TPMS.

Trong mô hình mô phỏng, lớp vỏ bảo vệ được thiết kế bằng cấu trúc TPMS dạng Primitive (P), với tỉ lệ thể tích được là  $\rho = 50\%$  với kích thước của tấm là  $2.5 \times 2.5 \times 0.5$  m, bao gồm 25 đơn vị với mỗi ô đơn vị có kích thước  $0.5 \times 0.5 \times 0.5$  m. Sự lựa chọn cấu trúc Primitive được dựa trên cả cơ sở lý thuyết và thực tiễn chế tạo. Về mặt lý thuyết, cấu trúc Primitive đã được chứng minh trong các nghiên cứu trước đây là có độ cứng và độ bền cao hơn so với các dạng TPMS phổ biến khác khi có cùng một tỉ lệ thể tích [16]. Bên cạnh đó, về mặt thực tiễn, đặc biệt là khi làm việc với

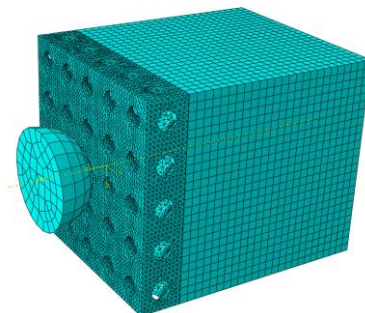
vật liệu bê tông, cấu trúc Primitive sở hữu một ưu điểm then chốt: nó tạo ra các kênh rỗng và khoảng không gian bên trong lớn và thông suốt nhất so với các dạng như Gyroid hay Diamond. Đặc tính này mang lại lợi thế thi công rất lớn, giúp cho việc đổ bê tông vào ván khuôn được tạo hình từ cấu trúc này trở nên dễ dàng và khả thi hơn, đảm bảo bê tông có thể lấp đầy toàn bộ các chi tiết phức tạp của khuôn đúc.

Toàn bộ mô hình va chạm của hệ thống trụ-vỏ được thể hiện chi tiết trong Hình 3. Các phần tử khối solid loại C3D8R đã được sử dụng để rời rạc hóa toàn bộ mô hình, đây là loại phần tử phù hợp cho các bài toán va chạm và biến dạng lớn trong Abaqus/Explicit. Kích thước các phần tử được không chế nằm trong khoảng giá trị 50mm. Tổng số phần tử của hệ xấp xỉ 100 000 phần tử C3D8R.

a)



b)

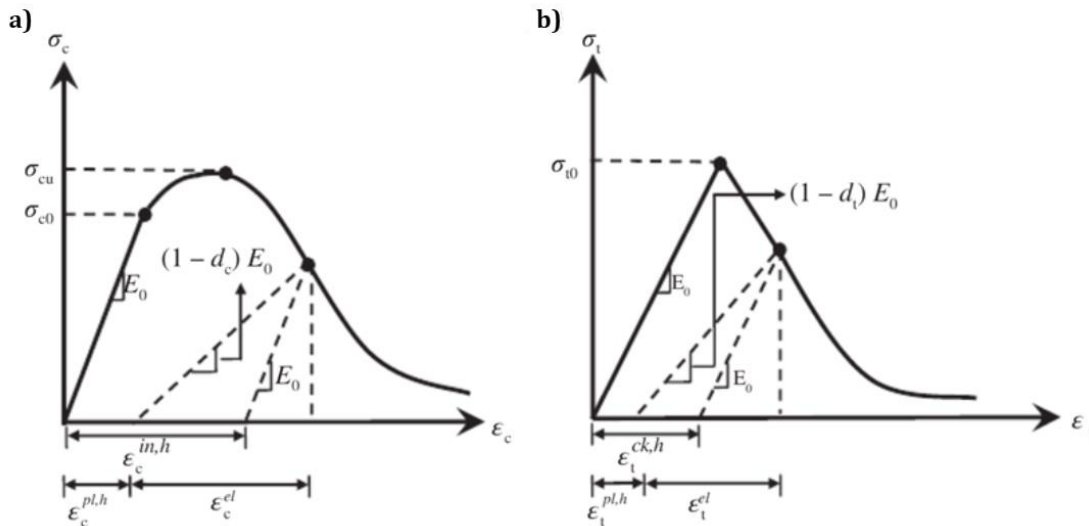


**Hình 3.** Mô hình và chạm của trụ cầu. (a) Mô hình hình học, (b) Mô hình chia lưới phần tử.

Tác nhân va chạm trong mô phỏng là mũi của một sà lan, được đơn giản hóa thành một khối hình học (như trong Hình 3). Khối này được định nghĩa là một vật cứng (rigid body) trong Abaqus. Việc đơn giản hóa mũi tàu thành vật cứng dựa trên hai lý do chính. Thứ nhất, nó cho phép tập trung tài nguyên tính toán vào ứng xử của trụ cầu và lớp vỏ TPMS. Thứ hai, đây là một giả định mang tính bảo thủ. Khi tàu được định

nghĩa là vật cứng không biến dạng, nó sẽ không tự hấp thụ bất kỳ phần năng lượng va chạm nào. Điều này buộc toàn bộ động năng của tàu phải được hấp thụ hoàn toàn bởi hệ thống trụ-vỏ, tạo ra một kịch bản va chạm bất lợi nhất và khiến cho kết quả đánh giá hiệu quả bảo vệ trở nên an toàn và đáng tin cậy hơn. Toàn bộ khối lượng tương đương của một sà lan 100 DWT được gán cho vật cứng này. Về kích thước, đường kính của khối cứng được lựa chọn =2m không nhằm mô phỏng độ bền thực tế của mũi tàu, mà nhằm mục đích đại diện cho một vùng tiếp xúc ban đầu hợp lý, qua đó lực va chạm được truyền từ tàu sang hệ thống bảo vệ. Một vận tốc ban đầu 5 m/s được gán cho khối cứng theo hướng va chạm trực diện, vuông góc với bề mặt hệ thống vỏ bảo vệ.

Để mô tả sự làm việc phi tuyến của vật liệu giòn như bê tông, mô hình phá hoại dẻo của bê tông (Simplified Concrete Damage Plasticity – SCDP) được sử dụng [17]. Mô hình này được miêu tả một cách trực quan qua các đường cong ứng suất-biến dạng trong Hình 4. Hình 4a thể hiện ứng xử của bê tông khi chịu nén. Ban đầu, vật liệu có ứng xử đàn hồi tuyến tính với mô đun ban đầu  $E_0$ . Sau khi đạt đến ứng suất nén cực đại  $\sigma_{cu}$ , vật liệu bắt đầu đi vào giai đoạn suy giảm, nơi khả năng chịu tải giảm dần trong khi biến dạng không đàn hồi ( $\epsilon^{in,h}$ ) tiếp tục tăng. Hình 4b mô tả ứng xử chịu kéo, đặc trưng bởi sự gia tăng ứng suất tuyến tính cho đến khi đạt cường độ chịu kéo cực đại ( $\sigma_{tu}$ ), tại điểm này vật liệu bắt đầu xuất hiện nứt. Sau đỉnh này, khả năng chịu tải của vật liệu giảm đột ngột, mô phỏng sự phát triển của vết nứt, đặc trưng bởi biến dạng nứt ( $\epsilon^{ck,h}$ ).



Hình 4. Mô hình phá hoại dẻo của bê tông. (a) Chịu nén, (b) Chịu kéo.

Trong mô hình SCDP, vấn đề quan trọng nhất là xác định sự suy giảm độ cứng của vật liệu khi bị hư hỏng. Như được minh họa bằng các đường nét đứt trong Hình 4, khi vật liệu bị hư hỏng, mô đun đàn hồi của nó bị suy giảm từ giá trị ban đầu  $E_0$  xuống một giá trị thấp hơn. Sự mất mát về khả năng chịu lực này được định lượng bằng các tham số hư hỏng. Mô hình SCDP cho phép tính toán các tham số hư hỏng này cho cả chịu nén và chịu kéo. Tham số hư hỏng chịu nén  $d_c$  biểu thị mức độ mất mát khả năng chịu lực trong giai đoạn suy giảm sau khi đạt đỉnh, được tính bằng:

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{cu}} \quad (5)$$

Trong đó  $\sigma_c$  là ứng suất nén danh nghĩa và  $\sigma_{cu}$  là ứng suất nén cực đại.

Tương tự, tham số hư hỏng chịu kéo,  $d_t$  được tính bằng:

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_{tu}} \quad (6)$$

Trong đó  $\sigma_t$  là ứng suất kéo danh nghĩa và  $\sigma_{tu}$  là ứng suất kéo cực đại.

Các giá trị ứng suất, biến dạng không đàn hồi, biến dạng nứt và các tham số hư hỏng tương ứng được sử dụng để định nghĩa vật liệu bê tông trong mô hình mô phỏng được trình bày chi tiết trong Bảng 1.

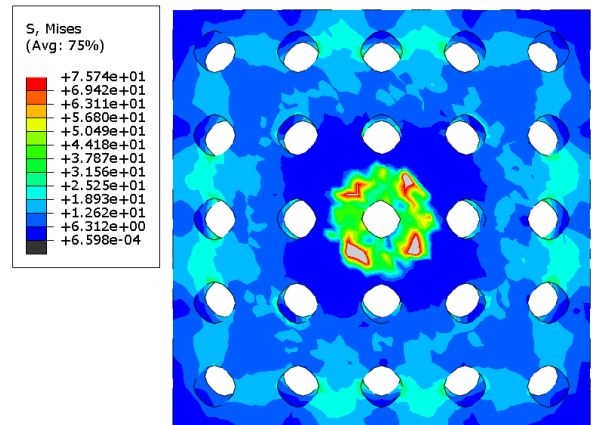
**Bảng 1.** Các tham số phá hoại của bê tông [17].

Tham số dẻo				
Góc giãn nở (°)	Độ lệch tâm	fb0/fc0	K	Tham số độ nhớt (s)
36	0.1	1.16	0.667	0.0001
Ứng xử nén			Ứng xử kéo	
Ứng suất (Mpa)	Biến dạng không đàn hồi	Tham số phá hoại C	Ứng suất (Mpa)	Biến dạng nứt
5.3	0	0	3.4	0
19.2	0.000048	0	0.034	0.0053
22.5	0.000119	0	-	-
25.2	0.000214	0	-	-
27.3	0.000333	0	-	-
28.8	0.000474	0	-	-
29.7	0.000639	0	-	-
30	0.000828	0	-	-
29.7	0.001039	0.01	-	-
28.8	0.001274	0.04	-	-
27.3	0.001533	0.09	-	-
25.2	0.001814	0.16	-	-
22.5	0.002119	0.25	-	-
19.2	0.002448	0.36	-	-
15.3	0.002800	0.49	-	-
10.8	0.003175	0.64	-	-
5.7	0.003573	0.81	-	-

#### 4. Kết quả và Thảo luận

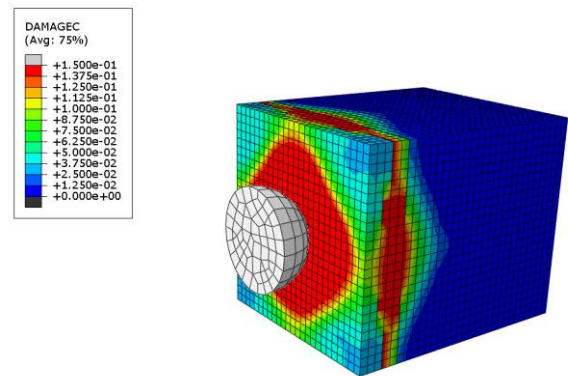
Phần này trình bày và phân tích so sánh chi tiết phản ứng động học của hai trường hợp: trụ cầu không được bảo vệ và trụ cầu được bảo vệ bằng lớp vỏ bê tông TPMS dưới cùng một kịch bản va chạm tàu. Trước tiên, để hiểu rõ cơ chế làm việc của lớp vỏ bảo vệ, Hình 5 hiển thị trường phân bố ứng suất von Mises trên một mặt cắt ngang của cấu trúc TPMS-Primitive tại thời điểm ứng suất cực đại. Có thể quan sát rõ ràng một vùng tập trung ứng suất hình thành trong các thành mỏng của cấu trúc nằm ngay bên dưới khu vực tiếp xúc trực tiếp

với mũi tàu. Điều này chỉ ra rằng các bộ phận này của cấu trúc TPMS được kích hoạt đầu tiên và chịu tải trọng nén cục bộ lớn nhất. Lực va chạm sau đó được truyền và phân tán ra các cấu trúc lân cận, thể hiện qua sự suy giảm của trường ứng suất khi đi xa dần tâm va chạm. Vùng tập trung ứng suất cao này chính là nơi khởi nguồn cho sự phá hủy vật liệu (như được thể hiện trong Hình 6b), khởi đầu cho cơ chế sụp đổ lũy tiến của vỏ bảo vệ.

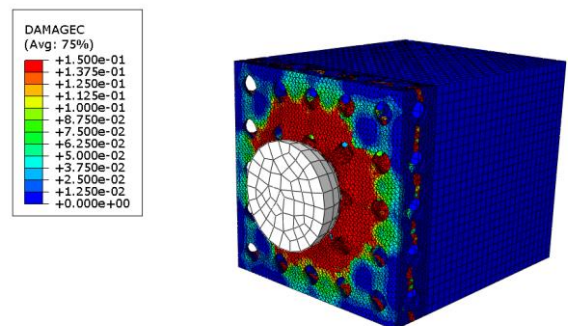


**Hình 5.** Biểu đồ phân bố ứng suất bên trong lớp TPMS.

a)



b)



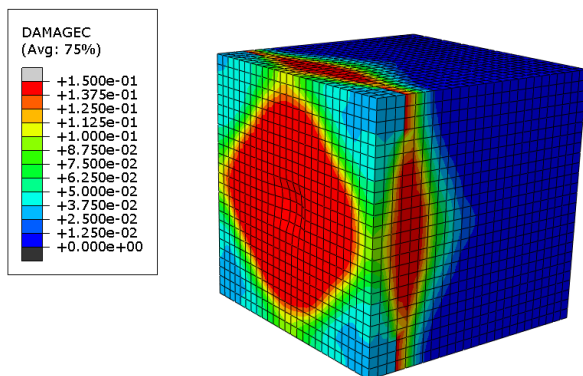
**Hình 6.** Hình ảnh và chạm của trụ cầu. (a) Không có lớp bảo vệ, (b) Có lớp TPMS bảo vệ.

Hình 6 trình bày so sánh trực quan về cơ chế phá hủy trong hai trường hợp tại thời điểm va chạm, thông qua trường phân bố của tham số hư hỏng chịu nén ( $d_c$ ). Tham số này, được định nghĩa trong mô hình SCDP, định lượng mức độ vật liệu bị nghiền nát và mất khả năng chịu lực. Trên thang màu, màu xanh dương (giá trị gần 0) biểu thị vật liệu còn nguyên vẹn, trong khi các màu từ xanh lá đến đỏ biểu thị vật liệu đã bị hư hỏng và phá hủy.

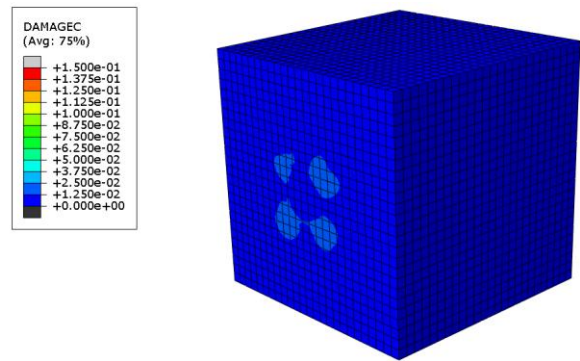
Trong trường hợp trụ không được bảo vệ, mũi tàu va chạm trực tiếp vào thân trụ bê tông. Ngay tại thời điểm tiếp xúc ban đầu, một vùng ứng suất tập trung xuất hiện tại điểm va chạm, dẫn đến sự phá hủy cục bộ nghiêm trọng. Có thể quan sát rõ ràng một vùng phá hủy hình nón đặc trưng, thể hiện bằng dải màu đỏ và cam, lan truyền sâu vào bên trong lõi trụ. Phản ứng của trụ mang đặc trưng của phá hủy giòn, với năng lượng va chạm gây ra hư hỏng nghiêm trọng và xuyên sâu vào lõi trụ, đe dọa đến tính toàn vẹn kết cấu tổng thể.

Ngược lại, trong trường hợp trụ được bảo vệ, lớp vỏ bê tông cấu trúc TPMS đóng vai trò là cấu kiện hy sinh, tiếp nhận và xử lý năng lượng va chạm trước khi nó kịp truyền tới trụ lõi. Hình 6b cho thấy mũi tàu va chạm vào lớp vỏ TPMS. Thay vì phá hủy tập trung, lớp vỏ TPMS thể hiện một cơ chế sụp đổ lũy tiến. Cấu trúc TPMS tại vùng va chạm bị nghiền nát, các thành mỏng của cấu trúc bê tông TPMS bị uốn, gãy và vỡ vụn một cách tuần tự. Quá trình sụp đổ và phá vỡ cấu trúc có kiểm soát này tiêu tán một lượng năng lượng va chạm lớn.

a)



b)



**Hình 7.** Trạng thái hư hỏng của trụ khi. (a) Không có lớp vỏ bảo vệ, (b) Bó lớp TPMS bảo vệ.

So sánh trực quan trạng thái hư hỏng cuối cùng của trụ trong Hình 7, trụ lõi bên trong hệ thống TPMS gần như được bảo vệ nguyên vẹn. Các tham số hư hỏng trên thân trụ lõi là rất nhỏ, cho thấy ứng suất truyền qua lớp vỏ TPMS đã được giảm thiểu đáng kể, nằm trong khả năng chịu đựng đàn hồi của trụ chính. Điều này chứng minh rõ ràng hiệu quả của lớp vỏ TPMS trong việc chuyển đổi cơ chế phá hủy từ dạng giòn và tập trung sang dạng dẻo và phân tán.

Để định lượng hiệu quả bảo vệ một cách rõ ràng, việc phân tích sự chuyển hóa năng lượng trong quá trình va chạm là vô cùng quan trọng. Một vụ va chạm, về bản chất là một quá trình chuyển hóa năng lượng cực kỳ nhanh, tuân theo Định luật Bảo toàn Năng lượng, trong đó toàn bộ Động năng của hệ thống – chủ yếu là năng lượng do tàu chuyển động ( $1/2 \cdot m \cdot v^2$ ) – phải được chuyển hóa khi va chạm xảy ra. Năng lượng này không mất đi, mà nó được chuyển hóa thành Nội năng bên trong các cấu kiện. Nội năng chính là năng lượng được vật liệu hấp thụ thông qua các quá trình như biến dạng đàn hồi, biến dạng dẻo và phá hủy vật liệu.

Bằng cách theo dõi lịch sử của hai dạng năng lượng này, chúng ta có thể xác định chính xác năng lượng va chạm đã được phân bố đi đâu: nó bị trụ cầu hấp thụ trực tiếp (gây hư hỏng), hay nó đã bị lớp vỏ TPMS "hy sinh" hấp thụ và triệt tiêu một cách hiệu quả. Các biểu đồ sau đây sẽ làm rõ cơ chế phân bố năng lượng này trong cả hai trường hợp.

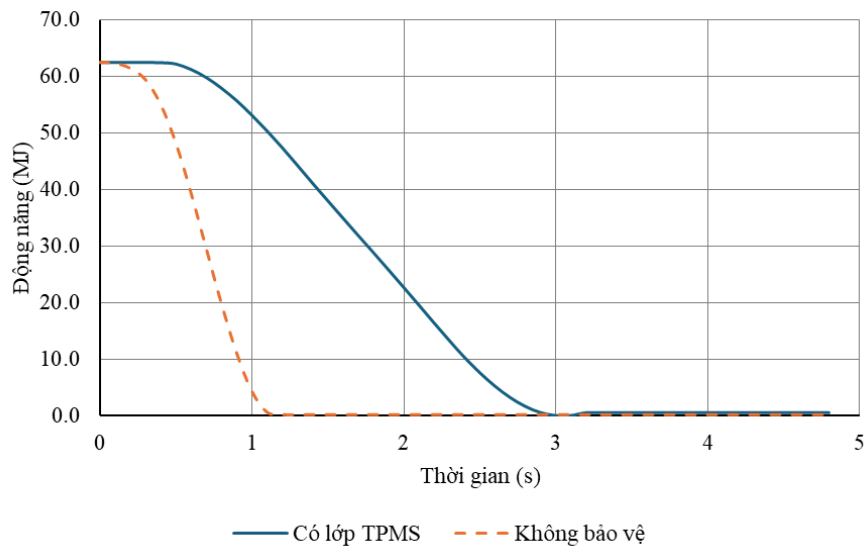
Hình 8 trình bày lịch sử suy giảm động năng của toàn hệ thống cho cả hai trường hợp mô phỏng.

Động năng của hệ tại thời điểm ban đầu ( $t=0$ ) chủ yếu là động năng của mũi tàu đang chuyển động, và giá trị này là như nhau trong cả hai kịch bản (khoảng 62 MJ), đảm bảo một phép so sánh công bằng về năng lượng va chạm đầu vào.

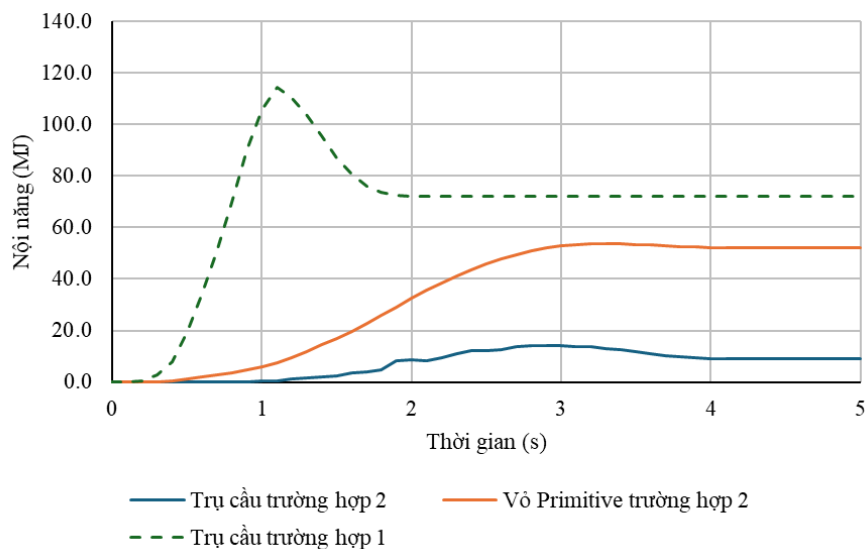
Sự khác biệt rõ rệt nằm ở tốc độ tiêu tán động năng. Trong trường hợp trụ không được bảo vệ (đường nét đứt), động năng của hệ giảm xuống 0 một cách đột ngột và rất nhanh, với toàn bộ quá trình va chạm chỉ diễn ra trong khoảng thời gian ngắn. Điều này đặc trưng cho một vụ va chạm cứng, nơi năng lượng được truyền đi và tiêu tán

tức thời, thường dẫn đến lực va đập đỉnh rất cao.

Ngược lại, trong trường hợp có lớp vỏ TPMS (đường liền), quá trình suy giảm động năng diễn ra một cách từ từ và kéo dài hơn đáng kể, mất nhiều thời gian hơn để triệt tiêu hoàn toàn. Nguyên nhân là do lớp vỏ TPMS đã hoạt động như một bộ đệm, bị nghiền nát và sụp đổ một cách lũy tiến. Bằng cách "làm mềm" vụ va chạm và kéo dài thời gian tương tác ( $\Delta t$ ), lớp vỏ bảo vệ đã làm giảm đáng kể lực va chạm đỉnh truyền vào kết cấu, theo đúng nguyên lý xung lượng-động lượng ( $F=\Delta p/\Delta t$ ). Biểu đồ này cung cấp bằng chứng rõ ràng về sự thay đổi cơ chế phản ứng của hệ thống khi có sự tham gia của lớp vỏ TPMS.



**Hình 8.** Động năng của toàn hệ.



**Hình 9.** Nội năng của hệ.

Trong khi Hình 8 mô tả thời gian và tốc độ suy giảm động năng của hệ thống, thì Hình 9 giải thích năng lượng đó đã được phân bố đi đâu bằng cách thể hiện lịch sử hấp thụ Nội năng của các cấu kiện.

Trong trường hợp trụ không được bảo vệ, đường nét đứt cho thấy toàn bộ quá trình chuyển hóa năng lượng này xảy ra trực tiếp bên trong trụ cầu. Hình 9 thể hiện nội năng của trụ tăng vọt, đạt giá trị cực đại và ổn định ở 70 MJ sau đó. Giá trị nội năng cao này tương ứng trực tiếp với mức độ hư hỏng nghiêm trọng và phá hủy vật liệu trên diện rộng đã quan sát được trong Hình 6a và Hình 7a.

Ngược lại, trong trường hợp trụ được bảo vệ, biểu đồ năng lượng cho thấy một cơ chế phân bố năng lượng hiệu quả. Hệ thống này được đại diện bởi hai đường cong: Thứ nhất, đường màu cam thể hiện nội năng của lớp Vỏ Primitive có xu hướng tăng vọt lên và ổn định ở mức cao, khoảng 55 MJ. Đường cong màu xanh tiếp theo thể hiện Nội năng của phần trụ được bảo vệ, xu hướng của đường này là tăng rất chậm và ổn định ở 15 MJ. Tổng nội năng mà toàn bộ hệ thống đã hấp thụ là tổng của hai giá trị này  $IE_{tổng} = 70$  MJ. Từ đó có thể tính toán được phần năng lượng mà lớp vỏ đã hấp thụ là  $55MJ / 70MJ = 80\%$  Phân tích nội năng của các cấu kiện cho thấy lớp vỏ bê tông TPMS hấp thụ phần lớn nội năng của hệ thống, xấp xỉ 80% tổng nội năng bị tiêu tán. Năng lượng này được tiêu thụ qua quá trình sụp đổ lũy tiến, nứt và vỡ vụn của cấu trúc TPMS. Chỉ một phần nhỏ năng lượng được truyền vào và hấp thụ bởi trụ lõi bên trong. Nói cách khác, lớp vỏ TPMS đã hoạt động như một lớp hy sinh chủ động hấp thụ và triệt tiêu năng lượng va chạm thông qua cơ chế phá hủy có kiểm soát, trước khi năng lượng đó có thể tiếp cận và gây hại cho kết cấu trụ chính. Các chỉ tiêu so sánh hiệu suất chống va xô của lớp vỏ bảo vệ TPMS-Primitive được so sánh và tổng hợp trong Bảng 2.

**Bảng 2.** Tổng hợp so sánh hiệu suất chống va xô.

Chỉ tiêu	Trụ không bảo vệ	Trụ có vỏ TPMS-Primitive
Năng lượng hấp thụ trực tiếp bởi trụ cầu, gây hư	Toàn bộ năng lượng va chạm (~70 MJ) bị hấp thụ trực tiếp bởi trụ cầu, gây hư	Năng lượng được phân bố hiệu quả: Vỏ TPMS hấp thụ ~55 MJ (xấp xỉ 80% tổng năng lượng). Trụ lõi (được

(Nội năng)	hỏng nghiêm trọng.	bảo vệ): Chỉ hấp thụ ~15 MJ.
Chuyển vị ngang của trụ	3.4 mm	1.578 mm
Cơ chế phá hủy	Phá hủy giòn, tập trung. Hư hỏng lan truyền sâu vào lõi trụ.	Sụp đổ lũy tiến, có kiểm soát, và phân tán. Năng lượng được tiêu tán qua việc nghiền nát cấu trúc vỏ.
Tình trạng trụ lõi sau va chạm	Hư hỏng nghiêm trọng, phá hủy trên diện rộng.	Gần như nguyên vẹn. Các tham số hư hỏng trên thân trụ lõi là rất nhỏ

## 5. Kết luận và kiến nghị

Nghiên cứu này đã tiến hành một phân tích mô phỏng số chi tiết nhằm đánh giá hiệu quả của việc sử dụng lớp vỏ bảo vệ bằng bê tông có cấu trúc TPMS-Primitive, với mục tiêu tăng cường khả năng chống va xô cho trụ cầu bê tông. Thông qua việc so sánh hai trường hợp mô phỏng, bao gồm trụ cầu không được bảo vệ và trụ cầu được bảo vệ, các kết quả đã cho thấy một cách rõ ràng những lợi ích vượt trội của giải pháp đề xuất.

Kết quả cho thấy lớp vỏ bê tông TPMS đã hoạt động như một hệ thống hy sinh hiệu quả cao, hấp thụ và tiêu tán xấp xỉ 80% tổng năng lượng va chạm của hệ thống. Cụ thể, trong khi trụ không được bảo vệ phải hấp thụ toàn bộ 70 MJ năng lượng, thì ở trường hợp được bảo vệ, lớp vỏ TPMS đã hấp thụ 55 MJ, chỉ để trụ lõi hấp thụ 15 MJ. Việc hấp thụ năng lượng chủ động này đã bảo vệ trực tiếp trụ lõi, giúp giảm chuyển vị ngang tối đa của trụ xuống còn 1.578 mm, tương đương mức giảm 53,6% so với 3.4 mm của trụ không được bảo vệ. Kết quả cho thấy rõ lớp vỏ TPMS đã kéo dài đáng kể thời gian va chạm, qua đó "làm mềm" vụ va chạm và giảm thiểu đáng kể lực va chạm đỉnh truyền vào kết cấu chính.

Phân tích cơ chế phá hủy cho thấy lớp vỏ TPMS đã chuyển đổi hình thức phá hủy từ dạng giòn, tập trung và đột ngột sang cơ chế sụp đổ lũy tiến có kiểm soát, giúp tiêu tán một lượng lớn năng lượng va chạm. Kết quả đánh giá hư hỏng vật liệu cũng xác nhận rằng trụ trong trường hợp có lớp bảo vệ

gần như được bảo toàn nguyên vẹn, trong khi trụ bình thường chịu hư hỏng nghiêm trọng trên diện rộng. Các kết quả phân tích trên là minh chứng cho tính khả thi của việc "cấu trúc hóa vật liệu" cho các ứng dụng bảo vệ, cho thấy ngay cả vật liệu giòn như bê tông cũng có thể biểu hiện cơ chế hấp thụ năng lượng hiệu quả khi được chế tạo dưới dạng TPMS.

Mặc dù các kết quả mô phỏng là rất hứa hẹn, nghiên cứu này còn một số hạn chế quan trọng cần được nhấn mạnh. Hạn chế lớn nhất là toàn bộ phân tích đều dựa trên mô phỏng số, và mô hình vật liệu bê tông SCDP dù chi tiết nhưng vẫn là một sự lý tưởng hóa. Do đó, việc kiểm chứng bằng thực nghiệm trên quy mô lớn là vô cùng cần thiết để xác nhận các phát hiện này. Thêm vào đó, nghiên cứu mới chỉ xem xét kích bản va chạm trực diện; ảnh hưởng của các góc va chạm khác nhau, vốn rất thực tế, vẫn chưa được khảo sát. Về mặt ứng dụng, tính khả thi thi công thực tế và phân tích chi phí-hiệu quả của việc chế tạo các cấu trúc bê tông TPMS phức tạp trên quy mô lớn hiện vẫn là một thách thức công nghệ lớn. Khả năng chịu đựng lâu dài của cấu trúc này trong các môi trường xâm thực khắc nghiệt, đặc biệt là môi trường ăn mòn biển, cũng là một yếu tố then chốt chưa được đánh giá.

Dựa trên những kết quả ban đầu và các hạn chế đã nêu, các hướng nghiên cứu trong tương lai cần tập trung vào việc tối ưu hóa các thông số hình học của cấu trúc TPMS nhằm tối đa hóa khả năng hấp thụ năng lượng, đồng thời phải giải quyết các thách thức về kiểm chứng thực nghiệm, chi phí, tính khả thi thi công và độ bền vật liệu trong điều kiện vận hành thực tế.

### Đóng góp của các tác giả trong bài báo

**Nguyễn Tuấn Bình:** Phương pháp, Xây dựng kế hoạch, Trực quan hóa, Tiếp nhận tài trợ, Viết bản thảo gốc. **Lê Bá Anh:** Biên soạn dữ liệu, Phân tích dữ liệu, Thực hiện tính toán, Chính sửa bản thảo. Phản hồi ý kiến phản biện,

### Tuyên bố không xung đột lợi ích và cam kết bản quyền

Các tác giả tuyên bố về sự không xuất hiện những xung đột tiềm ẩn từ nghiên cứu này, và cam kết bài báo chưa từng được công bố trước đây.

### Chia sẻ dữ liệu theo yêu cầu

Dữ liệu sẽ được cung cấp theo yêu cầu.

1<sup>st</sup> Nguyen Tuan Binh. *University of Transport and Communications*

2<sup>nd</sup> Le Ba Anh\*. *University of Transport and Communications*

\*Corresponding author: baanh.le@utc.edu.vn

### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2025-CT-023.

### Tài liệu tham khảo

- [1] A. Goswami and S. D. Adhikary, "Retrofitting materials for enhanced blast performance of Structures: Recent advancement and challenges ahead," *Construction and Building Materials*, vol. 204, pp. 224–243, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.188.
- [2] C. Zhang, G. Gholipour, and A. A. Mousavi, "Blast loads induced responses of RC structural members: State-of-the-art review," *Composites Part B: Engineering*, vol. 195, p. 108066, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108066.
- [3] H. B. Rebelo and C. Cismasiu, "Robustness assessment of a deterministically designed sacrificial cladding for structural protection," *Engineering Structures*, vol. 240, p. 112279, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112279.
- [4] M. Alphonse, V. K. Bupesh Raja, V. Gopala Krishna, R. S. U. Kiran, B. V. Subbaiah, and L. V. R. Chandra, "Mechanical behavior of sandwich structures with varying core material – A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 44, pp. 3751–3759, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.722.
- [5] N. H. Vo, T. M. Pham, K. Bi, W. Chen, and H. Hao, "Stress Wave Mitigation Properties of Dual-meta Panels against Blast Loads," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 154, p. 103877, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2021.103877.
- [6] F. S. L. Bobbert *et al.*, "Additively manufactured metallic porous biomaterials based on minimal surfaces: A unique combination of topological, mechanical, and mass transport properties," *Acta Biomaterialia*, vol. 53, pp. 572–584, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.actbio.2017.02.024.

- [7] J. Chen *et al.*, "Fabrication and development of mechanical metamaterials via additive manufacturing for biomedical applications: a review," *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2024, doi: 10.1088/2631-7990/ad88e3.
- [8] N. V. Viet, N. Karathanasopoulos, and W. Zaki, "Mechanical attributes and wave propagation characteristics of TPMS lattice structures," *Mechanics of Materials*, vol. 172, p. 104363, Sept. 2022, doi: 10.1016/j.mechmat.2022.104363.
- [9] B. Liu, M. Liu, H. Cheng, W. Cao, and P. Lu, "A new stress-driven composite porous structure design method based on triply periodic minimal surfaces," *Thin-Walled Structures*, vol. 181, p. 109974, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.tws.2022.109974.
- [10] A. Alhembar, A. N. Alagha, M. M. Naji, J. Sheikh-Ahmad, and F. Jarrar, "Recent Advancements in Design Optimization of Lattice-Structured Materials," *Adv Eng Mater*, vol. 25, no. 17, p. 2201780, Sept. 2023, doi: 10.1002/adem.202201780.
- [11] R. Asbai-Ghoudan, S. Ruiz De Galarreta, and N. Rodriguez-Florez, "Analytical model for the prediction of permeability of triply periodic minimal surfaces," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 124, p. 104804, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jmbbm.2021.104804.
- [12] V. Nguyen-Van, P. Tran, C. Peng, L. Pham, G. Zhang, and H. Nguyen-Xuan, "Bioinspired cellular cementitious structures for prefabricated construction: Hybrid design & performance evaluations," *Automation in Construction*, vol. 119, p. 103324, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103324.
- [13] V. Nguyen-Van, N. K. Choudhry, B. Panda, H. Nguyen-Xuan, and P. Tran, "Performance of concrete beam reinforced with 3D printed Bioinspired primitive scaffold subjected to three-point bending," *Automation in Construction*, vol. 134, p. 104060, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2021.104060.
- [14] V. Nguyen-Van, J. Liu, C. Peng, G. Zhang, H. Nguyen-Xuan, and P. Tran, "Dynamic responses of bioinspired plastic-reinforced cementitious beams," *Cement and Concrete Composites*, vol. 133, p. 104682, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104682.
- [15] JICA B. G. T. V. T., "Giao thông vận tải đường thủy nội địa," 2010.
- [16] B.-A. Le, B.-V. Tran, T.-S. Vu, Q.-B. Nguyen, H.-Q. Nguyen, and X. Chateau, "Anisotropy and mechanical characteristics of ultra-high performance concrete and its interpenetrating phase composite with triply periodic minimal surface architectures," *Journal of Applied Mechanics*, pp. 1–20, July 2024, doi: 10.1115/1.4065901.
- [17] M. Hafezolghorani, F. Hejazi, R. Vaghei, M. S. B. Jaafar, and K. Karimzade, "Simplified Damage Plasticity Model for Concrete," *Structural Engineering International*, vol. 27, no. 1, pp. 68–78, Feb. 2017, doi: 10.2749/101686616X1081.