

# NGHIÊN CỨU ÁP LỰC SÓNG XUNG KÍCH KHI XẢY RA NỔ ĐỒNG THỜI

Nguyễn Xuân Bằng<sup>a,\*</sup>, Mai Việt Chinh<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Viện Kỹ thuật Công trình đặc biệt, Học viện Kỹ thuật Quân Sự,  
236 Hoàng Quốc Việt, quận Bắc Từ Liêm, Hà Nội*

*Nhận ngày 04/4/2023, Sửa xong 11/6/2023, Chấp nhận đăng 21/7/2023*

## Tóm tắt

Nghiên cứu về các tác động của vụ nổ đến công trình là một nhiệm vụ có ý nghĩa rất quan trọng nhằm đánh giá, kiểm soát, giảm thiểu các ảnh hưởng bất lợi của chúng. Trong tính toán, đến nay mới chủ yếu đề cập đến trường hợp vụ nổ đơn, chưa đề cập nhiều đến trường hợp nổ nhiều lượng nổ đồng thời, chỉ có thể đánh giá qua thí nghiệm nổ hiện trường. Tuy nhiên, việc thực hiện các thí nghiệm nổ hiện trường với các yêu cầu khắt khe về an toàn và kỹ thuật, phải thực hiện nhiều lần là một công việc khó khăn, tốn kém, mất nhiều thời gian. Mục tiêu của bài báo này là nghiên cứu áp lực sóng xung kích với nhiều kịch bản nổ khác nhau (một lượng nổ, hai lượng nổ đồng thời có khối lượng bằng nhau hoặc khác nhau) bằng phương pháp mô phỏng. Độ tin cậy của mô hình được kiểm chứng qua việc so sánh với các công thức thực nghiệm và các công bố khác. Các kết quả đạt được bổ sung thêm các kiến thức quan trọng về phân tích nổ, giúp tăng cường độ chính xác, tiết kiệm thời gian, công sức (khi có thể chính xác hóa số liệu trước khi thí nghiệm hiện trường) và nâng cao hiệu quả trong thiết kế kết cấu chịu tải trọng nổ.

*Từ khóa:* sóng xung kích; TNT; CONWEP; coupled Euler-Lagrange; hiệu ứng Mach.

STUDY ON SHOCK WAVE PRESSURE UNDER SIMULTANEOUS EXPLOSION

## Abstract

The study of explosions and its impacts on structures plays an important to assess and minimize the adverse effects. So far, most research focuses on blasts with a single source of the explosion. Simultaneous blast scenarios do have not much attention. Field-in explosion experiments with strict safety and technical requirements that can repeat is a difficult and expensive mission. By the simulation approach, the current paper aims to investigate the shock wave pressure in different explosion scenarios (one source of explosion, two simultaneous explosions with the same or different TNT equivalent). The reliability of the proposed model is validated by the comparison with empirical formulas and previous publications. The results obtained from the study strengthen the understanding of explosion analysis, save time and improve accuracy as well as efficiency in the design of structures subjected to blast loading.

*Keywords:* shockwave; TNT; CONWEP; coupled Euler-Lagrange; Mach stem.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17\(4V\)-14](https://doi.org/10.31814/stce.huce2023-17(4V)-14) © 2023 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

## 1. Giới thiệu

Các kịch bản vụ nổ đại diện cho các sự kiện bất ngờ bắt nguồn từ các nguyên nhân vô tình (tai nạn công nghiệp) hay cố ý (khủng bố, chiến tranh) có thể dẫn đến hậu quả thảm khốc về con người cũng như hạ tầng xã hội [1]. Sóng nổ và tác động của sóng nổ đến kết cấu đã nhận được sự quan tâm lớn trong vài thập kỷ qua [2], bởi một số nhóm tác giả và phòng thí nghiệm khoa học quân sự, dân sự, với sự hỗ trợ của các thí nghiệm ngoài thực địa và phương pháp số. Có thể kể đến trong đó các nghiên cứu về tấm composite chịu tải trọng nổ [3], các tấm nhôm [4] và kết cấu thép [5], các tấm panel [6], kết cấu bê tông cốt thép [7, 8], kết cấu bê tông siêu tính năng [9, 10] và các hệ thống cụm kính [11] dưới

\*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: [nxbang1978@gmail.com](mailto:nxbang1978@gmail.com) (Bằng, N. X.)

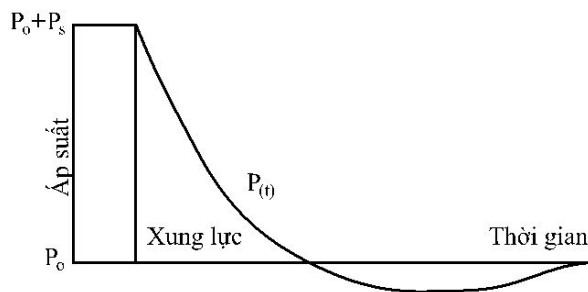
ảnh hưởng của tải trọng nổ. Sự đa dạng về các công bố liên quan đến tải trọng nổ cho thấy tầm quan trọng của nó trong lĩnh vực kết cấu công trình. Trên thực tế, các vụ nổ bắt nguồn từ nguyên nhân cố ý (khủng bố hay chiến tranh) có thể xảy ra đồng thời nhiều lượng nổ với mục đích tạo ra tình huống phá hoại nghiêm trọng hơn; hay trong sản xuất công nghiệp, nguy cơ xảy ra một vụ nổ đồng thời luôn hiện hữu, ví dụ các sự cố nổ xảy ra trong các cơ sở sản xuất, lưu trữ chất nổ hay nhà máy xử lý hóa dầu. Các hướng dẫn hiện có về thiết kế chống nổ như UFC-3-340-02 [12] và ASCE 59-11 [13] mới chỉ dừng ở mức đánh giá vụ nổ đơn tác dụng lên kết cấu công trình. Khi xảy ra nổ đồng thời, áp lực sóng xung kích và sóng phản xạ có thể sẽ cao hơn nhiều so với trường hợp các vụ nổ đơn tương đương.

Dựa trên tổng quan về tải trọng nổ và tác động của tải trọng nổ, có thể thấy có rất ít các nghiên cứu liên quan về áp lực sóng xung kích với kịch bản có hai, hoặc ba vụ nổ xảy ra đồng thời, với các đương lượng nổ giống nhau và khác nhau. Do các yêu cầu nghiêm ngặt về an toàn, bảo mật cũng như kỹ thuật, việc tiến hành thử nghiệm liên tục các vụ nổ trên thực tế là rất tốn kém và khó khăn. Sử dụng các mô phỏng số sau khi được kiểm chứng với kết quả thu được từ thực nghiệm là một cách tiếp cận phù hợp và hiệu quả. Theo cách tiếp cận này, giai đoạn tính toán áp suất nổ đầu vào thường đòi hỏi nhiều nỗ lực nhưng có thể tận dụng các công cụ số tiên tiến như các phần mềm thương mại mô phỏng vụ nổ Abaqus [14] hay LS Dyna [15]. Tính linh hoạt của các công cụ số này có thể hỗ trợ hiệu quả cho việc phân tích các kịch bản nổ nói chung. Trong một số trường hợp, các giả định đầu vào cơ bản có thể yêu cầu các hiệu chuẩn, ví dụ việc lựa chọn mô hình vật liệu trong phân tích nổ.

Trong bài báo này, các mô phỏng số được thực hiện để phân tích sự lan truyền sóng nổ và áp lực sóng xung kích với các kịch bản hai nguồn nổ có các đương lượng nổ giống và khác nhau, sử dụng tùy biến Coupled Euler-Lagrange (CEL) [16] trong phần mềm Abaqus explicit. Kết quả đạt được từ nghiên cứu này bổ sung thêm các kết quả quan trọng về sóng nổ nhằm tăng cường hiệu quả trong thiết kế các công trình chịu tải trọng nổ.

## 2. Tổng quan về sóng nổ

Một vụ nổ được bắt đầu từ các nguồn nổ như trinitrotoluene (TNT), hỗn hợp amoni nitrat và nhiên liệu dầu (ANFO) tạo ra sự giải phóng năng lượng rất nhanh gây nén và đẩy không khí xung quanh khỏi nguồn nổ, từ đó hình thành nên sóng xung kích. Nói cách khác, năng lượng giải phóng trong vụ nổ được truyền vào không khí xung quanh tạo ra sóng xung kích [17]. Ở một khoảng cách nhất định tính từ tâm vụ nổ, bất kể nguồn phát ra sao, tất cả sóng nổ đều có hình dạng gần như giống nhau [18]. Các tham số sóng nổ, như vận tốc sóng xung kích, áp suất cực đại và thời gian sóng tới là các thông số quan trọng hàng đầu.



Hình 1. Mô hình hóa sóng nổ phát ra từ một nguồn nổ

Hình 1 cho thấy hình dạng của sóng nổ điển hình được tạo ra từ một vụ nổ trong không khí. Sóng nổ với vận tốc  $U_s$ , thời gian đến bề mặt vật cản là  $t_a$ . Áp suất xung quanh (áp suất khí quyển) là  $P_0$ .

Khi đến bề mặt vật cản, áp suất đạt giá trị lớn nhất là  $P_s$ . Phần sóng nổ tương ứng với áp suất trên  $P_s$  được gọi là pha dương, trong khi phần bên dưới  $P_s$  được gọi là pha âm hay pha hút.

Đối với một lượng nổ hình cầu lý tưởng, một khái niệm chung của tất cả các công thức thực nghiệm là khoảng cách tỉ lệ  $Z$ , được xác định dựa trên khoảng cách thực từ nguồn nổ đến điểm khảo sát và đương lượng nổ TNT theo công thức của Hopkinson–Cranz [19, 20]:

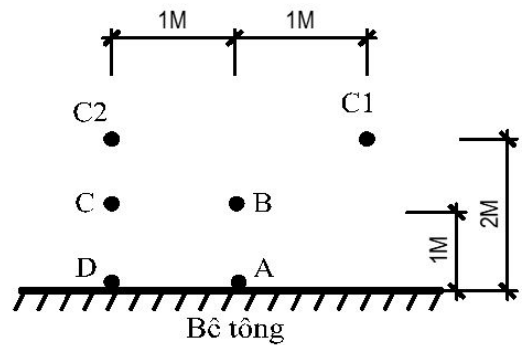
$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (1)$$

trong đó  $W$  là đương lượng nổ, được định nghĩa là khối lượng tương đương TNT và  $R$  là khoảng cách từ điểm khảo sát đến nguồn nổ. Smith và cs. [21] đã đưa ra các giá trị khoảng cách tỉ lệ  $Z$  để xác định các điều kiện nổ ứng với từng trường hợp. Trong đó, vụ nổ xa được xác định khi  $3,97 < Z$ , vụ nổ gần được xác định khi  $1,19 < Z \leq 3,97$  và vụ nổ rất gần là khi  $Z \leq 1,19$ .

### 3. Các kịch bản nổ và mô phỏng số

#### 3.1. Kịch bản mô phỏng nổ

Ảnh hưởng của sóng xung kích được khảo sát với các kịch bản nổ khác nhau như minh họa trên Hình 2 và Bảng 1. Các lượng nổ C1, C2 được đặt cách bề mặt khảo sát là 2 m. Bề mặt khảo sát bê tông được giả thiết là rất cứng. Có 3 kịch bản mô phỏng khác nhau tương ứng với đương lượng nổ (kg TNT) khác nhau tại nguồn nổ. Với mỗi kịch bản này, mô hình sẽ được phân tích và kết quả áp lực sóng xung kích tại các điểm A, B, C, D sẽ được trích xuất từ mô hình số.



Hình 2. Minh họa các mô hình nổ

Kịch bản mô phỏng nổ 1 (KB1): Với lượng nổ C2 = 5 kG, tương ứng tại B, C, D là trường hợp nổ rất gần, A là vị trí nổ gần; A, D là vị trí nằm trên bề mặt kết cấu, có xảy ra hiện tượng phản xạ sóng. Đây là kịch bản để kiểm chứng mô hình bài toán với các công thức thực nghiệm.

Kịch bản mô phỏng nổ 2 (KB2): Với hai lượng nổ C1 = C2 = 5 kG, tương ứng A, D là vị trí nằm trên bề mặt kết cấu, có xảy ra hiện tượng phản xạ sóng; A, B là vị trí nằm trên đường trung tuyến của hai mặt sóng bằng nhau (do lượng nổ C1, C2 gây ra); C, D là vị trí nằm trên đường thẳng nối vị trí lượng nổ (và vuông góc) với bề mặt kết cấu của lượng nổ C1. Đây là kịch bản nhằm khảo sát sóng kết hợp, sóng phản xạ tại các vị trí điển hình.

Bảng 1. Các kịch bản mô phỏng vụ nổ

Kịch bản (KB) vụ nổ	C1 (kg TNT)	C2 (kg TNT)	Ghi chú
KB1	0	5	Một lượng nổ
KB2	5	5	Hai lượng nổ bằng nhau
KB3	10	5	Hai lượng nổ khác nhau

Kịch bản mô phỏng nổ 3 (KB3): Với hai lượng nổ C1 = 10 kG, C2 = 5 kG, tương ứng A, D là vị trí nằm trên bề mặt kết cấu, có xảy ra hiện tượng phản xạ sóng; A, B là vị trí nằm trên đường trung tuyến của hai mặt sóng (do lượng nổ C1, C2 gây ra); C, D là vị trí nằm trên đường thẳng nối vị trí lượng nổ (và vuông góc) với bề mặt kết cấu của lượng nổ C1. Đây là kịch bản nhằm nghiên cứu sóng kết hợp, sóng phản xạ tại các vị trí điển hình.

### 3.2. Xây dựng mô hình số

Bảng 2. Thông số đầu vào của thuốc nổ và không khí dùng trong mô phỏng

Loại vật liệu	Loại thông số	Chi tiết	Giá trị	Đơn vị	
Không khí	Mật độ	//	1,29	kg/m <sup>3</sup>	
	EOS	Hằng số khí	287	J/kgK	
		Áp suất xung quanh	101325	N/m <sup>2</sup>	
	Nhiệt dung riêng	//	717,6	J/kgK	
	Độ nhớt	//	6,92e <sup>-06</sup>	kg/s.m	
TNT	Mật độ	//	1630	kg/m <sup>3</sup>	
	Hằng số EOS	Tốc độ truyền sóng	6930	m/s	
			A	37377e <sup>07</sup>	N/m <sup>2</sup>
			B	37377e <sup>07</sup>	N/m <sup>2</sup>
			$\omega$	0,35	//
			R1	4,15	//
			R2	0,9	//

Hai phương pháp mô phỏng trong phân tích vụ nổ đang được sử dụng rộng rãi nhất là CONWEP (Conventional Weapons Effects) và Coupled Euler-Lagrangian (CEL) [22, 23]. Phương pháp CONWEP còn được gọi là phương pháp Lagrangian thuần túy, trong đó tác động của vụ nổ được quy ra tải trọng đặt trực tiếp lên các bề mặt của kết cấu mà không thể hiện sự lan truyền sóng nổ. Phương pháp này đơn giản và dễ áp dụng. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp CONWEP là nó không thể hiện được các tương tác bậc hai giữa các sóng phản xạ trong các phân tử liền kề, đây là một hiệu ứng quan trọng trong phân tích vụ nổ [24]. Khác với phương pháp CONWEP, dựa trên thuật toán tính toán ghép nối Euler-Lagrange, phương pháp CEL mô tả đầy đủ tương tác kết cấu và miền không khí xung quanh [16]. Sóng xung kích trong điều kiện tốc độ biến dạng cao và hiệu ứng hình học phi tuyến tính của kết cấu cũng được miêu tả theo cách tiếp cận CEL. Vật liệu nổ và các phân tử rắn như bê tông hoặc thép được mô hình hóa bằng phần tử Lagrangian trong khi các phân tử Euler được sử dụng để mô phỏng không khí xung quanh. Trong mô phỏng CEL, phương trình trạng thái cho vụ nổ TNT được mô phỏng theo công thức đề xuất của Jones-Wilkins-Lee (JWL) [25], trong đó áp suất được tạo ra thông qua việc giải phóng năng lượng từ nguồn nổ:

$$p = A\left(1 - \frac{\omega\rho}{R_1\rho_0}\right) \exp\left(-R_1\frac{\rho_0}{\rho}\right) + B\left(1 - \frac{\omega\rho}{R_2\rho_0}\right) \exp\left(-R_2\frac{\rho_0}{\rho}\right) + \omega\rho E_m \quad (2)$$

trong đó  $A, B, R_1, R_2, \omega$  là các hằng số vật liệu;  $\rho$  là khối lượng riêng của thuốc nổ;  $E_m$  là mật độ khối lượng.

Phương trình trạng thái khí lý tưởng được xác định theo công thức sau:

$$p + p_A = \rho R(\theta - \theta^Z) \quad (3)$$

trong đó  $p_A$  là áp suất xung quanh điểm nổ;  $R$  là hằng số khí;  $\theta, \theta^Z$  biểu thị nhiệt độ hiện tại và nhiệt độ tuyệt đối trên thang nhiệt độ.

Các thông số khai báo thuốc nổ, không khí theo phương trình JWL được minh họa ở Bảng 2 [25, 26]. Trong đó Equations of State (EOS) được hiểu là các phương trình trạng thái được phát triển

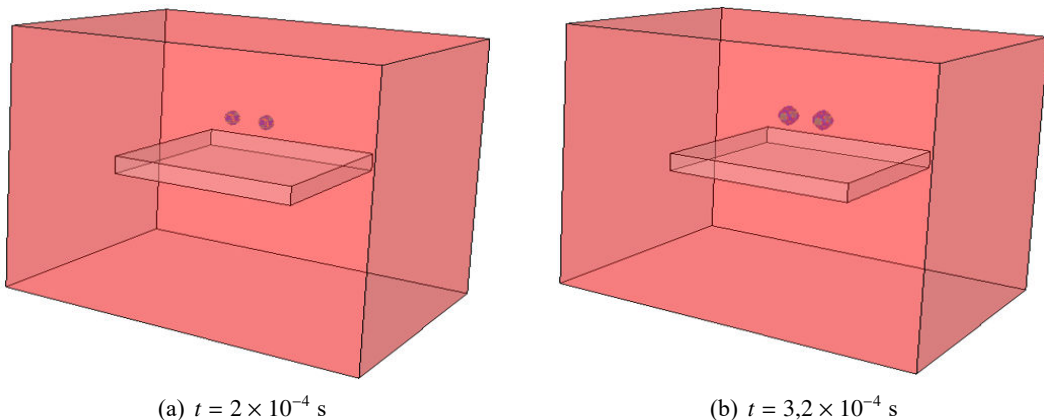
để lập mô hình chất nổ giãn nở và không khí xung quanh. EOS xác định mối quan hệ giữa các biến trạng thái của nhiệt động lực học như áp suất, thể tích, mật độ và năng lượng bên trong. Phương trình trạng thái của Jones-Wilkins-Lee (JWL) là được sử dụng rộng rãi nhất do tính dễ thực hiện của nó trong tính toán thủy động lực học thông qua các hằng số.

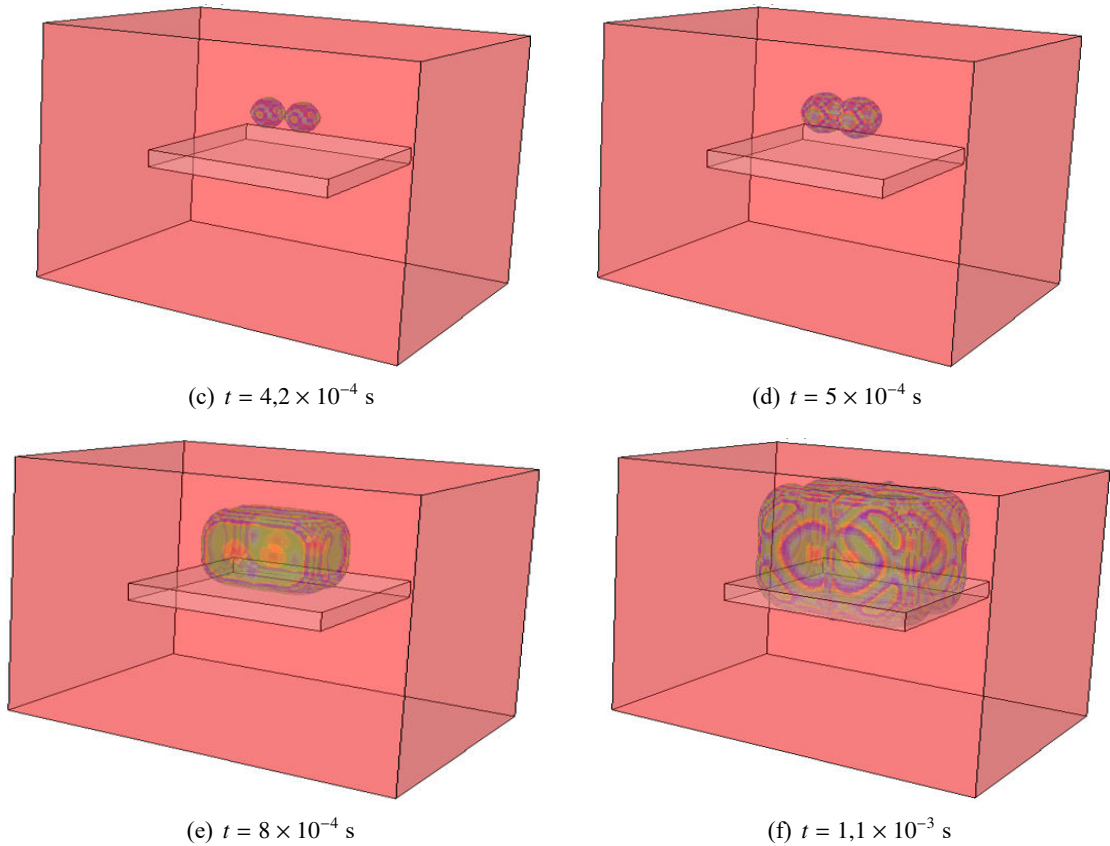
Mô hình số của trong nghiên cứu liên quan đến đáp ứng động phức tạp của kết cấu dưới tải trọng nổ và thời gian tính toán mô hình phụ thuộc vào kích thước ô lưới cũng như kích thước của miền Euler. Kích thước phù hợp của miền Euler được xác định để thu được kết quả chính xác nhất nhưng đồng thời cũng phải tiết kiệm được thời gian phân tích. Trong mô hình mô phỏng CEL, miền Euler phải đủ lớn để bao phủ tất cả các phần tử kết cấu bên trong [14]. Với mô hình số hiện tại, khối không khí (miền Euler) bao trùm toàn bộ khối chất nổ và tấm bê tông cốt thép (phần tử Lagrange). Miền Euler được chia lưới bởi các phần tử EC3D8R, là các phần tử gạch tuyến tính tám nút với tích hợp giảm. Kích thước ô lưới trong khoảng 7 mm - 10 mm được lấy đủ mịn và dòng chảy không phản xạ (non-reflection) được áp dụng cho điều kiện biên của miền Euler. Điểm nổ TNT được mô hình hóa dưới dạng hình cầu có bán kính 0.09 m tương đương với lượng nổ 5 kg TNT. Trước thời điểm phát nổ, quả cầu nổ có năng lượng và mật độ cao, sau đó áp suất do vụ nổ tạo ra được lan truyền trong miền không khí. Phần tử tuyến tính tám nút C3D8R được chọn để mô phỏng bê tông. Mặt dưới của tấm bê tông được cố định để không có chuyển vị theo phương thẳng đứng. Lưới mô hình của tấm bê tông được chia theo kích thước 10mm và được mesh dưới dạng phần tử explicit dùng cho phân tích bài toán động.

#### 4. Kết quả phân tích

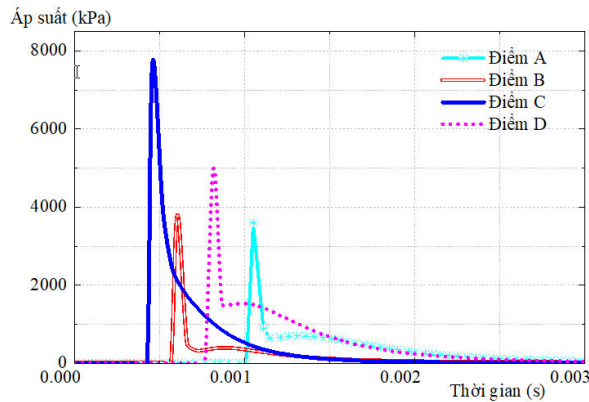
Mô hình số trước khi dùng để khảo sát ảnh hưởng của nguồn nổ đến sóng xung kích cần được kiểm chứng. Quy trình kiểm chứng được thực hiện bằng cách so sánh kết quả đạt được từ mô phỏng với các thí nghiệm ngoài hiện trường. Việc xác minh mô hình có thể tham khảo trong [27] với các công bố trước đó của nhóm tác giả. Mô hình số của các tấm bê tông siêu tính năng UHPC gia cường lưới thép chịu tải trọng nổ đã được phân tích. Kết quả được so sánh với thí nghiệm của Mao [27] về độ võng và trạng thái hư hỏng sau vụ nổ để kiểm chứng tính chính xác của mô hình trong mô phỏng. Các kết quả đạt được đã xác thực độ tin cậy của mô hình đề xuất.

Hình 3 minh họa sự lan truyền của sóng nổ trong không khí với trường hợp 2 nguồn nổ được kích hoạt đồng thời. Có thể thấy ở các bước thời gian đầu tiên sau khi kích nổ  $t = 2 \times 10^{-4}$  s đến  $t = 4,2 \times 10^{-4}$  s, sóng xung kích phát triển độc lập tại hai vị trí nguồn nổ. Thời điểm  $t = 5 \times 10^{-4}$  s, quan sát thấy được sự giao thoa của sóng xung kích xuất phát từ hai nguồn nổ này. Sau thời điểm này, sóng giao thoa này bao trùm cả miền phân tích.





Hình 3. Sự phát triển của sóng nổ trong không khí



Hình 4. Đồ thị áp suất tại các điểm khảo sát tương ứng với KB1

Hình 4 thể hiện đường cong áp suất – thời gian tại các điểm khảo sát A, B, C, D thu được từ mô phỏng. Về mặt định tính, có thể thấy thời gian sóng tới tại các điểm này là không giống nhau. Ví dụ điểm tại điểm C sóng tới tại thời điểm  $4,58 \times 10^{-4}$  s nhưng tại điểm B, sóng tới có độ trễ tương ứng với bước thời gian  $6,06 \times 10^{-4}$  s. Các điểm càng xa nguồn nổ thì sóng xung kích sẽ tác động muộn hơn. Điều này là hoàn toàn phù hợp với quy luật vật lý cơ bản về sự lan truyền của sóng trong không khí [28]. Bảng 3 thể hiện áp suất lớn nhất tại các điểm A, B, C, D. Áp suất lớn nhất tại điểm gần nguồn nổ nhất (điểm C) là 7694,2 kPa. Ngược lại, áp suất nhỏ nhất tại điểm A (điểm cách xa nguồn nổ nhất)

là 3589,4 kPa.

Bảng 3. Áp suất lớn nhất (kPa) tại các điểm khảo sát (KB1)

Điểm A	Điểm B	Điểm C	Điểm D
3589,4	3787,1	7694,2	5001,6

Một số công thức thực nghiệm để xác định áp suất sóng tới của vụ nổ trong không khí, cụ thể như sau:

Công thức của Mills [29]:

$$p = \frac{1772}{Z^3} - \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z} \quad (4)$$

Hay công thức của Sadowski [30]:

$$p = \frac{106\sqrt[3]{C}}{R} + \frac{430\sqrt[3]{C^2}}{R^2} + \frac{1400C}{R^3} \text{ (kPa)} \quad (5)$$

trong đó  $R$  là khoảng cách từ nguồn nổ đến điểm khảo sát;  $Z$  là hệ số tỉ lệ.

Bảng 4 thể hiện khoảng cách tỉ lệ tại các điểm khảo sát ứng với vụ nổ tương đương 5 kg TNT. Bảng 5 và 6 thể hiện kết quả tính toán áp suất tại điểm B, C (các điểm trong không khí) theo các phương pháp phân tích khác nhau.

Bảng 4. Khoảng cách tỷ lệ tại các điểm khảo sát

Điểm KS	Khoảng cách đến điểm nổ $R$ (m)	$Z$ (m/kg <sup>1/3</sup> )	Trường hợp nổ
A	2,2	1,28	Nổ gần
B	1,4	0,82	Nổ rất gần
C	1	0,58	Nổ rất gần
D	2	1,17	Nổ rất gần

Bảng 5. Áp suất tới tại điểm B theo các phương pháp tính

Vị trí	Điểm B		
PP tính	Mills	Sadowski	Mô phỏng
Áp suất (kPa)	3176	3321	3787,1
Chênh lệch (%)	16	12,3	//

Bảng 6. Áp suất tới tại điểm C theo các phương pháp tính

Vị trí	Điểm C		
PP tính	Mills	Sadowski	Mô phỏng
Áp suất (kPa)	8711	8438	7694,2
Chênh lệch (%)	13	9,6	//

Theo Bảng 5 và 6 có thể thấy áp lực tại các điểm khảo sát trong không khí B, C từ mô phỏng và các công thức thực nghiệm chênh lệch lớn nhất là 16%. Sự chênh lệch này là giá trị có thể chấp nhận được. Sự chênh lệch này liên quan đến các điều kiện lý tưởng mô phỏng so với một vụ nổ thực tế để xây dựng nên công thức thực nghiệm.

Khi sóng nổ tiếp xúc với một bề mặt cứng (như bê tông) hình thành áp lực sóng phản xạ lớn hơn áp lực sóng tới [31]. Áp lực tại các điểm A, D không được tính theo các công thức thông thường của Mills và Sadowski mà phải kể đến hệ số phản xạ. Với điểm A,  $z = 1,28$ , giá trị sóng xung kích tới  $P_{so} = 660$  kPa được xác định theo đồ thị hình 13 được đề xuất bởi các kỹ sư Hoa Kỳ [32]. Với góc phản xạ tại điểm A là  $\alpha = 27^\circ$ , khi đó, hệ số phản xạ  $C_{r\alpha}$  được xác định là 4,5. Áp suất phản xạ tại điểm A,  $P_r = 660 \times 4,5 = 2970$  kPa.

Với điểm D,  $z = 1,17$  theo đồ thị đề xuất bởi các kỹ sư Hoa Kỳ [32], giá trị sóng xung kích tới  $P_{so} = 793$  kPa. Với góc phản xạ tại điểm D là  $\alpha = 0^\circ$ , áp suất phản xạ tại điểm D được xác định theo công thức:

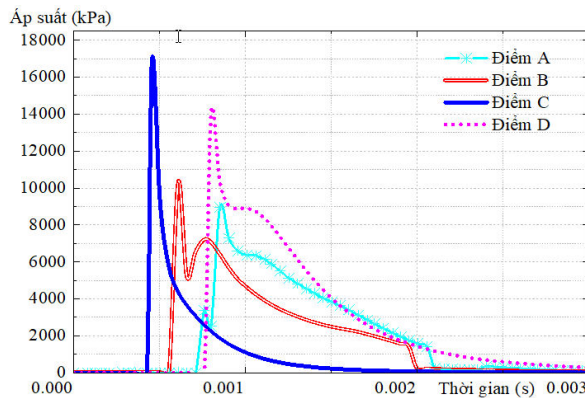
$$P_r = 2P_{so} \left( \frac{4P_{so} + 7P_o}{P_{so} + 7P_o} \right) \tag{6}$$

Với  $P_o = 101,3$  kPa là áp suất không khí. Thay số vào công thức (6) ta được áp suất phản xạ tại điểm D là  $P_r = 4098$  kPa.

Bảng 7. Áp suất phản xạ tại điểm A, D theo các phương pháp tính

Vị trí	Điểm A		Điểm D	
PP tính	CT thực nghiệm	Mô phỏng	CT thực nghiệm	Mô phỏng
Áp suất (kPa)	2970	3589,4	4098	5001,6
Chênh lệch (%)	//	21%	//	22%

Từ Bảng 7 có thể thấy áp suất phản xạ tại các điểm A, D theo mô phỏng và theo công thức thực nghiệm có sự chênh lệch lớn hơn so với các điểm B, C (vị trí không kể đến áp suất phản xạ). Điều này có thể được giải thích là do áp suất phản xạ phụ thuộc vào độ cứng của bề mặt phản xạ. Ngoài ra, một kết quả quan trọng khác có thể thấy là cả mô phỏng và công thức thực nghiệm đều cho thấy áp suất tại điểm D lớn hơn tại điểm B dù khoảng cách tỉ lệ tại điểm D lớn hơn tại B. Rõ ràng, hiệu ứng phản xạ làm tăng đáng kể áp suất của sóng xung kích.



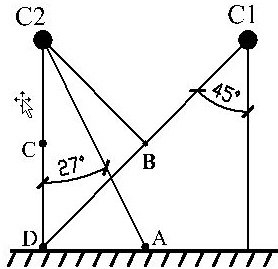
Hình 5. Đồ thị áp suất tại các điểm khảo sát tương ứng với KB2

Hình 5 thể hiện đường cong áp suất – thời gian tại điểm A, B, C, D ứng với kịch bản 2. Bảng 8 cho thấy sự gia tăng về áp suất tại các điểm khảo sát giữa kịch bản 1 và kịch bản 2. Có thể thấy áp suất tại các điểm khảo sát với trường hợp nổ kép (KB2) tăng từ 2,3 đến 2,8 lần. Sự gia tăng áp suất tại điểm D là lớn nhất mặc dù khoảng cách tỉ lệ của điểm D so với 2 nguồn nổ là nhỏ nhất. Điều này có thể được giải thích bằng hiệu ứng áp suất Mach [33].

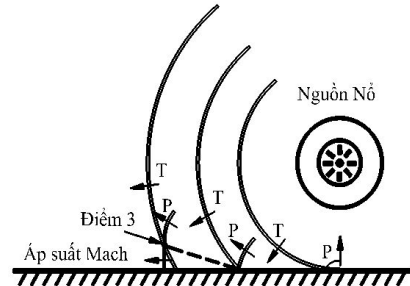


Bảng 8. Áp suất lớn nhất (KPa) tại các điểm khảo sát (KB2)

Điểm KS	Điểm A	Điểm B	Điểm C	Điểm D
Áp suất (kPa)	8986,2	10278,3	16940,8	14062,9
Chênh lệch với KB1	↑2,5 lần	↑2,7 lần	↑2,2 lần	↑2,8 lần

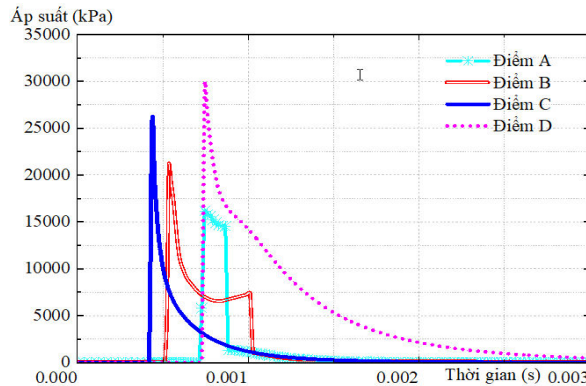


Hình 6. Góc tới với các điểm khảo sát



Hình 7. Hiệu ứng Mach trong phân tích sóng nổ  
(Ghi chú: T- sóng tới; P- sóng phản xạ)

Thông thường, sóng xung kích phát ra từ một vụ nổ trong không khí hình thành sóng tới. Sóng tới này va chạm với mặt đất và hình thành sóng phản xạ. Minh họa góc tới với các điểm đang xét như trên Hình 6. Đối với các góc tới nhỏ, sóng tới đi trước sóng phản xạ và hiện tượng phản xạ điển hình xảy ra. Tuy nhiên với các trường hợp góc tới lớn, sự kết hợp giữa sóng tới và sóng phản xạ tạo ra hiệu ứng Mach, như trên Hình 7. Giao điểm của sóng tới, sóng phản xạ được gọi là điểm ba. Khi hiện tượng Mach xảy ra, sóng kết hợp này có thể lớn hơn đáng kể so với các giá trị áp suất phản xạ thông thường. Theo Vasilis và George [34], khi góc tới lớn hơn  $40^\circ$ , hiệu ứng Mach sẽ xảy ra. Như trên Hình 5, góc tới tại điểm D là  $45^\circ$  với nguồn nổ C1. Như vậy tại điểm D sẽ xảy ra hiện tượng chồng chất áp suất, điều này dẫn đến áp suất tại điểm D tăng nhanh hơn tại các vị trí khác.



Hình 8. Đồ thị áp suất tại các điểm khảo sát tương ứng với kích bản 3

Hình 8 thể hiện đường cong áp suất – thời gian tại các điểm khảo sát ứng với kích bản 3 (KB3). Bảng 9 thể hiện sự chênh lệch áp suất lớn nhất tại các điểm khảo của KB3 so với KB1 và KB2. So với KB1, áp suất của các điểm khảo sát của KB3 tăng từ 3,3 tới 5,9 lần. So với KB2, áp suất tại các điểm khảo sát của KB3 tăng từ 1,8 lần đến 2,1 lần tùy theo vị trí. Một lần nữa có thể thấy áp suất phản xạ tại các điểm khảo sát tăng nhanh hơn các vị trí khác. Ngoài ra tại điểm D chịu ảnh hưởng của hiệu ứng Mach, sự gia tăng áp suất lớn nhất so với các vị trí còn lại.

Bảng 9. Áp suất lớn nhất (KPa) tại các điểm khảo sát (KB3)

Điểm KS	Điểm A	Điểm B	Điểm C	Điểm D
Áp suất (kPa)	16296,4	20997,4	25560,6	29711,8
Chênh lệch với KB1	↑4,5 lần	↑5,5 lần	↑3,3 lần	↑5,9 lần
Chênh lệch với KB2	↑1,8 lần	↑2,0 lần	↑1,5 lần	↑2,1 lần

## 5. Kết luận

Bài báo khảo sát áp lực sóng xung kích với các trường hợp nổ khác nhau. Dựa trên các kết quả thu được, có thể rút ra các kết luận sau:

- Kết quả khảo sát áp lực sóng xung kích cho thấy sự đáp ứng tốt so với các công thức thực nghiệm. Phương pháp Coupled Euler-Lagrange chứng minh sự hiệu quả và độ tin cậy trong việc phân tích kết cấu dưới tải trọng nổ.

- So với các công thức thực nghiệm, kết quả mô phỏng cho thấy sự chênh lệch về áp suất phản xạ lớn hơn so với áp suất thông thường trong không khí. Kết quả này liên quan đến độ cứng của bề mặt khảo sát.

- Kích bản một vụ nổ kép cho thấy sự gia tăng đáng kể về áp suất so với vụ nổ đơn tại tất cả các điểm khảo sát. Khi dùng vụ nổ kép với lượng nổ gấp đôi trường hợp vụ nổ đơn, áp lực của sóng xung kích có thể tăng lên gấp 2,8 lần.

- Dù khoảng cách khảo sát so với nguồn nổ cao hơn, áp suất sóng phản xạ tại một số vị trí thể hiện giá trị lớn hơn so với áp suất sóng nổ của các điểm trong không khí. Khi tăng lượng nổ với các kích bản khác nhau, với các điểm nằm trong vùng xảy ra hiệu ứng Mach, hiện tượng chùng chất sóng nổ gây ra sự gia tăng lớn nhất về áp suất so với các điểm còn lại. Đây là điểm cần lưu ý khi thiết kế cấu chịu tác động của sóng nổ.

## Tài liệu tham khảo

- [1] Yu, G., Wang, Y., Zheng, L., Huang, J., Li, J., Gong, L., Chen, R., Li, W., Huang, J., Duh, Y.-S. (2021). [Comprehensive study on the catastrophic explosion of ammonium nitrate stored in the warehouse of Beirut port. \*Process Safety and Environmental Protection\*, 152:201–219.](#)
- [2] Shirbhate, P. A., Goel, M. D. (2020). [A Critical Review of Blast Wave Parameters and Approaches for Blast Load Mitigation. \*Archives of Computational Methods in Engineering\*, 28\(3\):1713–1730.](#)
- [3] Kiakojouri, F., Tavakoli, H. R., Sheidaii, M. R., Biagi, V. D. (2022). [Numerical analysis of all-steel sandwich panel with drilled I-core subjected to air blast scenarios. \*Innovative Infrastructure Solutions\*, 7 \(5\).](#)
- [4] George, A., Mohanan, N., Kulavattom, A. A. (2018). [Effect of multi-layers in Aluminium corrugated sandwich panels under blast loading. \*IOP Conference Series: Materials Science and Engineering\*, 396: 012006.](#)
- [5] Mirtaheri, M., Sharei, E., Norouzi, A. (2011). [A damage mitigation measure for steel structures under blast loading. \*International Journal of Steel Structures\*, 11\(3\):287–295.](#)
- [6] Lin, X., Zhang, Y., Hazell, P. J. (2014). [Modelling the response of reinforced concrete panels under blast loading. \*Materials & Design \(1980-2015\)\*, 56:620–628.](#)
- [7] Liu, J., Yin, Y., Zhao, Y., Li, Y. (2023). [Dynamic Behavior Analysis of I-Shaped RC Beams under Combined Blast and Impact Loads. \*Applied Sciences\*, 13\(3\):1943.](#)
- [8] Trung, P. T., Bảo, N. Q., Hiếu, V. Đ. (2020). [Đánh giá sự phá hủy cấu kiện cột bê tông cốt thép dưới tác dụng tải trọng nổ tiếp xúc bằng mô phỏng số và thực nghiệm tại hiện trường. \*Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng \(TCKHCNXD\) - ĐHXDH\*, 14\(5V\):180–196.](#)
- [9] Mai, V.-C., Vu, N.-Q. (2020). [Assessment of Dynamic Response of 3D Ultra High Performance Concrete Frame Structure under High Explosion Using Johnson-Holmquist 2 Model. \*KSCE Journal of Civil Engineering\*, 25\(3\):1008–1018.](#)

- [10] Hao, P. M., Thang, N. C., Van Thao, N., Van Tuan, N., Hai, L. N., Thuy, N. N., Man, N. X. (2022). Blast testing of ultra-high performance concrete fortifications using local materials. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-HUCE*, 16(4):73–86.
- [11] Zhang, X., Bedon, C. [Vulnerability and Protection of Glass Windows and Facades under Blast: Experiments, Methods and Current Trends](#). *International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research*, 1(2):10–23.
- [12] UFC3-340-02 (2008). *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*.
- [13] ASCE (2011). *Blast protection of buildings*. American Society of Civil Engineers.
- [14] Simulia (2016). *ABAQUS 6.14 user's manuals*. Dassault Systèmes Simulia Corp.
- [15] LS-DYNA manuals (2014). *Livermore software technology corporation*.
- [16] Zaid, M., Sadique, M. R. (2021). [A Simple Approximate Simulation Using Coupled Eulerian–Lagrangian \(CEL\) Simulation in Investigating Effects of Internal Blast in Rock Tunnel](#). *Indian Geotechnical Journal*, 51(5):1038–1055.
- [17] Díaz, J. S., Rigby, S. E. (2022). [Blast wave kinematics: theory, experiments, and applications](#). *Shock Waves*, 32(5):405–415.
- [18] Kinney, G. F., Graham, K. J. (2013). *Explosive shocks in air*. Springer Science & Business Media.
- [19] Krauthammer, T. (1999). *Blast effects and related threats*. Technical Paper, Protective Technology Centre, Penn State University.
- [20] Sadovskiy, M. A. (1953). Mechanical effects of air shockwaves from explosions according to experiments. *Physics of Explosion, USSR Academy of Sciens*, Moscow, Nauka Press Moscow, 1:77–110.
- [21] Smith, S. J., McCann, D. M., Kamara, M. E. (2009). Blast resistant design guide for reinforced concrete structures. Technical report, Portland Cement Association.
- [22] Shuaib, M., Daoud, O. (2015). [Numerical Modelling of Reinforced Concrete Slabs under Blast Loads of Close-in Detonations Using the Lagrangian Approach](#). *Journal of Physics: Conference Series*, 628: 012065.
- [23] Larcher, M., Casadei, F. (2010). [Explosions in Complex Geometries — A Comparison of Several Approaches](#). *International Journal of Protective Structures*, 1(2):169–195.
- [24] Sun, L., Taylor, R. E., Taylor, P. H. (2010). [First- and second-order analysis of resonant waves between adjacent barges](#). *Journal of Fluids and Structures*, 26(6):954–978.
- [25] Lee, E. L., Hornig, H. C., Kury, J. W. (1968). *Adiabatic Expansion Of High Explosive Detonation Products*. No. UCRL-50422.
- [26] Dobratz, B. M. (1972). [Properties of chemical explosives and explosive simulants](#). *Lawrence Livermore National Laboratory*, 1:1–334.
- [27] Mai, V.-C., Vu, N.-Q., Nguyen, V.-T., Pham, H. (2020). [Ultra high Performance Fiber Reinforced Concrete Panel Subjected to Severe Blast Loading](#). *Defence Science Journal*, 70(6):603–611.
- [28] Ivančo, M., Erdélyiová, R., Figuli, L. (2019). [Simulation of detonation and blast waves propagation](#). *Transportation Research Procedia*, 40:1356–1363.
- [29] Mills, C. A. (1987). The design of concrete structures to resist explosions and weapon effects. *Proc. 1st Int. Conf. Concr. Hazard Prot., Edinburgh, UK*.
- [30] Lidner, M., Szcześniak, Z. (2016). [Blast load estimation using Finite Volume Method and linear heat transfer](#). *MATEC Web of Conferences*, 86:01027.
- [31] Department of Defence (2008). *Unified facilities criteria (UFC) Structures To Resist the Effects of Accidental Explosions*. Washington, DC.
- [32] Department of Defence (2014). *Unified facilities criteria (UFC) Structures To Resist the Effects of Accidental*. Approved for Public Release and Distribution Unlimited.
- [33] Vaishnavi, J. K., Krishna, B. M. (2022). [Determination of response of multistorey structure subjected to blast loading](#). *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 7(1).
- [34] Karlos, V., Solomos, G. (2013). Calculation of blast loads for application to structural components. *Luxembourg: Publications Office of the European Union*, 5.