

# NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG KÍCH THƯỚC LƯỚI MÔ HÌNH PHẦN TỬ HỮU HẠN VỚI HỘI TỤ KẾT QUẢ THÔNG QUA XÁC MINH CHÉO VỚI KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VỤ NỔ TRONG KHÔNG KHÍ

ThS. NGUYỄN CÔNG NGHỊ, TS. LÊ ANH TUẤN, ThS. TẠ ĐỨC TUÂN,  
ThS. ĐINH QUANG TRUNG  
Học viện Kỹ thuật Quân sự

**Tóm tắt:** Bài báo trình bày nghiên cứu ảnh hưởng của kích thước lưới chia mô hình phần tử hữu hạn xây dựng trên phần mềm LS-DYNA đến sự hội tụ và ổn định của kết quả mô phỏng một vụ nổ trong không khí thông qua xác minh chéo với kết quả thử nghiệm tại hiện trường. Kết quả khảo sát cho thấy kỹ thuật chia lưới và mật độ kích thước lưới chia có ảnh hưởng lớn đến sự hội tụ của kết quả mô phỏng. Cũng thông qua nghiên cứu này cho thấy, ngoài mật độ chia lưới thì các yếu tố khác như hệ số tỉ lệ bước thời gian, kích thước lưới chia lượng nổ và bề rộng biên cũng ảnh hưởng lớn đến kết quả và dạng của biểu đồ áp lực tại điểm khảo sát. Từ kết quả khảo sát đưa ra một số khuyến cáo hữu ích cho mô phỏng vụ nổ trong không khí bằng LS-DYNA.

**Từ khóa:** Lưới chia, thử nghiệm, áp lực, mô phỏng số, LS-DYNA.

**Abstract:** This paper presents the research on the effects of the meshing size of finite element model built-in LS-DYNA software to convergence and stability of simulation results of air-burst explosions through cross-reference to experimental results in the field. The survey results show that the meshing technique and meshing density have significant effects on the convergence of simulation results. This research also shows that not only meshing size, but other factors like time step, meshing size, and boundary width also have significant effects on the result and the shape of the pressure figure at the survey point. Thanks to the obtained results, the paper proposes some helpful recommendations for simulating air-burst explosion by LS-DYNA software.

**Keywords:** mesh, experiment, pressure, numerical simulation, LS-DYNA.

## 1. Mở đầu

Nổ là sự gia tăng nhanh chóng về thể tích và giải phóng năng lượng một cách cực đoan trong khoảng thời gian ngắn. Sự giải phóng năng lượng đột ngột sẽ làm cho nhiệt độ và áp suất tăng. Sau đó sản phẩm nổ sẽ dẫn nổ làm cho không khí bị nén mạnh

tạo thành sóng xung kích. Tác động của vụ nổ tạo ra vấn đề lớn về độ phi tuyến cao với ứng xử cơ học rất phức tạp, gây khó khăn cho việc phân tích chính xác. Trong hầu hết các trường hợp, phân tích được thực hiện bằng cách xác minh chéo dữ liệu và kết quả của các phân tích mô phỏng số có được từ các thử nghiệm nổ thực tế. Thử nghiệm nổ đòi hỏi kinh phí khá lớn với các khu vực thử nghiệm hạn chế và tiềm ẩn nhiều nguy hiểm làm cho các thử nghiệm nổ thường bị hạn chế. Để tránh nguy hiểm có thể, phân tích kỹ thuật hỗ trợ máy tính được sử dụng để các thử nghiệm nổ có thể được thay thế bằng mô phỏng số. Tuy nhiên, độ tin cậy của phân tích mô phỏng số phụ thuộc vào nhiều yếu tố cấu thành mô hình số nhất là mật độ lưới chia phần tử.

Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) là một phương pháp số được áp dụng rộng rãi trong các lĩnh vực nghiên cứu khác nhau. Trong kỹ thuật thường cần phải xử lý hình học phức tạp, sự sai lệch về tính chất vật liệu và hành vi phi tuyến của vật liệu. FEM là sự kết hợp của nhiều phương pháp số và cung cấp kết quả phân tích với thông tin đầy đủ về trường chuyển vị và trường ứng suất làm tài liệu tham khảo cho một thiết kế kỹ thuật. Trong FEM khi lưới càng mịn và số phần tử càng lớn thì độ chính xác của phân tích sẽ càng cao, tuy nhiên sai số tính toán có thể tích lũy. Mật độ lưới chia càng cao, thời gian tính toán càng dài và tài nguyên phần cứng khi tính toán được tiêu thụ càng nhiều. Để đáp ứng đồng thời cả độ chính xác và hiệu quả của các kết quả mô phỏng, cần phải có một phân tích về sự hội tụ lưới của mô hình các phần tử hữu hạn. Gebbeken và Ruppert [1] năm 1999 đã xây dựng một mô hình lưới nhúng bao gồm lưới chất lỏng và lưới rắn được xây dựng độc lập để xử lý các vấn đề tương tác lỏng rắn trong phân tích tác động vụ nổ, trong đó lưới chất lỏng và lưới rắn tương tác thông qua chế độ tiếp xúc. Sự kết hợp của chất lỏng và chất rắn được thiết lập bằng lưới chồng lên nhau với khuyến nghị mật độ chia lưới rắn ít nhất

phải gấp đôi mật độ của lưới chất lỏng. Các nghiên cứu khác [2, 3, 4] đã được thực hiện về việc tích hợp FEM với một mô hình xác định để phân tích vụ nổ. Tuy nhiên, sự mất ổn định tiềm ẩn gây ra bởi vụ nổ do chỉ định mật độ chia lưới tới sự hội tụ của kết quả không được xem xét sâu trong các nghiên cứu này.

Ứng xử cơ học của các vụ nổ chủ yếu liên quan đến việc phân tích phản ứng theo thời gian của tải trọng động, trong đó thời gian tải là ngắn và tần số rung động cao, đây là một vấn đề cho phân tích động tốc độ cao. Ngoài ra, vật liệu, hình học và trạng thái đều có tính phi tuyến cao [5, 6]. Để giải quyết các vấn đề liên quan đến chủ đề của nghiên cứu này, 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) đủ cho 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 tương tác giữa vật liệu lỏng - rắn và (5) có khả năng phân tích sự chuyển dịch nhanh hoặc biến dạng lớn của vật liệu chịu áp lực [7]. 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, công thức trạng thái và tiêu chuẩn phá hủy. Phần mềm có lợi thế xử lý phi tuyến và trạng thái biến dạng lớn trong cấu trúc không gian 3 chiều, điều này làm cho LS-DYNA lý tưởng để giải quyết các chủ đề phi tuyến như va chạm hay vụ nổ tốc độ cao. Nghiên cứu này sử dụng dữ liệu thử nghiệm nổ để xác minh chéo với phân tích số và thiết lập mô hình mật độ lưới hợp lý làm nền tảng để phân tích số tác động do vụ nổ gây ra.

## 2. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu chính được sử dụng trong nghiên cứu này là xác minh chéo giữa kết quả thử nghiệm và phân tích số. Dữ liệu thực nghiệm được so sánh với mô phỏng số, dữ liệu thực nghiệm được sử dụng làm tài liệu tham khảo để xác minh độ tin cậy mô phỏng số.

### 2.1 Phương pháp phân tích mô hình số

Nghiên cứu này chủ yếu áp dụng khái niệm cơ bản của FEM để phân tích sự hội tụ của lưới về ứng xử động của vụ nổ. FEM của phần mềm LS-DYNA

được sử dụng trong phân tích số vì nó đồng thời cung cấp các phương pháp tích phân hiện (Explicit) và ẩn (Implicit), dựa trên sự kết hợp giữa mô hình số chất lỏng và rắn được phát triển bởi Lagrangian và Eulerian theo phương pháp tùy biến Lagrangian-Eulerian (Arbitrary Lagrangian-Eulerian, ALE). Phương pháp tùy biến Lagrangian-Eulerian được kết hợp đồng thời của cả thuật toán Lagrangian và thuật toán Eulerian. Phương pháp này không chỉ khắc phục vấn đề kết thúc tính toán gây ra bởi sự biến dạng quá mức của lưới phần tử, mà còn kiểm soát và theo dõi hiệu quả ứng xử chuyển động của biên vật liệu. Phương pháp này khắc phục những thiếu sót của thuật toán Lagrangian và thuật toán Eulerian, cho phép các nhà nghiên cứu giải quyết các vấn đề biến dạng lớn va chạm và nổ với tốc độ cao [8, 9, 10, 11].

#### a. Kiểu phần tử và tích phân theo thời gian

Phần mềm LS-DYNA cung cấp các kiểu phần tử đa dạng. Nó tính đến sự khác biệt giữa các loại phân tích và phương pháp tính toán cho phép lựa chọn các kiểu phần tử. Nghiên cứu này chọn phương pháp ALE và kết hợp phần tử khối 3 chiều, 8 nút để tính toán phân tích. Đây là loại phần tử khối 3 chiều và các phần tử được xác định trong 8 nút, trong đó bậc tự do của mỗi nút được thay đổi theo các trục tọa độ X, Y và Z, bậc tự do của vận tốc và gia tốc cũng được đưa ra với tất cả có 9 bậc tự do cho mỗi nút. Khi chịu ứng suất nén hoặc biến dạng lớn sẽ tránh được hiện tượng thể tích âm. Loại phần tử này được áp dụng phù hợp cho phép tích phân hiện giải quyết vấn đề ứng xử động tốc độ cao [12].

Phân tích ứng xử va chạm tốc độ cao hay tác động cực hạn của vụ nổ là một vấn đề của động lực học thời gian ngắn. Một phương trình vi phân có liên quan đến các dẫn xuất của thời gian và không gian, và phải có khả năng giải quyết hiệu quả tích phân theo thời gian. Loại phương trình vi phân này được chia thành tích phân theo thời gian hiện và ẩn. Tích phân hiện sử dụng giải pháp cho một bước thời gian được biết trước đó để tìm lời giải cho lần tiếp theo. Nói cách khác, nó sử dụng vectơ của một thời điểm đã biết để thể hiện một vectơ mới. Mặt khác, kiểu tích phân ẩn sử dụng phương pháp lặp để tìm lời giải. Phương trình vi phân thông thường thể hiện việc tích phân theo thời gian như sau [13]:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\partial F(U)}{\partial x} = G(U) \quad (1)$$

$$G^{AVG} = \int G(\tau) \frac{d\tau}{dt} \quad (2)$$

$$G^{AVG} = \varepsilon G^{t+\Delta t} + (1-\varepsilon)G^t \quad (3)$$

$$U^{t+\Delta t} = U^t + \Delta t[\varepsilon G^{t+\Delta t} + (1-\varepsilon)G^t] \quad (4)$$

Trong công thức (4), khi  $\varepsilon = 0$  thì  $G^{AVG} = G^t$  có nghĩa là  $G^{AVG}$  có thể lấy giá trị của bước thời gian trước, đây là phương pháp tích phân hiện. Ngược lại, khi  $\varepsilon \neq 0$  thì  $G^{AVG}$  phải lấy giá trị của bước thời gian trước, sau và phương pháp lặp được thực hiện để tính toán, đây là phương pháp tích phân ẩn.

$$\ddot{U}_t = \frac{1}{\Delta t} \left( \frac{U_{t+\Delta t} - U_t}{\Delta t} - \frac{U_t - U_{t-\Delta t}}{\Delta t} \right) = \frac{1}{\Delta t^2} (U_{t-\Delta t} - 2U_t + U_{t+\Delta t}) \quad (5)$$

$$\dot{U}_t = \frac{1}{2\Delta t} (-U_{t-\Delta t} + U_{t+\Delta t}) \quad (6)$$

Bậc của sai số trong các phương trình trên là  $(\Delta t^2)$ . Để tìm kết quả cho bước thời gian tiếp theo  $(t + \Delta t)$  xem xét phương trình động lực học của kết cấu:

$$M\ddot{U}_t + KU_t = P(t) \quad (7)$$

Thay các công thức (5), (6) vào công thức (7):

$$\frac{1}{\Delta t^2} MU_{t+\Delta t} = P(t) - \left( K - \frac{2}{\Delta t^2} M \right) U_t - \frac{1}{\Delta t^2} MU_{t-\Delta t} \quad (8)$$

Phương trình (8) cho thấy chuyển vị  $U_{t+\Delta t}$  có nguồn gốc từ sự dịch chuyển ở các bước thời gian trước đó, chỉ các điều kiện cân bằng tại thời điểm  $(t)$  cần được xem xét, đây là lợi ích của phương pháp tích phân hiện. Phân tích vụn nổ là một vấn đề lớn của động lực học thời gian ngắn, nó đòi hỏi một khoảng thời gian rất nhỏ. Phương pháp tích phân hiện là phương pháp tích phân theo thời gian chính trong LS-DYNA. Phương pháp này là phương pháp tính toán có điều kiện và ổn định, do đó phương pháp này tốt hơn để phân tích các vụ nổ.

**b. Kiểm soát bước thời gian trong tính toán**

Trong phương pháp tích phân hiện, thời gian  $(\Delta t)$  phải nhỏ để tránh xảy ra sai số quá lớn trong quá trình tính toán, đây là sự ổn định có điều kiện của phép tích phân hiện. Các bước thời gian  $\Delta t$  của các loại phần tử khác nhau đòi hỏi các phương pháp tính toán khác nhau, liên quan đến độ lớn phần tử và tốc độ truyền âm của vật liệu. Phương trình (9) hiển thị công thức cho bước thời gian  $\Delta t$  được sử dụng cho các phần tử được chọn trong nghiên cứu này. Khi tính toán thời gian T, chương trình sẽ tự động phân

Trong phương pháp tích phân hiện, phương pháp sai phân trung tâm sẽ tốt hơn khi tính toán các bài toán phi tuyến. Lợi ích của phương pháp là không bắt buộc phải tính ma trận tổng thể và ma trận khối lượng của tất cả các phần tử, chỉ có phương trình động cần được giải. Hạn chế của phương pháp là độ chính xác của ma trận khối chéo tùy thuộc vào phương án lựa chọn phần tử. Phương pháp sai phân trung tâm, một phương pháp tích phân hiện trong LS-DYNA, được mô tả ngắn gọn dưới đây [12]. Phương pháp sai phân trung tâm giả định các mối quan hệ giữa gia tốc, vận tốc và chuyển vị như sau:

chia thành các chu kỳ  $T/\Delta t$ . Do đó, thời gian cần thiết để tính toán trong chương trình phụ thuộc rất nhiều vào số lượng bước thời gian  $\Delta t$ . Số lượng bước thời gian  $\Delta t$  phụ thuộc vào kích thước lưới phần tử. Lưới phần tử càng mịn, thời gian tính toán cần thiết càng dài và độ chính xác càng cao.

Công thức cho phần tử khối:

$$\Delta t_e = \frac{L_e}{\left[ \left[ Q + (Q^2 + c^2)^{1/2} \right] \right]} \quad (9)$$

$$Q = \begin{cases} C_1 c + C_0 L_e |\dot{\varepsilon}_{kk}|, & \dot{\varepsilon}_{kk} \leq 0 \\ 0, & \dot{\varepsilon}_{kk} > 0 \end{cases} \quad (10)$$

Bước thời gian  $(\Delta t)$  trong phương pháp sai phân trung tâm phải nhỏ hơn giá trị ngưỡng, nếu nó lớn hơn giá trị ngưỡng, giá trị phương sai của sai phân trung tâm sẽ không ổn định. Các tiêu chí cho một  $\Delta t$  ổn định của phần tử khối 3 chiều, 8 nút trong LS-DYNA được mô tả dưới đây:

$$L_e = \frac{v_e}{A_{e \max}} \quad (11)$$

Tốc độ truyền sóng của vật liệu đàn hồi thông thường là:

$$c = \left[ \frac{4G}{3\rho_0} + \frac{\partial p}{\partial \rho} \right]_s^{1/2} \quad (12)$$

Đối với vật liệu đàn hồi có mô đun khối cố định, đó là:

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (13)$$

trong đó:  $Q$  - hàm biểu diễn hệ số độ nhớt theo thể tích của  $C_0$  và  $C_1$ ;  $L_e$  - độ dài đặc trưng phần tử;  $v_e$  - thể tích phần tử;  $A_{e\max}$  - diện tích đo theo cạnh dài nhất;  $\dot{\epsilon}_{kk}$  - tensor tốc độ biến dạng;  $c$  - vận tốc truyền âm của vật liệu;  $\rho$  - khối lượng riêng;  $E$  - mô đun đàn hồi;  $G$  - mô đun trượt;  $\nu$  - hệ số Poisson.

Kết quả là  $\Delta t$  được xác định bởi lưới phần tử nhỏ nhất. Mật độ của lưới phần tử xác định độ chính xác tính toán, độ ổn định và thời gian tính toán. Để ổn định, trong hướng dẫn sử dụng LS-DYNA gợi ý tỉ lệ bước thời gian TSSFAC mặc định 0.9, đối với mô phỏng vụ nổ khuyến cáo TSSFAC  $\leq 0.67$  [12].

## 2.2 Thử nghiệm nổ hiện trường



Hình 1. Bố trí thí nghiệm đo áp lực nổ không khí hiện trường



## 3. Thiết lập mô hình số

Các kết quả từ mô phỏng số bị ảnh hưởng bởi hệ lưới chia của mô hình và bước thời gian ( $\Delta t$ ). Hội tụ của quá trình phân tích mô phỏng số là cần thiết trước khi thiết lập một mô hình, để có được mật độ lưới chia và bước thời gian tối ưu.

### 3.1 Phân tích mô hình

Nghiên cứu này áp dụng phương pháp mô phỏng số với việc sử dụng LS-DYNA làm công cụ phân tích để nghiên cứu quá trình phát nổ, lan truyền áp lực sóng xung kích trong không khí và phân tích sự hội tụ lưới phần tử hữu hạn dưới tải trọng động. Mô hình phân tích được thiết lập với phần tử rắn 8 nút. Phương pháp ALE được thông qua để tính toán và đơn vị là kg - m - s. Kích thước miền không khí là  $110 \times 110 \times 110$  (cm) và phần tử không khí được xác định là trạng thái khí lý tưởng. Thiết lập thuốc nổ TNT có hình chữ nhật, trọng lượng 200g, với khối lượng

Để kiểm chéo việc thiết lập mô hình số cho vụ nổ nhằm thu được kết quả mô phỏng và phân tích tham số mô phỏng cần số liệu thử nghiệm hiện trường để kiểm chứng. Mục đích của thử nghiệm nổ là để thu được số liệu áp suất không khí khi thực hiện vụ nổ TNT để xác minh tính chính xác của mô phỏng số. Thử nghiệm nổ trong không khí sử dụng lượng nổ 200g TNT, đặt cách mặt đất 120cm, đầu đo áp lực không khí cách tâm lượng nổ 100cm. Vị trí và sơ đồ thử nghiệm được minh họa trong hình 1. Thiết bị đo áp lực nổ được sử dụng là PCB loại 137B21B. Một tín hiệu được tạo ra bởi điện áp và áp lực nổ tối đa có thể đo được là 6,895 kPa. Việc ghi đo số liệu cho hệ thống đo bao gồm một máy đo đa kênh NCXI-1000DC và bộ card điều chỉnh tín hiệu đo. Tín hiệu được tạo ra bởi đầu đo áp lực nổ được gửi đến máy đo ghi thông qua hệ dây dẫn tín hiệu và bộ card điều chỉnh tín hiệu đo. Khi áp suất kích nổ vượt quá 5 kPa, các tín hiệu áp lực không khí được ghi lại dưới dạng tín hiệu số.

riêng  $1600 \text{ kg/m}^3$ . Điểm phát nổ tại vị trí tâm của khối thuốc nổ TNT. Với tính đối xứng mô hình, 1/8 mô hình được sử dụng để phân tích nhằm hạn chế tiêu tốn năng lượng phần cứng khi phân tích bài toán.

### 3.2 Mô hình vật liệu và các phương trình trạng thái của vật liệu

Quy luật cấu thành vật liệu được biểu thị bằng một tensor ứng suất và tensor biến dạng, nó mô tả quy luật cấu thành và ứng xử của vật liệu. Trong trạng thái tĩnh, các mô tả ứng suất và biến dạng là đủ để thể hiện các ứng xử của vật liệu bị ngoại lực tác động. Tuy nhiên, nếu sự biến dạng của vật liệu quá mức, việc áp dụng một phương trình trạng thái (EOS) vào ứng xử của vật liệu sẽ là cần thiết.

Một phương trình trạng thái chủ yếu mô tả các mối quan hệ giữa áp suất, nhiệt độ, thể tích, mật độ và năng lượng bên trong của quy luật cấu thành vật liệu. Nó cũng có thể mô tả mối quan hệ giữa những

thay đổi về áp suất, năng lượng bên trong và mật độ, khối lượng vật liệu sau khi bị nổ hoặc va chạm. Đối với trạng thái vận tốc cao, nhiệt độ cao và áp suất cao từ vụ nổ, sử dụng EOS là cần thiết để mô tả ứng xử của vật liệu, liên quan đến thay đổi lớn về thể tích, để mô phỏng thực tế ứng xử động của vật liệu.

**a. Mô hình không khí**

$$P = C_0 + C_1 + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E_0 \tag{14}$$

$$P = (\gamma - 1) \frac{\rho}{\rho_0} E_0 \tag{15}$$

trong đó:  $E_0$  - nội năng của đơn vị thể tích;  $\mu$  - hệ số nhớt động;  $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$  - các hệ

Sử dụng thẻ vật liệu MAT\_NULL và phương trình trạng thái sử dụng thẻ EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL để mô tả ứng xử của vật liệu không khí thể hiện theo phương trình trạng thái trong công thức (14). Phương trình trạng thái (14) có thể được sử dụng để mô hình hóa không khí với phương trình trạng thái theo luật Gamma. Điều này có thể đạt được bằng cách thiết lập với  $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$  và  $C_4 = C_5 = \gamma - 1$ , viết lại như công thức (15) [12]:

số;  $V_0$  - khối lượng tương đối;  $\gamma$  - hệ số nhiệt dung riêng của không khí ( $\gamma = 1.4$  với không khí ở 20°C);  $\rho_0$  - khối lượng riêng ban đầu không khí;  $\rho$  - khối lượng riêng của không khí.

**Bảng 1. Tham số mô hình vật liệu không khí**

$\rho(\text{kg/m}^3)$	$E_0(\text{J/m}^3)$	$V_0(\text{kg/m}^3)$	$C_4$	$C_5$
1.23	2.58xE5	1.0	0.4	0.4

**b. Mô hình thuốc nổ TNT**

Sử dụng thẻ vật liệu MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN và phương trình trạng thái sử dụng Jones-Wilkins-Lee (JWL) bằng thẻ EOS\_JWL để mô tả ứng xử của vật liệu TNT thể hiện theo phương trình trạng thái trong công thức (16) [14]:

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) E_m^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) E_m^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \tag{16}$$

trong đó:  $A, B, R_1, R_2$  và  $\omega$  - các hằng số liên quan đến vật liệu;  $V$  - khối lượng tương đối;  $E_0$  - nội năng của đơn vị thể tích;  $E_m$  - năng lượng bên trong vật liệu.

Trong bảng 2 thể hiện các tham số cho mô hình chất nổ TNT với các tham số như:  $\rho$  - khối lượng riêng;  $v_D$  - tốc độ phát nổ và  $P_{CJ}$  - áp suất Chapman-Jouget.

**Bảng 2. Tham số mô hình vật liệu TNT**

$\rho(\text{kg/m}^3)$	$v_D(\text{m/s})$	$P_{CJ}(\text{Pa})$	$A(\text{Pa})$	$B(\text{Pa})$
1600	9630	2.1xE10	3.738xE11	3.747xE9
$R_1$	$R_2$	$\omega$	$V$	$E_0(\text{J/m}^3)$
4.15	0.9	0.35	1.0	6.0xE9

**4. Kết quả và bàn luận**

**4.1 Ảnh hưởng kích thước chia lưới môi trường không khí**

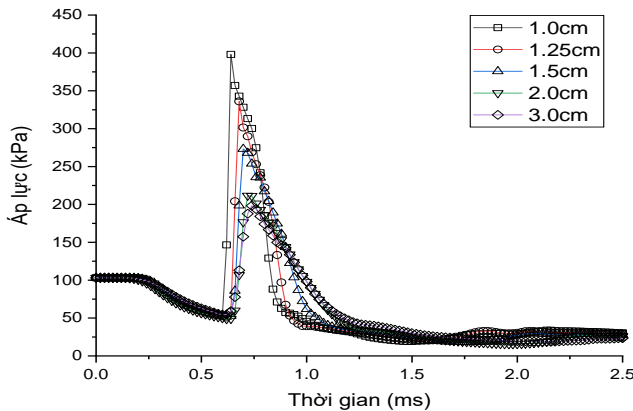
Trong mô phỏng số nói chung có nhiều cách xây dựng mô hình bài toán và chia lưới phần tử khác nhau để đem lại kết quả mô phỏng tốt nhất tiến gần đến kết quả thực nghiệm. Với các bài toán mô phỏng nổ thông thường kích thước lượng nổ so với môi trường xung quanh và kết cấu là rất nhỏ nên việc chia lưới có thể gặp khó khăn khi chia nhỏ lưới chia cho lượng nổ. Để khắc phục hạn chế này và làm giảm số lượng phần tử, sử dụng phương án chia lưới có vùng chuyển tiếp của môi trường bằng cách chia nhỏ lưới

khu vực môi trường gần lượng nổ và tỉ lệ lưới lớn dần khi ra xa lượng nổ.

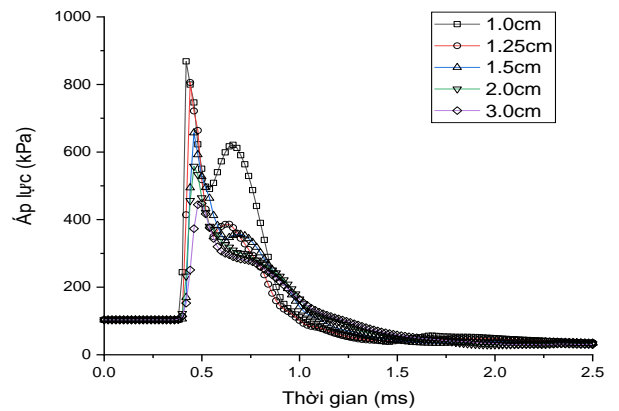
Để đánh giá ảnh hưởng của mật độ lưới chia đến kết quả mô phỏng trên LS-DYNA thực hiện mô phỏng các bài toán với thuốc nổ TNT lấy đối xứng 1/8 có kích thước 2.5x2.5x2.5cm được chia thành các phần tử khối lập phương 8 nút có kích thước cạnh 0.125cm. Kích thước lưới chia phần không khí được chia thành các phần tử khối lập phương 8 nút với các cạnh lần lượt bằng 1cm, 1.25cm, 1.5cm, 2cm và 3cm. Phần tiếp nối giữa mật độ chia lưới thuốc nổ TNT và không khí được chuyển tiếp bằng các phần tử khối 8 nút dạng chóp cụt có kích thước cạnh tăng dần. Các mô hình mô phỏng sử dụng hệ số TSSFAC

= 0.6 để so sánh. Chênh lệch áp lực đỉnh của các bài toán lưới chia lớn được đánh giá dựa trên so sánh với bài toán lưới chia nhỏ nhất 1cm (lấy bằng 0.4

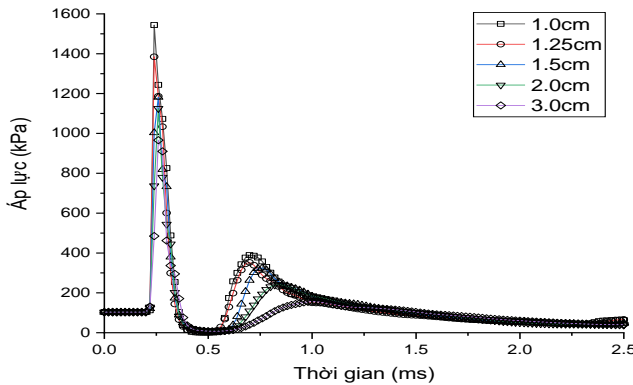
chiều dài cạnh lượng nổ TNT): (Lưới chia lớn - Lưới chia nhỏ nhất)/Lưới chia nhỏ nhất x 100%, kết quả khảo sát được thể hiện trong hình 5.



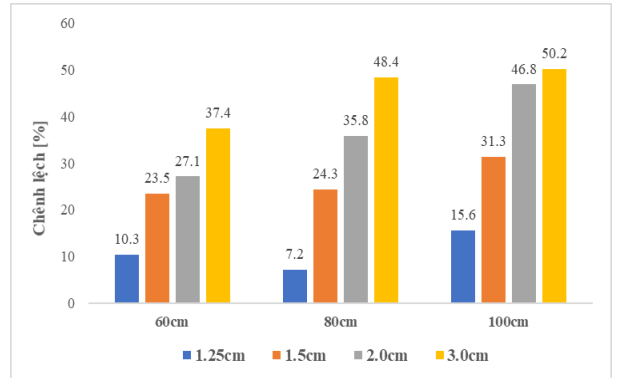
**Hình 2. Điểm khảo sát cách tâm nổ 100cm**



**Hình 3. Điểm khảo sát cách tâm nổ 80cm**



**Hình 4. Điểm khảo sát cách tâm nổ 60cm**



**Hình 5. Chênh lệch đỉnh áp lực so với lưới 1cm**

Kết quả mô phỏng số cho thấy tỉ lệ lưới chia ảnh hưởng lớn đến sự sai khác giữa các kết quả đỉnh áp lực đến 50.2% khi tăng kích thước lưới chia lên 3cm (1.2 lần chiều dài cạnh lượng nổ TNT). Từ kết quả khảo sát tỉ lệ chia lưới cho thấy tỉ lệ lưới chia ảnh hưởng lớn đến kết quả mô phỏng, với mô phỏng vụ nổ trong nghiên cứu cho thấy lưới chia 1cm (0.4 lần cạnh lượng nổ TNT) và 1.25cm (0.5 lần cạnh lượng nổ TNT) cho kết quả áp lực đỉnh ổn định cũng như chênh lệch không quá lớn (từ 7.2 đến 15.6%) nên trong nghiên cứu này đề xuất tỉ lệ chia lưới không vượt quá 0.5 lần chiều dài cạnh lượng nổ TNT.

**4.2 Ảnh hưởng yếu tố tỉ lệ bước thời gian**

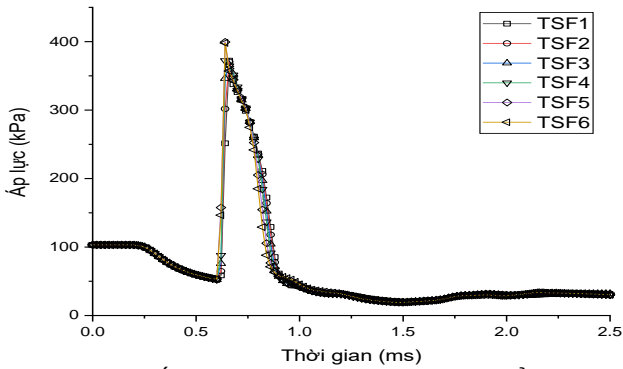
Bước thời gian bị ảnh hưởng bởi yếu tố tỉ lệ của nó (TSSFAC), được thể hiện trong biểu thức (17) [15]. Một hệ số tỉ lệ mặc định phổ biến được sử dụng để tính bước thời gian là 0.9. Tuy nhiên, hệ số tỉ lệ thường được hạ xuống 0.67 hoặc thấp hơn cho phân

tích bài toán nổ hoặc để tăng tính ổn định tính toán. Phân tích hệ số tỉ lệ bước thời gian sử dụng 6 mô hình với TSSFAC = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 và 0.6 (Tương ứng các mô hình TSF1, TSF2, TSF3, TSF4, TSF5 và TSF6) áp dụng vào mô hình lưới phần tử không khí 1cm. Áp lực nổ của từng mô hình được so sánh với TSF1 để xác định tham số yếu tố tỉ lệ bước thời gian phù hợp cho nghiên cứu này. Biểu thức (17) thể hiện yếu tố tỉ lệ TSSFAC ảnh hưởng đến bước thời gian trong mô phỏng của LS-DYNA [12].

$$\Delta t = TSSFAC (l_{mesh} / C_1) \tag{17}$$

trong đó: TSSFAC - tỉ lệ bước thời gian;  $l_{mesh}$  - mật độ lưới chia nhỏ nhất;  $C_1$  - chiều dài bước sóng.

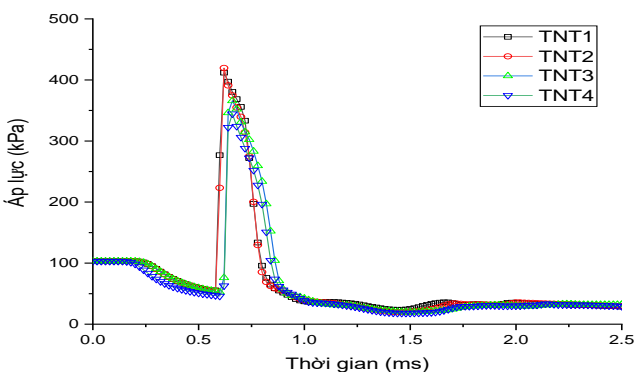
Chênh lệch áp lực đỉnh của các bài toán hệ số TSSFAC được đánh giá dựa trên so sánh với bài toán lưới có hệ số TSSFAC nhỏ nhất (0.1): (TSSFAC lớn - TSSFAC nhỏ nhất) / TSSFAC nhỏ nhất x 100%, kết quả khảo sát được thể hiện trong hình 7.



**Hình 6.** Áp lực sóng xung kích cách tâm nổ 1m

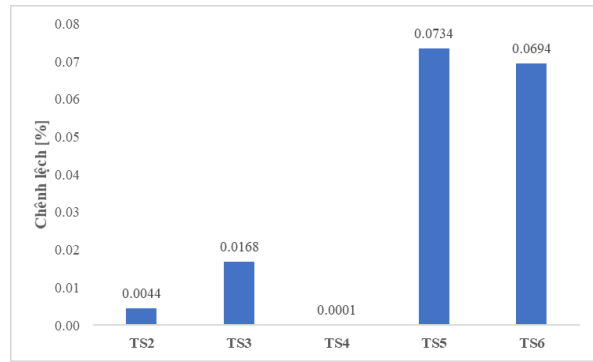
Từ kết quả khảo sát cho thấy các hệ số TSSFAC trong khoảng từ 0.1 đến 0.6 cho kết quả ổn định với bài toán mô phỏng tác động nổ của TNT. Tuy nhiên, khi hệ số TSSFAC nhỏ kéo theo thời gian tính tăng đáng kể từ 03 giờ 52 phút 18 giây cho trường hợp TSSFAC = 0.6 lên đến 20 giờ 23 phút 37 giây cho trường hợp TSSFAC = 0.1. Do đó, để đáp ứng yêu cầu về độ ổn định và giảm thời gian tính toán trong nghiên cứu này đề xuất hệ số TSSFAC = 0.3 cho bài toán so sánh với kết quả thực nghiệm.

**4.3 Ảnh hưởng của lưới chia lượng nổ TNT**



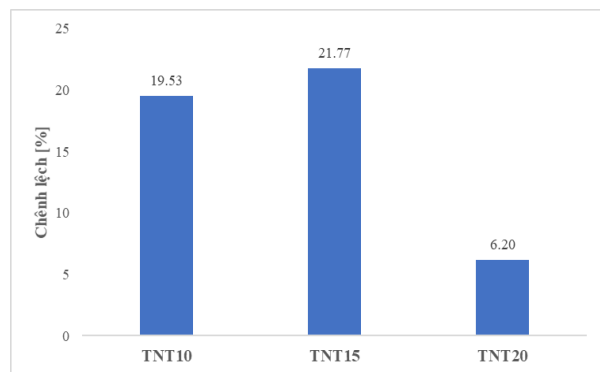
**Hình 8.** Áp lực sóng xung kích cách tâm nổ 1m

Từ kết quả khảo sát cho thấy tỉ lệ lưới chia lượng nổ TNT ở hai mức 1/20 và 1/25 cho chênh lệch kết quả áp lực có độ ổn định trong phạm vi có thể chấp nhận được (6.2%). Tuy nhiên, khi lưới chia TNT nhỏ cũng làm tăng đáng kể thời gian tính toán từ 3 giờ 42 phút 6 giây cho mô hình 1/10 (TNT1) lên đến 9 giờ 36 phút 38 giây cho mô hình 1/25 (TNT4) nên trong nghiên cứu này đề xuất sử dụng lưới chia lượng nổ TNT bằng 1/20 chiều dài cạnh lượng nổ.



**Hình 7.** Chênh lệch áp lực đỉnh

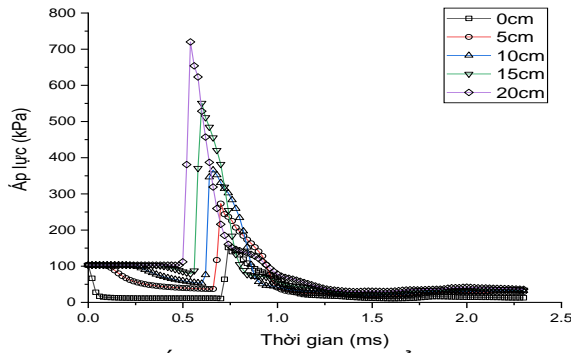
Nghiên cứu ảnh hưởng của lưới chia lượng nổ TNT đến kết quả mô phỏng tiến hành trên các mô hình có cùng kích thước lưới chia môi trường không khí 1cm, hệ số tỉ lệ bước thời gian TSSFAC = 0.3 với các lưới chia lượng nổ TNT bằng 1/10, 1/15, 1/20 và 1/25 cạnh lượng nổ (Tương ứng các mô hình TNT1, TNT2, TNT3 và TNT4). Áp lực đỉnh của từng mô hình được so sánh với TNT4, chênh lệch áp lực đỉnh của các bài toán lưới chia TNT được đánh giá dựa trên so sánh với bài toán lưới có lưới chia TNT nhỏ nhất (1mm): (Lưới chia TNT lớn - Lưới chia TNT nhỏ nhất)/ Lưới chia TNT nhỏ nhất x 100%, kết quả khảo sát được thể hiện trong hình 9.



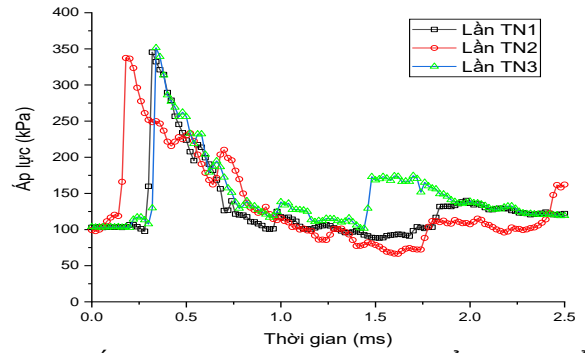
**Hình 9.** Chênh lệch áp lực đỉnh

**4.4 Ảnh hưởng bề rộng biên đến dạng của biểu đồ áp lực**

Để nghiên cứu ảnh hưởng của bề rộng biên đến dạng của biểu đồ áp lực tiến hành xuất áp lực mô phỏng trên bài toán TSF3 tại các vị trí bắt đầu từ điểm nằm trên biên hướng vào tâm lượng nổ với các khoảng cách mỗi điểm khảo sát cách nhau lần lượt 5cm (khoảng cách từ điểm khảo sát đến tâm nổ lần lượt là 110cm, 105cm, 100cm, 95cm và 90cm và cách biên tương ứng là 0cm, 5cm, 10cm, 15cm và 20cm).



Hình 10. Áp lực sóng xung kích điểm khảo sát



Hình 11. Áp lực sóng xung kích thử nghiệm nổ cách tâm nổ 100cm

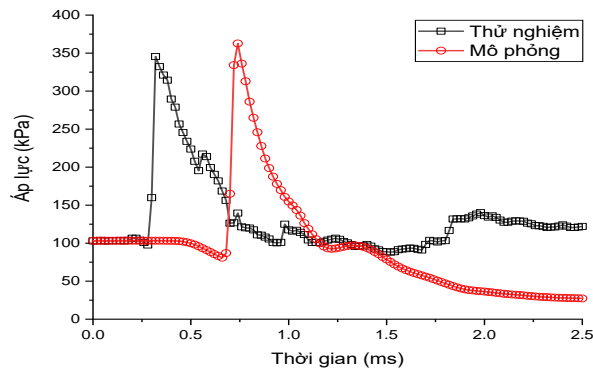
Từ kết quả khảo sát cho thấy các điểm khảo sát cách biên từ 15 đến 20 lần kích thước lưới chia của chiều dài cạnh phần tử không khí cho kết quả dạng của biểu đồ áp lực phù hợp với dạng biểu đồ áp lực đo được từ 03 vụ nổ thực nghiệm tại hiện trường. Do vậy, trong nghiên cứu này khuyến cáo sử dụng bề rộng biên tối thiểu bằng 15 lần chiều dài cạnh phần tử không khí.

#### 4.5 So sánh kết quả mô phỏng số với thử nghiệm nổ

Để đánh giá kết quả mô phỏng số tiến hành thử nghiệm nổ hiện trường 03 lần như mô tả trong mục 2.2, kết quả áp lực đỉnh sóng xung kích tại vị trí cách tâm nổ 100cm trung bình sau 03 lần thử là 345.45 kPa và sai khác với công thức thực nghiệm của Giáo

sư Xa-đốp-ki [16] (384.66 kPa) là 9.44%, cho thấy kết quả thử nghiệm nổ hiện trường đo được là phù hợp.

Từ các kết quả khảo sát ảnh hưởng của kích thước lưới phần tử môi trường không khí, hệ số tỉ lệ bước thời gian, kích thước lưới TNT, ảnh hưởng của bề rộng biên đến kết quả mô phỏng nổ và thời gian kết thúc tính toán, lựa chọn thông số cho bài toán mô phỏng: kích thước lưới chia lấy bằng 0.5 lần chiều dài cạnh lượng nổ TNT (1.25cm), hệ số tỉ lệ bước thời gian TSSFAC = 0.3, lưới chia lượng nổ TNT bằng 1/20 cạnh lượng nổ (1.25mm) và khoảng cách từ điểm khảo sát áp lực đến biên bằng 15 lần chiều dài phần tử lưới chia không khí (18.75cm). Kết quả áp lực đỉnh mô phỏng 362.64 kPa sai số so với thực nghiệm 4.98% và công thức thực nghiệm 5.72%.



Hình 12. Áp lực mô phỏng LS-DYNA và thực nghiệm nổ hiện trường

Mặc dù thực tế là các kết quả số và công thức thực nghiệm không hoàn toàn giống nhau do sự phức tạp của vụ nổ, các tham số của vật liệu và phương trình trạng thái thu được và tổng kết từ thử nghiệm không hoàn toàn nhất quán, kết quả từ mô phỏng về cơ bản phù hợp với thực tế thử nghiệm đo được. Do đó, có thể khẳng định rằng khi mật độ lưới phần tử xấp xỉ bằng 0.5 lần chiều dài cạnh bên của lượng nổ, hệ số tỉ lệ bước thời gian được đặt ở TSSFAC = 0.3, lưới chia lượng nổ bằng 1/20 cạnh

lượng nổ và bề rộng biên từ điểm khảo sát áp lực tối thiểu bằng 15 lần chiều dài phần tử cho phép một mô hình phân tích trên LS-DYNA đủ tin cậy để mô phỏng số của vụ nổ TNT trong môi trường không khí.

#### 5. Kết luận

Từ các kết quả thực nghiệm và phân tích mô phỏng trên mô hình số, rút ra một số kết luận:

- So sánh giá trị áp lực đỉnh tại vị trí khảo sát khi thay đổi mật độ lưới phần tử cho thấy, khi tăng mật

độ lưới phần tử thì giá trị áp lực đỉnh tại điểm khảo sát có xu hướng ổn định và tiến gần tới giá trị thực nghiệm (sai lệch ít nhất). Kết quả thử nghiệm số cũng cho thấy khi chiều dài cạnh lưới phần tử không vượt quá 0.5 lần chiều dài cạnh lượng nổ cho kết quả tốt hơn;

- Phân tích yếu tố tỉ lệ bước thời gian cho thấy ảnh hưởng của bước thời gian là khá nhỏ. Khi thay đổi bước thời gian kết quả nhận được chỉ sai khác nhau khoảng 0.01% và các đường cong phân bố áp lực vụ nổ với các hệ số tỷ lệ khác nhau trong biểu đồ phân bố áp lực vụ nổ gần như trùng lặp với nhau. Xem xét thời gian tính toán và độ ổn định, TSSFAC = 0.3 được khuyến nghị làm hệ số áp dụng cho các nghiên cứu tiếp theo;

- Qua các thử nghiệm số đã khảo sát ở trên cho thấy trường hợp lưới chia lượng nổ bằng 1/20 chiều dài cạnh lượng nổ cho kết quả áp lực đỉnh tiến gần tới giá trị ổn định và kết quả mô phỏng cho giá trị áp lực đỉnh phù hợp với kết quả thực nghiệm nổ hiện trường;

- Đối với bề rộng biên của mô hình tính từ điểm khảo sát áp lực khi lấy tối thiểu bằng 15 lần chiều dài cạnh phần tử không khí cho kết quả dạng của biểu đồ áp lực phù hợp với kết quả thực nghiệm hiện trường đo được.

Những kết quả trên là một số gợi ý như một tài liệu tham khảo cho các nghiên cứu tiếp sau về việc thiết kế mô hình số để mô phỏng tác động của vụ nổ trong không khí.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Gebbeken N., Ruppert M (1999). "On the safety and reliability of high dynamic hydrocode simulations". *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 46, p. 839-851.
2. Mackerle J (1996). "Structural response to impact, blast and shock loadings A FE/BE bibliography (1993-1995)". *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 24, p. 95-110.
3. Stein L. R., Gentry R. A., Hirt C. W (1977). "Computational simulation of transient blast loading on threedimensional structures". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 11, p. 57-74.
4. Urgessa G. S., Arciszewski T (2011). "Blast response comparison of multiple steel frame connections". *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 47, p. 668-675.
5. Jialing L (1999). "Numerical simulation of shock (blast) wave interaction with bodies". *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 4, p. 1-7.
6. Nath G., Vishwakarma J. P (2014). "Similarity solution for the flow behind a shock wave in a non-ideal gas with heat conduction and radiation heat-flux in magnetogasdynamics". *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, Vol. 19, p. 1347-1365.
7. Wang, I.T (2014). "Numerical and experimental verification of finite element mesh convergence under explosion loading". *J. Vibroeng*, 16, 1786–1798.
8. Benson D. J (1990). "Computational methods in lagrangian and eulerian hydrocodes". *Dept. of AMES R-011 University of California, San Diego La Jolla, CA 92093*.
9. Jean Donea (1983). "Arbitrary Lagrangian–Eulerian finite element methods". in: *T. Belytschko, T.J.R. Hughes (Eds.), Computational Methods for Transient Analysis, North Holland, pp. 474–516, chapter 10*.
10. Puso M. A., Sanders J., Settgast R., Liu B (2012). "An embedded mesh method in a multiple material ALE". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 245-246, p. 273-289.
11. Wang Y. T., Zhang J. Z (2011). "An improved ALE and CBS-based finite element algorithm for analyzing flows around forced oscillating bodies". *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 47, p. 1058-1065.
12. LS-DYNA (2019). Theory Manual. *Livermore Software Technology Corporation*.
13. Bathe Klaus (1996). Finite element procedures. *Englewood Cliffs, N. J., Prentice Hall*.
14. Dobratz B. M (1981). LLNL Explosive Handbook Properties of Chemical Explosives and Explosive Simulants. *Lawrence Livermore National Laboratory*.
15. LS-DYNA (2020). Version 971 User's Manual. *Livermore Software Technology Corporation*.
16. Nguyễn Trí Tá, Vũ Đình Lợi, Đặng Văn Đích (2008). Giáo trình công sự tập I. *Học viện Kỹ thuật Quân sự*.

**Ngày nhận bài:** 22/9/2020.

**Ngày nhận bài sửa lần cuối:** 22/10/2020.

Research on the effect of mesh size in finite element analysis on convergence through cross-reference to the experimental results of explosions in the air