

NGHIÊN CỨU BỘ HẤP THỤ NĂNG LƯỢNG NHẪM GIẢM TÁC ĐỘNG CỦA ÁP LỰC NỔ LÊN KẾT CẤU CÔNG TRÌNH

Nguyễn Công Nghi¹, Lê Anh Tuấn², Vũ Chí Hải³

^{1, 2, 3}Học viện Kỹ thuật quân sự

Email: ¹congnghi.hd@gmail.com, 0986873001; ²tuanleanh@gmail.com, 0983538226

³vuhai110394@gmail.com, 0984089268

DOI: <https://doi.org/10.59382/hnkh17-ibst.2025.ses2-22>

TÓM TẮT: Giải pháp hấp thụ năng lượng của áp lực nổ có thể thực hiện bằng nhiều phương thức khác nhau, trong đó giải pháp sử dụng vật liệu có cấu trúc lỗ rỗng để tạo bộ hấp thụ áp lực nổ đã, đang được nghiên cứu và cho thấy những hiệu quả đáng kể. Nội dung nghiên cứu của bài báo tập trung đánh giá hiệu quả hấp thụ của vật liệu có cấu trúc lỗ rỗng, phương pháp tính toán bộ hấp thụ năng lượng. Tiến hành khảo sát thực nghiệm số thông qua phần mềm LS-DYNA để đánh giá hiệu quả của bộ hấp thụ năng lượng, cũng như khảo sát các trường hợp khác nhau để khẳng định thêm tính đúng đắn trong cách tính của bộ hấp thụ khi bỏ qua một số yếu tố để đơn giản hóa cách tính mà vẫn đảm bảo hiệu quả.

TỪ KHÓA: Bộ hấp thụ năng lượng, vật liệu xốp, tấm bê tông cốt thép, tấm dãn lực, phần mềm LS-DYNA.

ABSTRACT: Energy absorption solutions for blast pressure can be implemented in various ways. Among them, using porous (cellular) materials to create a blast-pressure absorber has been, and is being, investigated and has shown notable effectiveness. This paper focuses on evaluating the absorption efficiency of porous materials and on the calculation method for the energy-absorbing device. Numerical experiments are performed with the LS-DYNA software to assess the absorber's effectiveness, and different cases are examined to further confirm the validity of the calculation approach when certain factors are neglected to simplify the calculations while still ensuring effectiveness.

KEYWORDS: Energy absorber, porous material, reinforced concrete slab, layered composite plate, LS-DYNA.

1. GIỚI THIỆU

Khi một vụ nổ xảy ra, công trình phải chịu đồng thời nhiều dạng tác động khác nhau như áp lực sóng nổ, mảnh văng tốc độ cao, tác động nhiệt do cháy cũng như rung động truyền qua nền đất. Trong đó, áp lực sóng nổ thường được xem là yếu tố nguy hiểm nhất bởi đặc tính có đỉnh áp suất rất lớn, xuất hiện đột ngột trong thời gian cực ngắn và lan truyền trên diện rộng. Đặc tính này có thể gây chấn động dữ dội tại khu vực gần tâm nổ và đồng thời làm hư hại nghiêm trọng cho các công trình ở phạm vi xa hơn, gây thiệt hại đáng kể về kết cấu và con người [1].

Để hạn chế các tác động này, nhiều giải pháp truyền thống đã được áp dụng như tăng khoảng cách an toàn giữa tâm nổ và công trình, hoặc xây dựng các tường chắn, chương ngại nhằm làm suy giảm cường độ sóng nổ [2, 3]. Tuy nhiên, trong điều kiện thực tế,

đặc biệt với các công trình hiện hữu trong môi trường đô thị hoặc hạ tầng quân sự và dân sự đã có từ trước, việc tạo ra khoảng cách an toàn hoặc xây dựng kết cấu chắn nổ quy mô lớn thường không khả thi. Điều này đặt ra yêu cầu phải có những giải pháp thay thế vừa linh hoạt và vẫn đạt hiệu quả tốt.

Một hướng đi triển vọng được quan tâm mạnh mẽ trong những năm gần đây là phát triển các vật liệu và kết cấu có khả năng hấp thụ năng lượng. Thay vì chỉ cản hoặc phản xạ sóng nổ, các kết cấu này được thiết kế để tiêu tán năng lượng nhờ cơ chế biến dạng dẻo, sụp đổ các lỗ rỗng hoặc ma sát nội vật liệu. Các nghiên cứu thực nghiệm đã chỉ ra tính hiệu quả của vật liệu có cấu trúc lỗ rỗng (xốp) kim loại và kết cấu nhiều lớp trong việc giảm áp lực nổ [4], trong khi các mô phỏng số với kết cấu dạng hy sinh (sacrificial cladding) cũng khẳng định khả năng bảo vệ công trình trước tải trọng xung kích [5]. Trong lĩnh vực quân sự, các nước phát

triển đã ứng dụng nhiều giải pháp thực tiễn như HESCO barriers (khung thép - geotextile - đất/cát), tấm nhiều lớp thép - aluminium tổ ong, bột polyurethane trên phương tiện bọc thép, kính nhiều lớp (laminated glass) cho hạ tầng chống khủng bố và gần đây là nghiên cứu về vật liệu auxetic và polymer nanocomposites [6].

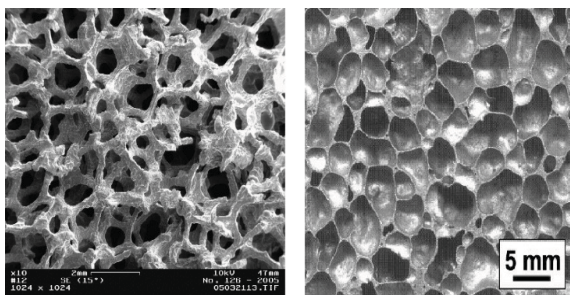
Xu hướng sử dụng vật liệu hấp thụ năng lượng trong bảo vệ công trình chống nổ vì vậy đang ngày càng được thúc đẩy. Đây không chỉ là giải pháp có ý nghĩa thực tiễn trong lĩnh vực quốc phòng mà còn là một chủ đề nghiên cứu mang tính chiến lược, với tiềm năng phát triển mạnh cả về lý thuyết lẫn ứng dụng.

Xuất phát từ những xu thế trên và những đặc trưng cơ bản trong khả năng hấp thụ áp lực tác động của vật liệu có cấu trúc lỗ rỗng (vật liệu xốp), bài báo tập trung nghiên cứu cơ chế ứng xử của vật liệu xốp khi chịu nén ép và giải pháp tạo bộ hấp thụ năng lượng sử dụng vật liệu xốp để giảm tác động của áp lực từ vụ nổ. Ngoài ra, đây là những vật liệu dễ sản xuất và khi được triển khai sẽ có nhiều khả năng ứng dụng thực tiễn trong cả quốc phòng và dân sinh.

2. KHẢ NĂNG HẤP THỤ NĂNG LƯỢNG TÁC ĐỘNG CỦA VẬT LIỆU XÓP

2.1. Đặc điểm cấu tạo của vật liệu xốp

Vật liệu xốp được tạo ra với hai yếu tố quan trọng là vật liệu nền và hình thái của pha khí. Có hai hình thái pha khí trong vật liệu xốp là lỗ rỗng mở và lỗ rỗng đóng kín (Hình 1). Các lỗ rỗng mở có cấu trúc dạng xương cho phép không khí có thể luân chuyển giữa các lỗ rỗng, còn đối với cấu trúc lỗ rỗng đóng kín ngoài cấu trúc xương như lỗ rỗng mở còn được ngăn cách bởi các vách ngăn bằng pha rắn, ngăn không cho khí thoát ra ngoài các lỗ rỗng. Ngoài ra kích thước lỗ rỗng đóng vai trò quan trọng trong ứng xử và kiểm soát tốc độ khí thoát ra khi vật liệu bị nén [7].



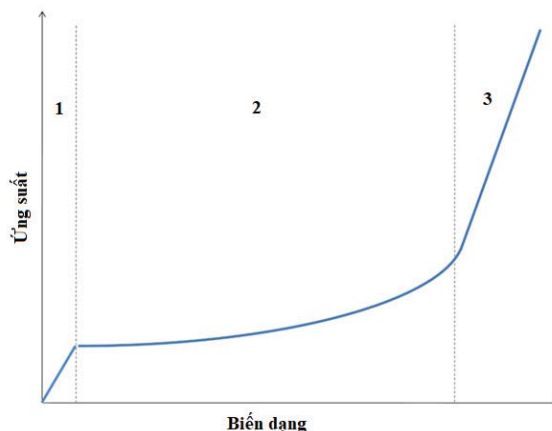
Hình 1 : Cấu trúc lỗ rỗng mở (trái) và lỗ rỗng kín (phải) [8]

Vật liệu nền có thể được làm từ nhiều loại vật liệu dạng cứng hoặc dẻo (có độ linh hoạt cao). Vật liệu nền dạng cứng thường tạo ra vật liệu xốp cứng ít có khả năng phục hồi. Cấu trúc của vật liệu bị phá vỡ do quá trình biến dạng dẻo hoặc vật liệu nền bị bẻ gãy. Trong ứng xử biến dạng dẻo, vật liệu nền trải qua biến dạng dẻo với rất ít hoặc không có khả năng phục hồi trạng thái [9].

2.2. Ứng xử của vật liệu xốp khi chịu nén

Đối với vật liệu xốp có cấu trúc lỗ rỗng đóng kín và mở, khi chịu nén ép thì quan hệ ứng suất - biến dạng ban đầu có dạng tuyến tính liên quan đến ứng xử trước khi cấu trúc lỗ rỗng chưa bị xô lệch (giữ được hình dạng ban đầu) [10]. Tiếp theo là quan hệ ứng suất - biến dạng khi cấu trúc của lỗ rỗng bị uốn cong và xô lệch tạo thành một thêm biến dạng dài trong đó ứng suất gần như không đổi (ứng suất “đoạn bằng” (plateau stress)) [11]. Trong trường hợp cấu trúc lỗ rỗng mở, cuối cùng vật liệu xốp sẽ bị nén đến mức các khung xương bắt đầu tiếp xúc với nhau và bắt đầu xít chặt lại với nhau. Sau khi xốp đã thành khối rắn hoàn toàn và không còn không khí trong các lỗ rỗng, khi đó quan hệ ứng suất - biến dạng sẽ trở thành đặc tính của vật liệu nền.

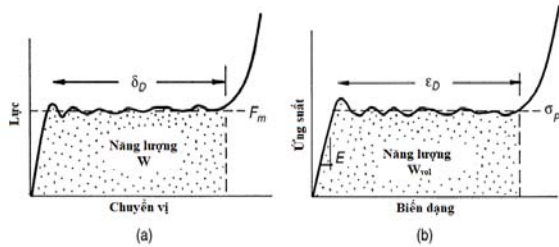
Ứng xử của quá trình cấu trúc bị uốn cong ở hai dạng cấu trúc là khác nhau, trong đó mật độ đóng rắn hoàn toàn gần như là không thể, nhất là với xốp cấu trúc lỗ rỗng đóng kín (trừ khi các lỗ rỗng bị vỡ). Thay vào đó, khi các lỗ rỗng bị nén thì áp suất không khí tăng lên trong các lỗ rỗng (thể tích khí có thể tiệm cận gần đến 0). Về cơ bản ứng xử khi chịu nén của vật liệu xốp thường trải qua ba giai đoạn điển hình, trong Hình 2 minh họa ứng suất và biến dạng của vật liệu xốp trải qua ba giai đoạn (Vùng 1 - Vùng 2 - Vùng 3) [10-12].



Hình 2 : Đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng vật liệu xốp

2.3 Nguyên lý hấp thụ năng lượng của vật liệu xốp

Vật liệu hấp thụ năng lượng lý tưởng với đường cong ứng suất - biến dạng có đoạn ứng suất không đổi như các Hình 3 (a) và (b) [13]. Vật liệu hấp thụ bị sụp đổ dẻo ở một ứng suất danh nghĩa không đổi, được gọi là ứng suất đoạn bằng σ_{pl} đạt đến một biến dạng tương đối giới hạn ε_D . Các vật liệu hấp thụ năng lượng được chọn sao cho ứng suất đoạn bằng nằm ngay dưới mức sẽ gây ra hư hỏng cho kết cấu được bảo vệ. Lựa chọn tốt nhất sau đó là lựa chọn có đoạn bằng dài nhất và do đó hấp thụ nhiều năng lượng nhất trước khi đạt đến ε_D . Diện tích dưới đường cong gần bằng $\sigma_{pl}\varepsilon_D$ là năng lượng mà vật liệu có thể hấp thụ trên một đơn vị thể tích tương ứng đoạn bằng. Các vật liệu xốp có đường cong ứng suất - biến dạng như trong Hình 3 thực hiện tốt chức năng này.



Hình 3 : (a) Đường cong lực - chuyển vị và (b) đường cong ứng suất - biến dạng của vật liệu xốp [13]

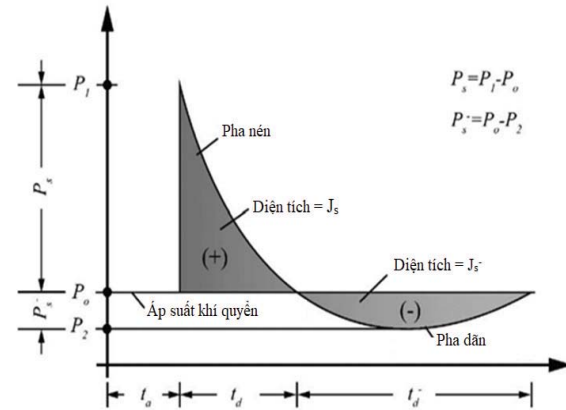
Trong bảo vệ chống va chạm, vật liệu hấp thụ phải hấp thụ động năng của vật thể chuyển động mà không đạt đến biến dạng nén chặt ε_D , khi đó ứng suất không bao giờ vượt quá ứng suất đoạn bằng. Tuy nhiên, điều này là khác khi tác động là áp lực từ vụ nổ gây ra. Vụ nổ truyền một xung lượng và bảo toàn động lượng thay vì truyền năng lượng. Do đó, các tính toán trở nên phức tạp hơn và cần được xem xét cụ thể.

3. TÍNH TOÁN CẤU TẠO BỘ HẤP THỤ NĂNG LƯỢNG ÁP LỰC NỔ

3.1 Xung lượng từ vụ nổ

Biểu đồ áp lực theo thời gian của một vụ nổ lý tưởng trong không khí ở một khoảng cách cố định (R) từ tâm vụ nổ có thể được mô tả như trong Hình 4, được gọi là dạng sóng Friedlander. Biểu đồ áp lực theo thời gian có thể được chia thành các giai đoạn của pha nén và pha giãn. Dạng sóng Friedlander lý tưởng có các thông số sóng nổ như: thời gian đến (t_a), áp lực pha nén cực đại (P_s), thời gian pha nén (t_d), áp lực pha giãn (P_s^-), thời gian pha giãn (t_d^-), xung lượng pha nén (J_s) và xung lượng pha giãn (J_s^-).

(t_d), xung lượng pha nén (J_s) và xung lượng pha giãn (J_s^-).



Hình 4: Đường cong áp lực theo thời gian của nổ trong không khí [16]

Đối với việc nghiên cứu các ảnh hưởng của sóng nổ lên các kết cấu và cũng như thiết kế các kết cấu hoặc cấu kiện, pha nén thường được coi là quan trọng hơn so với pha giãn vì biên độ lớn của áp lực (P_s) và xung lượng (J_s) [14]. Mặt khác, pha giãn thường bị bỏ qua vì độ lớn tương đối nhỏ và rất khó đo [15]. Tuy nhiên, một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng, đối với khoảng cách tỷ lệ ($Z=R/W^{1/3}$) lớn hơn 20m/kg^{1/3} (đặc biệt đối với khoảng cách tỷ lệ (Z) lớn hơn 50m/kg^{1/3}), không thể bỏ qua ảnh hưởng của pha giãn [16].

Xung lượng của pha nén có thể được tính bằng cách tích phân đường cong áp lực theo thời gian trong khoảng thời gian pha nén (t_d). Xung lượng pha nén là tham số có tầm quan trọng chủ yếu đối với tải trọng lên kết cấu và có thể được biểu thị bằng toán học như sau [17]:

$$J_s = \int_{t_a}^{t_a+t_d} [P(t) - P_0] dt \quad (1)$$

Xung lượng pha giãn cũng có thể được tính toán bằng cách sử dụng khoảng cách tỷ lệ (Z), khối lượng nổ (W) và khoảng cách (R). Phương trình thực nghiệm được trình bày đã được sửa đổi để có đơn vị là Nsm-2. Quan hệ thực nghiệm của xung lượng nén (J_s) được Sadovsky (1952) [18-23] xây dựng dưới đây:

$$J_s = \begin{cases} (34 \div 36) \times 9,81 \times \frac{\sqrt[3]{W^2}}{R} & Z > 0,5 \\ 147,15 \times \frac{W}{R^2} & Z < 0,25 \end{cases} \quad (2)$$

3.2. Nguyên lý tính toán bộ hấp thụ áp lực nổ

Các vụ nổ tạo ra một sóng xung kích có dạng gần như tam giác với thời gian tác dụng rất ngắn [24]. Vụ nổ truyền một xung lượng J_s trên một đơn vị diện tích của kết cấu bị tác động, bằng tích phân của áp lực theo thời gian:

$$J_s = \int p dt \quad (3)$$

Để đơn giản trong việc xác định xung lượng pha nén có thể sử dụng công thức thực nghiệm (2) của Sadvovsky (1952).

Bảo vệ kết cấu khỏi tác động của vụ nổ đạt được bằng cách đặt một tấm đàn lực nặng gắn trên vật liệu xốp (bộ hấp thụ năng lượng) lên trên bề mặt của kết cấu cần bảo vệ. Xung động từ vụ nổ làm tăng tốc tấm đàn lực, động năng của nó bị tiêu tán bởi vật liệu xốp hấp thụ năng lượng tốt. Cho tấm đàn lực có chiều dày δ_{td} và khối lượng riêng ρ_{td} (điều kiện tấm đàn lực không bị phá hoại cục bộ bởi áp lực nổ). Sau đó, xung lượng J_s truyền động lượng M_s đến một đơn vị diện tích của bề mặt tấm [25], khi đó:

$$M_s = \rho_{td} \delta_{td} v = J_s \quad (4)$$

Với vận tốc của tấm là v , lúc này tấm đàn lực có động năng là:

$$U_s = \frac{1}{2} \rho_{td} \delta_{td} v^2 = \frac{J_s^2}{2 \rho_{td} \delta_{td}} \quad (5)$$

và chính điều này mà vật liệu xốp hấp thụ năng lượng cần tiêu tán của xung lượng nổ thông qua hấp thụ động năng của tấm đàn lực. Lưu ý rằng tấm đàn lực càng dày và nặng thì động năng mà vật liệu phải hấp thụ càng thấp.

Việc lựa chọn vật liệu xốp làm vật liệu hấp thụ năng lượng cần phải hấp thụ được động năng U_s trên một đơn vị diện tích tại một ứng suất đoạn bằng σ_{pl} sẽ không làm hư hại đối tượng kết cấu được bảo vệ. Để động năng được hấp thụ trên một đơn vị thể tích lên đến mức nén chặt của vật liệu xốp có ứng suất đoạn bằng σ_{pl} là W_{vol} (xem Hình 3b). Với W_{vol} là giá trị lớn nhất của năng lượng trên một đơn vị thể tích mà xốp hấp thụ cho đến khi bị nén chặt có thể xác định gần đúng bởi $W_{vol} = \sigma_{pl} \varepsilon_D$. Khi đó, chiều dày h_x của vật liệu xốp cần thiết để hấp thụ xung lượng vụ nổ là:

$$h_x = \frac{J_s^2}{2 \rho_{td} \delta_{td} W_{vol}} \quad (6)$$

Hiệu quả của sự hấp thụ được tối ưu hóa bằng cách sử dụng một tấm đàn lực ($\rho_{td} \delta_{td}$) và chọn loại xốp có W_{vol} lớn với đoạn bằng dài.

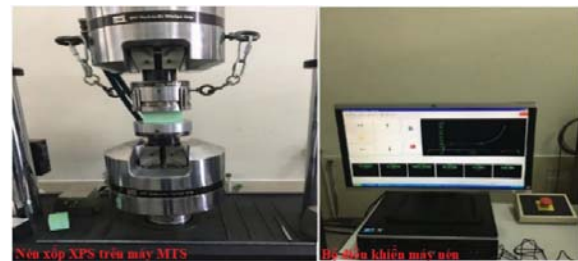
3.3. Thí nghiệm vật liệu xốp và tính toán bộ hấp thụ năng lượng

Để tính toán bộ hấp thụ năng lượng tác động của vụ nổ chấp nhận giả thiết bài toán truyền động lượng lý tưởng, áp lực vụ nổ trải đều trên đối tượng tác động.

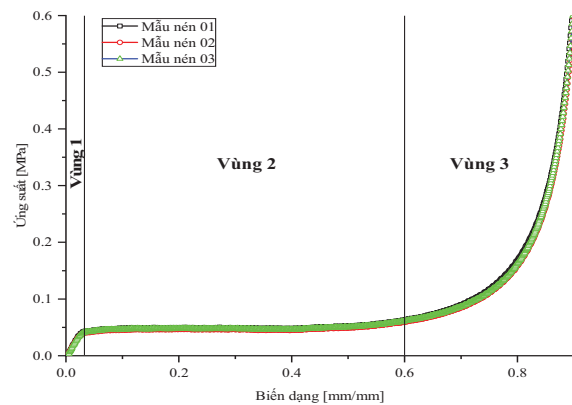
3.3.1. Thí nghiệm nén vật liệu xốp [26]

Tiến hành thí nghiệm trong phòng quá trình nén ép vật liệu xốp cứng không phục hồi bằng việc sử dụng mẫu xốp XPS (Extruded Polystyrene) nhằm nghiên cứu ứng xử của vật liệu khi chịu nén và thu thập số liệu thí nghiệm thực.

Tiến hành thí nghiệm ép mẫu xốp trên hệ thống máy kéo nén đa năng của hãng MTS sử dụng đầu gia lực 647 Hydraulic Wedge Grips có khả năng gia tải lên đến 50kN với tốc độ nén được điều khiển trên Hình 5. Các mẫu xốp XPS kích thước 50x50x50mm được nén với tốc độ 4mm/phút, thời điểm kết thúc nén khi mẫu thí nghiệm biến dạng đạt 90%. Kết quả quan hệ ứng suất - biến dạng đặc trưng của vật liệu trên Hình 6.



Hình 5: Thí nghiệm nén mẫu xốp XPS



Hình 6: Kết quả quan hệ ứng suất - biến dạng của mẫu XPS thí nghiệm

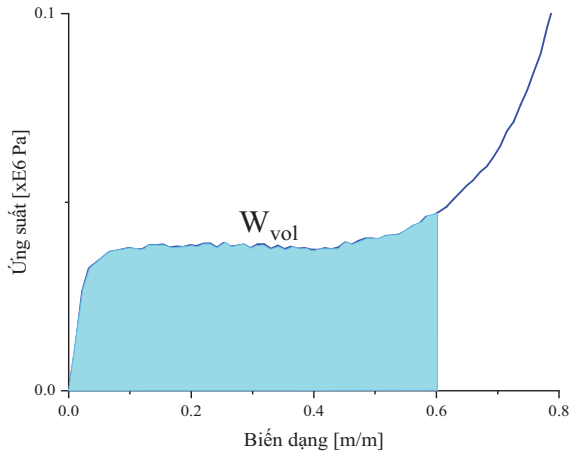
3.3.2. Tính toán bộ hấp thụ năng lượng

Đặt bài toán với kết cấu tấm bê tông cốt thép (BTCT) kích thước 100 × 100 × 6 cm, kê bốn cạnh tự do trên khối đế bằng BTCT cần bảo vệ trước áp

lực của khối thuốc nổ TNT có khối lượng 1,0 kg treo cách mặt trên tấm bê tông 100 cm.

Thực tế sản xuất hiện nay trên thị trường thường có các loại xốp XPS có chiều dày nhất định từ nhà sản xuất. Để phù hợp với sản phẩm thông dụng trên thị trường trong nghiên cứu lựa chọn tấm xốp cứng XPS dày 50 mm. Do tấm xốp được lựa chọn trước chiều dày nên tấm đàn lực phía trên sẽ được tính toán dựa trên loại vật liệu lựa chọn. Lựa chọn vật liệu thép cho tấm đàn lực, vì đây là loại vật liệu thông dụng và có cường độ cao phía trên đặt tấm đàn lực. Công thức xác định chiều dày tấm đàn lực được suy ra từ công thức (6).

Thực hiện tính toán xung lượng vụ nổ (J_s) theo công thức (2). Trong đó, năng lượng hấp thụ của vật liệu xốp (W_{vol}) được xác định thông qua tích phân số trên đường cong quan hệ ứng suất - biến dạng từ thực nghiệm trên Hình 7, với ứng suất lấy đơn vị là (Pa) và trong khoảng biến dạng đến 60%.



Hình 7: Năng lượng hấp thụ của vật liệu xốp (W_{vol})

Bảng 1. Bảng kết quả tính bộ hấp thụ năng lượng

Thông số	J_s (Nsm ⁻²)	W_{vol} (J/m ³)	h_x (m)
Kết quả	353,16	2,29E4	0,05
Thông số	ρ_{td} (kg/m ³)	δ_{td} (mm)	δ_{td} (chọn)
Kết quả	7850	6,94	7,0

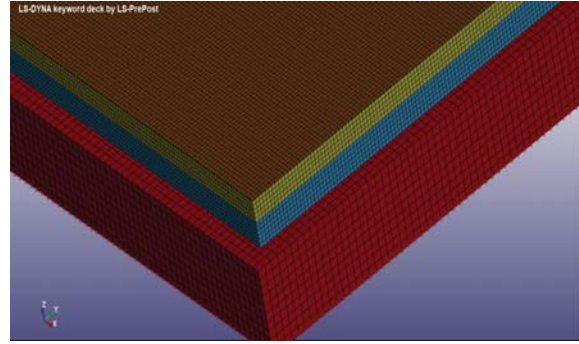
4. THIẾT LẬP MÔ HÌNH THỬ NGHIỆM SỐ

4.1 Mô phỏng số thử nghiệm bài toán

Để tiến hành đánh giá hiệu quả của bộ hấp thụ năng lượng theo nguyên lý thiết kế như trên tiến hành mô phỏng số bài toán cụ thể như sau: kết cấu BTCT kích thước $100 \times 100 \times 6$ cm, kê bốn cạnh tự do trên khối đế bằng BTCT, khối thuốc nổ TNT có khối lượng 1,0 kg treo cách mặt trên tấm bê

tông 100 cm. Sử dụng xốp XPS có chiều dày 50 mm, mặt dưới dán lên tấm bê tông, mặt trên dán đàn lực dày 7 mm như trên Hình 8.

Để đơn giản bài toán và không mất đi ý nghĩa của áp lực nổ, trong nghiên cứu sử dụng mô hình tải trọng nổ CONWEP được tính toán dựa trên khối lượng nổ và khoảng cách từ tâm nổ đến bề mặt tiếp nhận áp lực nổ.



Hình 8: Mô phỏng bài toán trên LS-DYNA (khối đế - tấm bê tông - xốp XPS - tấm đàn lực)

Các phương pháp thực nghiệm hiện trường là biện pháp hữu hiệu và chính xác để đánh giá khả năng gia cường của vật liệu FRP cho kết cấu, tuy nhiên các thử nghiệm toàn diện về kết cấu rất tốn kém và phần lớn việc tiến hành các thí nghiệm về tải trọng động như áp lực của vụ nổ hoặc đâm va lên công trình thực là rất khó thực hiện. Do đó, mô phỏng số (thông qua các phần mềm như LS-DYNA, ABAQUS, ANSYS,...) là công cụ thiết yếu để kiểm tra và tối ưu hóa thiết kế gia cường FRP khi các điều kiện về thực nghiệm với tải trọng thực còn hạn chế.

Để đáp ứng được ứng xử của kết cấu khi chịu tác dụng tải trọng động tốc độ cao (tải trọng nổ, va chạm), một công cụ phân tích số phải có các tiêu chí sau: (1) có thời gian tải và phản hồi đặc trưng trong một mili giây; (2) có đủ khả năng xử lý các vấn đề phi tuyến vật liệu, phi tuyến hình học và phi tuyến trạng thái; (3) cho phép mô phỏng phân tích động phi tuyến cao; (4) Có thể xử lý các vấn đề về yêu cầu vật liệu và tiếp xúc giữa vật liệu mềm và cứng; (5) Có khả năng phân tích sự thay đổi lớn hoặc biến dạng lớn của vật liệu chịu ứng suất [10]. Xét về đặc điểm, yêu cầu về bản chất của đối tượng nghiên cứu và theo phân tích, so sánh chức năng phần mềm thì LS-DYNA là một phần mềm phân tích động phù hợp nhất với mô phỏng tác động cực hạn từ vụ nổ cho nghiên cứu này về lý thuyết, mô hình vật liệu, chức năng, phương trình trạng thái và tiêu chuẩn phá hủy. LS-DYNA được

ứng dụng rộng rãi trong việc phân tích phản ứng của kết cấu đối với tải trọng va đập và xung kích với nhiều mô hình khác nhau cho vật liệu BTCT và đa dạng các loại vật liệu khác.

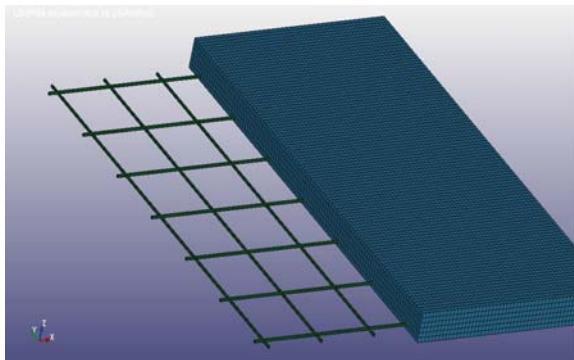
Trong nội dung tiếp theo của bài báo sẽ tiến hành sử dụng phần mềm mô phỏng số LS-DYNA để khảo sát và đánh giá hiệu quả gia cường cho kết cấu BTCT chịu tác động của tải trọng động.

Để mô hình hóa bài toán nghiên cứu sử dụng phần tử khối 8 nút cho tấm bê tông, khối đế và tấm xốp XPS, kích thước lưới phần tử 1 cm. Hệ lưới cốt thép được mô tả bằng phần tử thanh dài 5 cm, tấm dãn lực được mô tả bằng phần tử vỏ kích thước 1 cm.

Để mô tả tấm bê tông, khối đế và tấm xốp XPS sử dụng phần tử khối 8 nút bằng thẻ *SECTION_SOLID với tham số ELFORM = 1. Hệ lưới cốt thép sử dụng phần tử thanh bằng thẻ *SECTION_BEAM với các tham số ELFORM = 1 (dầm Hughes-Liu) và QR = 2, CST = 1 cho tiết diện tròn. Tấm dãn lực sử dụng phần tử vỏ 4 nút bằng thẻ *SECTION_SHELL với tham số ELFORM = 2 [27, 28].

Đối với tiếp xúc giữa tấm BTCT - tấm xốp - tấm dãn lực, sử dụng mô tả tiếp xúc hai chiều bằng thẻ *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE, với các tham số cho lớp keo bám dính thông qua các tham số FS và FD là 0,6 [27, 28].

Điều kiện biên của bài toán được mô hình hóa cho tấm BTCT kê tự do lên khối đế thông qua mô tả bề mặt hai đối tượng tiếp xúc trực tiếp với nhau, sử dụng tiếp xúc hai chiều giữa hai bề mặt bằng thẻ *CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE với các tham số FS và FD lấy bằng 0,2 [27, 28]. Chân của khối đế được xem như liên kết ngầm, thông qua việc mô tả các nút không có chuyển vị thẳng và xoay.



Hình 9: Mô hình hệ lưới cốt thép trong bê tông

Trong nghiên cứu sẽ sử dụng phương pháp nhúng lưới cốt thép trong bê tông và hệ lưới cốt

thép được mô tả độc lập với tấm bê tông như Hình 9. Sử dụng thẻ *CONSTRAINED-LAGRANGE_IN_SOLID để mô tả ghép nối giữa lưới cốt thép và tấm bê tông với CTYPE lấy bằng 2 [27].

4.2 Tham số mô hình vật liệu trong mô phỏng

Để thực hiện quá trình mô phỏng bài toán trong nghiên cứu này, sẽ kế thừa các kết quả và thông số đầu vào trong nghiên cứu gần đây cho mô hình vật liệu. Các tham số này được lấy từ dữ liệu của một số công bố trên các tạp chí có uy tín [29].

Sử dụng mô hình MAT_084 với thẻ vật liệu 084/085-WINFRITH_CONCRETE để mô tả ứng xử của bê tông, với năng lượng phá hoại 65 Nm/m², kích thước trung bình cốt liệu 8 mm [29].

Bảng 2. Tham số vật liệu bê tông [29]

$\rho(\text{kg/m}^3)$	$E_t(\text{GPa})$	ν	$\sigma_n(\text{MPa})$	$\sigma_k(\text{MPa})$
2400	26,41	0,2	30	3,0

Sử dụng thẻ vật liệu 003-PLASTIC_KINEMATIC để mô tả ứng xử của cốt thép trong bê tông và tấm dãn lực [29].

Bảng 3. Tham số vật liệu thép [29]

$\rho(\text{kg/m}^3)$	$E(\text{GPa})$	ν	$\sigma_{ch}(\text{MPa})$
7850	205	0,3	420

Sử dụng thẻ vật liệu MAT_CRUSHABLE_FOAM kết hợp với đường công ứng suất - biến dạng lấy từ kết quả thí nghiệm nén mẫu xốp [26].

Bảng 4. Tham số vật liệu xốp XPS [26]

$\rho(\text{kg/m}^3)$	$E(\text{Pa})$	ν_f
40	1,17xE6	0,0

Hệ số Poisson của vật liệu xốp không phải hằng số, có phụ thuộc vào mật độ vật liệu xốp và tốc độ biến dạng [30]. Thông thường mô hình vật liệu xốp được thực hiện bởi tính toán bởi LS-DYNA (và các phần mềm mô phỏng khác) đều giả sử tỷ lệ Poisson thấp [31]. Điều này cho phép xác định biến dạng thể tích của vật liệu dễ dàng hơn, các phần tử vật liệu xốp trong mô phỏng sẽ có xu hướng tăng cứng để chống lại lỗi thể tích âm thường gặp trong mô phỏng vật liệu xốp chịu tốc độ biến dạng cao. Một số công trình nghiên cứu đã công bố, lựa chọn hệ số Poisson của xốp bằng 0 [32-37]. Do vậy, trong nội dung nghiên cứu của bài báo lựa chọn hệ số Poisson của vật liệu xốp cứng không phục hồi bằng 0.

5. KẾT QUẢ KHẢO SÁT THỬ NGHIỆM SỐ

Để tiến hành đánh giá hiệu quả của bộ hấp thụ đã tính toán ở trên, tiến hành sánh tham số động lực học của tấm BTCT cần bảo vệ thông qua các tham số chuyển vị giữa tấm, biến dạng giữa tấm và gia tốc khối của tấm. Việc đánh giá thông qua 03 bài toán, bao gồm:

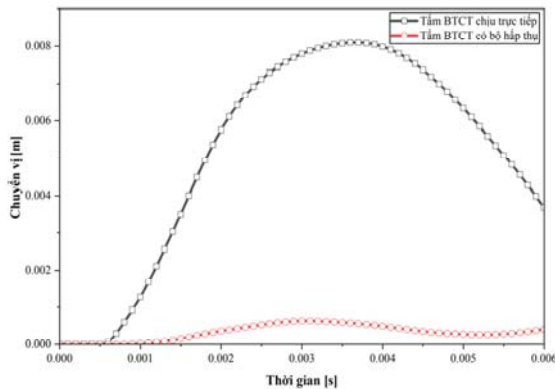
Thử nghiệm 01: so sánh giữa tấm bê tông chịu tác dụng trực tiếp với tấm bê tông có bộ hấp thụ (xốp XPS dày 50 mm, tấm đàn lực phía trên 7 mm).

Thử nghiệm 02: so sánh giữa các bộ hấp thụ có tấm đàn lực thay đổi chiều dày (3 mm, 5 mm, 7 mm và 9 mm).

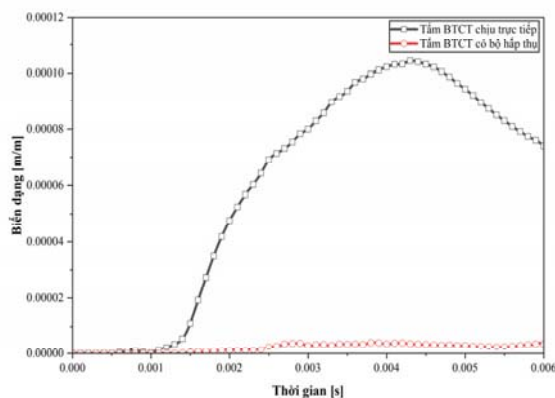
Thử nghiệm 03: so sánh giữa các bộ hấp thụ có chiều dày lớp xốp XPS thay đổi (50 mm, 100 mm và 150 mm).

5.1. Thử nghiệm số 01

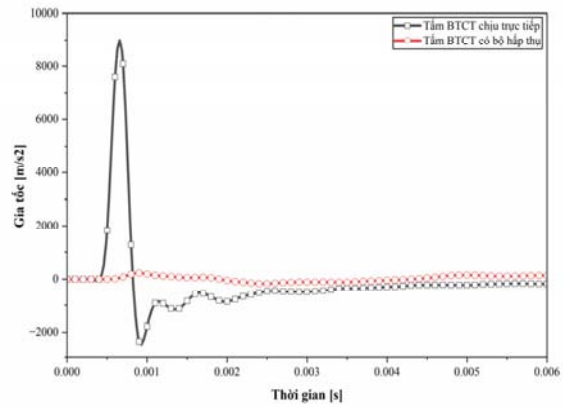
Đồ thị kết quả bao gồm chuyển vị, biến dạng và gia tốc được thể hiện trong các Hình 10, 11 và 12. Hình 13 thể hiện phá hoại mặt dưới của tấm BTCT.



Hình 10 : Chuyển vị giữa tấm BTCT



Hình 11: Biến dạng giữa tấm BTCT



Hình 12 : Gia tốc khối tấm BTCT



Hình 13 : Phá hoại mặt dưới tấm BTCT: tấm chịu trực tiếp (trái), tấm có bộ hấp thụ (phải)

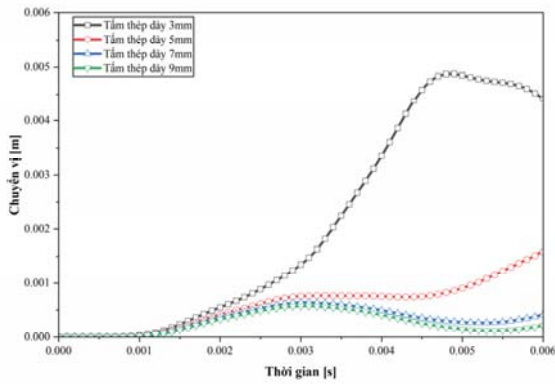
Bảng 5. Tổng hợp kết quả

Tham số	Trực tiếp	Bộ hấp thụ	Hiệu quả (%)
Chuyển vị (mm)	8,1	0,64	92,11
Biến dạng (m/m)	1,04E-4	4,21E-6	95,96
Gia tốc (m/s ²)	8,09E+3	2,36E+2	97,09

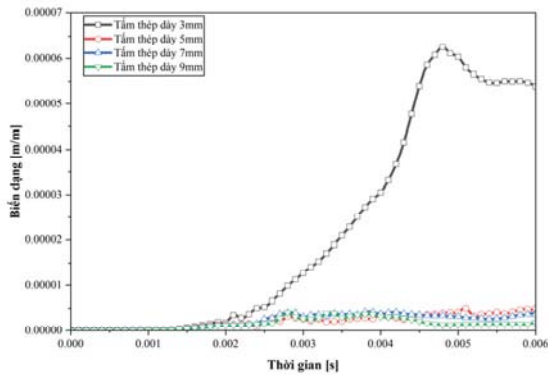
Qua kết quả khảo sát cho thấy bộ hấp thụ áp lực nổ cho hiệu quả cao, tấm BTCT không bị phá hoại khi không xuất hiện vết nứt và các tham số động học giảm mạnh đều đạt trên 90%.

5.2 Thử nghiệm số 02

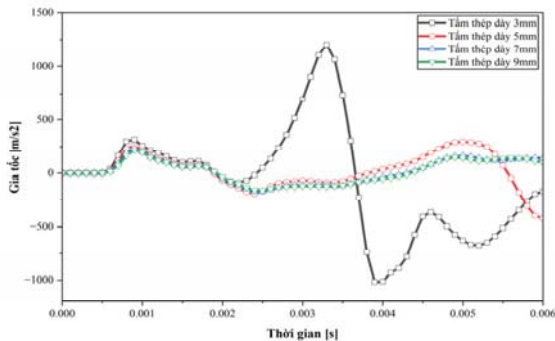
Thử nghiệm số với chiều dày tấm đàn lực thay đổi (tính toán 7 mm) bao gồm 3 mm, 5 mm, 7 mm và 9 mm (tấm xốp XPS dày 50 mm). Đồ thị kết quả bao gồm chuyển vị, biến dạng và gia tốc được thể hiện trong các Hình 14, 15 và 16. Hình 17 thể hiện phá hoại mặt dưới của tấm BTCT.



Hình 14: Chuyển vị giữa tấm BTCT



Hình 15: Biến dạng giữa tấm BTCT



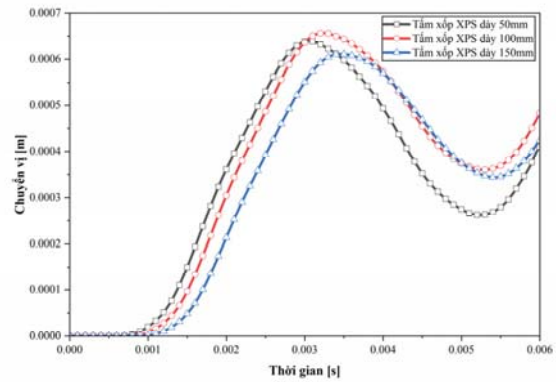
Hình 16: Gia tốc khối tấm BTCT



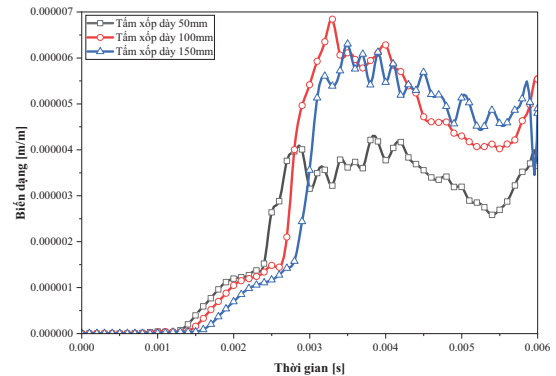
Hình 17: Phá hoại mặt dưới tấm BTCT: tấm dãn lực 3 mm (trái), tấm dãn lực 5 mm (phải), các tấm dãn lực 7 và 9 mm tấm BTCT không bị phá hoại

Thông qua kết quả khảo sát cho thấy khi tấm dãn lực mỏng thì các tham số động học lớn hơn so với chiều dày được tính toán, còn khi tấm dãn lực dày hơn thì hiệu ứng thay đổi không đáng kể. Bên cạnh đó cần lưu ý độ mỏng của tấm dãn lực sẽ ảnh hưởng đến độ lõm sâu của tấm, điều này có nguy cơ làm cho biến dạng của tấm xốp vượt ngưỡng hiệu quả.

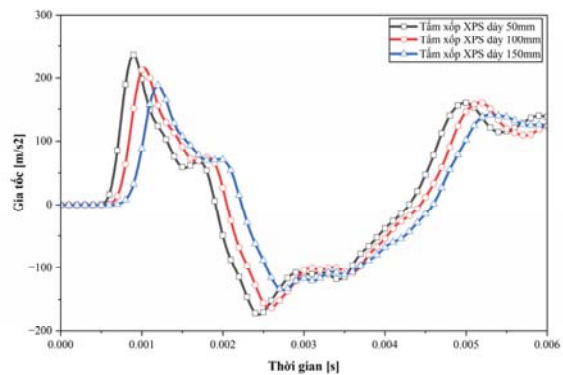
5.3. Thử nghiệm số 03



Hình 18: Chuyển vị giữa tấm BTCT



Hình 19: Biến dạng giữa tấm BTCT



Hình 20: Gia tốc khối tấm BTCT

Thử nghiệm số với chiều dày tấm xốp XPS thay đổi bao gồm 50 mm, 100 mm và 150 mm (tính toán chiều dày tấm đàn lực lần lượt 7 mm, 3,5 mm và 2,5 mm). Đồ thị kết quả bao gồm chuyển vị, biến dạng và gia tốc được thể hiện trong các Hình 18, 19 và 20.

Thông qua kết quả khảo sát cho thấy khi tấm xốp tăng chiều dày đồng nghĩa với việc các tấm đàn lực giảm chiều dày nhưng hiệu quả bảo vệ vẫn đảm bảo tốt. Tuy nhiên kết quả biến dạng cho thấy khi tấm đàn lực có chiều dày thích hợp (tăng độ cứng) làm xu thế lồi của tấm giảm sẽ tăng hiệu quả giảm áp lực lên kết cấu tốt hơn (đồ thị biến dạng).

5.4 Bàn luận hiệu quả của bộ hấp thụ

Thông qua kết quả khảo sát thực nghiệm số cho thấy bộ hấp thụ năng lượng được tính toán theo nguyên lý bảo toàn năng lượng và bỏ qua các yếu tố như độ lồi của tấm, cũng như các yếu tố vật lý khác vẫn cho hiệu quả bảo vệ rất tốt.

Tuy nhiên, khi độ dày của tấm đàn lực mỏng làm cho độ lồi của tấm đàn lực tăng lên có thể ảnh hưởng đến hiệu quả giảm áp lực tác động lên kết cấu. Vì vậy, việc nghiên cứu hiệu quả của độ dày tấm cần được quan tâm hơn nữa.

6. KẾT LUẬN

Từ những kết quả nghiên cứu và thử nghiệm số cho phép rút ra một số kết luận chính như sau:

Việc tính toán cấu trúc của bộ hấp thụ áp lực nổ thông qua nguyên lý bảo toàn năng lượng và chấp nhận bỏ qua một số yếu tố vật lý khác vẫn cho hiệu quả bảo vệ tốt. Điều này phù hợp cho những tính toán cơ bản và ứng dụng thực tế tốt hơn.

Hiệu quả giảm tác động của áp lực nổ đạt được với hiệu suất tốt, các tham số động học của kết cấu cần bảo vệ giảm rõ rệt với hiệu quả có thể đạt đến trên 90%. Bên cạnh đó, kết cấu được bảo vệ tốt khi trên cấu kiện khảo sát không thấy xuất hiện vết nứt bề mặt.

Kết quả nghiên cứu và khảo sát cũng cho thấy khi tấm đàn lực mỏng hơn (độ cứng giảm) làm gia tăng độ lồi và cũng ảnh hưởng đến hiệu quả giảm áp lực của bộ hấp thụ. Điều này cũng gợi mở thêm hướng nghiên cứu cụ thể hơn về ảnh hưởng của độ cứng tấm đàn lực đến hiệu quả của bộ hấp thụ.

Ngoài ra hướng nghiên cứu còn hạn chế khi chưa thực sự tiếp cận được thêm một số yếu tố quan trọng khác, đặc biệt là nghiên cứu về vật liệu xốp như xốp kim loại, xốp có tính đàn hồi cao để có cái nhìn tổng quát hơn.

Nội dung nghiên cứu của bài báo là một đóng góp nhỏ cho hướng nghiên cứu về phương thức bảo vệ kết cấu công trình chịu tác động của áp lực nổ, góp phần vào làm tăng hiệu quả bảo vệ công quốc phòng an ninh và dân sinh. Bên cạnh đó nghiên cứu cũng là tài liệu tham khảo hữu ích cho các nghiên cứu hoặc tiếp theo sau.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., & Ramsay, J. (2007). *Blast loading and blast effects on structures – An overview*. Electronic Journal of Structural Engineering, 7, 76–9
- [2] Department of Defense (2008). *UFC 3-340-02: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*.
- [3] US Army Corps of Engineers (1990). *TM 5-1300: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*.
- [4] Hanssen, A. G., Enstock, L., & Langseth, M. (2002). *Close-range blast loading of aluminium foam panels*. International Journal of Impact Engineering, 27(6), 593–618.
- [5] Xu, K., & Lu, Y. (2012). *Numerical simulation study of blast mitigation using sacrificial cladding*. International Journal of Protective Structures, 3(4), 407–430.
- [6] Pingle, S., Ghosh, S., & Chattopadhyay, A. (2019). *Auxetic structures for blast mitigation: A review*. Composite Structures, 230, 111505.
- [7] Kim, J. et al. (2024). *Mechanical Properties and Deformation Behavior of Open-Cell Type Aluminum Foams with Structural Conditions and Alloy Composition*. Metals, 14(8), 877.
- [8] Baillis, D., & Coquard, R. (2012). *Microstructural characterization of open-cell and closed-cell foams: SEM observations and 3D tomographic modeling*. Thermopedia. Available at: <https://www.thermopedia.com/de/content/166/>
- [9] Zhao, H. et al. (2024). *Energy-absorbing porous materials: Bioinspired and artificial porous materials*. Nano Research, 17, 1–30.
- [10] Luo, G. et al. (2021). *A Review on Mechanical Models for Cellular Media*. PMC.
- [11] Çibikçi, K.Ç. et al. (2024). *Experimental Investigation of Compressive Behavior and Damping Properties of Layered Hybrid Closed-Cell Aluminum Foams*. Journal of Materials Science.

- [12] Novak, N. et al. (2019). *Compressive Behaviour of Closed-Cell Aluminium Foam at Different Strain Rates*. Journal of Materials Science.
- [13] Mills, N. J. (2007). *Polymer Foams Handbook: Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide (2nd ed.)*. Oxford: Butterworth-Heinemann (Elsevier). ISBN 978-0-7506-8063-2.
- [14] N. Uddin (2010). *Blast protection of civil infrastructures and vehicles using composites*. Elsevier.
- [15] Nassr, A. A. A. M. (2012). *Experimental and analytical study of the dynamic response of steel beams and columns to blast loading (Doctoral dissertation)*. McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada.
- [16] M. Larcher (2008). *Pressure-time functions for the description of air blast waves*. JRC technical note. 46829.
- [17] G.F. Kinney, K.J. Graham (2013). *Explosive shocks in air*. Springer Science & Business Media.
- [18] K. Kangarlou (2013). *Mechanics of blast loading on the head models in the study of traumatic brain injury*. Nationalpark-Forschung In Der Schweiz (Switzerland Research Park Journal). 102.
- [19] J. Henrych, R. Major (1979). *The dynamics of explosion and its use*. Elsevier Amsterdam
- [20] R. Jeremić, Z. Bajić (2006). *An approach to determining the TNT equivalent of high explosives*. Sci. Tech. Rev. 56, 58-62.
- [21] D.B. Chang, C.S. Young (2010). *Probabilistic estimates of vulnerability to explosive overpressures and impulses*. Journal of physical security. 4, 10-29.
- [22] M. Sadovsky (2004). *Mechanical effects of air shockwaves from explosions according to experiments*. Geophysics and Physics of Explosion (ed. MA Sadovsky), Nauka Press, Moscow.
- [23] P. Saska, E. Krzystała, A. Mężyk (2011). *An analysis of an explosive shock wave impact onto military vehicles of contemporary warfare*. Journal of KONES. 18, 515-524.
- [24] P. Smith, J. Hetherington (1994). *Blast and ballistic loading of structures*. Butterworth. Heinemann Ltd Oxford.
- [25] M.F. Ashby, T. Evans, N.A. Fleck, J. Hutchinson, H. Wadley, L. Gibson (2000). *Metal foams: a design guide*. Elsevier.
- [26] Nguyễn Công Nghị, Lê Anh Tuấn, Đinh Quang Trung (2022). *Nghiên cứu đánh giá mô hình vật liệu xốp XPS trong LS-DYNA thông qua dữ liệu thực nghiệm*. Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (TCKHCN XD)-ĐHXDH, 16(2V), 153-163.
- [27] LSTC (2019). *LS-Dyna Theory Manual*.
- [28] LSTC (2021). *LS-Dyna Version R12.0 Keyword User's Manual*.
- [29] D.-K. Thai, S.-E. Kim (2018). *Numerical investigation of the damage of RC members subjected to blast loading*. Engineering Failure Analysis. 92, 350-367.
- [30] J. Kováčik, L. Marsavina, E. Linul (2018). *Poisson's ratio of closed-cell aluminium foams*. Materials. 11, 1904.
- [31] C. Thom (2009). *Soft materials under air blast loading and their effect on primary blast injury*. University of Waterloo.
- [32] H. Andami, H. Toopchi-Nezhad (2020). *Performance assessment of rigid polyurethane foam core sandwich panels under blast loading*. International Journal of Protective Structures. 11, 109-130.
- [33] B. Croop, H. Lobo, N. DatapointLabs (2009). *Selecting material models for the simulation of foams in LS-DYNA*. 7th European LS-Dyna Conference, pp. 1-6.
- [34] Q.H. Shah, A. Topa (2014). *Modeling large deformation and failure of expanded polystyrene crushable foam using LS-DYNA*. Modelling and Simulation in Engineering. 2014.
- [35] Y. Masso-Moreu, N. Mills (2003). *Impact compression of polystyrene foam pyramids*. International journal of impact engineering. 28, 653-676.
- [36] C.-J. Zhang, F. Yi, X.-b. Zhang (2010). *Mechanical properties and energy absorption properties of aluminum foam-filled square tubes*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 20, 1380-1386.
- [37] S. Vavilala, P. Shirbhate, J. Mandal, M.D. Goel (2020). *Blast mitigation of RC column using polymeric foam*. Materials Today: Proceedings. 26, 1347-1351.