

Bài báo khoa học

Mô phỏng hiện tượng đá bay trong quá trình nổ mìn khai thác mỏ bằng phương pháp động lực hạt mịn (SPH) trên phần mềm LS-Dyna, lấy ví dụ từ mỏ đá vôi Mông Sơn (Yên Bái)

Trần Đình Bảo^{1,2*}, Đỗ Văn Triều³, Nguyễn Đình An^{1,2}, Hoàng Văn Vân⁴, Bùi Xuân Điện⁵, Hoàng Đình Nam¹

¹ Trường Đại học Mỏ - Địa chất; trandinhbao@humg.edu.vn;

nguyendinhhan@humg.edu.vn; 2021040137@student.humg.edu.vn

² Nhóm nghiên cứu mạnh Những tiến bộ trong Khai thác mỏ bền vững và có trách nhiệm (ISRM), Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

³ Viện Khoa học Công nghệ Mỏ - Vinacomin; dovantrieu15091996@gmail.com

⁴ Chi nhánh Công nghiệp Hóa chất mỏ Hà Tuyên - MICCO;
hoangvanhaidang@gmail.com

⁵ Công ty Công nghiệp Hóa chất mỏ Bắc Trung Bộ - MICCO; dienbxbtb@gmail.com

*Tác giả liên hệ: trandinhbao@humg.edu.vn; Tel.: +84-988196996

Ban Biên tập nhận bài: 15/4/2023; Ngày phản biện xong: 12/6/2023; Ngày đăng bài: 25/6/2023

Tóm tắt: Đá bay là mối nguy hiểm lớn nhất trong hoạt động nổ mìn khai thác mỏ lộ thiên. Đá bay chiếm khoảng một nửa tổng số vụ tai nạn liên quan đến nổ mìn trên các mỏ lộ thiên, đây là một vấn đề nghiêm trọng và gây ra những phản ứng tiêu cực của cộng đồng dân cư sống quanh khu vực nổ mìn. Tuy nhiên, các nghiên cứu về phương pháp dự báo hiện tượng đá bay trong khai thác mỏ lộ thiên ở Việt Nam vẫn còn thiếu và hạn chế. Trong phạm vi nghiên cứu này, phương pháp phân tích mô phỏng thử nghiệm đá bay do nổ mìn gây ra bằng phương pháp động lực hạt mịn (SPH) trên phần mềm LS-Dyna cho mô hình 2D được xây dựng và áp dụng thực tế cho tuyến mặt cắt B2 của mỏ đá vôi Mông Sơn, tỉnh Yên Bái. Kết quả của mô hình cho thấy khả năng của phương pháp thủy động lực học hạt mịn trong việc phân tích quỹ đạo bay, khoảng cách của đá bay trong quá trình nổ mìn. Bằng cách sử dụng mô hình với các thông số nổ thực tế tại mỏ nhóm nghiên cứu đã đo được vận tốc và tốc độ bay của các mảnh đá tại các thời điểm thiết lập, cụ thể sau 1,5 giây đá bay xa nhất so với tâm bãi nổ đạt 85 m, tương ứng với vận tốc trung bình 40 m/s. Nghiên cứu giúp các kỹ sư khai thác mỏ ước lượng được khoảng cách đá bay cho từng vụ nổ cụ thể tại mỏ, qua đó đưa ra những biện pháp phù hợp để giảm thiểu hiện tượng đá bay, nâng cao hiệu quả nổ mìn. Tuy nhiên, cần tiến hành thêm những nghiên cứu chi tiết và chuyên sâu hơn về việc áp dụng phương pháp SPH trên phần mềm LS-Dyna cho mô hình 3D, đồng thời cần xem xét nhiều trường hợp nổ mìn thực tế theo hộ chiếu thi công và thí nghiệm bổ sung các tính chất cơ lý đá theo thuộc tính đất đá tại mỏ phù hợp với vật liệu trong phần mềm hỗ trợ.

Từ khóa: Đá bay; Động lực hạt mịn; Mô phỏng; Nổ mìn; LS-Dyna.

1. Đặt vấn đề

Trong khai thác mỏ lộ thiên, phương pháp khoan nổ mìn (KNM) được sử dụng rộng rãi và chiếm tỉ trọng cao trong đập vỡ và làm tơi khoáng sản có ích (KSCI). KNM là khâu công nghệ đầu tiên và quan trọng trong quy trình công nghệ khai thác mỏ và ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả của các khâu công nghệ tiếp theo. Mục tiêu chính của KNM là đảm bảo tăng cường hiệu quả khai thác đất đá và khoáng sản có ích bằng cách đảm bảo cung cấp đủ khối

lượng với chất lượng đập vỡ là tốt nhất, đồng thời giảm thiểu chi phí và hạn chế tiêu cực đến môi trường xung quanh [1–5]. Để đạt được các mục tiêu nêu trên, cần phải tiến hành tính toán chính xác các thông số nổ mìn trong quá trình thiết kế cũng như áp dụng các kỹ thuật nổ mìn hiện đại. Công tác KNM phải đảm bảo tuân thủ các yêu cầu về khối lượng đất đá cần làm toi, kích thước cục đất đá phù hợp theo yêu cầu của sản xuất, tối thiểu hóa chi phí cho toàn bộ dây chuyền khai thác mỏ, đồng thời cần phải giảm thiểu và kiểm soát các ảnh hưởng có hại tới môi trường xung quanh. Tóm lại, việc tối ưu hóa mức độ đập vỡ đất đá, khoảng cách dịch chuyển, kích thước hình học của đồng đá sau nổ mìn, đồng thời đảm bảo an toàn về rung chấn nền công trình, sóng đập không khí và đá văng. Các nỗ lực này nhằm đạt được hiệu quả tối đa và giảm thiểu tác động tiêu cực tới môi trường.

Trong nổ mìn khai thác mỏ lộ thiên chỉ có 20% đến 30% năng lượng nổ mìn được sử dụng để làm toi và đập vỡ đất đá từ khối nguyên. Phần năng lượng còn lại, bị lãng phí dưới dạng đá bay, chấn động nền công trình, sóng đập không khí, tạo ra bụi và đập vỡ quá mức, ... [6–9]. Đá bay xuất hiện trong quá trình nổ mìn là mối nguy hiểm lớn nhất trong hoạt động nổ mìn. Đá bay chiếm khoảng một nửa tổng số vụ tai nạn liên quan đến nổ mìn trên các mỏ lộ thiên. Tác giả [10] chỉ ra rằng trên 40% các vụ tai nạn có tử vong và trên 20% các vụ tai nạn nghiêm trọng xảy ra trong khai thác mỏ ở Ấn Độ là do đá bay. Đá bay vượt ra khỏi khu vực bán kính vùng nguy hiểm là nguyên nhân của 25% các vụ tai nạn do nổ mìn khai thác mỏ lộ thiên ở Mỹ [11]. Dựa trên các số liệu thống kê về tai nạn cho thấy có tới 20%–40% các vụ tai nạn liên quan đến nổ mìn là do đá bay [12]. Những nguy hiểm và thiệt hại do đá bay gây ra là một vấn đề rất nghiêm trọng kể từ khi nổ mìn được sử dụng để làm toi đất đá và KSCI. Một số hậu quả của đá bay là các đơn kiện của người dân sinh sống quanh khu vực nổ mìn, do đá bay gây ra các thương tích nghiêm trọng hoặc thậm chí tử vong. Ngoài ra, đá bay sinh ra trong nổ mìn cũng gây hư hỏng các công trình và làm hỏng hóc các thiết bị, thậm chí là phải đóng cửa mỏ.

Nguyên nhân dẫn đến hiện tượng đá bay trong nổ mìn khai thác mỏ có thể bao gồm một loạt các nguyên nhân, trong đó có những nguyên nhân có thể kiểm soát và không thể kiểm soát. Những nguyên nhân có thể kiểm soát bao gồm, các thiết kế nổ mìn thiếu chính xác, đường căn chưa chính xác, chiều cao cột bua chưa đủ, khoảng cách giữa các lỗ khoan chưa chính xác và sử dụng thuốc nổ có hiệu suất lớn. Đồng thời, các nguyên nhân không thể kiểm soát như điều kiện địa chất bất lợi (bao gồm các khe nứt, lỗ rỗng, các mặt phân lớp, các vị trí có địa chất yếu, ...), thời gian vi sai và trình tự vi sai không phù hợp, sự xuất hiện các nứt vỡ và đá rơi trên tầng, ... cũng góp phần vào các nguyên nhân dẫn đến hiện tượng đá bay [10–14]. Vì vậy, việc nghiên cứu ngăn chặn các điều kiện có thể dẫn tới hiện tượng đá bay là vấn đề cấp thiết, cần tiến hành các nỗ lực hướng đến giải quyết vấn đề này và đảm bảo an toàn và hiệu quả trong quá trình khai thác mỏ.

Hiện nay, hoạt động nổ mìn ngày càng tiến gần các khu dân cư, các công trình cần bảo vệ, các nguy cơ mất an toàn do hoạt động nổ mìn càng tăng cao. Nếu không kiểm soát những ảnh hưởng có hại do nổ mìn gây ra như chấn động nền công trình, sóng đập không khí, bụi và đặc biệt là đá bay sẽ dẫn tới những hậu quả nghiêm trọng. Đã có rất nhiều nhà nghiên cứu đã cố gắng đưa ra các phương pháp tính toán, dự đoán khoảng cách đá bay do nổ mìn gây ra nổ mìn khi xem xét các thông số nổ mìn thiết kế và một số yếu tố địa kỹ thuật. Bên cạnh đó, một số nhà nghiên cứu khác tiếp cận phân tích các điều kiện nổ mìn, các thông số nổ mìn thiết kế, điều kiện địa chất, hay tiếp cận dưới góc độ quản lý rủi ro, phân tích các số liệu thống kê tai nạn liên quan đến đá bay trong nổ mìn nhằm đưa ra các mô hình xác định phạm vi đá bay, mối tương quan giữa các thông số nổ mìn thiết kế với khoảng cách đá bay và sử dụng các thông số thiết kế nổ mìn là thông số đầu vào của các mô hình dự báo [15–21]. Nhiều nhà nghiên cứu đã cố gắng dự đoán khoảng cách đá bay trong thông qua các phương trình thực nghiệm [22–23]. Tuy nhiên, hiệu suất của các mô hình này chưa làm thỏa mãn trong quy mô thực địa dẫn tới thiếu chính xác và thiếu cơ sở khoa học.

Để dự báo khoảng cách đá bay, các nỗ lực phát triển các mô hình khác nhau đã được nhiều nhà khoa học trên thế giới thực hiện với các kết quả đầy hứa hẹn như áp dụng mạng nơ-ron nhân tạo và kỹ thuật logic mờ để dự đoán đá bay, sử dụng kỹ thuật máy học máy véc tơ hỗ trợ (SVS), phân tích xác suất để để phân định ranh giới khu vực nguy hiểm của đá bay trong một mô lộ thiên [24–31]. Với sự ra đời của các công cụ khoa học, kỹ thuật và sự cải tiến (cả phần cứng và phần mềm) trong vài thập kỷ qua, góp phần cải thiện độ chính xác của các dự đoán [32]. Việc sử dụng các mô hình trí tuệ nhân tạo (*Artificial Intelligence - AI*) như hệ thống suy luận mờ (*FIS*), mạng nơron nhân tạo (*ANN*), Hệ thống suy luận dựa trên mạng thích nghi mờ ANFIS (*Adaptive Network-based Fuzzy Inference System*) đã được triển khai thành công trong việc giải quyết các vấn đề địa kỹ thuật phức tạp, góp phần giảm những tác động tiêu cực của nổ mìn tới môi trường xung quanh [33–36]. Các mô hình phân tích AI dựa trên việc tận dụng tính chất linh hoạt của các dữ liệu, nhờ đó các mô hình có thể được hiệu chỉnh dễ dàng như một công cụ tiên lượng cho bất kỳ dữ liệu mới nào thu được. Lợi ích này làm cho AI trở thành một công cụ nhanh và mạnh trong việc giải quyết các vấn đề mối quan hệ phi tuyến của các thông số đầu vào và đầu ra và không được biết đến [37]. Tuy nhiên, bên cạnh những ưu điểm này, thì các mô hình sử dụng kỹ thuật AI cần thu thập một lượng lớn các thông số đầu vào, mặt khác việc đo vẽ khoảng cách đá bay do các vụ nổ là hết sức phức tạp và khó khăn. Cho đến nay, chưa có nhiều nghiên cứu sử dụng việc mô hình mô phỏng hiện tượng đá bay trong nổ mìn,

Trong nghiên cứu này, một phương pháp mới đã được đề xuất để dự đoán khoảng cách đá bay trên cơ sở mô hình được tạo dựa trên phương pháp động lực hạt mịn (*Smooth Particle Hydrodynamics - SPH*), mô hình được phát triển bởi [38]. Phương pháp này được phát triển để tránh những hạn chế gặp phải trong các bài toán biến dạng cực trị bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Sự khác biệt chính của SPH và các phương pháp cổ điển là SPH không chia các điểm nút. Các hạt là phần tử đại diện cho đối tượng và mang tính chất chung và riêng tùy theo thuộc tính khai báo [39–40].

Bài báo thực hiện phân tích mô phỏng thử nghiệm đá bay do nổ mìn gây ra bằng phương pháp SPH trên phần mềm LS-Dyna cho mô hình 2D được xây dựng từ tuyến mặt cắt B2 của mỏ đá vôi Mông Sơn. Kết quả của mô hình cho thấy khả năng của phương pháp thủy động lực học hạt mịn trong việc phân tích chuyên sâu công tác nổ mìn.

2. Phương pháp nghiên cứu và tài liệu thu thập

2.1. Khái quát về khu vực mỏ đá vôi Mông Sơn, Yên Bái

Mỏ đá Mông Sơn thuộc địa phận xã Mông Sơn, huyện Yên Bình, tỉnh Yên Bái. Tổng diện tích được cấp phép cho khu A và B của mỏ là 13,9 ha (Hình 1). Cấu trúc địa chất của khu mỏ khá đơn giản, chủ yếu là đá vôi bị hoa hóa màu trắng, đá vôi có màu trắng thuần khiết có cấu trúc hạt biến tính có kích thước khá lớn.

Mỏ Mông Sơn đang tập trung khai thác khu A với diện tích: 11,81 ha với hệ thống khai thác theo lớp bằng từ trên xuống dưới, chiều cao tầng 8,0 m; góc nghiêng sườn tầng, $\alpha = 75^\circ$. Đá trên mỏ được làm toi bằng phương pháp khoan nổ mìn với



Hình 1. Biên giới khai trường mỏ Mông Sơn [41].

lỗ khoan đường kính $d = 76$ mm, phương pháp nổ mìn vi sai phi điện toàn phần với thời gian giãn cách 17 ms và 42 ms. Thuốc nổ sử dụng là Anfo dạng túi D60, thuốc nhũ tương D60 được kích nổ bằng kíp phi điện xuống lỗ 400ms và mìn nổ MN31-175g/quả (đối với nổ mìn khai thác lần 1). Lượng thuốc nổ trong cột thuốc đa phần được kết cấu liên tục.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Trong phần này, tác giả sẽ tiến giới thiệu tổng quan về phương pháp động lực hạt mịn (SPH), phương thức tác động qua lại giữa các hạt trong SPH, cũng như phương trình trạng thái của vật liệu đặc trưng cho đất đá, vật liệu nổ phục vụ cho mô phỏng công tác nổ mìn trên mô hình 2D.

2.2.1. Công thức tiêu chuẩn của phương pháp động lực hạt mịn (SPH)

Phương pháp SPH được thể hiện dựa trên công thức bậc hai của các hạt chuyển động $(x_i(t), w_i(t))_{i \in P}$, P là tập hợp các hạt, $x_i(t)$ là vị trí của hạt thứ i ; $w_i(t)$ là trọng số của hạt thứ i . Công thức bậc hai cho một hàm có thể được viết như sau:

$$\int_{\Omega} f(x) dx = \sum_{j \in P} w_j(t) \cdot f(x_j(t)) \quad (1)$$

Công thức bậc hai (1) cùng với trạng thái làm mịn hạt nhân (*smoothing kernel*), hình thành lên định nghĩa về một hàm giá trị gần đúng của hạt. Giá trị nội suy của hàm $u(x)$ tại vị trí x sử dụng phương pháp SPH là:

$$\Pi^h(u(x_i)) = \sum_{j \in \Omega} w_j(t) \cdot u(x_j) \cdot w(x_i - x_j, h) \quad (2)$$

Trong đó Σ là trên tất cả các hạt bên trong Ω và trong bán kính $2h$, W là vị trí hạt nhân nội suy dựa trên đường “spline” có bán kính $2h$; h là độ dài làm mịn theo thời gian và không gian. Hàm kernel được định nghĩa như sau:

$$w(x_i - x_j, h) = \frac{1}{h} \theta \left\{ \frac{x_i - x_j}{h(x, y)} \right\} \quad (3)$$

$W(x_i - x_j, h) \rightarrow \delta$ khi $h \rightarrow 0$, δ là hàm Dirac, h là một hàm của x_i và x_j , được gọi là chiều dài làm mịn của hàm hạt nhân.

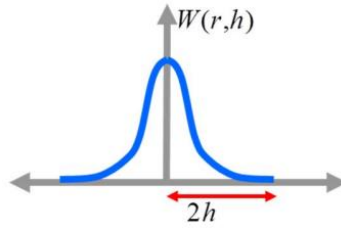
Hàm xây dựng đường “spline” được định nghĩa:

$$\theta(d) = Cx \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}d^2 + \frac{3}{4}d^3 & \text{Khi } 0 \leq d \leq 1 \\ \frac{1}{4}(2-d)^3 & \text{Khi } 1 \leq d \leq 2 \\ 0 & \text{Khác} \end{cases} \quad (4)$$

Với d là số chiều không gian. Độ dốc của hàm $u(x)$ được đưa ra bằng cách áp dụng toán tử đạo hàm trên độ dài làm mịn:

$$\nabla \Pi^h(u(x_i)) = \sum_j w_j \cdot u(x_j) \cdot \nabla w(x_i - x_j, h) \quad (5)$$

Đánh giá một tích nội suy của hai hàm được cho bởi tích các giá trị nội suy của chúng (Hình 2).



Hình 2. Vị trí nội suy của hàm hạt nhân 2D [42].

2.2.2. Phương trình liên tục và phương trình động lượng của các hạt trong phương pháp động lực hạt mịn

Giá trị gần đúng của hạt trong phương trình liên tục được xác định như sau:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \rho_i \sum_j \frac{m_j}{\rho_i} (v_i^\beta - v_j^\beta) w_{ij}, \beta \quad (6)$$

Nó là Galilean bất biến do vị trí và vận tốc hạt chỉ xuất hiện khi có sự sai khác, v_i^β là thành phần vận tốc tại hạt thứ i .

Dạng rời rạc của phương trình động lượng SPH được phát triển thành:

$$\frac{dv_i^\alpha}{dt} = -\sum_j \frac{m_j}{\rho_i \rho_j} (\sigma_i^{\alpha\beta} \pm \sigma_j^{\alpha\beta}) w_{ij}, \beta \quad (7)$$

Công thức trên đảm bảo rằng ứng suất tự động liên tục trên các bề mặt tiếp giáp vật liệu. Các loại phương trình động lượng SPH khác nhau có thể đạt được thông qua việc áp dụng các phương trình đồng nhất vào phương trình động lượng SPH thông thường. Tính đối xứng của phương trình động lượng SPH có thể làm giảm các lỗi phát sinh từ vấn đề không nhất quán của hạt.

Từ công thức (7), các thành phần lực tác dụng lên từng hạt được xác định:

$$F_i^{\text{pressure}} = -\sum_j m_j \frac{\rho_i + \rho_j}{2\rho_j} \nabla w(r_{ij}, h) \quad (8)$$

$$F_i^{\text{viscosity}} = \mu \sum_j m_j \frac{v_i + v_j}{2\rho_j} \nabla^2 w(r_{ij}, h)$$

Trong đó $r_{ij} = x_i - x_j$, μ là hệ số nhớt của vật liệu. Áp suất p_i được tính toán thông qua phương trình cấu thành:

$$p_i = k(\rho_i - \rho_0) \quad (9)$$

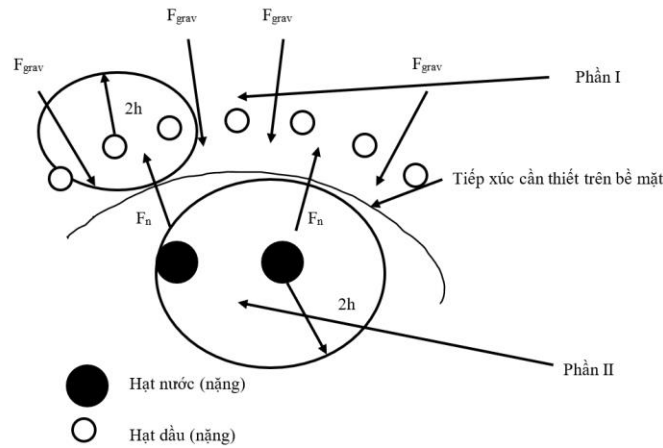
Trong đó k là độ cứng của vật liệu và B là mật độ ban đầu của nó. Cuối cùng, đối với gia tốc của hạt i , ta có:

$$a_i = \frac{1}{\rho_i (F_i^{\text{pressure}} + F_i^{\text{viscosity}} + F_i^{\text{external}})} \quad (10)$$

Trong đó: F_i^{external} là các lực bên ngoài như lực tác động lên thân hoặc lực do tiếp xúc.

2.2.3. Tương tác giữa các hạt trong mô phỏng

Hình 3 cho thấy tất cả các phép nội suy SPH được thực hiện bên trong các miền cục bộ của từng phần SPH. Các lực tiếp xúc sẽ được áp dụng cho các lực lượng bên ngoài như công thức 10.



Hình 3. Tương tác giữa các nốt với nốt [43].

Trong hệ thống này, lực tiếp xúc đẩy tác dụng lên hạt do tiếp xúc F_c , tỷ lệ thuận với sự dịch chuyển hoặc chông chéo giữa các hạt δ .

$$F_c = K_I \delta \tag{11}$$

Trong đó: $\delta = d-2d$ và K_I là hằng số lò xo tuyến tính hoặc độ cứng. Nếu tiếp điểm được mô hình hóa chỉ sử dụng lò xo tuyến tính này, sẽ không có năng lượng nào được tiêu thụ và tiếp điểm sẽ đàn hồi hoàn hảo. Trên thực tế, một số động năng bị tiêu hao trong biến dạng dẻo, hoặc chuyển thành năng lượng nhiệt hoặc âm thanh. Để giải thích cho những tổn thất năng lượng đó, một nguồn giảm chấn tiếp xúc dựa trên mô hình dashpot được xác định:

$$F_d = \eta v \tag{12}$$

Lực giảm chấn tiếp xúc tỷ lệ với vận tốc tương đối của các hạt tiếp xúc, trong đó hằng số tỷ lệ η được gọi là hệ số giảm chấn, $v = v_1 - v_2$.

2.2.4. Phương trình đặc trưng của vật liệu sử dụng trong mô phỏng

Cùng với sự ra đời của phương pháp SPH, các mô hình vật liệu vật chất được xây dựng và phát triển để giải quyết các vấn đề dưới trình mô phỏng của phần mềm LS-Dyna. Trong phạm vi nghiên cứu đá bay do nổ mìn gây ra, nhóm nghiên cứu sử dụng các mô hình đặc trưng cho đất đá: Mô hình *Riedel Hiermaier Thoma - RHT*; mô hình vật liệu nổ (*High Explosive Burn - HEB*) với phương trình trạng thái của vật liệu nổ (*Jones Wilkins Lee - JWL*).

- Mô hình vật liệu đất đá (RHT)

Đặc tính của đá là một loại vật liệu giòn [44]. Do đó, vật liệu hợp phù phỏng trong LS-Dyna là vật liệu *Riedel Hiermaier Thoma - RHT*, được phát triển bởi [45]. RHT bao gồm 03 bề mặt phụ thuộc áp suất trong không gian ứng suất, là các trạng thái giới hạn khác nhau, cụ thể là giới hạn phá hủy, giới hạn đàn hồi và phá hủy thứ phát.

Giới hạn phá hủy $Y_{phá hủy}$ được định nghĩa là một hàm áp suất p , góc θ và tỉ lệ biến dạng ϵ , được xác định bằng công thức.

$$Y_{phá hủy}(p^*, \theta, \epsilon) = Y_{TXC}^*(p^*) \cdot R_3(\theta) \cdot F_{t\grave{a}i}(\epsilon) \tag{13}$$

Trong đó p^* là áp suất được chuẩn bằng hàm f_c , $p^* = p / f_c$, với p là áp suất thủy tĩnh, f_c là cường độ nén; $R_3(\theta)$ là hàm xác định sự phụ thuộc bất biến của một hình; $F_{t\grave{a}i}$ là tốc độ biến dạng, được thể hiện thông qua sự gia tăng độ bền đứt gãy với tốc độ biến dạng dẻo; Y_{TXC}^* là cường độ ứng suất tương đương trên kinh tuyến nén.

Giới hạn đàn hồi được xác định dựa trên việc chia tỷ lệ bề mặt phá vỡ, được xác định theo công thức 14:

$$Y_{đàn hồi} = Y_{phá hủy} \cdot F_{đàn hồi} \cdot R_3(\theta) \cdot F_{CAP}(p^*) \tag{14}$$

Trong đó $F_{\text{đàn hồi}}$ là tỉ lệ giữa giới hạn đàn hồi và giới hạn phá hủy; $F_{\text{CAP}}(p^*)$ là hàm giới hạn ứng suất lệch đàn hồi khi nén thủy tĩnh, giá trị trong khoảng (0,1).

Phá hủy thứ phát để mô tả cường độ của đá bị nghiền nát hoàn toàn, được xác định qua biểu thức:

$$Y_{\text{phahuythupha}}^* = B.p^{*M} \tag{15}$$

Trong đó B là hằng số mặt phá hủy thứ phát; M là số mũ mặt phá hủy thứ phát.

- Phương trình lan truyền sóng ứng suất của lượng thuốc (JWL)

Đối với lượng thuốc nạp trong lỗ, mô hình vật liệu thuốc nổ (*High Explosive Burn - HEB*) sử dụng trong LS-Dyna với phương trình trạng thái JWL được xác định qua phương trình [45]:

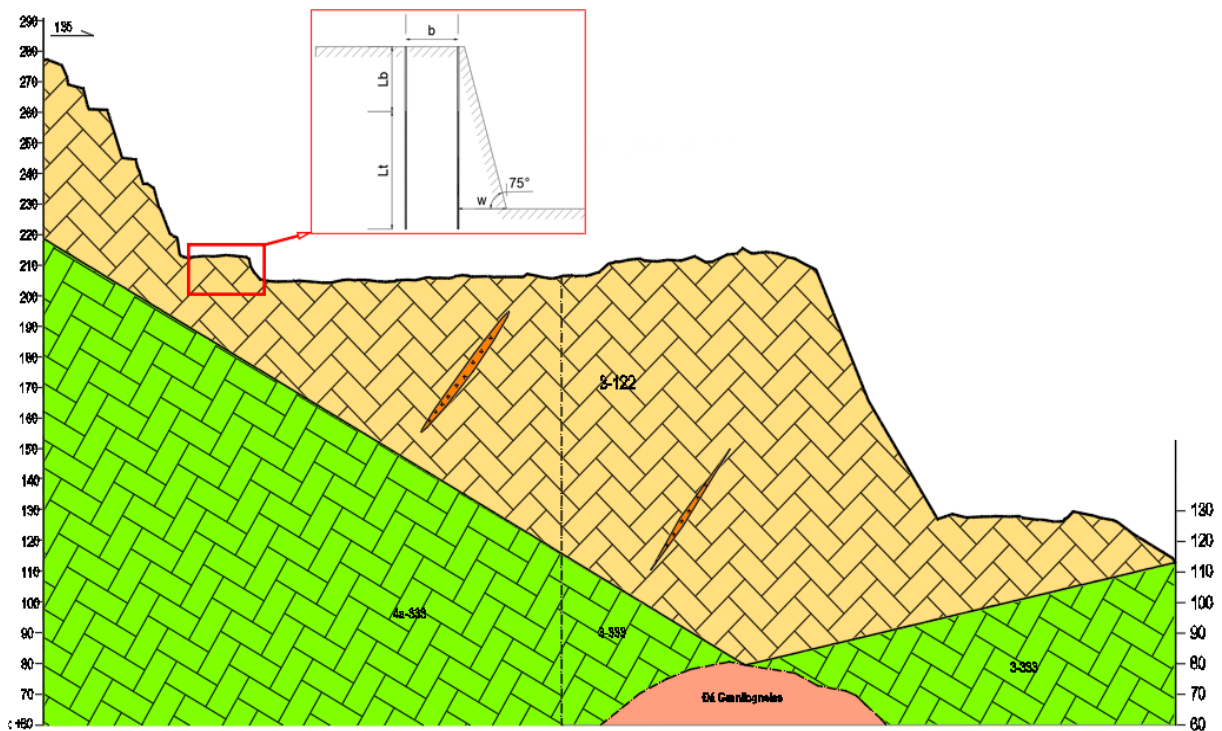
$$P = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right)e^{-R_1 V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right)e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \tag{16}$$

Trong đó P là sóng ứng suất, A, B, R_1 , R_2 và ω là các hằng số, V là thể tích riêng và E_0 là nội năng có giá trị ban đầu là E_0 .

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Mô hình mô phỏng đá bay cho mỏ đá vôi Mông Sơn bằng phương pháp SPH trên phần mềm LS-Dyna

Hiện nay, tại một số bãi nổ sản xuất của mỏ, với thông số khoan nổ mìn đang áp dụng, đã làm tăng nguy cơ mất an toàn đá văng. Do đó, để đánh giá mức độ ảnh hưởng của đá văng đến sản xuất, bài báo thực hiện mô phỏng khâu nổ mìn bằng phần mềm LS-Dyna trên mặt cắt tuyến B2 của mỏ (Hình 4).



Hình 4. Mặt cắt tuyến B2 mỏ Mông Sơn và sơ đồ nạp nổ thực hiện sử dụng để mô phỏng nổ mìn trên phần mềm LS-Dyna.

Các thông số khoan nổ trên mô hình 2D được trình bày tại bảng 1.

Bảng 1. Thông số khoan nổ mìn trên mô hình mô phỏng.

Thông số	Kỹ hiệu	Đơn vị	Giá trị
Chiều cao tầng	h	m	8
Khoảng cách các hàng	b	m	2,6
Chiều dài nạp búa	L _b	m	3,2
Chiều dài nạp thuốc	L _t	m	5,8
Đường kính lỗ khoan	d _k	mm	76
Đường kháng chân tầng	w	m	2,6
Loại thuốc			Anfo
Thời gian vi sai		ms	17

Các vật liệu đại diện cho môi trường đất đá, thuốc nổ tương thích với các thuộc tính của vật liệu RHT, JWL trong LS-Dyna được xác định dựa trên tài liệu địa chất của mỏ đá vôi Mông Sơn và các nghiên cứu đã có về tính chất cơ lý của đá vôi thể trọng 2,72 g/cm³. Các thông số chính của vật liệu xem bảng 2.

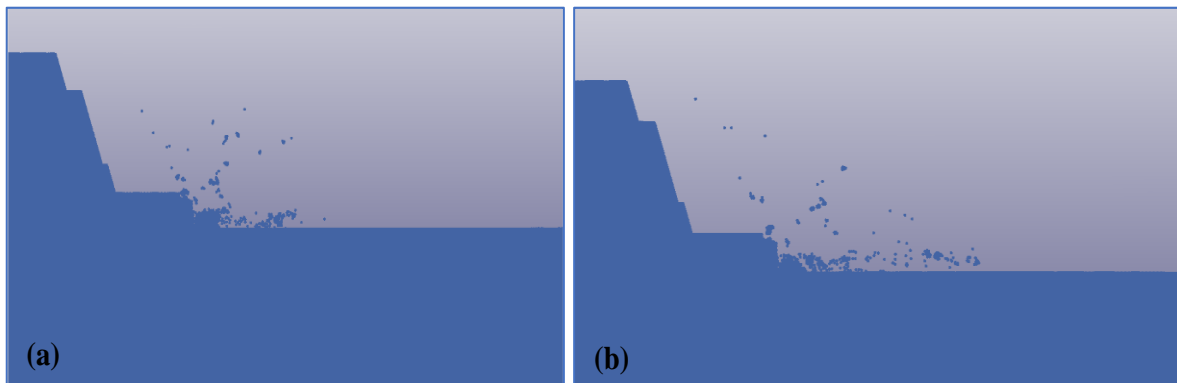
Bảng 2. Thông số chính của vật liệu đưa vào mô hình mô phỏng.

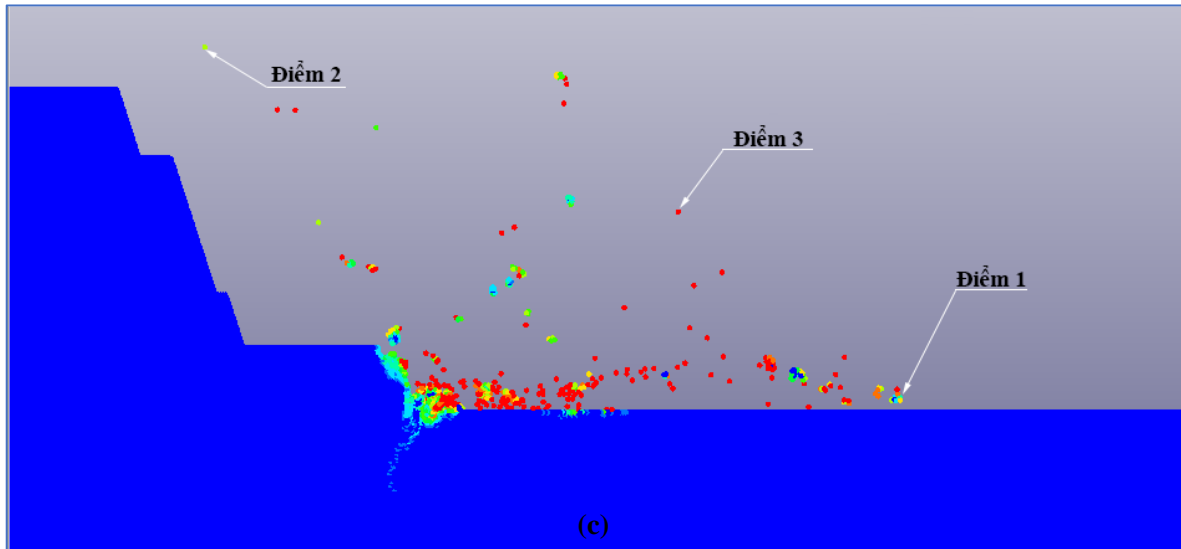
Thông số	Giá trị	Thông số	Giá trị
Mô hình vật liệu RHT			
Tỷ trọng, g/cm ³	2,72	Cường độ phá vỡ, Pa	4,00e ⁺⁷
Cường độ chịu kéo, kG/cm ²	60,77	Tốc độ phá vỡ biến dạng kéo	3,00e ⁺¹⁹
Cường độ kháng nén, kG/cm ²	750,77	Tốc độ phá vỡ biến dạng nén	3,00e ⁺¹⁹
Góc ma sát trong, độ	34 ^o 35'	Tốc độ biến dạng kéo	3,00e ⁻⁶
Mô đun biến dạng, kG/cm ²	4,08	Tốc độ biến dạng nén	3,00e ⁻⁵
Mô đun đàn hồi, Pa	2,47e ⁺¹⁰	Hệ số làm giảm mô đun cắt	0,5
Độ lỗ rỗng	1,94	Biến dạng phá vỡ tối thiểu	0,015
Phương trình trạng thái sóng ứng suất JWL			
Tỷ trọng, kg/m ³	931	Áp lực nổ, Pa	5,15e ⁺⁹
Tốc độ nổ, m/s	4.200		
Hệ số trạng thái (A), Pa	4,95e ⁺¹⁰	Hệ số trạng thái (R2)	1,118
Hệ số trạng thái (B), Pa	1,89e ⁺⁹	Hệ số trạng thái (ω)	0,33
Hệ số trạng thái (R1)	3,907	Năng lượng nổ trên 1 đơn vị thể tích, Pa/m ³	2,48e ⁺⁹

Thông số kỹ thuật máy tính sử dụng để mô phỏng công tác nổ mìn như sau: Intel(R) Core(TM) i7-10700 CPU @ 2.90GHz và RAM 16.0 GB. Với thời gian ghi nhận kết quả sau 1,5 giây, mô phỏng hoàn thành tính toán sau 12 giờ trên phần mềm LS-Dyna.

3.2. Kết quả mô phỏng đá bay cho mỏ đá vôi Mông Sơn bằng phương pháp SPH trên phần mềm LS-Dyna

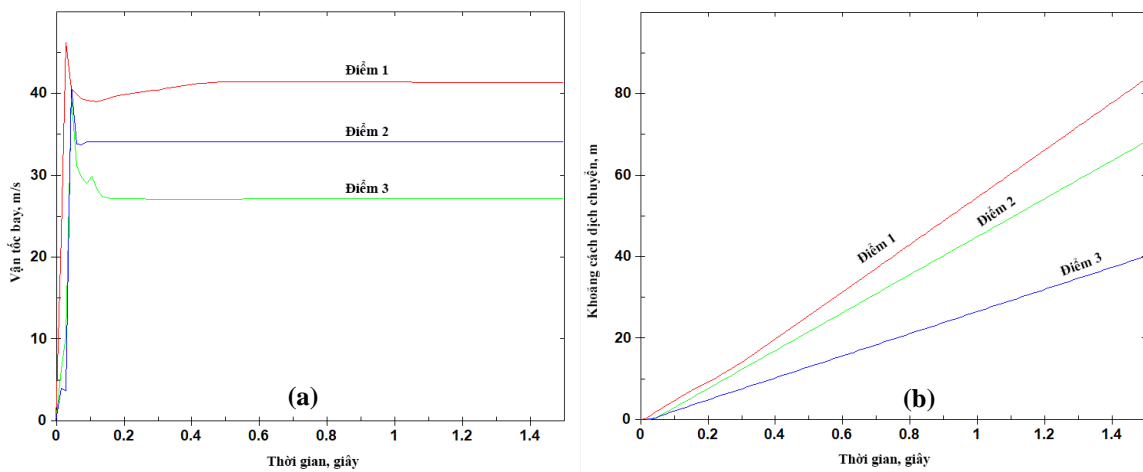
Bài báo thiết lập đo dữ liệu mô phỏng hiện tượng đá bay trong quá trình nổ mìn trên mô hình 2D của mặt cắt tuyến B2 tại mỏ đá vôi Mông Sơn sau 1,5 giây. Kết quả thu được qua các mốc thời gian 0,5 giây; 1,0 giây và 1,5 giây, xem hình 5.





Hình 5. Mô phỏng quá trình nổ mìn với phần mềm LS-Dyna: (a) 0,5 giây; (b) 1,0 giây; (c) 1,5 giây.

Để đánh giá khoảng cách đá bay, vận tốc đá bay sau 1,5 giây kích nổ lượng thuốc. Đặt 3 điểm đo trên mô hình mô phỏng (Hình 5c). Kết quả giám sát được thể hiện tại hình 6.



Hình 6. Vận tốc (a) và khoảng cách (b) đá bay từ 0 ÷ 1,5 giây: (a) Vận tốc đá bay trên 3 điểm khảo sát; (b) Khoảng cách bay trên 3 điểm khảo sát.

Kết quả đo tại các điểm giám sát cho thấy: Với thông số mạng nổ như bảng 1, sau 1,5 giây, đá bay xa nhất so với tâm bãi nổ đạt 85 m, tương ứng với vận tốc trung bình 40 m/s. Như vậy, thông số mạng nổ tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn đá văng cho mỏ Mông Sơn. Do đó, cần tính toán, lựa chọn thông số KNM theo điều kiện an toàn đá văng.

4. Kết luận

Phương pháp mô phỏng quá trình nổ mìn và xác định quỹ đạo bay, cũng như khoảng cách bay của đất đá trong quá trình nổ mìn sử dụng công cụ mô phỏng hiện chưa được sử dụng rộng rãi ở nước ta. Việc áp dụng các công thức thực nghiệm để xác định khoảng cách đá bay là chưa phù hợp với điều kiện thực tế trong quá trình nổ mìn. Trong khi đó, việc áp dụng các thuật toán máy học và mô hình trí tuệ nhân tạo (AI) đòi hỏi việc thu thập một lượng lớn các thông số đầu vào. Bên cạnh đó, việc đo vẽ khoảng cách đá bay do các vụ nổ cũng gặp nhiều khó khăn và phức tạp.

Phương pháp mô hình số đã trở thành giải pháp đáng tin cậy trong việc nghiên cứu, phân tích và đánh giá các tác động cơ học. Kết quả của mô hình đã chứng minh khả năng của

phương pháp thủy động lực học hạt mịn trong việc phân tích chuyên sâu công tác nổ mìn. Sử dụng phương pháp này, các kỹ sư khai thác mỏ và nhà quản lý an toàn trong quá trình nổ mìn có thể dự đoán sơ bộ khoảng cách đá bay trong từng vụ nổ, dựa trên các điều kiện nổ mìn thực tế tại mỏ, thông qua việc nhập các thông số đầu vào cho mô hình mô phỏng.

Dựa trên phân tích quá trình tác dụng nổ mìn sử dụng phương pháp SPH 2D, được áp dụng trên tuyến mắt cắt B2 của mỏ đá vôi Mông Sơn, những kết quả đã thu được cho thấy rằng hiện tại mô hình thiết kế KNM của mỏ đang tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn do đá văng. Do đó, cần tiến hành nghiên cứu, tính toán và thay đổi các lại thông số KNM sao cho hợp lý. Tuy nhiên, để đạt được điều này, cần tiến hành thêm những nghiên cứu chi tiết và chuyên sâu hơn về việc áp dụng phương pháp SPH trên phần mềm LS-Dyna cho mô hình 3D, đồng thời cần xem xét nhiều trường hợp nổ mìn thực tế theo hộ chiếu thi công và thí nghiệm các tính chất cơ lý đá bổ sung theo thuộc tính đất đá tại mỏ phù hợp với vật liệu trong phần mềm hỗ trợ. Mục tiêu của việc này là để nâng cao mức độ chính xác của mô phỏng, đồng thời thiết lập thời điểm quan sát dài hơn để đảm bảo việc xác định đầy đủ các hiện tượng đá bay theo các hướng và theo các thời điểm của vụ nổ.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: T.Đ.B.; Đ.V.Tr., H.V.V.; Lựa chọn phương pháp nghiên cứu: T.Đ.B.; Đ.V.Tr.; N.Đ.A.; Thu thập số liệu thực tế tại mỏ: H.V.V., H.Đ.N.; Xử lý số liệu: T.Đ.B.; Đ.V.Tr.; H.V.V.; B.X.D.; Viết bản thảo bài báo: T.Đ.B.; Đ.V.Tr.; B.V.D., N.Đ.A.; H.V.V.; H.Đ.N.; Chỉnh sửa bài báo: T.Đ.B.; Đ.V.Tr.; H.V.V., H.Đ.N.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn PGS.TS. Đàm Trọng Thắng, Học viện kỹ thuật quân sự đã giúp đỡ trong quá trình chạy mô hình mô phỏng nổ mìn bằng phần mềm bản quyền LS-Dyna/Ansys. Bên cạnh đó, tập thể tác giả trân trọng cảm ơn sự giúp đỡ của các nhà khoa học thuộc Nhóm nghiên cứu mạnh Những tiến bộ trong Khai thác mỏ bền vững và có trách nhiệm (ISRM), Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam đã hỗ trợ để, cố vấn khoa học trong quá trình nhóm tác giả thực hiện nghiên cứu này.

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

1. Kahriman, A.; Ozer, U.; Aksoy, M.; Karadogan, A.; Tuncer, G. Environmental impacts of bench blasting at Hisarcik Boron open pit mine in Turkey. *Environ. Geology*. **2006**, 50(7), 1015–1023.
2. Uysal, O.; Cavus, M. Effect of a pre-split plane on the frequencies of blast induced ground vibrations. *Acta Montanistica Slovaca* **2013**, 18(2), 101–109.
3. Karadogan, A.; Kahriman, A.; Ozer, U. A new damage criteria norm for blast induced ground vibrations in Turkey. *Arabian J. Geosci.* **2014**, 7(4), 1617–1627.
4. Gorgulu, K.; Arpaz, E.; Uysal, O.; Duruturk, Y.S.; Yuksek, A.G.; Kocaslani, A.; Dilmac, M.K. Investigation of the effects of blasting design parameters and rock properties on blast-induced ground vibrations. *Arabian J. Geosci.* **2015**, 8(6), 4269–4278.
5. Kulekci, G.; Alemdag, S. The investigation of blasting effect on natural heritages in quarries: Registered rock room sample. Proceedings of the 8th International Aggregates Symposium 13–14 October, Kutahya, Turkey, 2016, pp. 498–504.
6. Singh, T.N.; Singh, V. An intelligent approach to prediction and control ground vibration in mines. *Geotech. Geol. Eng.* **2005**, 23(3), 249–262.

7. Rezaei, M.; Monjezi, M.; Varjani, A.Y. Development of a fuzzy model to predict flyrock in surface mining. *Saf. Sci.* **2011**, *49*, 298–305.
8. Hajihassani, M.; Armaghani, D.J.; Sohaei, H.; Mohamad, E.T.; Marto, A. Prediction of airblast–overpressure induced by blasting using a hybrid artificial neural network and particle swarm optimization. *Appl. Acoust.* **2014**, *80*, 57–67.
9. Sadeghi, F.; Monjezi, M.; Armaghani, D.J. Evaluation and optimization of prediction of toe that arises from mine blasting operation using various soft computing techniques. *Nat. Resour. Res.* **2020**, *29*(2), 887–903.
10. Bhandari S. Engineering rock blasting operations. A.A. Balkema, Rotterdam, 1997.
11. Fletcher, L.R.; D'Andrea, D.V. Control of flyrock in blasting. Proceeding of 12th Conf. on Explosives and Blasting Technique. Atlanta, Georgia, 1986, pp. 167–177.
12. Raina, A.K.; Murthy, V.M.S.R.; Soni, A.K. Flyrock in surface mine blasting: understanding the basics to develop a predictive regime. *Curr. Sci.* **2015**, *108*, 660–665.
13. Workman, J.L.; Calder, P.N. Flyrock prediction and control in surface mine blasting. Proceeding of the 20th conference on explosives and blasting technique. Austin, Texas, 1994, pp. 59–74.
14. Kopp, J.W. Observation of flyrock at several mines and quarries. Proceeding of the 20th conference on explosives and blasting technique. Austin, Texas, 1994, pp. 75–81.
15. Lundborg, N.; Persson, P.A.; Ladegaard–Pedersen, A.; Holmberg, R. Keeping the lid on flyrock in opencast blasting. *Eng. Min. J.* **1975**, 95–100.
16. Roth, J. A model for the determination of flyrock range as a function of shot conditions, final report contract no. J03872A2. *Manage. Sci. Assoc.* **1979**.
17. Hillier, D.E.; Holywell, P.D.; Jeffries, R.M.; Scott, I.M.B. Limiting the instance of flyrock from quarry operations, research report. WS Atkins Consultants Ltd., Warrington, 1999.
18. Schneider, L. Back to the basics, flyrock (part 2: prevention). *Appl. Acoust.* **1997**, *71*, 1169–1176. Doi:10.1016/j.apacoust.2010.07.008.
19. Adhikari, G.R. Studies on flyrock at limestone quarries. *Rock Mech. Rock Eng.* **1999**, *32*, 291–301. Doi:10.1007/s006030050049.
20. Mishra, A.K.; Mallick, D.K. Analysis of blasting related accidents with emphasis on flyrock and its mitigation in surface mines. Proceedings of the 10th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. New Delhi, India. 2012, pp. 555–563.
21. Bajpayee, T.S.; Rehak, T.R.; Mowrey, G.L.; Ingram, D.K. Blasting injuries in surface mining with emphasis on flyrock and blast area security. *J. Saf. Res.* **2004**, *35*, 47–57. Doi:10.1016/j.jsr.2003.07.00.
22. Kulekci, G.; Yilmaz, A.O. Roadway tunnel construction with drilling–blasting method; Gümüşhane environment road example. *Int. J. Math. Eng. Nat. Sci.* **2018**, *4*, 34–39.
23. Kulekci, G.; Yilmaz, A. Investigation of the effect of activities in a copper mine on historical works, an example of Gümüşhane Süleymaniye. *J. Underground Resour.* **2019**, *16*(8), 1–14.
24. Monjezi, M.; Amini Khoshalan, H.; Yazdian Varjani, A. Prediction of flyrock and backbreak in open pit blasting operation: a neuro–genetic approach. *Arabian J. Geosci.* **2010a**, *5*(3), 441–448.
25. Monjezi, M.; Bahrami, A.; Yazdian Varjani, A. Simultaneous prediction of fragmentation and flyrock in blasting operation using artificial neural networks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2010b**, *47*(3), 476–480.

26. Monjezi, M.; Mehrdanesh, A.; Malek, A.; Khandelwal, M. Evaluation of effect of blast design parameters on flyrock using artificial neural networks. *Neural Comput. Appl.* **2012**, *23*(2), 349–356.
27. Rezaei, M.; Monjezi, M.; Varjani, A.Y. Development of a fuzzy model to predict flyrock in surface mining. *Saf. Sci.* **2011**, *49*, 298–305.
28. Ghasemi, E.; Sari, M.; Ataei, M. Development of an empirical model for predicting the effects of controllable blasting parameters on flyrock distance in surface mines. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2012a**, *52*, 163–170.
29. Ghasemi, E.; Amini, H.; Ataei, M.; Khalokakaei, R. Application of artificial intelligence techniques for predicting the flyrock distance caused by blasting operation. *Arabian J. Geosci.* **2012b**, *7*(1), 193–202.
30. Amini, H.; Gholami, R.; Monjezi, M.; Torabi, S.R.; Zadhesh, J. Evaluation of flyrock phenomenon due to blasting operation by support vector machine. *Neural Comput. Appl.* **2011**, *21*(8), 2077–2085.
31. Raina, A.K.; Chakraborty, A.K.; Choudhury, P.B.; Sinha, A. Flyrock danger zone demarcation in opencast mines: a risk based approach. *Bull. Eng. Geol. Environ.* **2011**, *70*(1), 163–172.
32. Alemdag, S.; Zeybek, H.I.; Kulekci, G. Stability evaluation of the Gümüşhane–Akçakale Cave by numerical analysis method. *J. Mountain Sci.* **2019**, *16*(9), 50–58.
33. Momeni, E.; Nazir, R.; Armaghani, D.J.; Maizir, H. Prediction of pile bearing capacity using a hybrid genetic algorithm–based ANN. *Measurement* **2014**, *57*, 122–131.
34. Mohamad, E.T.; Armaghani, D.J.; Hajihassani, M.; Faizi, K.; Marto, A. A simulation approach to predict blasting–induced flyrock and size of thrown rocks. *Electron. J. Geotech. Eng.* **2013a**, *18*, 365–374.
35. Monjezi, M.; Dehghani, H. Evaluation of effect of blasting pattern parameters on back break using neural networks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **2008**, *45*(8), 1446–1453.
36. Esmaeili, M.; Osanloo, M.; Rashidinejad, F.; Bazzazi, A.A.; Taji, M. Multiple regression, ANN and ANFIS models for prediction of backbreak in the open pit blasting. *Eng. Comput.* **2014**, *30*(4), 549–558.
37. Garret, J.H. Where and why artificial neural networks are applicable in civil engineering. *J. Comput. Civil Eng.* **1994**, *8*, 129–130.
38. R. A. Gingold, J. J. Monaghan. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **1977**, *Volume 181, Issue 3, December*, Pages 375–389, <https://doi.org/10.1093/mnras/181.3.375>
39. Thung, T.T. Study of the SPH method for Simulation in LS–Dyna, 2017.
40. Jayasinghe, L.B. Numerical investigation into the blasting-induced damage characteristics of rocks considering the role of in-situ stressed and discontinuity persistence. Nanyang Centre for Underground Space, School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798. 2020.
41. Ảnh chụp vệ tinh mỏ đá vôi Mông Sơn.
42. Xu, J.; Wang, J. Interaction Methods for the SPH Parts (Multiphase Flows, Solid Bodies) in LS–Dyna. Livermore Software Technology Corporation, 2013.
43. Thắng, Đ.T.; Nam, B.X.; Hiếu, T.Q. Nổ mìn trong ngành mỏ và công trình. Nhà xuất bản Khoa học tự nhiên và công nghệ, Hà Nội, 2015.
44. Gao, J.; Xie, S.; Zhang, X.; Wang, H.; Gao, W.; Zhou, H. Study on the 2D optimization simulation of complex five–hole cutting blasting under different lateral pressure coefficients. *Hindawi Complexity* **2020**, *4639518*, pp. 12.

45. Riedel, W.; Thoma, K.; Hiermaier, S. Numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes. Proceedings of 9th international symposium on interaction of the effects of munitions with structures, Strausberg, Germany. 1999, pp. 315–322.

Simulation on flyrock due to blasting using Smoothed particle hydrodynamics (SPH) with LS–Dyna software, an example from the Mong Son mine (Yen Bai)

Tran Dinh Bao^{1,2*}, Do Van Trieu³, Nguyen Dinh An^{1,2}, Hoang Van Van⁴, Bui Xuan Dien⁵, Hoang Dinh Nam¹

¹ Hanoi University of Mining and Geology; trandinhbao@humg.edu.vn; nguyendinhnam@humg.edu.vn; 2021040137@student.humg.edu.vn

² Innovations for Sustainable and Responsible Mining (ISRM) Research Group, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, 100000, Vietnam; trandinhbao@humg.edu.vn; nguyendinhnam@humg.edu.vn

³ Vinacomin-Institute of Mining Science and Technology; dovantrieu15091996@gmail.com

⁴ Micco - Branch of Ha Tuyen mining chemical industry company limited; hoangvanhaidang@gmail.com

⁵ MICCO - Bac Trung Bo mining chemical industry company limited; dienbxbtb@gmail.com

Abstract: Flying rock is the most serious danger released from blasting in open pit mines. More than a half of accidents due to blasting is related to rock flying. It is considered as serious problems because it raises negative complains from the locals who lives nearby the blasting areas. Nevertheless, there are few studies on rock flying in Vietnam in particular. This study focuses on Smooth Particle Hydrodynamic (SPH) method on LS-Dyna software to model rock flying on B2 section at Mong Son quarry, Yen Bai province. The result indicates the potential of Smooth Particle Hydrodynamic (SPH) method in analyzing the rock flying trajectory and distance in blasting. Using blasting practical parameters at the mine site, the software has estimated the flying velocity at various location and time. In which, the rock flying velocity is about 40 m/s at the distance of 85 m from the blasting point after 1.5 second. This study aims to help engineers to estimate rock flying distance on specific explosions. As a result, they are able to propose effective solutions to reduce the negative effects of rock flying and improve their blasting. However, it is necessary to implement more studies on the practicality of LS-Dyna software for 3D modelling. It is required to consider different practical cases in blasting based on blasting designs and rock mechanics regarding to the materials available in the software.

Keywords: Flyrock; SPH; Simulation; Blasting; LS-Dyna.