

Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <http://jmes.humg.edu.vn>

A novel soft computing model for predicting blast - induced ground vibration in open - pit mines using gene expression programming



Hoang Nguyen^{1,2,*}, Nam Xuan Bui^{1,2}, Hieu Quang Tran^{1,2}, Giang Huong Thi Le³

¹ Department of Surface Mining, Mining Faculty, Hanoi University of Mining and Geology, 18 Vien st., Duc Thang ward, Bac Tu Liem dist., Hanoi, Vietnam.

² Center for Mining, Electro - Mechanical research, Hanoi University of Mining and Geology, 18 Vien st., Duc Thang ward, Bac Tu Liem dist., Hanoi, Vietnam

³ Department of Mathematical, Basic Sciences Faculty, Hanoi University of Mining and Geology, 18 Vien st., Duc Thang ward, Bac Tu Liem dist., Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25th Aug. 2020

Accepted 24th Sept. 2020

Available online 10th Oct. 2020

Keywords:

Artificial intelligence;
Gene expression programming;
Ground vibration;
Machine learning;
Open - pit mine.

ABSTRACT

The efforts of this study are to develop and propose a state - of - the - art model for predicting blast - induced ground vibration in open - pit mines with high accuracy and ability based on the gene expression programming (GEP) technique. 25 blasts were conducted in the Tan Dong Hiep quarry mines with a total of 83 blasting events that were collected for this study. The GEP method was then applied to develop a non - linear equation for predicting blast - induced ground vibration based on a variety of influential parameters. A traditional empirical equation, namely Sadovski, was also applied to compare with the proposed GEP model. The results indicated that the GEP model can predict blast - induced ground vibration in open - pit mines better than the Sadovski model with an RMSE of 0.986 and R^2 of 0.867. Meanwhile, the traditional empirical model (Sadovski) only provided an accuracy with an RMSE of 1.850 và R^2 of 0.767.

Copyright © 2020 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: nguyenhoang@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.KTLT2020.09



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <http://tapchi.humg.edu.vn>



Mô hình dự báo chấn động nổ mìn trên mỏ lộ thiên dựa trên phương pháp lập trình di truyền

Nguyễn Hoàng^{1, 2,*}, Bùi Xuân Nam^{1,2}, Trần Quang Hiếu^{1,2}, Lê Thị Hương Giang³

¹ Bộ môn Khai thác lộ thiên, Khoa Mỏ, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Việt Nam,

² Trung tâm Nghiên cứu Cơ Điện Mỏ, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Việt Nam;

³ Bộ môn Toán, Khoa khoa học cơ bản, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Việt Nam,

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 25/8/2020
Chấp nhận 24/9/2020
Đăng online 10/10/2020

Từ khóa:

Chấn động nổ mìn;
Lập trình di truyền;
Máy học;
Mỏ lộ thiên;
Trí tuệ nhân tạo.

TÓM TẮT

Các nỗ lực của nghiên cứu này nhằm phát triển và đề xuất một mô hình hiện đại để dự báo chấn động nổ mìn trên mỏ lộ thiên với mức độ chính xác và tin cậy cao dựa trên phương pháp lập trình di truyền. 25 vụ nổ đã được thực hiện tại cụm mỏ đá Tân Đông Hiệp (Bình Dương) với tổng số 83 sự kiện chấn động nổ mìn đã được thu thập phục vụ nghiên cứu này. Phương pháp lập trình di truyền sau đó đã được áp dụng để phát triển một phương trình phi tuyến tính dự báo chấn động nổ mìn dựa trên một loạt các yếu tố được cho là có ảnh hưởng tới chấn động nổ mìn. Phương trình thực nghiệm truyền thống của Sadovski cũng được áp dụng để so sánh và đánh giá với phương trình phi tuyến tính đã phát triển. Các kết quả cho thấy mô hình lập trình di truyền có khả năng dự báo chấn động nổ mìn với mức độ chính xác và tin cậy cao hơn so với mô hình thực nghiệm Sadovski với $RMSE = 0,986$ và $R^2 = 0,867$. Trong khi đó, mô hình thực nghiệm truyền thống Sadovski chỉ mang lại mức độ chính xác với $RMSE = 1,850$ và $R^2 = 0,767$.

© 2020 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

1. Mở đầu

Trên các mỏ lộ thiên, nổ mìn là một trong những công đoạn quan trọng nhằm phá vỡ đất đá (hoặc quặng) để làm tơi sơ bộ, chuẩn bị cho các khâu công nghệ sau đó như xúc bốc, vận tải, nghiền sàng. Nó được xem là phương pháp làm tơi sơ bộ phổ biến và kinh tế nhất trong số các kỹ thuật làm tơi sơ bộ hiện có trên các mỏ lộ thiên.

Tuy nhiên, theo các nhà khoa học, một lượng lớn năng lượng của chất nổ (khoảng 70% đến 80%) bị lãng phí và chuyển thành công vô ích, sinh ra các tác động tiêu cực tới môi trường xung quanh như: chấn động, sóng đập không khí, đất đá bay, hậu xung, bụi và khí độc (Nhữ Văn Bách và Nguyễn Văn Thành, 1996; Nhữ Văn Bách và nnk., 2006; Manoj Khandelwal và PK Kankar, 2011; Nhữ Văn Bách và nnk., 2012; Masoud Monjezi và nnk., 2013b; Nhữ Văn Bách và nnk., 2014; Danial Jahed Armaghani và nnk., 2015a; Mohd Nur Asmawisham Alel và nnk., 2018; Xuan - Nam Bui và nnk., 2019; Xuan-Nam Bui và nnk., 2019; Xuan - Nam Bui và nnk., 2020). Trong số các tác động

*Tác giả liên hệ

E - mail: nguyenhoang@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.KTLT2020.09

tiêu cực đó, chấn động là một hiện tượng nguy hiểm, có thể gây ảnh hưởng nghiêm trọng tới cấu trúc của các công trình cần bảo vệ xung quanh, mất ổn định tầng và bờ mỏ, ảnh hưởng tới nước ngầm và gây tâm lý hoang mang, lo sợ cho dân cư nằm trong vùng bán kính ảnh hưởng của nổ mìn. Do đó, việc dự báo chấn động sinh ra do nổ mìn một cách hợp lý có thể giảm thiểu được các vấn đề môi trường do hoạt động nổ mìn trên các mỏ lộ thiên gây ra.

Trong thực tế, cường độ sóng chấn động nổ mìn là yếu tố được quan tâm đặc biệt. Nó được đại diện bằng tốc độ dao động nền đất cực đại (peak particle velocity - PPV) và được sử dụng như một chỉ số quan trọng để đánh giá mức độ ảnh hưởng của chấn động nổ mìn tới các công trình xung quanh.

Để dự báo PPV, nhiều nhà khoa học đã tiếp cận các phương trình thực nghiệm dựa trên mối quan hệ tuyến tính của khối lượng thuốc nổ (hoặc khối lượng thuốc nổ cực đại trong mỗi đợt nổ vi sai) và khoảng cách giám sát chấn động (Saeid R Dindarloo, 2015; S Ghoraba và nnk., 2016; Daniel Ainalis và nnk., 2017; Vivek K Himanshu và nnk., 2018). Tuy nhiên, các kết quả cho thấy việc giải thích PPV bằng các phương trình thực nghiệm chỉ dựa trên hai yếu tố này thường mang lại mức độ tin cậy không cao. Trong khi đó, nhiều yếu tố ảnh hưởng khác bao gồm cả các yếu tố có thể kiểm soát (đường căn chân tầng, các thông số mạng nổ, chiều dài cột bua, chỉ tiêu thuốc nổ) và các yếu tố không thể kiểm soát (tính chất cơ lý của đất đá, điều kiện địa chất, địa vật lý) cũng có ảnh hưởng đáng kể tới chấn động nổ mìn trên mỏ lộ thiên (Manoj Khandelwal và TN Singh, 2007; Masoud Monjezi và nnk., 2016; Hoang Nguyen và nnk., 2019).

Trong những năm gần đây, các mô hình tính toán mềm dựa trên kỹ thuật học máy và trí tuệ nhân tạo đã được phát triển và ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực này. Điển hình phải kể đến các nhà khoa học nổi tiếng trên thế giới trong lĩnh vực dự báo chấn động nổ mìn như Danial Jahed Armaghani (D Jahed Armaghani và nnk., 2014; Danial Jahed Armaghani và nnk., 2015b; Danial Jahed Armaghani và nnk., 2018), Manoj Khandelwal (Manoj Khandelwal và TN Singh, 2006, 2007, 2009; Manoj Khandelwal và nnk., 2010; Manoj Khandelwal, 2011; Manoj Khandelwal và nnk., 2011), M. Monjezi (M

Monjezi và nnk., 2010; Monjezi và nnk., 2011; M Monjezi và nnk., 2011; Masoud Monjezi và nnk., 2013a; Masoud Monjezi và nnk., 2016) và một số nhà khoa học khác. Các mô hình tính toán mềm đã và đang được phát triển mạnh mẽ ở các quốc gia phát triển (Mỹ, Úc, Trung Quốc, Malaysia, Ấn Độ, Iran...). Tuy nhiên các nghiên cứu phát triển các mô hình tính toán mềm để dự báo chấn động nổ mìn tại các mỏ lộ thiên Việt Nam vẫn còn nhiều hạn chế. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã nghiên cứu và phát triển một mô hình tính toán mềm để dự báo chấn động nổ mìn trên mỏ lộ thiên sử dụng kỹ thuật lập trình di truyền. Cụm mỏ đá Tân Đông Hiệp (Bình Dương) được chọn làm nghiên cứu điển hình và một phương trình phi tuyến tính sẽ được đề xuất để dự báo chấn động nổ mìn cho khu vực này.

2. Phương pháp nghiên cứu

Mục tiêu chính của nghiên cứu này là đề xuất một mô hình phi tuyến tính dự báo chấn động nổ mìn cho các mỏ lộ thiên, điển hình là cụm mỏ đá Tân Đông Hiệp. Do đó, kỹ thuật lập trình di truyền đã được áp dụng để phát triển một phương trình phi tuyến tính cho mục đích trên. Ngoài ra, một phương trình thực nghiệm dạng tuyến tính vốn dĩ đang được sử dụng rộng rãi để ước lượng chấn động nổ mìn cũng sẽ được phát triển để so sánh với phương trình phi tuyến tính đề xuất. Các kết quả so sánh là những căn cứ quan trọng để đánh giá mối quan hệ giữa chấn động nổ mìn và các yếu tố ảnh hưởng tới chúng.

Lập trình di truyền là một phương pháp học máy để khai phá dữ liệu, và được giới thiệu đầu tiên bởi Candida Ferreira (2001). Nó được xem là một thuật toán động có khả năng giải quyết hầu hết mọi vấn đề (hồi quy, phân loại, logistic, chuỗi thời gian). Trong lập trình di truyền, các cá thể được coi như những nhiễm sắc thể tuyến tính với chiều dài cố định. Chúng có thể được thể hiện thông qua cấu trúc cây với các kích thước và hình dạng khác nhau (Saeid R Dindarloo, 2015). Các thành phần của thuật toán lập trình di truyền bao gồm 5 thành phần chính: các thiết lập đầu - cuối, các hàm tính toán, hàm mục tiêu, các toán tử và điều kiện dừng. Cơ chế hoạt động của thuật toán lập trình di truyền được thực hiện qua 5 bước sau:

- Bước 1: Tạo một số lượng nhiễm sắc thể ngẫu nhiên dựa trên số lượng các cá thể;

- Bước 2: Các nhiệm sắc thể của các cá thể ban đầu được biểu diễn dưới dạng cây và các phương trình toán học;

- Bước 3: Đánh giá mức độ phù hợp của mỗi nhiệm sắc thể dựa trên hàm mục tiêu. Nếu điều kiện dừng chưa thỏa mãn, giá trị tốt nhất của thể hệ cá thể đầu tiên sẽ được lựa chọn dựa trên phương pháp phân tích biểu đồ tròn;

- Bước 4: Các toán tử di truyền được áp dụng để đột biến, đảo ngược, chuyển vị, và tái tổ hợp các thể hệ trước đó nhằm tạo ra một thể hệ cá thể mới;

- Bước 5: Lặp lại bước 3 cho đến khi thỏa mãn điều kiện dừng hoặc hàm mục tiêu.

Để so sánh với mô hình lập trình di truyền, phương trình thực nghiệm của Sadovski (2004) (một phương trình thực nghiệm đang được áp dụng phổ biến tại Việt Nam) đã được xem xét và áp dụng. Nó được mô tả thông qua một phương trình dạng tuyến tính như sau:

$$PPV = k \left(\frac{\sqrt{Q}}{D} \right)^m \quad (1)$$

Trong đó: Q - Khối lượng thuốc nổ, kg; D - Khoảng cách từ bãi nổ tới vị trí cần xác định cường độ chấn động nổ mìn, m; k và m - các hệ số khu vực.

3. Khu vực nghiên cứu và dữ liệu sử dụng

3.1. Khu vực nghiên cứu

Cụm mỏ Tân Đông Hiệp - nơi bao gồm 4 mỏ đá vật liệu xây dựng khác nhau: Khoáng Sản, Mùng 3 - 2, Trung Thành và Tân An đã được chọn làm khu vực nghiên cứu điển hình do có điều kiện khai thác

đặc biệt (như được minh họa trong Hình 1). Theo đó, 4 mỏ đá vật liệu xây dựng này gần như đã khép biên giới lại thành một. Xung quanh cụm mỏ là các công trình như đường sắt Bắc - Nam, đường cao tốc, đường ống cấp nước sạch, và khu vực dân cư. Khoảng cách tới các khu vực này là rất nhỏ (dưới 100m). Do đó, ảnh hưởng của chấn động nổ mìn tới những khu vực này là không nhỏ. Việc dự báo chính xác chấn động nổ mìn cho cụm mỏ Tân Đông Hiệp có ý nghĩa quan trọng trong việc kiểm soát và giảm thiểu các tác động tiêu cực của chấn động nổ mìn tới môi trường xung quanh, đặc biệt là các công trình có tính chất trọng yếu và cố định.

3.2. Dữ liệu nghiên cứu

Để thực hiện nghiên cứu này, 25 vụ nổ đã được thực hiện và giám sát chấn động nổ mìn. Các thiết bị chuyên dụng như Micromate và Blastmate III đã được sử dụng để ghi lại cường độ chấn động do các vụ nổ tại cụm mỏ này gây ra. Mỗi vụ nổ được giám sát bởi 3÷4 thiết bị. Do đó, tổng số 83 sự kiện của chấn động nổ mìn đã được ghi lại ở các vị trí khác nhau.

Các hộ chiếu nổ mìn của các vụ nổ cũng được thu thập để trích xuất các thông số nổ mìn như: khối lượng thuốc nổ (Q), chiều cao tầng (H), chiều sâu lỗ khoan (L), khoảng cách giữa các hàng lỗ khoan (b), đường căn chân tầng (W), chỉ tiêu thuốc nổ (q) và chiều cao cột bua (L_b). Để xác định khoảng cách giám sát chấn động nổ mìn (D), các thiết bị GPS đã được sử dụng. Dữ liệu được minh họa thông qua biểu đồ phân bố dữ liệu (Hình 2).



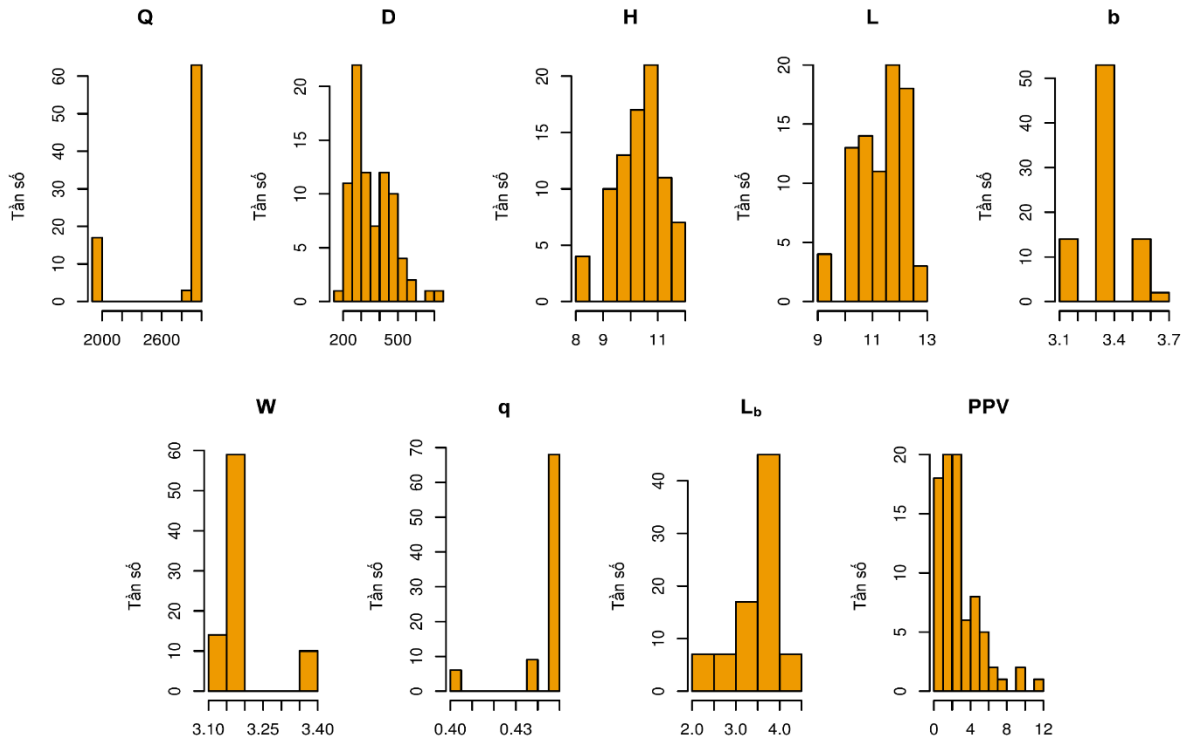
Hình 1. Cụm mỏ đá Tân Đông Hiệp và các khu vực lân cận.

4. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

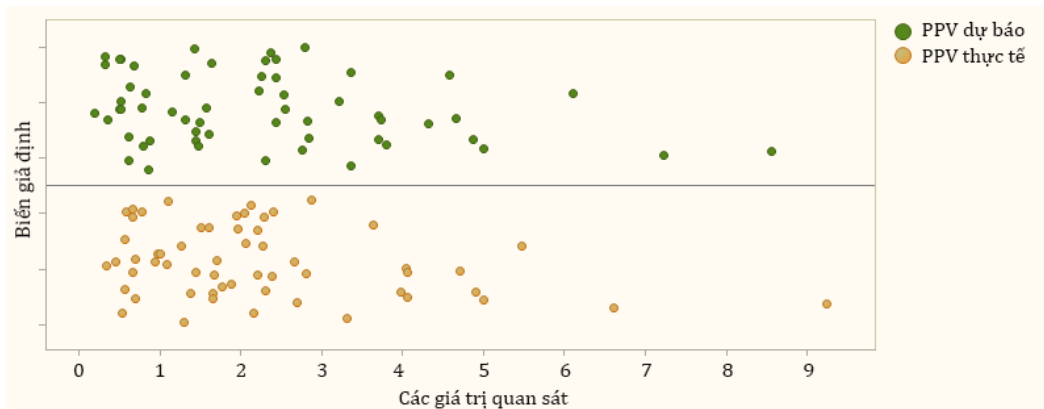
Để phát triển mô hình lập trình di truyền, bộ dữ liệu đã được chia ngẫu nhiên thành 2 phần: 70% tổng số sự kiện chấn động nổ mìn (58 sự kiện) được sử dụng để huấn luyện các mô hình, 30% còn lại (25 sự kiện) được sử dụng để kiểm tra hiệu suất của các mô hình sau khi huấn luyện.

Các toán tử của biểu hiện di truyền được thiết đặt với 30 nhiễm sắc thể ban đầu và 5 cấu trúc gen khác nhau đã được sử dụng. Sai số gốc bình quân phương (RMSE) đã được sử dụng làm hàm mục

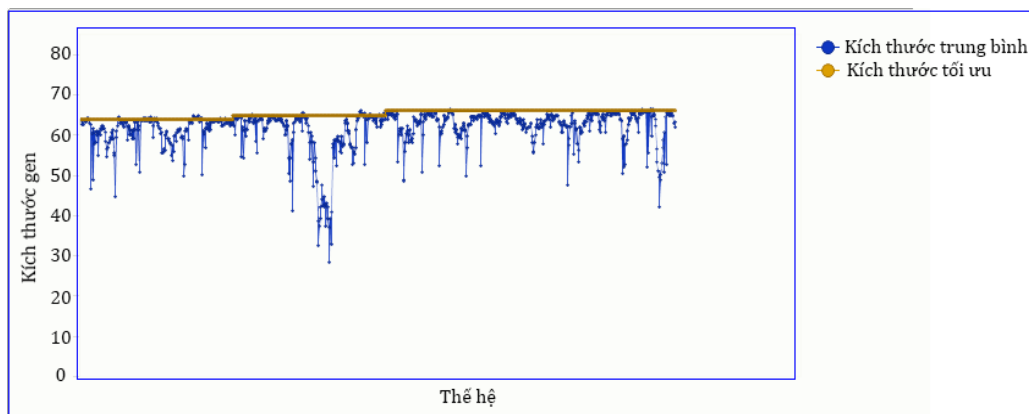
tiêu trong quá trình phát triển mô hình lập trình di truyền. Giá trị RMSE nhỏ nhất tương ứng với mô hình dự báo PPV tốt nhất. Quá trình tìm kiếm và di truyền được lặp lại 1000 lần để xác định giá trị tốt nhất cho mỗi thể hệ. Ngoài ra, chiến thuật tiến hóa tối ưu đã được áp dụng trong quá trình phát triển mô hình này. Cuối cùng, một mô hình lập trình di truyền tối ưu đã được thiết lập. Quá trình phát triển mô hình lập trình di truyền được minh họa thông qua biểu đồ phân bố xếp chồng (Hình 3) và biểu đồ di truyền (Hình 4). Phương trình di truyền dự báo chấn động nổ mìn cho khu vực cụm mỏ đá Tân Đông Hiệp trình bày trong phương trình (2).



Hình 2. Biểu đồ phân bố dữ liệu sử dụng.



Hình 3. Biểu đồ phân bố xếp chồng các giá trị PPV thực tế và PPV dự báo trong quá trình huấn luyện mô hình lập trình di truyền.



Hình 4. Biểu đồ di truyền thể hiện các thế hệ và nhiễm sắc thể thông qua kích thước của gen.

PPV

$$= \log(\min(6,658(H$$

$$+ q), \max(3,404, \min(b, L_b))) \left(\begin{aligned} & \left(1 + 8,573 \frac{1}{D^2 - L} + \max((W + 8,355), b^2 - \log 7, 389b) \right) \\ & + \frac{\frac{H^2 + Q}{2} + 3,46}{2} \times (b \times L_b - 1,114) \\ & + \tan \left(\frac{0,452 + \frac{6,047 + \max((6,047 - L_b), (L_b - q))}{2}}{2} \right) \end{aligned} \right) \quad (2)$$

Đối với phương trình thực nghiệm Sadovski (2004), kỹ thuật phân tích hồi quy đa biến đã được thực hiện để xác định các hệ số khu vực k và m . Phương trình thực nghiệm áp dụng dự báo chấn động nổ mìn cho cụm mỏ Tân Đông Hiệp theo Sadovski (2004) cuối cùng đã được xác định theo phương trình (3).

$$PPV = 1181.334 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{D} \right)^{2.015} \quad (3)$$

Để đánh giá mức độ chính xác và hiệu suất của hai mô hình đã phát triển (mô hình lập trình di truyền và mô hình thực nghiệm Sadovski), hai chỉ tiêu thống kê là RMSE và hệ số xác định R^2 đã được sử dụng. Các hiệu suất của các mô hình được tính toán trên cả bộ dữ liệu huấn luyện và bộ dữ liệu thử nghiệm. Các kết quả tính toán hiệu suất của hai mô hình được liệt kê trong Bảng 1.

Bảng 1. Kết quả dự báo PPV của các mô hình.

Mô hình	Huấn luyện		Kiểm tra	
	RMSE	R2	RMSE	R2
Sadovski	0,901	0,733	1,850	0,767
Lập trình di truyền	0,651	0,865	0,986	0,867

Từ các kết quả trong Bảng 1 cho thấy hiệu suất và mức độ chính xác của mô hình lập trình di truyền cao hơn mô hình thực nghiệm Sadovski Xét về mặt toán học, mô hình lập trình di truyền là một phương trình phi tuyến tính mà tại đó cả 8 biến đầu vào đều tham gia để giải thích mối liên hệ giữa chúng với PPV. Trong khi đó, mô hình thực nghiệm Sadovski chỉ sử dụng 2 biến đầu vào (Q và D) và giải thích mối quan hệ với PPV bằng một phương trình tuyến tính đơn giản. Các phát hiện này cho thấy PPV nên được giải thích bằng một mối quan hệ phi tuyến tính với các yếu tố có ảnh hưởng.

Xét về mặt cấu trúc, phương trình phi tuyến tính dưới dạng di truyền được đề xuất trong nghiên cứu này phức tạp hơn rất nhiều so với phương trình tuyến tính Sadovski Tuy nhiên, hiệu suất và mức độ chính xác của nó là vượt trội so với phương trình thực nghiệm dạng tuyến tính. Hơn nữa, với sự phát triển vượt bậc của công nghệ thông tin và sự hỗ trợ của máy tính, các phương trình phi tuyến tính phức tạp không còn là mối quan ngại của các kỹ sư và các nhà khoa học trong quá trình tính toán. Vấn đề mấu chốt là tìm ra phương trình phi tuyến tính có khả năng giải thích

rõ ràng mối quan hệ với PPV đã được giải quyết bằng mô hình lập trình di truyền trong nghiên cứu này. Hình 4 cho thấy mối tương quan giữa các giá trị PPV thực tế và PPV dự báo dựa trên hai mô hình đã phát triển trong nghiên cứu này.

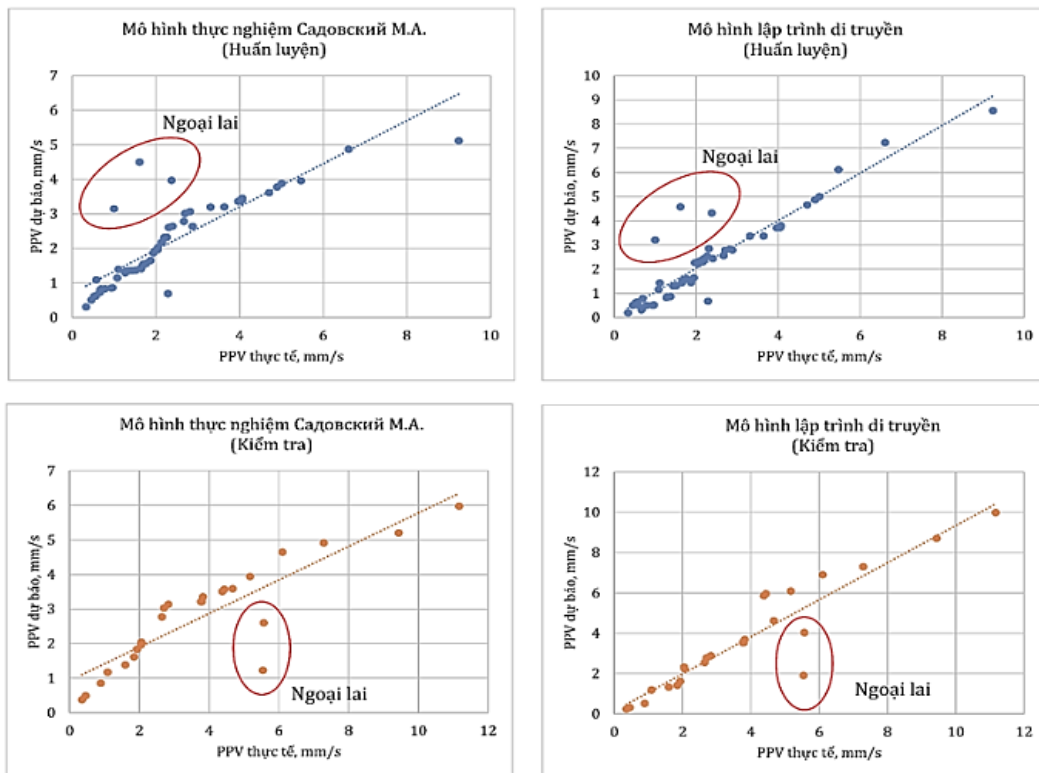
Các giá trị PPV thực tế và PPV dự báo trong Hình 5 cho thấy mức độ hồi quy của mô hình lập trình di truyền tốt hơn so với mô hình thực nghiệm Sadvovski. Mô hình lập trình di truyền có khả năng dự báo PPV với mức độ tin cậy cao trong toàn dải từ > 0 mm/s cho tới > 11m/s trên cả hai tập dữ liệu huấn luyện và kiểm tra. Đáng lưu ý, có 3 điểm dữ liệu có thể được xem là các điểm dữ liệu ngoại lai trong tập dữ liệu huấn luyện trên cả mô hình lập trình di truyền và mô hình thực nghiệm Sadvovski, và 2 điểm dữ liệu ngoại lai trên tập dữ liệu kiểm tra. Các điểm dữ liệu ngoại lai này dường như là những điểm khó có thể xử lý hoặc dự báo chính xác bởi cả hai mô hình đã phát triển. Tuy nhiên, quan sát kỹ 2 điểm dữ liệu ngoại lai trên bộ dữ liệu kiểm tra, mô hình lập trình di truyền dường như cung cấp các giá trị dự báo gần với các giá trị thực tế hơn mô hình thực nghiệm Sadvovski. Phát hiện này cho thấy mô hình lập trình di truyền còn có khả năng xử lý và dự báo các dữ liệu chấn động nổ mìn ngoại lai tốt hơn mô hình thực

nghiệm truyền thống Sadvovski. Các dữ liệu ngoại lai này có thể còn do ảnh hưởng của các yếu tố không thể kiểm soát như tính chất cơ lý của đất đá, điều kiện địa chất.

5. Kết luận

Nổ mìn là một công đoạn không thể thiếu và không thể tách rời trong quá trình khai thác mỏ lộ thiên. Tuy nhiên, các tác động tiêu cực tới môi trường xung quanh là rất lớn và cần phải được kiểm soát, giảm thiểu. Nghiên cứu này đã phát triển và đề xuất một mô hình dự báo chấn động nổ mìn mới dựa trên phương pháp lập trình di truyền. Giải thuật di truyền đã đóng vai trò quan trọng trong việc xây dựng một phương trình phi tuyến tính phức tạp để dự báo chấn động nổ mìn với mức độ chính xác được cải thiện đáng kể so với mô hình thực nghiệm truyền thống.

Các kết quả của nghiên cứu này đã chỉ ra rằng chấn động nổ mìn có mối liên hệ phi tuyến tính với các thông số ảnh hưởng khác. Các hệ số của phương trình phi tuyến tính là lời giải cho các yếu tố không rõ ràng liên quan đến tính chất cơ lý của đất đá và điều kiện địa chất trong quá trình nổ mìn trên các mỏ lộ thiên.



Hình 5. Đồ thị tương quan giữa PPV thực tế và dự báo.

Với các phát hiện trên, mô hình lập trình di truyền nên được sử dụng để dự báo chấn động nổ mìn trong thực tế do nó có ưu điểm vượt trội về mức độ chính xác, và minh bạch trong quá trình tính toán. Không giống như những thuật toán học máy khác, mô hình lập trình di truyền được xem là một trong những “thuật toán hộp trắng” thay vì những “thuật toán hộp đen” phức tạp của các thuật toán học máy khác.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 105.99 - 2019.309.

Đóng góp của các tác giả

- Lên ý tưởng: Nguyễn Hoàng, Bùi Xuân Nam;
- Thu thập dữ liệu: Trần Quang Hiếu, Nguyễn Hoàng;
- Phân tích dữ liệu: Nguyễn Hoàng, Lê Thị Hương Giang;
- Phát triển mô hình: Nguyễn Hoàng;
- Viết bản thảo gốc: Nguyễn Hoàng, Bùi Xuân Nam, Trần Quang Hiếu, Lê Thị Hương Giang;
- Chỉnh sửa bản thảo: Bùi Xuân Nam, Nguyễn Hoàng.

Tài liệu tham khảo

- Daniel Ainalis, Olivier Kaufmann, Jean - Pierre Tshibangu, Olivier Verlinden, và Georges Kouroussis (2017). Modelling the source of blasting for the numerical simulation of blast - induced ground vibrations: a review. *Rock mechanics and rock engineering*, 50(1), 171 - 193.
- D Jahed Armaghani, M Hajihassani, E Tonnizam Mohamad, A Marto, và SA Noorani (2014). Blasting - induced flyrock and ground vibration prediction through an expert artificial neural network based on particle swarm optimization. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(12), 5383 - 5396.
- Danial Jahed Armaghani, Mohsen Hajihassani, Aminaton Marto, Roohollah Shirani Faradonbeh, và Edy Tonnizam Mohamad (2015a). Prediction of blast - induced air overpressure: a hybrid AI - based predictive

model. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(11), 666.

Danial Jahed Armaghani, Mahdi Hasanipanah, Hassan Bakhshandeh Amnieh, và Edy Tonnizam Mohamad (2018). Feasibility of ICA in approximating ground vibration resulting from mine blasting. *Neural Computing and Applications*, 29(9), 457 - 465.

Danial Jahed Armaghani, Ehsan Momeni, Seyed Vahid Alavi Nezhad Khalil Abad, và Manoj Khandelwal (2015b). Feasibility of ANFIS model for prediction of ground vibrations resulting from quarry blasting. *Environmental earth sciences*, 74(4), 2845 - 2860.

Mohd Nur Asmawisham Alel, Mark Ruben Anak Upom, Rini Asnida Abdullah, và Mohd Hazreek Zainal Abidin. Optimizing Blasting's Air Overpressure Prediction Model using Swarm Intelligence. In *Journal of Physics: Conference Series*, 2018 (Vol. 995, pp. 012046, Vol. 1): IOP Publishing

Nhữ Văn Bách, Bùi Xuân Nam, Nguyễn Đình An, và Trần Khắc Hùng (2012). Phương pháp xác định tốc độ dao động của nền đất khi nổ mìn vi sai phi điện. *Tạp chí Khoa học kỹ thuật Mỏ - Địa chất*, 38/2012, 25 - 28.

Nhữ Văn Bách, Lê Văn Quyển, Bùi Xuân Nam, Nguyễn Đình An, và Nhữ Văn Phúc (2006). Những biện pháp giảm thiểu tác dụng chấn động khi nổ mìn ở mỏ Núi Béo. *Tạp chí Khoa học kỹ thuật Mỏ - Địa chất*, 14/2006, 58 - 62.

Nhữ Văn Bách, Lê Văn Quyển, Lê Ngọc Ninh, và Nguyễn Đình An (2014). *Công nghệ nổ mìn hiện đại với lỗ khoan đường kính lớn áp dụng cho các mỏ đá vật liệu xây dựng của Việt Nam*. Hà Nội: Khoa học Tự nhiên và Công nghệ.

Nhữ Văn Bách, và Nguyễn Văn Thành (1996). Ảnh hưởng các vụ nổ lớn và một số biện pháp bảo vệ công trình. *Tạp chí Công nghiệp mỏ*, 4/1996, 13 - 14.

Xuan - Nam Bui, Yosoon Choi, Victor Atrushkevich, Hoang Nguyen, Quang - Hieu Tran, Nguyen Quoc Long, và nnk. (2020). Prediction of Blast - Induced Ground Vibration Intensity in Open - Pit Mines Using Unmanned Aerial Vehicle and a Novel Intelligence System.

- Natural Resources Research*, 29(2), 771 - 790, doi:10.1007/s11053 - 019 - 09573 - 7.
- Xuan - Nam Bui, Pirat Jaroonpattanapong, Hoang Nguyen, Quang - Hieu Tran, và Nguyen Quoc Long (2019). A novel Hybrid Model for predicting Blast - induced Ground Vibration Based on k - nearest neighbors and particle Swarm optimization. *Scientific Reports*, 9(1), 1 - 14.
- Xuan-Nam Bui, Hoang Nguyen, Quang Hieu Tran, Hoang-Bac Bui, Quoc Long Nguyen, Dinh An Nguyen, và nnk. (2019). A Lasso and Elastic - Net Regularized Generalized Linear Model for Predicting Blast - Induced Air Over - pressure in Open - Pit Mines. *Inżynieria Mineralna*, 21.
- Saeid R Dindarloo (2015). Prediction of blast - induced ground vibrations via genetic programming. *International Journal of Mining Science and Technology*, 25(6), 1011 - 1015.
- Candida Ferreira (2001). Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. *arXiv preprint cs/0102027*.
- S Ghoraba, M Monjezi, N Talebi, D Jahed Armaghani, và MR Moghaddam (2016). Estimation of ground vibration produced by blasting operations through intelligent and empirical models. *Environmental earth sciences*, 75(15), 1137.
- Vivek K Himanshu, MP Roy, AK Mishra, Ranjit Kumar Paswan, Deepak Panda, và PK Singh (2018). Multivariate statistical analysis approach for prediction of blast - induced ground vibration. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(16), 460.
- Manoj Khandelwal (2011). Blast - induced ground vibration prediction using support vector machine. *Engineering with Computers*, 27(3), 193 - 200.
- Manoj Khandelwal, và PK Kankar (2011). Prediction of blast - induced air overpressure using support vector machine. *Arabian Journal of Geosciences*, 4(3 - 4), 427 - 433.
- Manoj Khandelwal, PK Kankar, và SP Harsha (2010). Evaluation and prediction of blast induced ground vibration using support vector machine. *Mining Science and Technology (China)*, 20(1), 64 - 70.
- Manoj Khandelwal, D Lalit Kumar, và Mohan Yellishetty (2011). Application of soft computing to predict blast - induced ground vibration. *Engineering with Computers*, 27(2), 117 - 125.
- Manoj Khandelwal, và TN Singh (2006). Prediction of blast induced ground vibrations and frequency in opencast mine: a neural network approach. *Journal of Sound and Vibration*, 289(4), 711 - 725.
- Manoj Khandelwal, và TN Singh (2007). Evaluation of blast - induced ground vibration predictors. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(2), 116 - 125.
- Manoj Khandelwal, và TN Singh (2009). Prediction of blast - induced ground vibration using artificial neural network. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(7), 1214 - 1222.
- Monjezi, M Ghafurikalajahi, và A Bahrami (2011). Prediction of blast - induced ground vibration using artificial neural networks. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(1), 46 - 50.
- M Monjezi, M Ahmadi, M Sheikhan, A Bahrami, và AR Salimi (2010). Predicting blast - induced ground vibration using various types of neural networks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(11), 1233 - 1236.
- M Monjezi, M Ghafurikalajahi, và A Bahrami (2011). Prediction of blast - induced ground vibration using artificial neural networks. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(1), 46 - 50.
- Masoud Monjezi, M Baghestani, R Shirani Faradonbeh, M Pourghasemi Saghand, và D Jahed Armaghani (2016). Modification and prediction of blast - induced ground vibrations based on both empirical and computational techniques. *Engineering with Computers*, 32(4), 717 - 728.
- Masoud Monjezi, Mahdi Hasanipanah, và Manoj Khandelwal (2013a). Evaluation and prediction of blast - induced ground vibration

- at Shur River Dam, Iran, by artificial neural network. *Neural Computing and Applications*, 22(7 - 8), 1637 - 1643.
- Masoud Monjezi, A Mehrdanesh, A Malek, và Manoj Khandelwal (2013b). Evaluation of effect of blast design parameters on flyrock using artificial neural networks. *Neural Computing and Applications*, 23(2), 349 - 356.
- Hoang Nguyen, Xuan - Nam Bui, Quang - Hieu Tran, và Ngoc - Luan Mai (2019). A new soft computing model for estimating and controlling blast - produced ground vibration based on hierarchical K - means clustering and cubist algorithms. *Applied Soft Computing*, 77, 376 - 386, doi:10.1016/j.asoc.2019.01.042.
- Sadovski (2004). *Механическое действие воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований*: М.: Наука.