

Journal of Mining and Earth Sciences

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

Modelisation of fractured rock mass for open pit mining in Vietnam



Tuan Anh Nguyen ^{1,*}, Viet Van Pham ¹, Nam Xuan Bui ¹, Hoa Thu Thi Le ¹, Hai Thi Le ¹, Bao Dinh Tran ¹, Hanh Minh Thi Le ^{1,2}

¹ Mining Faculty, Hanoi University of Mining and Geology, Vietnam

² Warsaw University of Life Sciences, Poland

ARTICLE INFO

Article history:
Received 08th Sept. 2020
Revised 24th Sept. 2020
Accepted 10th Oct. 2020

Keywords:

Fractured rock mass,
Open-pit mine,
Modelling,
Vietnam.

ABSTRACT

In open pit mining, besides the value of the minerals obtained, the cost of waste rock removal determines the efficiency of the mining operation. The paper introduces the rock mass data processing method and modelisation of fractured rock mass to serve the optimal calculation of technological stages in mining. This code is a discrete fracture network (DFN) code that couple geometrical block system construction based on modelisation stochastic with RESOBLOK simulations. The method of three-dimensional modeling (3D) of the fractured rock mass in the quarry is based on the rock mass data, the geometrical parameters of the open pit mine. From there, the rock mass simulation models were used in the analysis of the stability analysis of open pit benches, the optimization of the blast design parameters at overburden benches, project construction materials, and technology projects for block stone extraction. An application in some open pit mines such as quarries of Vietnam is presented.

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

*Corresponding author

E - mail: nguyenanhtuan@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.KTLT2020.07



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

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



Mô phỏng hệ khe nứt trong khối đá phục vụ khai thác mỏ lộ thiên ở Việt Nam

Nguyễn Anh Tuấn^{1,*}, Phạm Văn Việt¹, Bùi Xuân Nam¹, Lê Thị Thu Hoa¹, Lê Thị Hải¹, Trần Đình Bão¹, Lê Thị Minh Hạnh^{1,2}

¹ Khoa Mỏ, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Việt Nam

² Đại học Khoa học Đời sống Warsaw, Ba Lan

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:
 Nhận bài 08/9/2020
 Sửa xong 24/9/2020
 Chấp nhận đăng 10/10/2020

Từ khóa:
 Khe nứt,
 Mỏ lộ thiên,
 Mô phỏng,
 Việt Nam.

TÓM TẮT

Trong khai thác lộ thiên, bên cạnh giá trị của khoáng sản thu được thì chi phí bóc đá quyết định tới hiệu quả của hoạt động khai thác. Bài báo giới thiệu phương pháp xử lý dữ liệu khối đá và mô hình mô phỏng khối đá để phục vụ tính toán tối ưu các khâu công nghệ trong khai thác. Phương pháp mô hình ba chiều (3D) môi trường khối đá trong mỏ dựa trên các số liệu thực tế của khối đá, các thông số hình học của mỏ lộ thiên. Từ đó, các mô hình mô phỏng khối đá được sử dụng trong phân tích ổn định bờ mỏ, tối ưu mạng lỗ khoan nổ mìn cho mỏ đá vật liệu xây dựng, và hỗ trợ tính trữ lượng, tối ưu các thông số công nghệ khai thác đá khối. Kết quả mô hình mô phỏng khối đá được áp dụng cho một số điều kiện mỏ lộ thiên ở Việt Nam.

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

1. Mở đầu

Trong các mỏ đá, đặc điểm cấu trúc khối đá đóng vai trò quan trọng và quyết định tới việc lựa chọn công nghệ khai thác, đồng bộ thiết bị và các thông số hệ thống khai thác. Đặc tính cơ học của khối đá, thành phần khoáng vật, tính liên tục và màu sắc, hoa văn của đá là các chỉ tiêu quan trọng tương ứng với yêu cầu sử dụng đá thành phẩm. Trên cơ sở đó, công nghệ khai thác, bóc tách đá được lựa chọn cho phù hợp với các mỏ đá làm vật liệu san lấp, đắp (đá hộc), đá vật liệu VLXD thông thường (đá cấp phối) và đá khối sản xuất đá ốp lát,

mỹ nghệ.

Khối đá là môi trường đặc biệt, nó có thể là môi trường liên tục, gián đoạn; đẳng hướng, không đẳng hướng; bền vững, kèm bền vững chúng đan xen nhau phức tạp (Hình 1). Các đặc tính môi trường khối đá không liên tục là những nguyên nhân chính gây khó khăn trong khai thác và làm tăng chi phí khai thác. Trong nghiên cứu này, chúng tôi tập trung nghiên cứu đặc điểm phân bố khe nứt trong không gian khối đá, từ đó sử dụng các phương pháp mô hình mô phỏng khối đá một cách ngẫu nhiên phù hợp với thực tế nhằm phục vụ quá trình khai thác mỏ lộ thiên một cách hiệu quả hơn.

Những khe nứt tự nhiên có thể là những mặt phẳng hoặc cong tồn tại và chia tách khối đá đồng nhất thành các khối. Mỗi khe nứt được định nghĩa là "tất cả các gián đoạn cơ học và độ bền tách nhỏ

*Tác giả liên hệ

E - mail: nguyenanhtuan@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.KTLT2020.07

trong khối đá” (Priest, 1993). Khe nứt có thể hình thành tự nhiên do hoạt động kiến tạo và lịch sử hình thành địa chất và cấu trúc khu vực hoặc nhân tạo, được tạo ra bởi các hoạt động của con người như quá trình khoan nổ, xúc bốc trong khối đá. Các thông số đặc trưng của khe nứt trong khối đá được thể hiện trên Hình 1. Ở đây, chúng tôi sử dụng và thống nhất thuật ngữ "gián đoạn", "nứt nẻ" hoặc "khe nứt" trong các mô tả và sử dụng trong tính toán thiết kế tương ứng với các kích thước mở rộng của nó từ centimet đến hàng mét ứng dụng trong các điều kiện mỏ địa chất.

Trong thực tế, để xác định vị trí một khe nứt thường chỉ cần xác định góc phương vị hướng dốc (α) và góc dốc (β). Có thể sử dụng la bàn đo trực tiếp các thông số ngoài hiện trường (Hình 1b). Các quan sát và khảo sát khe nứt trên một khu vực nào đó thường được thực hiện dọc theo một tuyến khảo sát trên bề mặt theo các hướng khác nhau, vết lộ địa hình, vách đá trên sườn dốc của khu vực khai thác, hoặc bắt đầu từ hướng của khe nứt của lõi lỗ khoan thăm dò, hoặc phân tích từ các ảnh bề mặt địa hình, sườn tầng.

Tại các khu vực mỏ nghiên cứu cụ thể, chúng ta không thể thu thập hết và chính xác tất cả các khe nứt cũng như đủ những đặc điểm khe nứt của khối đá do tính phức tạp và không rõ ràng về điều kiện địa chất; phương pháp thu thập số liệu; khả năng quan sát. Do đó, việc thu thập số liệu đủ lớn (hoặc tối thiểu), sau đó xử lý số liệu khe nứt đảm bảo độ chính xác đóng vai trò quyết định đến độ tin cậy khi sử dụng chúng vào mô hình mô phỏng

khối đá phục vụ cho các nhiệm vụ cụ thể như khi thác an toàn hiệu quả các mỏ đá.

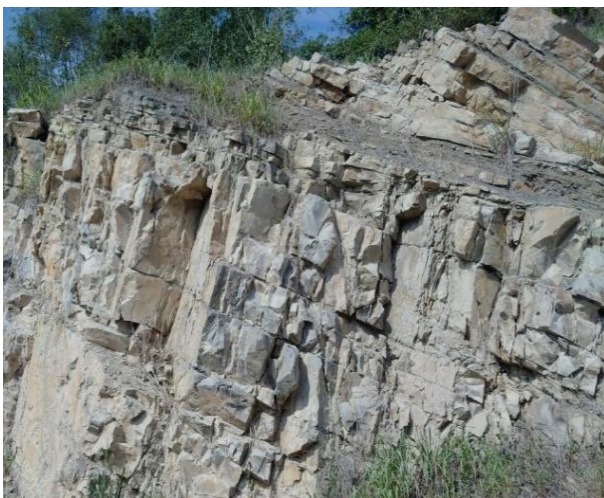
Trong phần sau của bài báo, chúng tôi sẽ giới thiệu các phương pháp phân tích dữ liệu khe nứt và mô phỏng ngẫu nhiên mô hình khối đá và kết quả mô hình mô phỏng khối đá được giới thiệu áp dụng cho một số mỏ lộ thiên ở nước ta như khai thác hiệu quả mỏ đá VLXD thông thường, tính toán tối ưu thiết kế mạng khoan nổ mìn trên mỏ đá, phân tích đánh giá ổn định bờ mỏ và sườn dốc, tính trữ lượng và tối ưu các thông số công nghệ khai thác mỏ đá khối.

2. Các thông số của khối đá và các mô hình mô phỏng khối đá

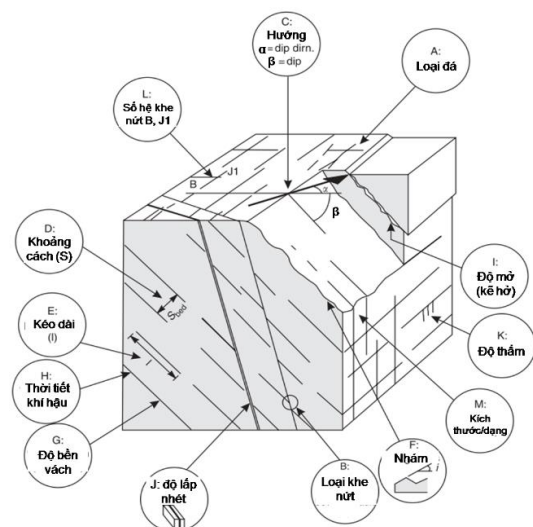
2.1. Các thông số cơ bản của khe nứt

Môi trường khối đá không liên tục, nó được đặc trưng bởi những khe nứt và các thông số đặc trưng của khe nứt và hệ khe nứt. Trong khối, thể nằm và vị trí của mặt phẳng khe nứt hoàn toàn được xác định trong không gian, các thông số cơ bản khe nứt và biểu diễn nó được giới thiệu trên Hình 2.

Các khe nứt có thể được biểu diễn bởi các vectơ pháp tuyến hoặc trục của hướng khe nứt (α_n, β_n) (Hình 2a). Chúng ta có thể xác định (α_n, β_n) từ giá trị (α_d, β_d) theo mối quan hệ sau: $\alpha_n = \alpha_d \pm 180^\circ$, trong đó «+» hoặc «-» tương ứng giá trị $0^\circ \leq \alpha_n \leq 360^\circ$; $\beta_n = 90^\circ - \beta_d$, $0^\circ \leq \beta_n \leq 90^\circ$, trong đó: α_d là phương vị hướng dốc (dip direction) và β_d là góc



(a)



(b)

Hình 1. Khối đá trong tự nhiên (a) và đặc tính của khối đá (b) (Ducan C. Wyllie, 1999)

dốc (dip). Mặt khe nứt có thể biểu diễn bởi các vectơ pháp tuyến đơn vị trong hệ trục tọa độ đề các $X(u_x, u_y, u_z)T$ (Hình 2b) (Jimenez-Rodriguez và Sitar, 2006). Mỗi liên hệ giữa hệ tọa độ đề các và các góc biểu diễn hướng của khe nứt được xác định như sau Priest (1993):

$$\begin{cases} u_x = \cos\alpha_n \cos\beta_n \\ u_y = \sin\alpha_n \cos\beta_n \\ u_z = \sin\beta_n \end{cases} \quad (1)$$

2.2. Hệ khe nứt

Một hệ khe nứt là tập hợp cấu trúc của các khe nứt có cùng nguồn gốc cũng như đặc điểm nứt nẻ và hướng tương đương, nó được biểu diễn trong Hình 3.

a) Phân bố hướng của hệ khe nứt

Nếu trong một hệ khe nứt có M khe nứt. Mặt khe nứt thứ i có vectơ pháp tuyến n_i tương ứng với hướng α_{ni} và góc dốc β_{ni} và trong hệ trục tọa độ đề các $X(n_{xi}, n_{yi}, n_{zi})$. Tổng vectơ pháp tuyến là r_n với $r_{xn} = \sum n_{xi}$, $r_{yn} = \sum n_{yi}$ và $r_{zn} = \sum n_{zi}$. Từ đó ta xác định được hướng trung bình của hệ khe nứt theo biểu thức sau:

$\alpha_n = \arctan(r_{xn}/r_{yn}) + Q$, $\beta_n = \arctan(r_{zn}/(r_{xn} + r_{yn}))^{0,5}$, trong đó: $Q=0^\circ$ nếu $r_{xn} \geq 0$ và $r_{yn} \geq 0$; $Q=180^\circ$ nếu $r_{xn} < 0$ và $r_{yn} \geq 0$ hoặc $r_{xn} < 0$ và $r_{yn} < 0$; $Q=360^\circ$ nếu $r_{xn} \geq 0$ và $r_{yn} < 0$.

Xác suất $P(\theta)$ là giá trị hướng của một khe nứt được chọn ngẫu nhiên trong một tập hợp tạo một

góc trong khoảng θ và $\theta+d\theta$ với giá trị hướng trung bình của hệ khe nứt phân bố như sau, (Priest, 1993):

$$P(\theta) = \frac{K \sin(\theta)}{e^{K-e^{-K}}} e^{K \cos\theta} d\theta \quad (2)$$

Với K là hệ số Fisher. Hệ số này có thể ước lượng suất phát từ tập hợp các khe nứt trong hệ như sau: $K \approx \frac{M}{M-|r_n|}$.

Có thể tính xác suất hướng của hệ khe nứt trong khoảng góc từ θ_1 và θ_2 :

$$P(\theta_1 < \theta < \theta_2) = \frac{e^{K \cos\theta_1} - e^{K \cos\theta_2}}{e^K - e^{-K}} \quad (3)$$

Nếu $\theta_1 = 0$, có:

$$P(<\theta) = \frac{e^K - e^{K \cos\theta}}{e^K - e^{-K}} \quad (4)$$

Với giá trị K lớn, biểu thức (4) có thể xác định như sau:

$$P(<\theta) \approx 1 - e^{K[\cos\theta - 1]} \quad (5)$$

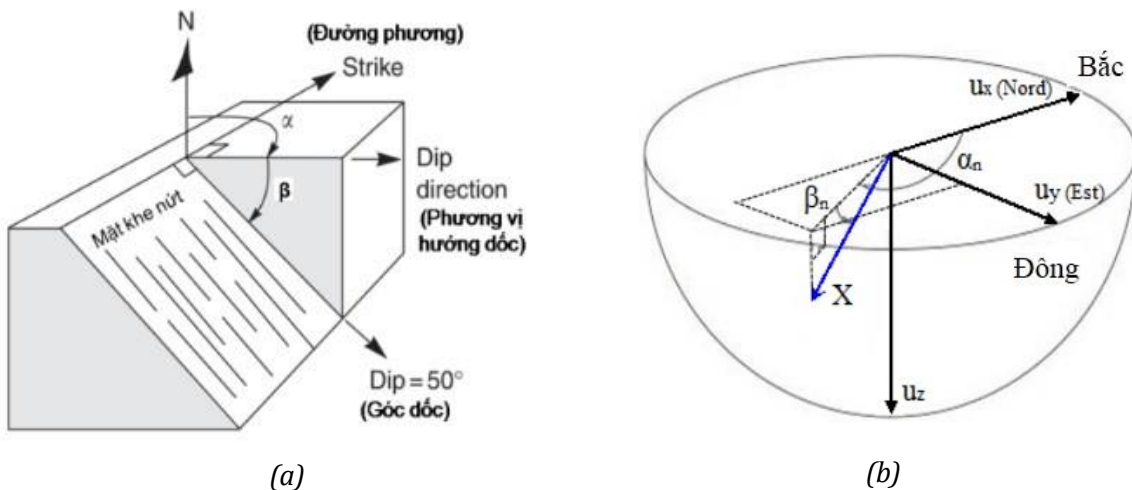
Xác định các khoảng tin cậy, Fisher đưa ra cách diễn đạt xác suất của một giá trị tổng vectơ r_n nhỏ hơn một góc θ với hướng trung bình của phân bố

là: $P_r(<\theta) \approx 1 - \left[\frac{M-|r_n|}{M-|r_n|\cos\theta} \right]^{M-1}$

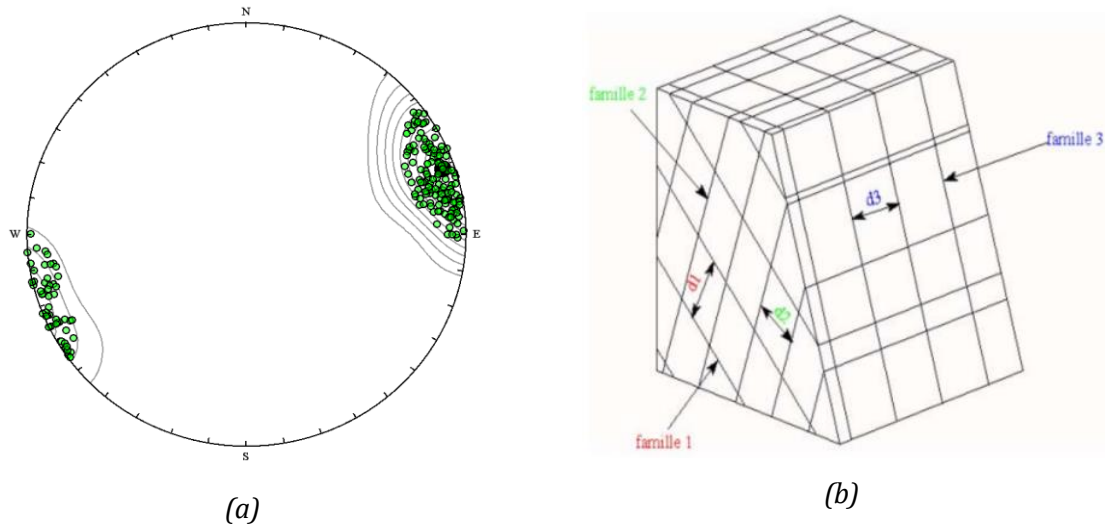
Với giá trị K lớn, có:

$$P(<\theta) \approx 1 - e^{K|r_n|[\cos\theta - 1]} \quad (6)$$

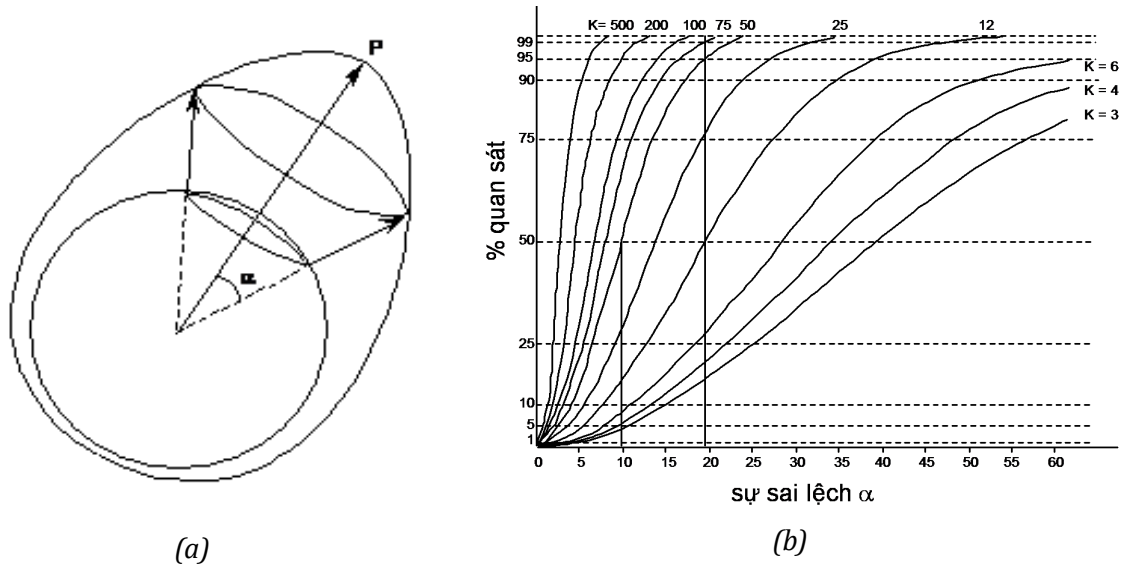
Trong khối đá nứt nẻ thông thường tồn tại một hoặc nhiều hệ khe nứt phân bố trong không



Hình 2. Kích thước hình học định nghĩa hướng của mặt phẳng khe nứt (a) Hướng của một mặt phẳng khe nứt: góc dốc (dip β) và góc phương vị hướng dốc (dip direction α) và (b) Biểu diễn vectơ pháp tuyến đơn vị mặt khe nứt trong hệ thống tọa độ Đề Các.



Hình 3. Phép chiếu Wulff trên bán cầu dưới với 195 khe nứt, hướng trung bình của hệ khe nứt (6,71) (a); 3 hệ khe nứt trên mô hình 3D (b) (Nguyễn A.T., 2015)



Hình 4. Phân bố Fisher trên mặt cầu, (a) hàm mật độ xác suất trên mặt cầu với góc hợp bởi trụ của phân bố; (b) hàm mật độ phân bố theo giá trị độ phân tán K và góc α (Mardia, 1972)

gian khối đá. Hướng của hệ khe nứt có thể phân bố theo quy luật phân bố Fisher trên mặt cầu với một hàm mật độ xác suất như trên Hình 4.

Ví dụ trên Hình 4, với giá trị $K = 50$ xác suất $P = 95\%$ tương ứng $\alpha = 20^\circ$ và với xác suất $P = 5\%$ thì $\alpha = 10^\circ$. Nghĩa là với 95% các vectơ pháp tuyến biến thiên một góc 20° xung quanh giá trị vectơ trung bình của hệ khe nứt. Nếu K là một giá trị lớn ($K > 1000$), với góc α rất nhỏ và các mặt khe nứt trong họ gần như song song với nhau.

b) Độ chéo góc giữa tuyến khảo sát thu thập số liệu với các khe nứt

Hướng chéo góc (δ) giữa tuyến khảo sát (*scanline*) thực hiện các phép đo thu thập khe nứt với các khe nứt cắt tuyến này cùng mức, các khe nứt cần hiệu chỉnh góc δ để xác định khoảng cách giữa các khe nứt trong cùng một hệ. Nếu coi mặt phẳng khe nứt có hướng vectơ pháp tuyến α_n và góc dốc β_n và mặt A. Xác suất, P_s với tuyến khảo sát có hướng α_s và góc cắm β_s cắt mặt phẳng khe nứt với tỉ lệ là A_s với phép chiếu A trên mặt phẳng pháp tuyến với tuyến khảo sát thì:

$$A_s = A \cos (\delta) \tag{7}$$

Với δ là góc giữa vectơ pháp tuyến của mặt khe nứt và tuyến khảo sát. Giá trị δ được xác định theo biểu thức sau:

$$(\delta) = |\cos(\alpha_n - \alpha_s) \cos\beta_n \cos\beta_s + \sin\beta_n \sin\beta_s| \quad (8)$$

Xác suất lớn nhất tương ứng $\delta = 0^\circ$ (tuyến khảo sát vuông góc với mặt của khe nứt) và xác suất nhỏ nhất với $\delta = 90^\circ$ (tuyến khảo sát song song với mặt khe nứt).

c) Tần số xuất hiện các khe nứt trên tuyến khảo sát

Quá trình hình thành các khe nứt trong khối đá thường rất phức tạp và giao cắt lẫn nhau. Khi tiến hành thực hiện các phép đo thu thập số liệu khe nứt, thông thường chúng ta coi sự giao cắt giữa khe nứt và tuyến khảo sát (*scanline*) là một hiện tượng ngẫu nhiên.

Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng hiện tượng này thường tuân theo phân bố Poisson. Nếu là phân bố các khe nứt với tần số λ , thì xác suất $P(k,x)$ cho chúng ta biết chính xác k sự kiện (ở đây là sự giao cắt giữa tuyến khảo sát với các khe nứt) sinh ra dạng khoảng cách chiều dài x trên tuyến, nó được xác định là:

$$P(k, x) = \frac{e^{-\lambda x} (\lambda x)^k}{k!} \quad (9)$$

Xác suất nếu không có sự kiện nào thì:

$$P(k, x) = e^{-\lambda x} \quad (10)$$

Với cùng lý do với quá trình Poisson có thể tạo ra hai kích thước về mật độ mặt và kể tới các sự kiện xuất hiện các khe nứt như các mặt phẳng. Khoảng cách khi đó có chiều dài x được thay thế và coi như khoảng cách giữa các mặt khe nứt. Trong không gian ba chiều, chúng ta sử dụng chỉ số mật độ thể tích, chi tiết nội dung này được giới thiệu ở mục dưới đây.

d) Khoảng cách giữa các khe nứt

Khoảng cách giữa các khe nứt là khoảng cách X_t giữa hai lần cắt liên tiếp của các khe nứt với đường thẳng tuyến khảo sát. Xác suất của X_t được coi là giá trị lớn nhất x với xác suất là không có khe nứt nào không cắt đoạn tuyến với giá trị chiều dài x.

$$P(X_t > x) = P(0, x) = e^{-\lambda x} \quad (11)$$

$$P(X_t \leq x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (12)$$

Hàm mật độ xác suất về khoảng cách giữa các khe nứt một các tổng quát là :

$$P(k, x) = e^{-\lambda x} \quad (13)$$

Thực chất đây là một hàm mũ lũy thừa âm với giá trị khoảng cách trung bình bằng $1/\lambda$ (với λ là tần số tuyến tính).

Phép đo khoảng cách thông thường chéo góc, tức là giá trị khoảng cách phụ thuộc vào sự kéo dài của các khe nứt và lệch một góc so với tuyến khảo sát lấy mẫu (*scanline*) một góc δ . Do đó, cần tìm giá trị khoảng cách thật là đường thẳng vuông góc giữa 2 mặt khe nứt liên tiếp trong cùng một hệ khe nứt và xác định theo biểu thức:

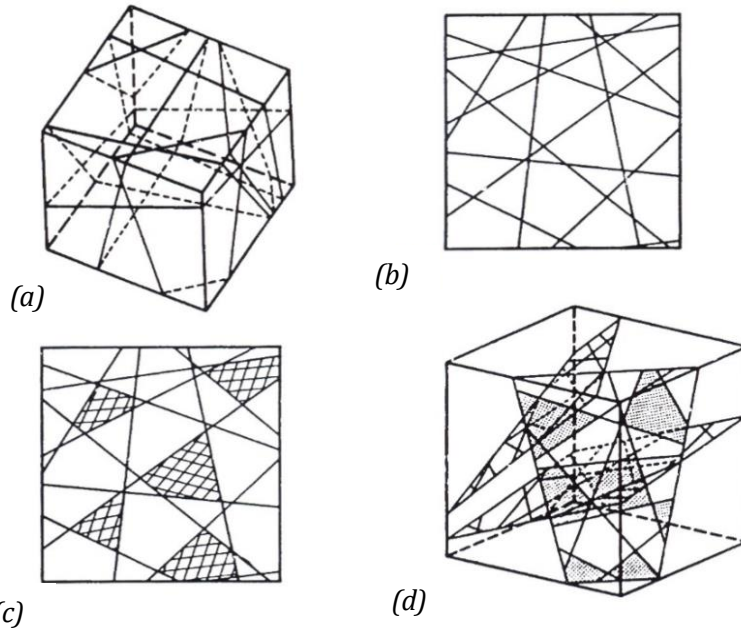
$$X_n = X_t \cos(\delta) \quad (14)$$

2.3. Mô hình mạng khe nứt trong khối đá

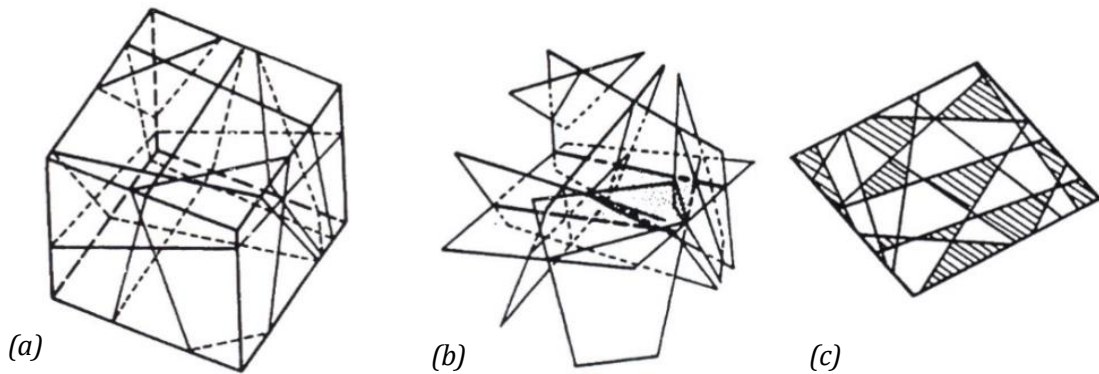
Các mặt khe nứt thường được xác định với vị trí chính xác hoặc ngẫu nhiên trong môi trường khối đá thông qua số ít số liệu thu thập được từ trên mặt hay từ lỗ khoan thăm dò. Phương pháp mô hình mô phỏng khối đá ngẫu nhiên được biểu diễn bằng giá trị trung bình về hướng của họ khe nứt, độ phân tán của hướng họ khe nứt, quy luật phân bố khoảng cách, và độ kéo dài và gián đoạn của hệ khe nứt. Các dạng hình học của khe nứt có thể là các mặt không xác định, ellíp, đĩa được hình thành trong quá trình kiến tạo.

Hiện nay có rất nhiều phương pháp mô hình mô phỏng khối đá, mà cụ thể trong nghiên cứu này là mạng khe nứt. Đầu tiên, mô hình khe nứt dạng đĩa của (Baecher và nnk., 1978; Dershowitz và Einstein, 1988) dựa trên giả thuyết về bán kính và kích thước của đĩa, nó được phát triển và ứng dụng rộng rãi trong ngành mỏ và cơ học đá. Hướng của khe nứt được định nghĩa theo quy luật phân bố Fisher. Độ kéo dài của khe nứt được định nghĩa bằng bán kính của đĩa theo cách xác định chính xác cho tất cả các khe nứt. Mô hình được (Dershowitz và Einstein, 1988) phát triển và sử dụng các phân bố hàm mũ và log-normal trong định nghĩa bán kính của các khe nứt dạng đĩa.

Mô hình Veneziano (Hình 5) được phát triển trên cơ sở các mặt và các đường thu thập số liệu theo quy luật Poisson. Mô hình này được phát triển trên các phân bố uniforme về hướng của các khe nứt (Priest và Hudson, 1976). Mô hình sử dụng phân bố mũ với khoảng cách giữa các khe



Hình 5. Mô hình Veneziano: (a) quá trình sơ cấp (mạng các mặt theo phân bố Poisson trong không gian 3D); (b) và (c) quá trình thứ cấp (quá trình phân bố Poisson 2D với các đa giác tạo thành từ các khe nứt); (d) mô hình khe nứt 3D (Dershowitz & Einstein, 1988)



Hình 6. Mô hình Dershowitz với (a) và (b) là quá trình sơ cấp (các mặt được tạo theo quá trình Poisson 3D và các đường khảo sát Poisson được hình thành cắt ngẫu nhiên); (c) quá trình thứ cấp hình thành các đa giác kín từ các hệ khe nứt

nứt trong hệ và chiều dài của các khe nứt (Dershowitz và Einstein, 1988).

Mô hình (Dershowitz, 1979) được phát triển từ mô hình Veneziano (Hình 6). Mô hình được phát triển từ 2 quá trình. Quá trình sơ cấp là mạng mặt theo phân bố Poisson được tạo ra trong không gian phân bố uniforme về hướng giống trong mô hình Veneziano. Quá trình thứ cấp bao gồm các phần quá trình tập hợp các đa giác kín được tạo bởi các khe nứt tồn tại trong khối đá (Dershowitz & Einstein, 1988).

Mô hình nhận diện kết hợp địa hình (topological identification) sử dụng phương pháp

giới thiệu biên giới các mặt khối. Tất cả các khối được biểu diễn đồng thời. Phương pháp này được phát triển bởi nhiều nhà khoa học như (Lin và nnk., 1987; Jing, 2000; Lu, 2002). Thuật toán cho phép nghiên cứu các khối thông số hình học khác nhau với khối lồi hoặc lõm với các mặt bất kỳ. Mô hình các phần tử rời rạc (DFN) được phát triển từ rất sớm, nó là phương pháp chia nhỏ không gian từ các mặt phẳng được phát triển đầu tiên bởi (Warburton, 1983) và sau đó là (Heliot, 1988). Các khe nứt được hình thành theo một trật tự xác định. Các miền ban đầu được chia thành 2 hoặc nhiều

khối bởi một hay một hệ khe nứt (Jing, 2003; Jing, 2000; Heliot, 1988) (Hình 7).

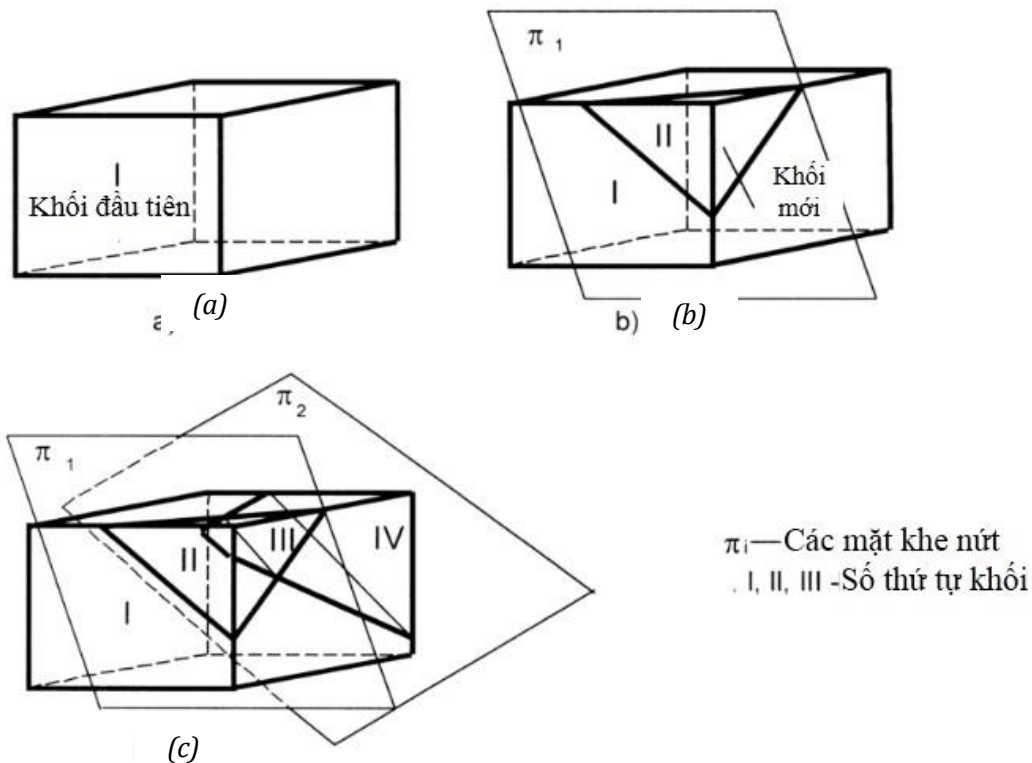
Các hệ khe nứt được định nghĩa bằng các phương pháp thống kê về hướng trung bình của hệ khe nứt (góc cắm, góc phương vị hướng dốc) và thông số K biểu diễn độ phân tán của hướng khe nứt quanh giá trị trung bình theo phân bố Langevin-Fisher; giá trị khoảng cách trung bình giữa các khe nứt trong hệ; quy luật phân tán của khoảng cách này và các thông số biểu diễn độ phân tán. Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng các công cụ tiên tiến xử lý số liệu khe nứt và mô phỏng hệ thống khe nứt này. Kết quả mô hình được sử dụng trong tối ưu một số thông số công nghệ khai thác đá khối và an toàn ổn định tầng trong quá trình khai thác. Chương trình mô hình RESOBLOK phát triển đầu tiên bởi LAEGO (phòng thí nghiệm Môi trường, Địa cơ học và Công trình thuộc Viện quốc gia Công nghệ bách khoa vùng Lorraine Pháp) và l'INERIS (Viện quốc gia về Môi trường công nghiệp và rủi ro CH Pháp) trên cơ sở lý thuyết của (D. Héliot, 1988), M. Bennani và T. Korini, 2000) và (V. Merrien-Soukatchoff và nnk., 2011) được sử dụng để mô hình khối đá nứt nẻ rời rạc. Chương trình xử lý

số liệu khe nứt thu được bằng module PSMY trong công trình của (Nguyen A.T., và nnk., 2013, 2014) và mô hình hệ khe nứt 2D và 3D bằng phần mềm RESOBLOK trong nghiên cứu của (Nguyen A.T. và nnk., 2014, 2015, 2016) được phát triển và nghiên cứu ứng dụng cho các mỏ khai thác lộ thiên nói chung và đá khối nói riêng.

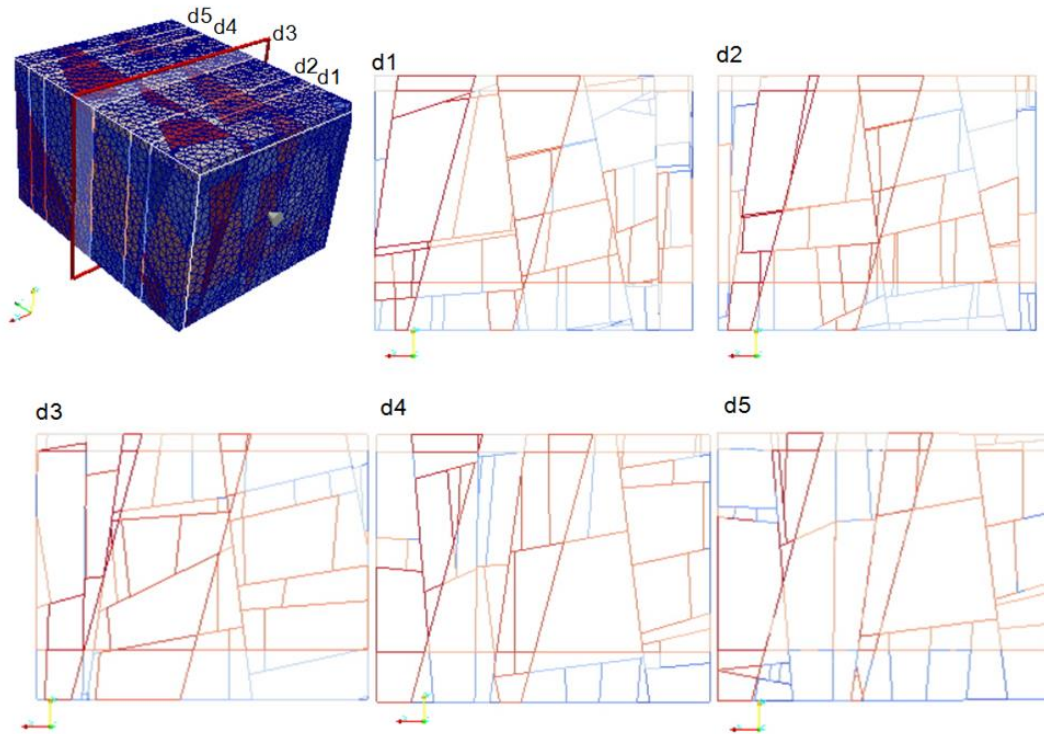
3. Một số mô hình mô phỏng khối đá phục vụ khai thác mỏ lộ thiên ở Việt Nam

Như đã giới thiệu ở phần trên, sự phân bố tự nhiên của kính thước các khối xuất phát từ sự tồn tại tại các hệ thống khe nứt (gồm các thông số chính của các khe nứt, nhóm khe nứt chính, khoảng cách giữa các khe nứt, độ kéo dài của các khe nứt), nó có thể được tính toán với các khu vực phân bố hoặc khối lượng các khối được hình thành do sự giao cắt của các khe nứt trong cả không gian hai hoặc ba chiều (Hình 7 và 8).

Sự phân bố tự nhiên của kính thước khối rõ ràng, tính chất cơ lý đá cũng như của khe nứt có thể định lượng được sẽ có giá trị chi phí sản xuất thực tế đối với mỏ đá nói chung. Đặc điểm tính chất của khối đá là cơ sở công nghệ đầu tiên để các



Hình 7. Quá trình chia cắt không gian ban đầu tạo môi trường không liên tục (Jing, 2000)



Hình 8. Mô hình mô phỏng khối đá nứt nẻ phục vụ khai thác mỏ lộ thiên (Nguyễn A.T., 2015)

kỹ sư lựa chọn đồng bộ thiết bị cơ giới khai thác hợp lý cho mỏ đá như mỏ đá san lấp, mỏ đá làm VLXD thông thường và mỏ đá khối, ốp lát. (Hình 9 và 10), giới thiệu sơ đồ lựa chọn phương pháp tách, khai thác đá VLXD và đá khối xuất phát từ mô hình hình phân tích các thông số cơ bản của khối đá.

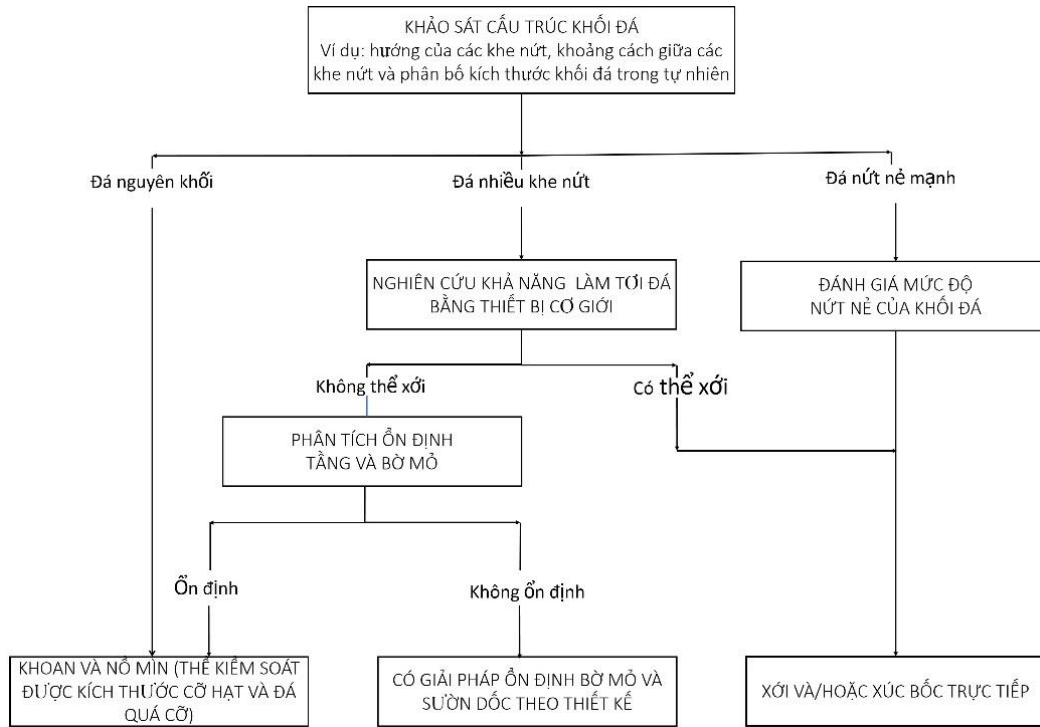
3.1. Mô hình mô phỏng khối đá phục vụ đánh giá ổn định của bờ mỏ

Như đã giới thiệu ở phần trên, các khe nứt chia khối đá thành các phần rời rạc. Hơn nữa, các khe nứt có thể giao cắt mặt tầng khai thác và bờ mỏ theo các hướng có khả năng hình thành các khối mất ổn định như dạng "mặt trượt", "khối trượt", "lật đổ" và dạng "nằm trượt". Các thông số hình học của tầng và các thông số của khe nứt sẽ xác định được các tiềm năng hình thành các dạng mất ổn định.

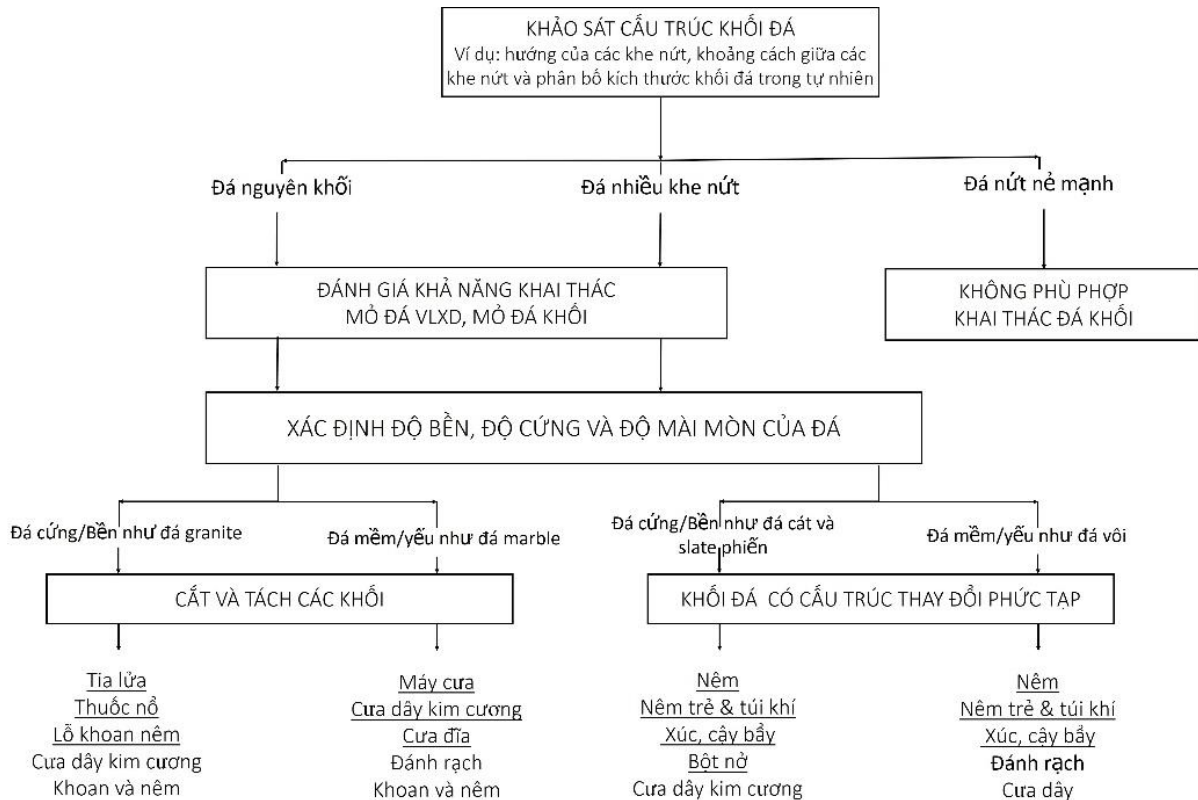
Ở khía cạnh đặc tính cơ lý khối đá nứt nẻ, sườn dốc thực tế luôn phụ thuộc vào độ bền kháng cắt của các khe nứt, hệ khe nứt. Độ nhám hay độ gồ ghề của mặt khe nứt sẽ tạo ra lực cản ma sát đối

với các mặt trượt và do đó làm tăng lực chống trượt đối với các dạng trượt lở. Mặt khác, rõ ràng các khe nứt hai bên luôn tạo ra các khối tự do và có ít lực cản ma sát. Thông thường, các bề mặt khe nứt và các khe nứt luôn bị thay đổi do các hoạt động thời tiết, phong hóa và bị lấp nhét bởi nước, các vật liệu như đất sét, khoáng chất bị vỡ vụn và mịn. Các phân tích tính toán ổn định thông qua hệ số ổn định được sử dụng phổ biến là so sánh giữa lực gây trượt của khối như trọng lực (lực tính, động lực) và lực chống trượt (thường áp dụng tiêu chuẩn Mohr-Coulomb tương ứng với các trị số ứng suất kháng cắt giới hạn, hệ số ma sát với độ gồ ghề của mặt khe nứt, lực dính kết) (Hoek và Brown, 1980).

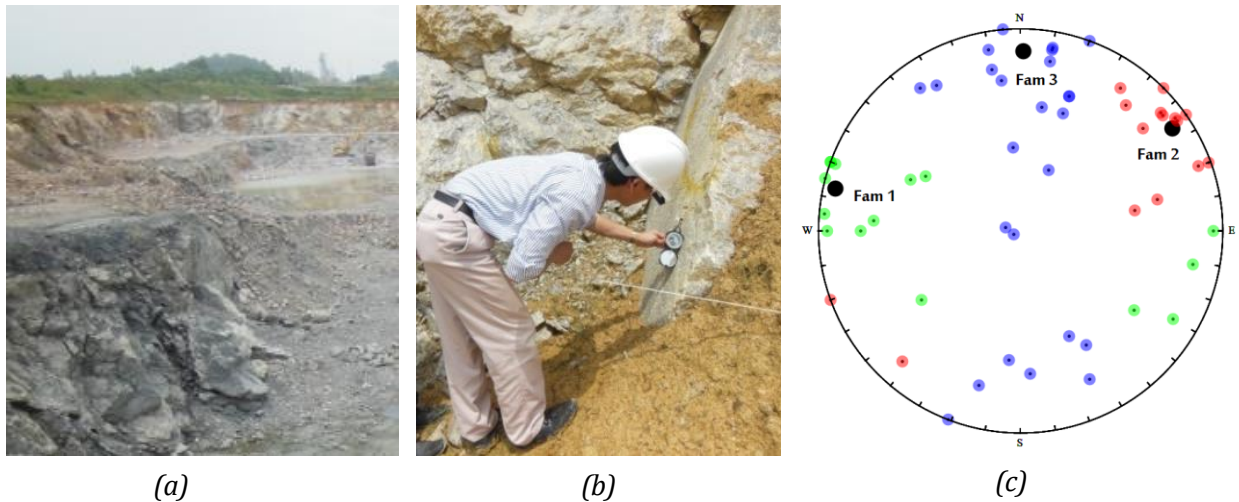
Kết quả nghiên cứu được nhóm tác giả giới thiệu ứng dụng của mô hình mô phỏng khối đá phục vụ tính toán ổn định bờ mỏ trong ví dụ là này mỏ đá Ninh Dân, cung cấp đá cho nhà máy xi măng Sông Thao, nằm cách Hà Nội 70km về phía Bắc. Số liệu khảo sát, đo hệ thống khe nứt trên 3 tầng, chiều cao tầng 10÷15m, góc nghiêng sườn tầng 75° (Hình 11).



Hình 9. Sơ đồ lựa chọn phương pháp tách, khai thác đá VLXD



Hình 10. Sơ đồ lựa chọn phương pháp tách đá khối



Hình 11. Vị trí các tầng khu vực nghiên cứu (a) và đo khe nứt (b) và biểu diễn 55 phép đo khe nứt trên mỏ đá Ninh Dân, Phú Thọ với 3 họ khe nứt Fam1, Fam2 và Fam3 (c)

Bảng 1. Thông số của 3 hệ khe nứt trên Ninh Dân

Các thông số		Hệ khe nứt		
		Fam1	Fam2	Fam3
Phương pháp phân nhóm khe nứt bằng thuật toán Spectrale (Nguyen và nnk., 2014)	Số khe nứt: N_d	15	15	25
	Tỷ lệ: N_{pc} , %	27,27	27,27	45,45
	Góc phương vị: α_d	241	84	197
	Góc cắm: β_d	80	83	81
	Hệ số Fisher: K_f	32,68	13,25	5,26
Khoảng cách giữa các khe nứt trong hệ		Phân bố mũ, $\lambda=0,3$	Phân bố mũ, $\lambda=0,15$	Phân bố mũ, $\lambda=1$

Mô hình khối đá nứt nẻ trên tầng mỏ đá Ninh Dân (Hình 12a), được phân tích bằng phương pháp cân bằng giới hạn (Warburton, 1983), phương pháp phân tích và mô hình ngẫu nhiên với 100 mô phỏng bằng phần mềm mã nguồn mở RESOBLOK (Nguyen và nnk., 2016; Nguyen và nnk., 2014; Heliot, 1988). Mô hình ngẫu nhiên với khả năng rui ro sụt lở lớn nhất với mô hình thứ 35 (Hình 12).

Kết quả phân tích với khối lượng, vị trí các khối mát ổn định có thể xây trên tầng biểu diễn trên Hình 12b với 4 khối mát ổn định, tổng khối lượng mát ổn định 20,9m³, giá trị trung bình khối mát ổn định 5,23 m³.

Vì vậy, để đảm bảo an toàn cho người và thiết bị dưới chân tầng, sườn dốc, cần phải để lại các mặt tầng như các đai an toàn nhằm hứng và chặn đá văng đá rơi xuống do hiện tượng trượt lở của đá. Để đảm bảo an toàn với tầng, bờ mỏ trong đá cứng hầu như không có nứt nẻ cắm đứng và chỉ có phân lớp nằm ngang thì góc nghiêng sườn tầng có

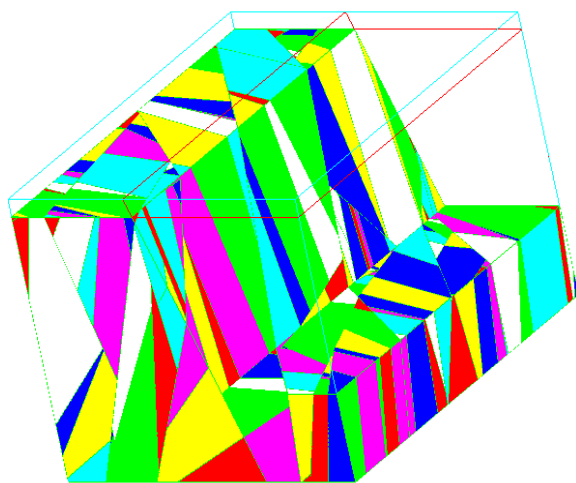
thể lên tới 85°, rộng mặt tầng đai an toàn từ 2 m trở lên với chiều cao tầng 10 m. Đối với các tầng kết thúc khai thác, bờ ổn định hoặc đã được gia cố ổn định thì độ dốc sườn tầng thường từ 60÷70°, chiều rộng mặt tầng từ 2÷5 m với chiều cao tầng 10 m.

3.2. Mô hình khối đá phục vụ tối ưu công tác khoan - nổ mìn trên mỏ đá VLXD

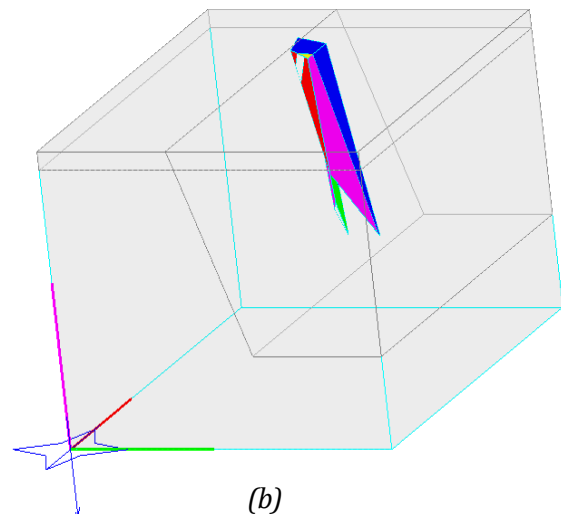
Trên mỏ đá VLXD, chuẩn bị đá bằng xúc bốc bằng phương pháp khoan-nổ mìn. Công đoạn này thường bao gồm giai đoạn khoan các lỗ khoan, nạp thuốc nổ, đấu ghép mạng nổ bằng các phương tiện nổ khác nhau và kính nổ lượng thuốc. Thông thường, lỗ khoan được khoan được bố trí bất kỳ hướng nào, hay được khoan thẳng đứng, nghiêng gần song song với mặt tầng. Lỗ khoan được khoan sâu hơn mặt tầng dưới một đoạn (chiều sâu khoan thêm) nhằm khi nạp thuốc nổ và nổ mìn sẽ tạo được sườn và mặt tầng bằng phẳng đồng thời tách

và đập vỡ đất đá trong khối tới kích thước yêu cầu. Về nguyên tắc, chi phí khoan và nổ mìn được giảm thiểu bằng cách khoan càng ít lỗ có đường kính càng lớn thì càng tốt. Thực tế cho thấy khối lượng công việc giảm sẽ tăng năng suất lao động và đồng thời giảm chi phí. Tuy nhiên, trong thực tế, thiết kế vụ nổ bị hạn chế bởi hai vấn đề sau: khối lượng thuốc nổ trong mỗi bãi nổ bị giới hạn nhằm đảm bảo an toàn và bảo vệ môi trường xung quanh, điều này làm giảm đường kính lỗ khoan và làm tăng số lượng lỗ khoan trong mỗi bãi nổ; các khe nứt, phân lớp và tính chất đá thay đổi phức tạp trong khối đá. Với các hệ thống khe nứt thì có thể xác định khoảng cách và vị trí chính xác các lỗ

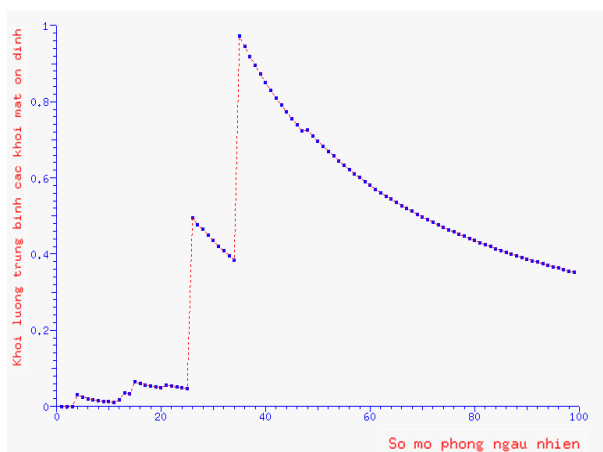
khoan trong khối đá của khu vực nổ mìn. Trong Hình 13 cho thấy, khoảng cách giữa các lỗ khoan (trong hàng hay khoảng cách giữa các hàng) lớn hơn khoảng cách giữa các khe nứt thì khả năng tạo ra các cục đá lớn chỉ được xác định bởi khoảng cách giữa các khe nứt. Vấn đề này mang lại các yếu tố tích cực đối với các mỏ khai thác đá khối, đá tảng lớn nhưng lại bất lợi đối với trong khai thác đá san lấp và đá VLXD thông thường yêu cầu kích thước cục đá nhỏ hơn kích thước ngàm đập và gầu xúc. Vậy, để tối ưu mạng lỗ khoan trong khối đá nứt nẻ, phân khối thì khoảng cách giữa các lỗ khoan trong mạng phải nhỏ hơn khoảng cách giữa các khe nứt và mỗi khối



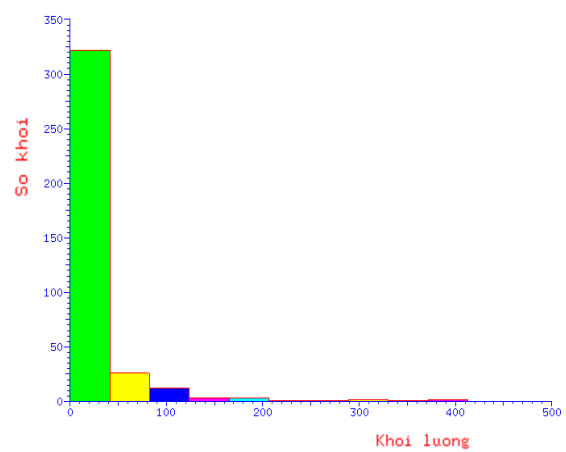
(a)



(b)

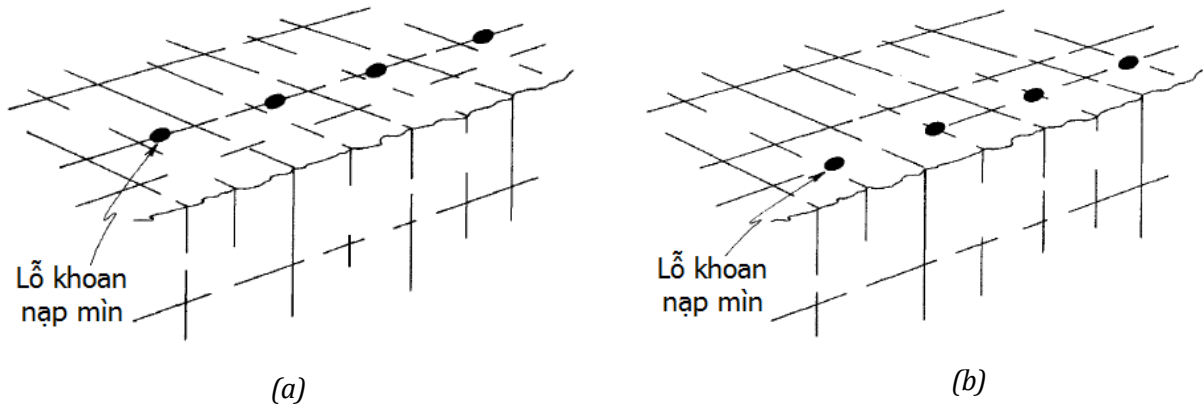


(c)

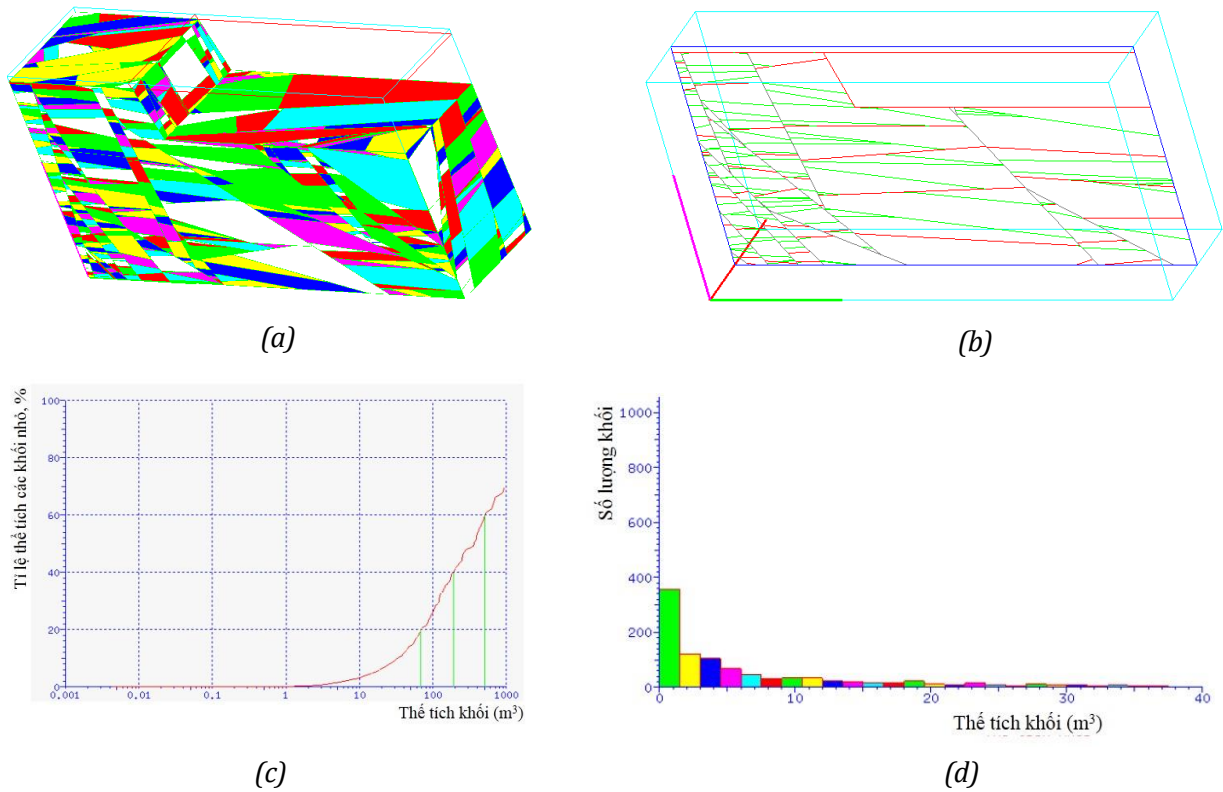


(d)

Hình 12. Mô hình khối đá nứt và hệ khe nứt (a), 100 mô phỏng mô hình khối đá ngẫu nhiên với lượng trung bình các khối mất ổn định tương ứng từng mô phỏng (b), phân bố các khối mất ổn định trên tầng (c), và phân bố kích thước khối trong mô hình ngẫu nhiên số 35 (d)



Hình 13. Sơ đồ biểu diễn khoảng cách và vị trí của các lỗ khoan nạp mìn khi tạo ra các khối (a) và đập vỡ khối tới kích thước cục vụn cầu (b)



Hình 14. Mô hình mô phỏng khối đá (a) và mặt cắt (b) hục vụ nổ mìn trên bờ Nam mỏ Tây Khe Sim và phân bố kích thước khối trong khu vực (c) và phân bố số lượng khối có thể tích khác nhau (d)

được hình thành do sự giao cắt giữa các khe nứt cần bố trí ít nhất một lỗ khoan. Trong điều kiện khai thác mỏ than Tây Khe Sim, thuộc Tổng Công ty Đông Bắc, nhóm tác giả đã khảo sát các thông số khe nứt trên bờ mỏ phía Nam và xác định mô hình hệ thống khe nứt trong khối đá như trong Hình 14.

Các thông số về sự phân bố tự nhiên của kích thước các khối xuất phát từ mô hình mô phỏng

khối đá tại một tầng trên bờ mỏ phía Nam được xác định.

Khu vực có 3 hệ thống khe nứt chính: hệ khe nứt (1) góc cắm trung bình 77° , góc phương vị 159° và khoảng cách trung bình giữa các khe nứt trong khối từ $0,35 \div 1\text{m}$; hệ khe nứt (2) góc cắm trung bình 1° , góc phương vị 281° và khoảng cách trung bình giữa các khe nứt trong khối từ $2 \div 9\text{m}$;

hệ khe nứt (3) góc cắm trung bình 1° , góc phương vị 199° và khoảng cách trung bình giữa các khe nứt trong khối từ $0,3 \div 1,8$ m. Các thông số khối đá: khối lượng riêng của đá $2,77$ tấn/ m^3 ; lực dính kết của các khe nứt bằng không, góc nội ma sát của khe nứt 30° . Căn cứ vào giá trị này, các thông số mạng lỗ khoan được đề xuất để nâng cao hiệu quả nổ mìn trên mỏ Tây Khe Sim (Bảng 2).

3.3. Mô hình khối đá phục vụ tối ưu các thông số công nghệ khai thác đá khối

Đá ốp lát tự nhiên được áp dụng cho các tấm đá được gia công từ đá khối thiên nhiên thuộc nhóm đá granit, đá hoa (đá marble) và đá vôi, dùng để ốp và lát các công trình xây dựng. Đá khối nguyên khai được bóc tách thường có kích thước từ $0,4 \div 8$ m^3 . Kích thước này được xác định là chuẩn quốc tế trong công tác vận tải và chế biến đá khối sau quá trình khai thác là cắt thành các lát có chiều dày $2 \div 10$ cm, quy cách sản phẩm đá ốp lát từ đá khối được phân nhóm từ Nhóm I cho đến Nhóm V tương ứng với chiều rộng của khổ đá từ 100×200 mm đến 600×800 mm, chiều dài từ 100×400 mm đến 600×1200 mm.

Xuất phát từ yêu cầu sản phẩm đá ốp lát và kích thước khối như trên, hướng bóc tách các khối đá tối ưu thường vuông góc hoặc chéo góc với các khe nứt. Thực tế có thể khảo sát, nhận dạng các vùng có mật độ nứt nẻ cao là nguyên nhân tạo ra các khối có kích thước nhỏ hoặc các khối có kích thước không đạt yêu cầu. Mô hình khối đá 3 chiều có khả năng biểu diễn được khả năng hình thành khối trước và sau mỗi chu kỳ cắt, bóc tách các khối.

Kết quả này cho phép xác định kích thước khối đá nguyên khai phù hợp với yêu cầu kích thước của các lát của đá sau khi chế biến. Do đó, kích thước và chất lượng khối đá nguyên khai có

thể được dự báo một cách hiệu quả. Với sự hỗ trợ của mô hình khe nứt của khối đá, hướng phát triển của mặt bóc tách được tối ưu đảm bảo hệ số thu hồi khối là lớn nhất. Bên cạnh đó, chỉ số kinh tế là điều kiện đủ để đánh giá phương án và hướng phát triển công trình mỏ. Hướng bóc tách hợp lý tương ứng với các thông số hệ thống khai thác hợp lý như chiều cao tầng (chiều cao khối), chiều rộng dải khâu (chiều rộng khối) và chiều dài khu vực khai thác (chiều dài khối).

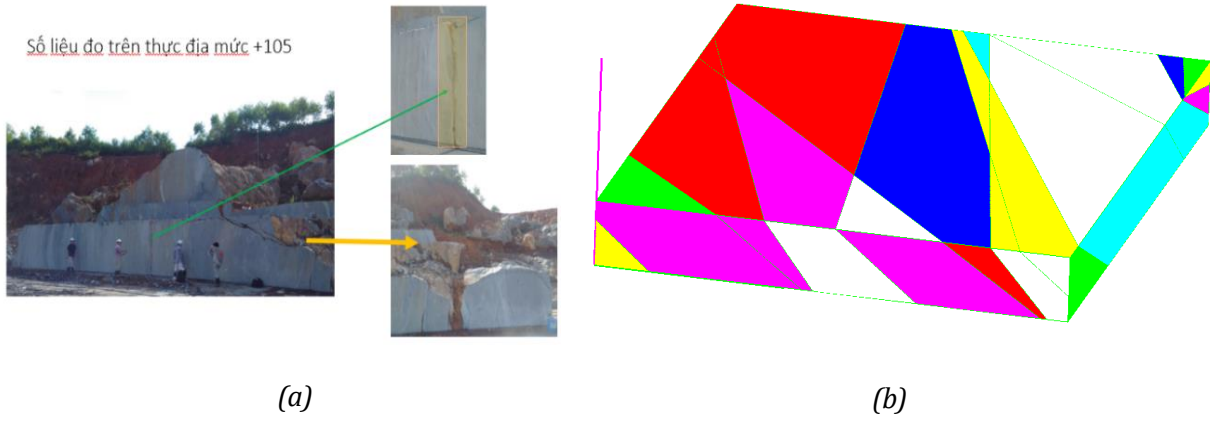
Trong nội dung công việc này, bài báo giới thiệu một số kết quả trong xác định và tối ưu các thông số hệ thống khai thác cho mỏ đá đen Lộc Điền, Thừa Thiên Huế. Hình 15 giới thiệu vị trí đo xác định hệ thống khe nứt trên mỏ. Số liệu thu thập ở khu vực gương khai thác cho thấy các khe nứt tồn tại với góc cắm là $5^\circ, 10^\circ$ và 120° và khoảng cách giữa các khe nứt trung bình từ $0,5 \div 4$ m (Hình 15a). Dựa trên các thông tin đã thu thập và áp dụng mô hình mô phỏng khối đá của mỏ có kể tới độ phân tán về hướng và góc cắm của hệ khe nứt chính. Kết quả các mô hình mô phỏng thể hiện như Hình 15b.

Hướng tuyến khai thác được cho là tối ưu nhất khi góc giữa hướng tuyến tầng khai thác song song hoặc vuông góc với hệ khe nứt chính và cho phép thu hồi lớn nhất thể tích các khối đá thường phẩm. Trình tự và hướng khai thác được mô phỏng mô hình và thể hiện tại Hình 16.

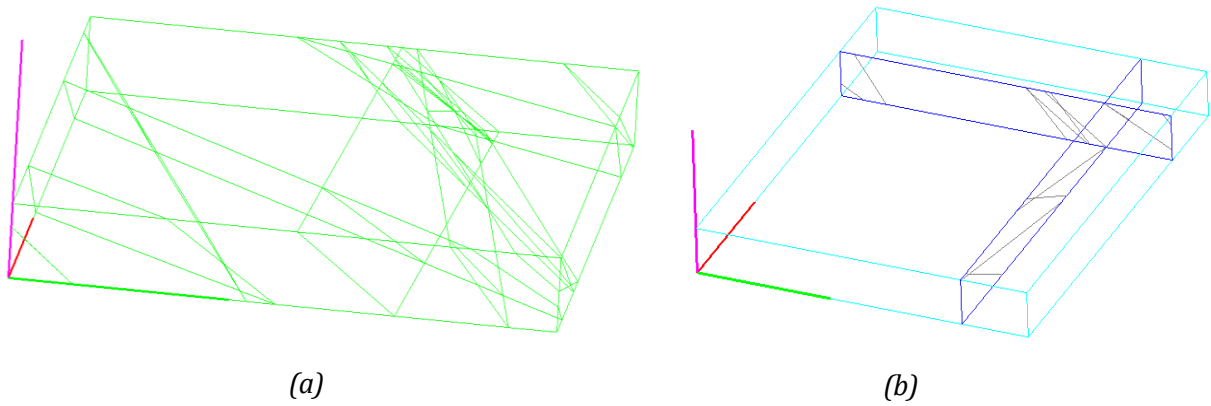
Sau khi lựa chọn được hướng khai thác tối ưu kết hợp kích thước khối đá của mỏ, kích thước sản phẩm đá ($\leq 600 \times >1600 \times 20$) chọn chiều cao tầng cắt là 1,6 m và 3,2 m. Dựa trên mô hình mô phỏng hệ khe nứt trong khối đá, các kết quả cụ thể như Hình 17. Từ kết quả phân tích ở biểu đồ phần trăm khối thể tích của các khối có trong mô hình tương ứng: Đối với chiều cao tầng khai thác 1,6 m thì số khối trung bình trong moong là 23.

Bảng 2. Các thông số mạng lỗ khoan của mỏ được đề xuất thay đổi trong ngoặc

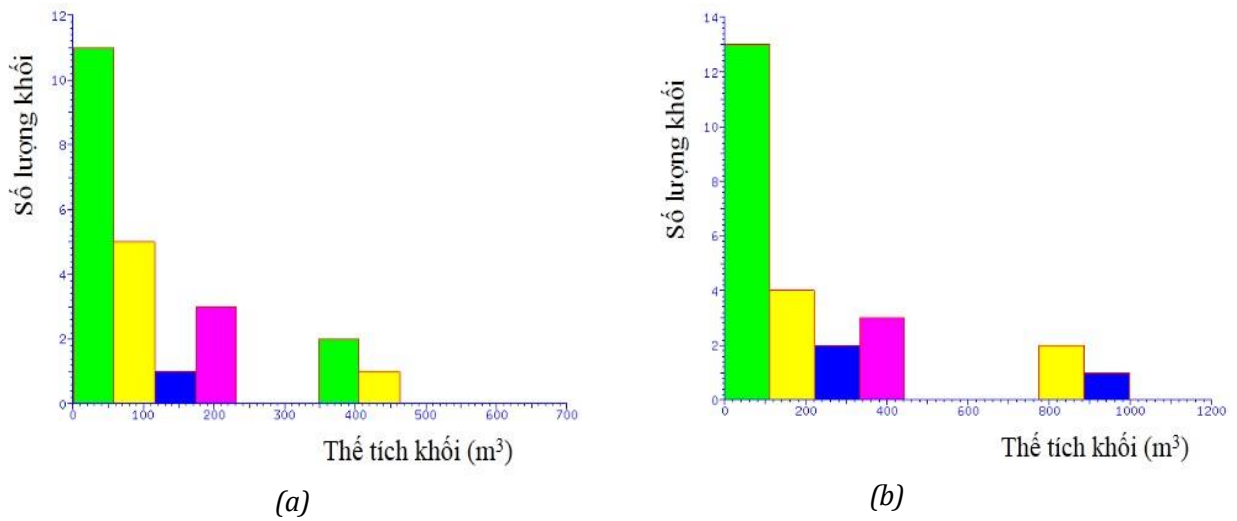
Thông số	Đơn vị	Loại máy khoan với đường kính	
		230 mm	127 mm
Chiều cao tầng	m	15	10
Đường kính lỗ khoan	mm	230	127
Góc nghiêng lỗ khoan	độ	$70 \div 90$	$70 \div 90$
Đường kháng chân tầng	m	8,0 (6÷7)	3,5 (3,5÷4)
Khoảng cách giữa các lỗ trong hàng	m	8,0 (6÷7)	4,0 (3÷3,5)
Khoảng cách giữa các hàng lỗ khoan	m	8 (6÷7)	3,5 (3,5÷4)



Hình 15. Vị trí tầng tiến hành đo xác định hệ thống khe nứt (a) và mô hình mô phỏng khối đá khu vực khảo sát mức +105 của mỏ đá Quê Chử, Thừa Thiên Huế (b)



Hình 16. Sơ đồ trình tự khai thác với chiều cao lớp cắt là 1,6 m hoặc 3,2 m khi hướng cắt song song (a) và vuông góc với các hệ khe nứt chính, bước cắt tương đương với chiều rộng dải khẩu 2÷4 m (b)



Hình 17. Biểu đồ phân bố số lượng và thể tích các khối trong khu vực khai thác tương ứng với tầng khai thác cắt tầng 1,6 m ứng hình (a) 3,2 m ứng hình (b)

Khối lượng đá có kích thước $V_{min} \geq 8 \text{ m}^3$ chiếm 98%; khối lượng đá có kích thước $V_{min} \geq 100 \text{ m}^3$ chiếm 88%. Khối lượng đá khai thác có kích thước V_{min} giảm đột ngột biến thiên lớn khi $V_{min} = 100 \div 150 \text{ m}^3$ và $200 \div 250 \text{ m}^3$.

Đối với chiều cao tầng khai thác 3,2 m thì số khối trung bình trong moong là 27 khối. Khối lượng đá có kích thước $V_{min} \geq 8 \text{ m}^3$ chiếm 99%; khối lượng đá có kích thước $V_{min} \geq 100 \text{ m}^3$ chiếm 95%. Khối lượng đá khai thác có kích thước V_{min} giảm đột ngột biến thiên lớn khi $V_{min} = 200 \div 250 \text{ m}^3$ và $400 \div 450 \text{ m}^3$.

Dựa trên việc mô phỏng mô hình khối đá mở trên cơ sở các số liệu thu thập khảo sát đo đạc tại mỏ và áp dụng cơ sở tính toán tối ưu các thông số hệ thống khai thác, nghiên cứu chỉ ra hướng khai thác tối ưu là hướng Đông Nam, công trình mở tiến về hướng Bắc và chiều cao tầng khai thác là 1,6 m hoặc 3,2 m với tỷ lệ độ thu hồi khối $V_{min} \geq 8 \text{ m}^3$ chiếm cao nhất. Kích thước khối đá tối ưu làm cơ sở để tối ưu và lựa chọn các thông số khai thác cho mỏ.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày cơ sở lý thuyết và các mô hình mô phỏng hệ khe nứt trong môi trường khối đá nứt nẻ. Các thông số cơ bản về hệ khe nứt được xác định từ thực địa rồi sử dụng vào mô phỏng khối đá bằng phương pháp mô phỏng ngẫu nhiên dưới dạng 3D. Các mô hình mô phỏng khối đá phục vụ khai thác mỏ lộ thiên cụ thể như đánh giá ổn định bờ mỏ, tối ưu được mạng lỗ khoan và xác định được trữ lượng cụ thể, tối ưu hóa các thông số hệ thống khai thác cơ bản khi thác mỏ đá khối. Các kết quả ban đầu có được khi vận dụng các mô hình mô phỏng khối đá vào phân tích ổn định cho mỏ đá Ninh Dân, vận dụng tính toán tối ưu các thông số mạng lỗ khoan-nổ mìn cho mỏ than Tây Khe Sim và tối ưu hóa hướng, chiều cao tầng khai thác cho mỏ đá khối (đá marble đen) Lộ Điền, Thừa Thiên Huế. Với các kết quả ban đầu đó, chúng tôi sẽ tiếp tục nghiên cứu, áp dụng cho các điều kiện tương tự và trong phân tích rủi ro mất ổn định và các giải pháp an toàn, nâng cao hiệu quả khai thác bóc tách đá cho các mỏ đá VLXD, nâng cao hệ số thu hồi cho các mỏ đá khối có điều kiện tương tự Việt Nam và trên thế giới.

Đóng góp của các tác giả

Tác giả Nguyễn Anh Tuấn hình thành ý tưởng và triển khai các nội dung bài báo, hoàn thiện bản thảo cuối của bài báo; tác giả Bùi Xuân Nam cùng triển khai các nội dung và đọc bản thảo bài báo; tác giả Phạm Văn Việt cùng triển khai các nội dung, số liệu thực địa mỏ đá khối; tác giả Lê Thị Thu Hoa và Lê Thị Hải cùng triển khai các nội dung, số liệu mỏ đá VLXD thông thường; tác giả Trần Đình Bảo cùng triển khai các nội dung, số liệu khảo sát khối đá tại mỏ đá khối.

Tài liệu tham khảo

- A. T. Nguyen, V. Merrien-Soukatchoff, M. Vinches và M. Gasc-Barbier, (2016). Grouping discontinuities in representative sets: influence on the stability analysis of slope cuts. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(4), tr. 1429–1444.
- Dershowitz, W. S., Einstein, H. H., (1988). Characterizing rock joint geometry with joint system models. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 21(1), tr. 21–51.
- Heliot, D., (1988). Generating a blocky rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 25(3), tr. 127–138.
- Jing, L., (2000). Block system construction for three-dimensional discrete element models of fractured rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(4), tr. 645–659.
- Lin, D., Fairhurst, C. và Starfield, A.M., (1987). Geometrical identification of three-dimensional rock block systems using topological techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 24(6), tr. 331–338.
- Lu, J., (2002). Systematic identification of polyhedral rock blocks with arbitrary joints and faults. *Computers and Geotechnics*, 29(1), tr. 49–72.
- Nguyen, A.T., Merrien-Soukatchoff, V. và Vinches, M., (2014). Grouping discontinuities of fractured rock mass into main sets: consequences on the stability analysis of open

- pit benches. In D. 2014, ed. DFNE 2014. Vancouver, Canada, tr. 1-8.
- Nguyễn Anh Tuấn, Trần Quang Hiếu, Phạm Văn Việt, (2016). *Công nghệ khai thác đá khối tiên tiến*. Nhà xuất bản Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, Hà Nội.
- Priest, S., (1993). *Discontinuity analysis for rock engineering*, Chapman & Hall.
- Riccardo Salvini, Giovanni Mastrorocco, Marcello Seddaiu, Damiano Rossi và Claudio Vanneschi, (2016). The use of an unmanned aerial vehicle for fracture mapping within a marble quarry (Carrara, Italy): photogrammetry and discrete fracture network modelling. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(1), tr. 34-52.
- S. Mosch, D. Nikolayew, O. Ewiak và S. Siegesmund, (2011). Optimized extraction of dimension stone blocks. *Environmental Earth Sciences*, 63(7), tr. 1911-1924.
- Sousa, L. M. O., Oliveira, A. S., Alves, I. M. C., (2016). Influence of fracture system on the exploitation of building stones: the case of the Mondim de Basto granite (north Portugal). *Environmental Earth Sciences*, 75(1), tr. 1-16.