# Nghiên cứu sự suy giảm sóng ứng suất nổ khi lan truyền trong môi trường đá vôi

Research on the attenuation of blasting stress wave while propagation in limestone

> PGS.TS ĐÀM TRỌNG THẮNG<sup>1</sup>, TS NGÔ NGỌC THUỶ<sup>1</sup>, THS NGÔ THẾ ĐỨC<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GV Viện KT Công trình đặc biệt, Học viện Kỹ thuật Quân sự

Email: thangdt@lgdtu.edu.vn; ngocthuy.ngo@lqdtu.edu.vn

<sup>2</sup>HV NCS Ngành XDCT Quốc phòng, Học viện Kỹ thuật Quân sự; Email: ducnt1988@lqdtu.edu.vn

# TÓM TẮT

Khi nổ trong môi trường đá, dưới tác dụng đột ngột của áp lực sản phẩm nổ lên thành buồng mìn đã làm hình thành sóng ứng suất lan truyền trong môi trường đá. Quá trình lan truyền sóng ứng suất trong khối đá phụ thuộc nhiều yếu tố như đặc tính lượng nổ, đặc tính đất đá và điều kiên nổ. Càng ra xa tâm nổ cường độ sóng ứng suất giảm dần. Mức độ suy qiảm này phụ thuộc vào đặc tính từng loại đá, điều kiện địa chất và các điều kiện nổ. Đến nay chưa có một công trình nghiên cứu toàn diện về quá trình lan truyền sóng ứng suất nổ trong đá vôi. Chính vì vậy bài báo đã sử dụng phương pháp giải tích kết hợp với việc xây dựng mô hình mô phỏng quá trình lan truyền của sóng ứng suất trong môi trường đá vôi khi nổ lượng nổ dài trên phần mềm Abagus. Kết quả nghiên cứu bước đầu rút ra được mức độ suy giảm của cường độ sóng ứng suất theo bán kính tính từ tâm nổ theo qui luật hàm mũ với hệ số suy qiảm nằm trong phạm vi nghiên tổng kết thực nghiệm của các loại đá. Còn trị số tốc độ lan truyền của sóng ứng suất trong vùng xa tâm nổ cũng phù hợp với số liệu thực nghiệm trong đá vôi của các công trình đã côna bố.

Từ khoá: Nổ mìn; sóng ứng suất nổ; sóng nổ; nổ phá đá; mô phỏng nổ.

# ABSTRACT

When blasting in rock, the explosive product generates pressure that acts suddenly on the surrounding bore hole, creating a stress wave that propagates in the rock environment. The propagation of the stress wave in the rock mass depends on various factors such as explosive quantity characteristics, rock properties, and blasting conditions. As the distance from the explosion center increases, the intensity of the stress wave gradually decreases. The extent of this decrease depends on the properties of each type of rock, geological conditions, and blasting conditions. Until now, there has not been a comprehensive study on the blasting stress wave propagation process in limestone rock. Therefore, this paper employs an analytical method combined with the simulation model for the propagation process of stress waves in a limestone rock environment during prolonged explosive detonation using the Abagus software. The preliminary research results reveal the decreasing magnitude of stress wave intensity as a function of radial distance from the explosion center, following an exponential decay law with a decay coefficient falling within the range summarized from experimental studies of various rock types. Furthermore, the propagation velocity values of the stress wave in the far-field from the explosion center also align well with experimental data from published works on limestone rock

**Keyword:** Blasting; blasting stress wave; detonation wave; blasting in rock; explosion simulation.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Khoan nổ mìn phá hủy đất là một kỹ thuật phổ biến hiện nay trong thi công bóc đất đá cũng như khoáng sản rắn. Để ứng dụng hiệu quả kỹ thuật này, cần phải nghiên cứu giải quyết hàng loạt các vấn đề về khoa học, kỹ thuật và công nghệ, trong đó việc nghiên cứu quy luật phá hủy đất đá từ tâm lượng nổ ra xung quanh là một nội dung nghiên cứu cơ bản và được chia làm hai hướng:

 Hướng 1 cho rằng quá trình phá hủy đất đá là do năng lượng nổ. Khi đó để xác định được quy luật phá hủy đất đá, cần nghiên cứu quy luật phân bố năng lượng nổ xung quanh lượng nổ. Điển hình hướng nghiên cứu này có với lý thuyết thủy động lực học nổ của O.E Vlaxov [1] [2]. Việc nghiên cứu phát triển ứng dụng lý thuyết của O.E Vlaxov để nghiên cứu quy luật phá hủy đất đá xung quanh lượng nổ dài được thực hiện trong các công trình nghiên cứu của Lê Văn Trung [3], Đàm Trọng Thắng, Nguyễn Trí Tá, Vũ Xuân Bảng [4]... Hạn chế của hướng nghiên cứu này chưa giải thích được quá trình hình thành xuất hiện các vết nứt xung quanh lỗ mìn.

- Hướng 2 cho rằng phá hủy đất đá là do sóng ứng suất. Khi đó

để xác đinh được quy luật phá hủy đất đá, cần nghiên cứu quá trình hình thành và lan truyền sóng ứng suất xung quanh lỗ mìn trong môi trường đất đá. Hướng nghiên cứu này đã khắc phục hạn chế của hướng 1 và đã đưa ra cơ sở khoa học để giải thích quá trình hình thành các vết nứt cũng như để xác đinh bán kính các vùng tác dung nổ như vùng nén, vùng phá rời, vùng nứt nẻ và vùng chấn đông. Nghiên cứu này cho đến nay vẫn có nhiều quan điểm tiếp cận khác nhau. Tuy nhiên hầu hết các tác giả đều đồng tình với quan điểm của A. N. Khanukaev cho rằng cơ chế phá hủy đất đá không giống nhau đối với các loại đá khác nhau, trong một mức đô đáng kể, quá trình đó phu thuộc vào đô cứng truyền âm của chúng. Đất đá có độ cứng truyền âm nhỏ, sự phá hủy đất đá nhóm này là do áp lực nổ (gọi là nhóm 1). Đất đá có độ cứng truyền âm trung bình, sư phá hủy đá của nhóm này là do tác động của sóng ứng suất và do áp suất sản phẩm nổ (gọi là nhóm 2). Còn đất đá có đô cứng âm học lớn, sự phá hủy đất đá là do sóng ứng suất (gọi là nhóm 3). [1] [2] Đồng ý theo quan điểm phá đá bằng sóng ứng suất có nhà khoa học Nhật Bản Kumao Hino, các nhà khoa học Anh như Khoks, Pak, Evans, Dzeims, các nhà khoa học Nga như E.O Mindel, N.V Mennhikov, G.I Pokroski, B.N Kutuzov, ở Việt Nam có các tác giả Nhữ Văn Bách, Đàm Trọng Thắng ....

Việc nghiên cứu quá trình lan truyền và suy giảm sóng ứng suất xung quanh lỗ mìn hình trụ trong môi trường đất đá, chủ yếu được nghiên cứu trên các mô hình giải tích và mô hình thực nghiệm nổ trên mô hình thu nhỏ và nổ thí nghiệm trên thực tế [5]. Các mô hình giải tích đến nay tương đối hoàn thiện, tuy nhiên các kết quả nghiên cứu thực nghiệm vẫn còn khiêm tốn trong một số điều kiện cụ thể. Đặc biệt sự hạn chế về việc đo đạc cường độ sóng ứng suất trong các vùng gần lượng nổ, vùng phá hủy. Vì vậy cho đến nay chưa có một bộ hệ số thực nghiệm đặc trưng cho sự suy giảm sóng ứng suất theo khoảng cách của lượng nổ dài đầy đủ cho các loại đất đá.

Chính vì các lý do trên, việc nghiên cứu quá trình lan truyền và suy giảm sóng ứng suất trên mô hình mô phỏng trên máy tính là một hướng nghiên cứu hợp lý, có tính cấp thiết. Kết quả nghiên cứu cho phép dự báo chi tiết về sự biến đổi, đặc tính cường độ sóng ứng suất theo thời gian và không gian, làm cơ sở cho việc rút ra các hệ số đặc trưng cho sự giảm cường độ sóng ứng suất theo khoảng cách trong loại đá nghiên cứu và điều khiển quá trình phá hủy đất đá.

#### 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT CỦA QUÁ TRÌNH LAN TRUYỀN SÓNG ỨNG SUẤT

Theo thuyết phá đá bằng sóng ứng suất, cường độ sóng ứng suất giảm dần khi ra xa tâm nổ. Giá trị ứng suất nén pháp tuyến trong sóng tới tại một toạ độ trong không gian phụ thuộc vào khoảng cách đến tâm nổ, hàm áp lực nổ trong lỗ khoan và đặc trưng của đất đá có dạng [5]:

$$\sigma_1(\overline{r},t) = \frac{1}{(\overline{r}-1)^{\beta}} p(t); \quad \frac{(\overline{r}-1).r_0}{c} \le t \le \frac{(\overline{r}-1).r_0}{c} + \theta \tag{1}$$

trong đói  $\Vec{r}$  - khoảng cách tương đối tương đối từ điểm nghiên cứu đến tâm nổ,  $\Vec{r} \ge 1$ ;

c - tốc độ lan truyền của sóng ứng suất nổ trong môi trường đá, m/s;

 $\theta$  - thời gian tồn tại pha dương của hàm áp lực nổ, s;

p(t) - áp lực nổ theo thời gian tại thành lỗ khoan, Pa;

r: khoảng cách từ trục lượng nổ đến điểm nghiên cứu, m; r₀: bán kính lượng nổ, m;

β: hệ số suy giảm sóng ứng suất theo khoảng cách, phụ thuộc vào đặc tính tự nhiên môi trường đất đá, theo Phenonov  $β = 1 \div 3$  [5].

Áp lực nổ trong lỗ khoan là một thông số phức phụ thuộc rất nhiều yếu tố như các đặc tính của bua, thuốc nổ, kết cấu lượng nổ, đất đá... Có nhiều công trình nghiên cứu về áp lực nổ lên thành lỗ mìn của các tác giả như T.M Xalamakhin, O.E Vlaxov, F.A Baum Tuy nhiên trong thực tế để đơn giản thông thường có thể sử dụng công thức thực nghiệm của giáo sư Protodiaknov làm cơ sở cho các tính toán [5]

$$p(t) = p_0 e^{-\alpha t} \tag{2}$$

Trong đó:  $p_0$  - áp lực tối đa ban đầu của sản phẩm nổ,  $\rho_z D^2$ 

$$p_0 = \frac{p_T b}{2(k+1)}$$

 $\rho_T$  - mật độ thuốc nổ, kg/m<sup>3</sup>;

D - tốc độ nổ, m/s;

k - chỉ số đa biến, đối với sản phẩm nổ theo Lanđao k=3;

t - thời điểm khảo sát sau khi kích nổ, s;

α - hệ số đặc trưng cho sự suy giảm của hàm áp lực nổ trong buồng mìn, phụ thuộc vào đặc tính bua, lượng nổ, đất đá.



Hình 1. Biểu đồ áp lực sóng nén tại một phần tử đất đá

Từ giả thuyết coi đất đá là môi trường liên tục đồng nhất, đẳng hướng nên có thể xem rằng tốc độ lan truyền của sóng ứng suất trong môi trường đàn hồi là không đổi và bằng tốc độ lan truyền của sóng dọc trong môi trường đất đá (c) có dạng: [6]

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$
(3)

Trong đó: E: mô đun đàn hồi của vật liệu môi trường; ρ: mật độ môi trường;

Phân tích quy luật (1) chỉ ra rằng, cường độ sóng ứng suất phụ thuộc vào tốc độ lan truyền sóng ứng suất trong đất đá, quy luật hàm áp lực nổ trong lỗ mìn, thời gian và giảm dần theo khoảng cách từ lỗ mìn đến điểm khảo sát. Mức độ suy giảm ứng suất theo khoảng cách phụ thuộc vào đặc tính của đất đá. Đất đá trong tự nhiên được đặc trưng bởi rất nhiều các chỉ tiêu cơ lý và đặc tính tự nhiên như nứt nẻ, lỗ rỗng, nước ngầm... Hệ số suy giảm sóng ứng suất đối với mỗi loại đất đá là khác nhau. Để xác định hệ số này phải dựa vào các thí nghiệm phức tạp trên mỗi loại đất đá. Ngày nay, khoa học máy tính phát triển, có nhiều chương trình mô phỏng và tính toán các tham số nổ mìn như LS-DYNA, ANSYS AUTODIN...Việc ứng dụng công cụ máy tính trong việc xác định hệ số suy giảm sóng ứng suất theo khoảng cách giúp giảm được khối lượng thí nghiệm, tiết kiệm thời gian, chi phí, nâng cao hiệu quả kinh tế trong việc khảo sát các tham số của mỗi loại đất đá.

Chính vì vậy ứng dụng mô phỏng số trong việc xác định quy luật phân bố cường độ sóng ứng suất theo khoảng cách, hệ số suy giảm ứng suất khi nổ mìn và tốc độ lan truyền sóng nổ trong môi trường đất đá có tính cấp thiết, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn sâu sắc. Bài báo tập trung khai thác phần mềm ABAQUS, và sử dụng các tính toán thống kê để xác định hệ số suy giảm sóng ứng suất lan truyền trong đá vôi khi nổ lượng nổ dài hình trụ.

# 3. XÂY DƯNG MÔ HÌNH THỬ NGHIÊM SỐ MÔ PHỎNG SƯ LAN TRUYỀN SÓNG ỨNG SUẤT

# 3.1. Lưa chon phần mềm mô phỏng

Phần mềm ABAQUS được tích hợp để mổ phỏng các vụ nổ trong các môi trường khác nhau. Có có thể phân tích ứng xử động học phi tuyến của các kết cấu, thuật toán Lagrange được áp dụng khi phân tích các loại chất rắn, trong khi đó thuật toán Lagrange-Euler phù hợp khi phân tích các bài toán về dòng chảy của chất lỏng và chất khí. Phương pháp này cũng thích hợp để phân tích sự lan truyền sóng ứng suất trong môi trường đất đá khác nhau.

#### 3.2. Lưa chon môi trường nghiên cứu, mô hình vật liệu

\* Lưa chon môi trường nghiên cứu tác đông nổ: Quá trình nổ có thể xảy ra ở rất nhiều môi trường khác nhau. Tuy nhiên, ở nước ta đá vôi là môt loai vật liêu phổ biến trong xây dựng. Chính vì vậy bài báo này lưa chon vật liệu nghiên cứu là đá vôi với các đặc tính sau [7]:

Mô đun đàn hồi E=27,54 GPa; Mât đô môi trường p=2300 kg/m<sup>3</sup>; Hê số Poát xông v=0,26

\* Mô hình hoá vật liệu đá vôi

Vật liệu đá vôi được khai báo theo mô hình vật liệu của Holmquist, Johnson and Cook (HJC) (1993) đã được phát triển cho tính toán phá huỷ các vật liệu giòn như đá, bê tông... chịu áp lực cao, biến dạng lớn [8] [9]

Mô hình HJC bao gồm phương trình quan hê giữa cường đô ứng suất với tốc độ biến dạng, phương trình trạng thái nén tĩnh phi tuyến và phương trình phát triển phá huỷ với biến dạng dẻo [8] [9] [7] [10].



Hình 2. Mô hình HJC

a- Quan hệ giữa cường độ và tốc độ biến dạng; b- Sự tích lũy biến dạng và phá hủy

 Phương trình quan hệ giữa cường độ ứng suất và tốc độ biến dang

Quan hê giữa cường đô và tốc đô biến dang của vât liêu được biểu thị qua phương trình:

 $\sigma^* = \left\lceil A(1-D) + BP^{*N} \right\rceil (1+C\ln\dot{\varepsilon}^*)$ 

Trong đó:  $\sigma^*$ : ứng suất tương đương được chuẩn hoá  $\sigma^* = (\sigma_1 - \sigma_3)/f_c$ 

 $f_c$ : cường đô chiu nén

P<sup>\*</sup>: ap lưc được chuẩn hoá  $P^* = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3f_c$ ;

 $\dot{\varepsilon}^*$  tốc độ biến dạng không thứ nguyên  $\dot{\varepsilon}^* = \varepsilon^* / \varepsilon_0^*$ 

 $\varepsilon^*$ : tốc đô biến dang thực

 $\varepsilon_0^*$ : tốc độ biến dạng tham chiếu  $\varepsilon_0^* = 1.0 \, s^{-1}$ 

T<sup>\*</sup>: cường độ chịu kéo được chuẩn hoá  $T^* = T/f_c$ 

T: cường độ chịu kéo

S<sub>max</sub>: cường đô lớn nhất được chuẩn hoá mà đất đá có thể chiu đựng được

A, B và N lần lượt là các hằng số vật liệu đại diện cho cường độ

dính chuẩn hóa, hệ số cứng áp suất chuẩn hóa và số mũ cứng áp suất.

C: hệ số tốc độ biến dạng

D: phá huỷ tích luỹ  $(0 \le D \le 1)$ 

#### - Phương trình phá huỷ

Hình 2.b cho thấy sư phá huỷ của mô hình HJC được tích luỹ từ biến dang dẻo tương đượng và biến dang dẻo thể tích, và được xác đinh theo công thức

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f}$$
(5)

trong đó:  $\Delta \mathcal{E}_p$  và  $\Delta \mu_p$  lần lượt là số gia biến dạng dẻo có hiệu và biến dang dẻo thể tích.

 $\mathcal{E}_{p}^{f} + \mu_{p}^{f}$ : Tổng biến dạng dẻo dưới tác dụng tải trọng tĩnh cho đến khi nứt, được tính bằng công thức

$$\mathcal{E}_{p}^{f} + \mu_{p}^{f} = D_{1} \left( P^{*} + T^{*} \right)^{D_{2}} \ge e_{f \min}$$
 (6)

efmin: hằng số vật liêu được dùng để triệt tiêu nứt nẻ do các sóng kéo gây ra

D1 và D2: các hằng số phá huỷ

Phương trình trang thái nén tĩnh

Phản ứng nén tĩnh được điểu chỉnh bằng phương trình trạng thái và chia thành 3 giai đoan như hình 3.



Hình 3. Trang thái nén tĩnh của vật liêu theo mô hình HJC

Giai đoạn 1 là đàn hồi tuyến tính từ ngưỡng áp lực âm T(1-D) tới giới han đàn hồi

$$P = K\mu \, \mathrm{khi} \, P < P_{crush} \tag{7}$$

trong đó:  $\mu$ : biến dạng thể tích tiêu chuẩn  $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1;$ 

 $\rho_0$  và  $\rho$  mật đô ban đầu và mật đô hiện tại

*K*: Mô đun đàn hồi khối của vật liệu  $K = \frac{P_{crush}}{\mu_{crush}}$  $\mu_{crush}$ : Biến dạng thể tích tại giới hạn đàn hồi P<sub>crush</sub>

Giai đoan 2: còn gọi là giai đoan chảy dẻo trong giai đoan này các lỗ rỗng không khí dần bị nén ra khỏi bê tông và các phá huỷ đuọc tạo ra do biến dạng dẻo thể tích cho đến khi khi đạt đến điểm ( $\mu_{lock}, P_{lock}$ )

$$P = P_{crush} + K_{lock} (\mu - \mu_{crush})$$
(8)

Trong đó  $K_{lock} = (P_{lock} - P_{crush})(\mu_{plock} - \mu_{crush})$  hệ số góc;

 $\mu_{\it plock}$  biến dạng thể tích tại áp lực nén  $P_{\it lock}$ 

 $\mu_{lock}$ : biến dạng thể tích ở trạng thái nén chặt

$$\mu_{lock} = \frac{\rho_{grain}}{\rho_0} - 1$$

 $ho_{\rm arain}$ : mật độ vật liệu ở trạng thái nén chặt không còn lỗ rỗng Giai đoạn 3: giai đoạn nén chặt: khi tất cả lỗ rỗng không khí đã thoát hết ra khỏi bê tông. Được coi như là hoàn toán đàn hồi phi tuyến. mối quan hệ giữa áp lực và biến dang được biểu thi qua công thức

$$P = K_1 \overline{\mu} + K_2 \overline{\mu}^2 + K_3 \overline{\mu}^3 \tag{9}$$

trong đó:  $\overline{\mu} = \frac{(\mu - \mu_{lock})}{(1 + \mu_{lock})}$  là biến dạng thể tích hiệu chỉnh,

K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>: các hằng số vật liệu

Nghiên cứu mô phỏng được thực hiện trên đá vôi (LIMESTONE). Các tham số của môi trường được lấy theo nghiên cứu của Wang cùng công sư 2019 [7] Trình bày trong bảng 1 Rảng 1. Tham số của đá vội theo mô hình nhá huỷ HIC [7]

Thông số	Giá trị	Thông số	Giá Thông số		Giá trị
			trị		
ρ <sub>o</sub> (kg.m <sup>-3</sup> )	2300	$\mathcal{E}_0^{\bullet}$	1.0	K₁ (GPa)	39
G (GPa)	10,093	T (MPa)	4	<i>K</i> <sub>2</sub> (GPa)	-223
Ν	0.89	<b>D</b> 1	0.04	<i>K</i> ₃ (GPa)	550
А	0.55	D2	1	$\mu_{crush}$	0.00125
В	1.23	P <sub>crush</sub> (MPa)	20	$\mu_{lock}$	0.174
С	0.0097	Plock (GPa)	2		
S <sub>max</sub>	20	<b>e</b> fmin	0.01		

Bảng 2: Các tham số của thuốc nổ theo phươna trình trana thái JWL [19] Thông số Giá tri

#### \* Thiết lập mô hình thử nghiêm số

Mô hình thử nghiệm số được thực hiện với lượng nổ dài có kích thước 10x10x80cm trong môi trường đá vôi. Theo khuyến cáo để thoả mãn điều kiên nổ ngầm phục vụ việc nghiên cứu lan truyền sóng ứng suất nổ, kích thước mẫu đá cần có kích thước tối thiểu gấp 100 lần bán kính lượng nổ [3]. Vì vậy mô hình khối đá được thiết lập với kích thước 10x10x10m.



Hình 4. Mô hình thử nghiêm số

1, 2, 3, 4- Các điểm đo tại khu vực gần tâm nổ (vùng nén ép) 5, 6, ..., 11- các điểm đo ở khu vực xa tâm nổ (vùng đàn hồi)

## 4. KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM SỐ

Quá trình hình thành và lan truyền sóng ứng suất được phản ánh trong hình 6.



Hình 5. Hình ảnh lan truyền sóng ứng suất tại các thời điểm

Kết quả thử nghiêm số về áp lực sản phẩm nổ, cường đô sóng

#### \* Mô hình hoá vật liệu nổ

Trong tính toán mô phỏng số để xác đinh được áp lực do sản phẩm nổ tác dụng lên đất đá, các nhà nghiên cứu sử dụng phương trình trạng thái để biểu thị mối quan hệ giữa năng lượng, áp lực và mât đô của sản phẩm nổ. Có nhiều tác giả xây dựng các dang phương trình trạng thái khác nhau như Becker-Kistiakowsky-Wilson (BKW) EOS, Mie-Gruneisen EOS, Tillotson EOS. [11] [12] [13]. Phương trính trang thái Jones-Wilkins-Lee (JWL equation of state) được sử dụng phổ biến và rộng rãi vì tính đơn giản của nó và đã được nhiều nhà nghiên cứu sử dụng trong các công trính nghiên của của mình. [14] [15] [10] [7] [16]

Áp lực tác dụng lên môi trường do sản phẩm nổ gây ra được tính toán theo phương trình trạng thái "Jones-Wilkins-Lee" (JWL equation of state) được biểu thị theo phương trình sau [17]

$$p = A_1 \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 \upsilon} + B_1 \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 \upsilon} + \frac{\omega E_0}{V}$$

Trong đó: p: Áp lực của sản phẩm nổ tác động lên mội trường V: Thể tích tương đối của sản phẩm nổ;

A1, B1, R1, R2, và ω là các tham số đặc tính của thuốc nổ, các tham số này thu được khi thí nghiêm dãn nở sản phẩm nổ trong các điều kiện kiểm soát được. [18] Giá trị của các tham số này được lấy theo nghiên cứu của Bibiana Luccioni và công sư 2019 [19] và được trình bày trong bảng 2

•••		ine thee phaleing	anni a șing aran	=[]				
	A1	B1	<i>R</i> <sub>1</sub>	R2	Е	ω	$V_d$	ρ
	(MPa)	(MPa)			(kJ/m³)		(m/s)	(kg/m³)
	3,73.105	3,74.10 <sup>3</sup>	4,15	0,9	6,06.10 <sup>6</sup>	0,35	6930	1650

ứng suất tại các thời điểm khảo sát khác nhau được phản ánh trong bảng 3, hình 6 và hình 7







Hình 7. Biểu đồ áp lực sóng theo thời gian tai các điểm đo trong đá vôi Mặc dù áp lực của sản phẩm nổ tác dụng lên thành buồng mìn là rất lớn nhưng do giới hạn bền của đất đá nhỏ hơn rất nhiều so

với áp lực của sản phẩm nổ nên vật liệu nhanh chóng bị phá huỷ và ứng suất trong phẩn tử đất đá không tồn tại, khi quan sát trên biểu đồ ta thấy ứng suất giảm đột ngột về giá trị bằng 0

Điểm đo	Thời điểm	Thời điểm đạt	Thời điểm	∆t tăng áp	∆t giảm áp	Áp lực đỉnh sóng	Tốc độ lan truyền
r (m)	sóng tới	đỉnh	p=0				sóng (c)
0.05	1.0176e-5	3.0025e-5	-	1.9849e-5	-	2724540000	-
0.15	1.9216e-5	5.0299e-5	8.559e-5	3.1083e-5	3.5291e-5	950352000	11061.95
0.25	3.4726e-5	8.0391e-5	1.1533e-4	4.5665e-5	3.4939e-5	791313000	8146.64
0.35	5.5854e-5	1.0693e-4	1.452e-4	5.1076e-5	3.827e-5	584546000	6567.732
0.842	0.000146	0.000287	0.000409	0.000141	0.000122	317151000	5767.123
1.238	0.000235	0.000375	0.000510	0.000140	0.000135	202213000	5268.085
1.832	0.000372	0.000527	0.000670	0.000155	0.000143	114550000	4924.731
2.426	0.000501	0.000661	0.000817	0.000160	0.000156	76202600	4842.315
3.218	0.000685	0.000854	0.001011	0.000169	0.000157	51576600	4697.81
4.01	0.000866	0.001039	0.001199	0.000173	0.000160	38481700	4630.485
4.406	0.000943	0.001121	0.001283	0.000178	0.000162	31944700	4672.322

Bảng 3: Các tham số của sóng ứng suất tại các vị trí

Từ biểu đồ trong hình 7 và các giá trị trong bảng 3 ta nhận nhấy khi càng ra xa tâm nổ giá trị lớn nhất của sóng ứng suất giảm dần nhưng thời gian tồn tại hàm áp lực nổ ( $\theta$ ) tăng lên. Bện cạnh đó, thời gian kể từ khi phận tử đất đá nhận được sóng ứng suất đến khi đạt giá trị lớn nhất cũng tăng lên khi khoảng cách đến tâm nổ tăng lên.

# 5. PHÂN TÍCH KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM SỐ

Từ các kết quả trong hình 8 và bảng 3 ta thu được các giá trị áp lực sóng ứng suất lớn nhất và thời gian tồn tại của hàm áp lực sóng ứng suất tại các vị trí và quy luật thay đổi như trong hình 9 và hình 10. Sử dụng chương trình tính Graph.exe bằng phương pháp bình phương tối thiểu ta thu được qui luật phân bố cường độ ứng suất cực đại theo khoảng cách (11),

$$P_{\max}(r) = 1,68.10^{10}.\overline{r}^{-1.39} = 1,68.10^{10}.\left(\frac{r}{r_0}\right)^{-1.39}$$
(11)

Từ công thức 11 ta thấy, áp lực lên phần tử đất đá bên thành buồng mìn (khi r=r<sub>0</sub>) có giá trị P<sub>0</sub>=1,68.10<sup>4</sup> Mpa. so sánh với giá trị thu được từ mô phỏng P<sub>0</sub>=1,524.10<sup>4</sup> Mpa, sai số giữa 2 phương pháp khoảng 9,3%

Số mũ -1,39 chính là hệ số suy giảm cường độ sóng ứng suất theo khoảng cách khi lan truyền trong môi trường







Hình 9. Thời gian duy trì áp lực sóng ứng suất (pha dương) khi lan truyền trong đất đá

Càng ra xa tâm nổ, thời gian duy trì hàm áp lực sóng nổ cũng tăng lên theo khoảng cách. Trong pham vi r<20r<sub>0</sub> thời gian duy trì của hàm áp lực sóng nổ tăng khá nhanh theo khoảng cách r. Tuy nhiên sau đó tốc độ tăng giảm dần và ở ngoài khoảng cách 50r<sub>0</sub> tốc đô tăng gần như không đáng kể (Hình 10)



Hình 11. Sự thay đổi vận tốc lan truyền sóng theo khoảng cách

Cùng với sự thay đổi thời gian duy trì áp lực sóng ứng suất, vận tốc lan truyền của sóng ứng suất cũng thay đổi theo khoảng cách. Từ bảng 3 và biều đồ trong hình 11 cho ta thấy vận tốc lan truyền sóng ứng suất nổ trong đá vôi gần khu vực tâm nổ cao hơn nhiều so với các khu vực ở xa. Sóng ứng suất ở gần lượng nổ còn gọi là sóng đập lan truyền với tốc độ siêu âm trong môi trường và khi lan truyền đến khoảng cách nhất định thì chuyển thành sóng đàn hồi lan truyền với tốc độ nhỏ hơn và bằng tốc độ sóng âm trong môi trường đất đá [1]. Khi ra xa tâm nổ vận tốc lan truyền của sóng ứng suất giảm dần và ở vùng đàn hồi giá trị vận tốc lan truyền gần như không thay đổi đạt trung bình khoảng (4667m/s) kết quả này sai số khoảng 0,7% so với kết quả thí nghiệm của Fahad Asemi và cộng sự  $v_p$ =4700m/s [20]

#### 6. KẾT LUẬN VÀ KHUYẾN NGHỊ

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã trình bày cơ sở lý thuyết lan truyền của sóng ứng suất nổ trong môi trường đá cứng đồng nhất. Kết quả mô phỏng đã chỉ ra tốc độ lan truyền sóng ứng suất trong môi trường xung quanh lượng nổ là không giống nhau. Khu vực gần tâm nổ có tốc độ lan truyền nhanh hơn so với khu vực xa tâm nổ. Đồng thời đưa ra được phương pháp xác định hệ số suy giảm sóng ứng suất theo khoảng cách trong môi trường đất đá bằng phương pháp mô phỏng số. Kết quả tính toán được hệ số suy giảm sóng ứng suất nổ trong môi trường đá vôi là 1,39. Để có kết quả chính xác hơn và xét đến các yếu tố ảnh hưởng khác của môi trường đất đá. Cần tiến hành thí nghiệm nổ và có các phương tiện đo hiện đại trong môi trường đá vôi thực tế để có thể so sánh và hiệu chỉnh mô hình.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Đàm Trọng Thắng, Nổ mìn trong ngành mỏ và công trình, Hà Nội: NXB Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, 2015.

[2] Hồ Sĩ Giao, Đàm Trọng Thắng, Lê Văn Quyển, Hoàng Tuấn Trung, Nổ Hoá học - Lí thuyết và Thực tiễn, Hà Nội: NXB Khoa học và Kỹ thuật, 2010.

[3] Vũ Xuân Bảng, "Luận án tiến sĩ: "Nghiên cứu hoàn thiện quy luật phá huỷ đất đá của lượng nổ dạng phẳng"," Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội, 2023.

[4] Đàm Trọng Thắng, Nguyễn Trí Tá, Vũ Xuân Bảng, "Nghiên cứu ảnh hưởng của hình dạng lượng nổ đến mức độ đập vỡ đất đá bằng phương pháp thực nghiệm," Tạp chí Khoa học & Kĩ thuật, Học viện Kỹ thuật Quân sự, 2018.

[5] Đàm Trọng Thắng, Nổ trong xây dựng công trình, Hà Nội: Học viện Kỹ thuật Quân sự, 2020.

[6] Trần Đình Thành, Nguyễn Văn Thủy, Đỗ Văn Minh, Vật lý nổ và va đập, Hà Nội: NXB Quân đội Nhân dân, 2021.

[7] Zhiliang Wang, Youpeng Huang and Feng Xiong, "Three-Dimensional Numerical Analysis of Blast-Induced Damage Characteristics of the Intact and Jointed Rockmass," *Computers, Materials & Continua*, vol. 60, pp. 1189 - 1206, 2019.

[8] T. J. Holmquist, G. R. Johnson and W. H. Cook, "A computational constitutive model for concrete subjective tolarge strain, high strain rate and high pressure," *The 14th International Symposium on Ballistic*, pp. 591-600, 1993.

[9] Gen-Mao Ren, Hao Wu, Qin Fang, Xiang-Zhen Kong, "Parameters of Holmquist–Johnson–Cook model for highstrength concrete-like materials under projectile impact," *International Journal of Protective Structure*, 2017.

[10] Zhiliang Wang, Haochen Wang, Jianguo Wang, Nuocheng Tian, "Finite element analyses of constitutive models performance in the simulation of blast-induced rock cracks," *Computers and Geotechnics*, vol. 135, 2021.

[11] C. Mader, Numerical Modeling of Detonation, California: U. of California, 1979.

[12] J.R. Asay and M. Shahinpoor., High-Pressure Shock Compression of Solids, 1993.

[13] W.C. Davis, W.P. Walters, "Explosive Effects and Applications," in *Shock wave in solids*, New York, Springer-Verlag, 1998, pp. 75-102.

[14] M. D. Banadaki and B. Mohanty, "Numerical simulation of stress wave induced fractures in rock," *International Journal of Impact Engineering*, Vols. 40-41, pp. 16-25, 2012.

[15] Jianzhong Lai, Xujia Guo, Yaoyong Zhu, "Repeated penetration and different depth explosion of ultra-high performance concrete," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 84, pp. 1–12, 2015.

[16] Zhongqi Wang, Yong Lu, Hong Hao, Karen Chong, "A full coupled numerical analysis approach for buried structures subjected to subsurface blast," *Computers and Structures*, vol. 83, p. 339-356, 2005.

[17] S. Itoh, H. Hamashima, K. Murata, Y. Kato, "Determination of JWL parameters from underwater explosion test," in *12th International Detonation Symposium*, San Diego, 2002.

[18] A. Alia and M. Souli, "High explosive simulation using multi-material formulations," *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, pp. 1032-1042, 2006.

[19] Bibiana Luccioni, Daniel Ambrosini, Gerald Nurick, Izak Snyman, "Craters produced by underground explosions," *Computers and Structures*, vol. 87, pp. 1366-1373, 2009.

[20] Tohid Asheghi, Ahmad Fahimifar, Farhad Asemi, "The Effect of the Crack Initiation and Propagation on the P-Wave Velocity of Limestone," *Amirkabir University of Technology*, 2019.

[21] Э.О. Мнндели, Н.Ф. Кусов, А.А. Сорнеев, Г.И. Марцинкевич, Мнндели, исследование волн напряжений при взрыве в горных порода, Москва: НАУКА, 1978.