

TỐI ƯU HÓA KẾ HOẠCH KHAI THÁC MỎ ĐÁ VÔI – CUNG CẤP NGUYÊN LIỆU BỀN VỮNG CHO SẢN XUẤT XI MĂNG

Vũ Đình Trọng¹, Nguyễn Tô Hoài^{1,*}

Tô Hữu Cường²

¹Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh

²Công ty 91- chi nhánh tổng công ty Đông Bắc

*Email: nguyentohoai@qui.edu.vn

TÓM TẮT

Lập kế hoạch khai thác dài hạn cho các mỏ đá vôi là nhiệm vụ cần thiết nhằm cung cấp nguồn nguyên liệu bền vững cho các nhà máy xi măng. Thông thường, việc lập kế hoạch được thực hiện bằng các tính toán dựa trên các phương pháp thủ công đảm bảo các điều kiện kỹ thuật và công nghệ khai thác đá vôi. Các phương pháp này thường tốn nhiều công sức, gia tăng chi phí sử dụng phụ gia cũng như chất lượng sản phẩm không đồng đều. Các mỏ khai thác đá vôi hiện đại sử dụng các mô hình khối (block model) kết hợp với các thuật toán tối ưu tích hợp trên các phần mềm máy tính nhằm giảm thiểu các sai sót này. Tuy nhiên, do sự không chắc chắn về các yếu tố địa chất vẫn dẫn đến sự không ổn định trong chất lượng nguyên liệu khai thác, thậm chí là thiếu hụt nguồn nguyên liệu trong một thời gian nhất định. Nghiên cứu này đề xuất một phương pháp mới nhằm giảm thiểu các yếu tố bất lợi trên. Đồng thời, một ứng dụng được phát triển dựa trên phương pháp này được phát triển nhằm đánh giá các kết quả thu được khi áp dụng vào mỏ đá vôi Tà Thiết sẽ được đề cập.

Từ khóa: mỏ đá vôi, lập kế hoạch khai thác dài hạn, nguyên liệu thô, phụ gia xi măng, tối ưu hóa, mô phỏng

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Lập kế hoạch sản xuất dài hạn cho các mỏ đá xi măng không phải là một công việc dễ dàng. Người lập kế hoạch thường gặp khó khăn khi tính toán nhằm đảm bảo các yêu cầu về phối trộn nguyên liệu thô và các thông số khai thác mỏ, đồng thời lại cần đảm bảo nguồn nguyên liệu được cung cấp liên tục. Các chất phụ gia như đá vôi hàm lượng cao, bau xít, quặng sắt hoặc cát thường được đưa vào để bù đắp cho sự thiếu hụt hoặc cân bằng chất lượng nguyên liệu khai thác từ mỏ đá. Các phương pháp lập kế hoạch khai thác chủ yếu là thủ công, dựa trên các bảng tính hoặc kinh nghiệm của chuyên gia lập kế hoạch. Do vậy, độ sai lệch là không thể tránh khỏi, dẫn tới làm tăng chi phí, giảm tính liên tục và làm cạn kiệt của nguyên liệu đầu vào. Một hệ thống lập kế hoạch khai thác một cách thông minh là yêu cầu quan trọng và cấp thiết trong ngành công sản xuất xi măng.

Hiện nay, có rất nhiều phần mềm thương mại được sử dụng trong ngành mỏ để lập kế hoạch khai thác dài hạn. Tuy nhiên, phần lớn

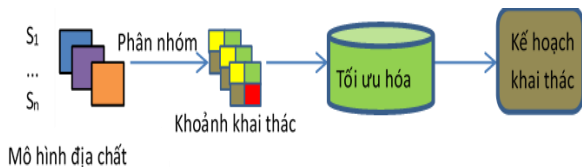
các ứng dụng này được thiết kế riêng cho khai thác cho các mỏ quặng với mục tiêu và dữ liệu đầu vào khác biệt với các mỏ đá xi măng. Trong khi các phần mềm này tập trung vào việc tối ưu giá trị hiện tại ròng (NPV) của dự án khai thác mỏ, lập kế hoạch cho các mỏ đá xi măng lại có mục tiêu tối ưu chi phí và kéo dài tuổi thọ mỏ, mang lại lợi ích tối đa khi đầu tư cho các nhà máy xi măng [1]. Vì vậy, các phần mềm ứng dụng cho các mỏ đá xi măng không nhiều và thường tạo ra các phương án khai thác không khả thi khi chạy trên các phần mềm tối ưu cho các mỏ quặng [2]. Một ví dụ là phương pháp tính toán sử dụng công cụ MS Excel hoặc là với sự trợ giúp của công cụ đồ họa AutoCAD. Một trong những phần mềm đầu tiên là QSO Expert (Quarry Scheduling and Optimization) được phát triển bởi tập đoàn Holderbank (hiện tại là LafargeHolcim) được sử dụng nội bộ.

Các phần mềm lập kế hoạch hiện đại sử dụng các mô hình khối địa chất (block model) vốn được xây dựng bằng các phương pháp đánh giá và thống kê. Các phương pháp ước

lượng này sử dụng các dữ liệu địa chất có đặc trưng là tính không chắc chắn và có độ sai lệch khi đánh giá cũng là nguyên nhân dẫn tới sự sai lệch và không chính xác khi lập kế hoạch khai thác [3]. Các thuật toán mô phỏng có điều kiện (conditional simulation) cho phép mô phỏng hàng loạt các kết quả tính toán địa chất với xác suất xuất hiện gần với thực tế là một trong các phương pháp tốt nhất hiện nay để giải quyết vấn đề trên [4].

Trong bài báo này, nhóm nghiên cứu đề xuất một phương pháp lập kế hoạch khai thác dài hạn cho các mỏ đá vôi xi măng với mục tiêu tối ưu chi phí, giảm thiểu và kiểm soát độ sai lệch do các yếu tố không chắc chắn và địa chất. Ứng dụng Quarryer được phát triển dựa trên phương pháp này và được đưa ra thử nghiệm và đánh giá tại mỏ đá vôi xi măng Tà Thiết, tỉnh Bình Phước.

2. LẬP KẾ HOẠCH DÀI HẠN CHO CÁC MỎ ĐÁ LÀM NGUYÊN LIỆU SẢN XUẤT XI MĂNG



Hình 1. Phương pháp lập kế hoạch khai thác dài hạn cho các mỏ đá dùng làm nguyên liệu sản xuất xi măng

Phương pháp được nhóm nghiên cứu đề xuất gồm 3 bước chính: (i) xây dựng các mô hình mô phỏng địa chất, quản lý tính không chắc chắn của dữ liệu; (ii) xây dựng các khoảnh khai thác phù hợp với các thông số khai thác và đảm bảo yêu cầu khai thác chọn lọc; (iii) tối ưu hóa kế hoạch khai thác dài hạn, xem Hình 1.

2.1. Mô phỏng địa chất

Khoáng sàng đá vôi được xây dựng trên cơ sở dữ liệu các lỗ khoan thăm dò, thông thường bao gồm các thông tin về hàm lượng, loại đất đá, ... Phương pháp mô phỏng địa thống kê theo thứ bậc (hierarchical simulation) được sử dụng để đánh giá tính không chắc chắn của dữ liệu. Trong đó, các lớp đất đá sẽ được mô phỏng trước bằng kỹ thuật Sequential Indicator Simulation (SIS) theo sau bằng là phân bố hàm lượng sử dụng kỹ thuật Sequential Gaussian

Simulation (SGS). Kết quả của bước này tạo ra hàng loạt các mô hình khối khoáng sàng đá vôi với xác suất xuất hiện cao trong thực tế.

2.2. Phân nhóm thành các khoảnh khai thác

Ở bước này, các khối trong mô hình khai thác sẽ được nhóm vào với nhau tạo thành các khoảnh khai thác dựa trên các thông số khai thác thực tế, tính chọn lọc và đồng nhất về chất lượng nguyên liệu trong các khoảnh. Các nhóm có ít biến động về địa chất cũng sẽ được ưu tiên nhóm cùng với nhau. Các kỹ thuật phân nhóm như k-mean cũng sẽ được sử dụng. Thông số về chất lượng, loại đất đá, vị trí trong không gian của các khoảnh khai thác sẽ được sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho mô hình tối ưu hóa ở bước tiếp theo.

2.3 Tối ưu hóa kế hoạch sản xuất dài hạn

Trong bước này, mô hình tối ưu hóa ngẫu nhiên phức hợp số nguyên (stochastic mixed integer programming – SMIP) sẽ được xây dựng để tối ưu hóa kế hoạch sản xuất dài hạn cho mỏ đá xi măng. Mô hình này tối ưu 3 yếu tố chi phí trong quá trình cung cấp nguyên liệu thô cho các nhà máy xi măng: (i) tối thiểu hóa chi phí khai thác nguyên liệu tại các mỏ đá xi măng; (ii) tối thiểu hóa chi phí phụ gia dành cho phối trộn; (iii) tối thiểu hóa chi phí sai lệch do sự không chắc chắn về thăm dò, đánh giá trữ lượng. Mô hình cũng thiết lập các ràng buộc trong quá trình khai thác và phối trộn nguyên liệu thô trong sản xuất xi măng bao gồm: (i) ràng buộc về sản lượng yêu cầu sản lượng nguyên liệu thô cần cung cấp cho nhà máy xi măng; (ii) ràng buộc về chất lượng nguyên liệu phối trộn; (iii) ràng buộc về sản lượng mỏ; (iv) ràng buộc về trình tự khai thác; (v) ràng buộc về trữ lượng khai thác. Kết quả thu được từ mô hình tối ưu hóa sẽ bao gồm các thông số về sản lượng, trình tự khai thác, khối lượng và chi phí cho phụ gia.

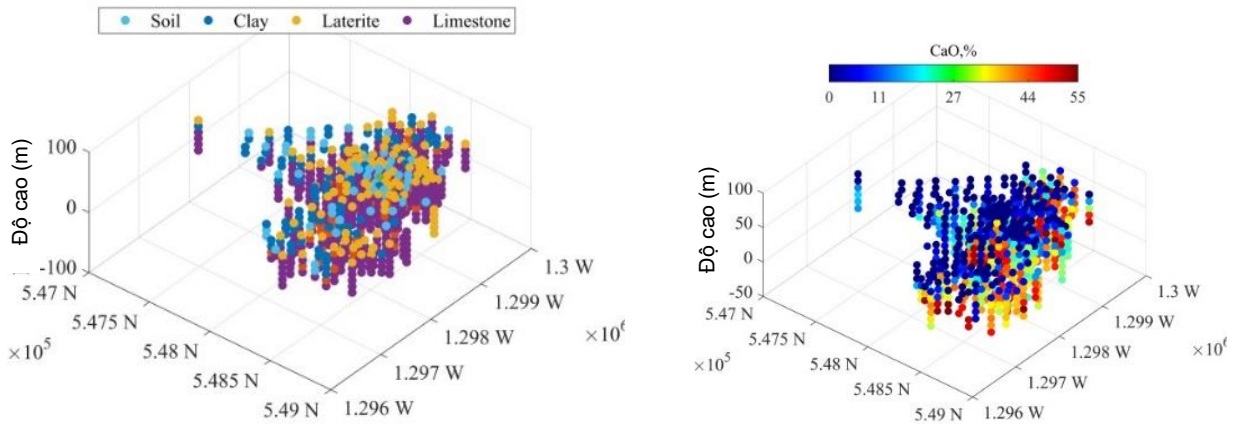
3. TỐI ƯU HÓA KẾ HOẠCH KHAI THÁC DÀI HẠN CHO MỎ ĐÁ VÔI TÀ THIẾT, BÌNH PHƯỚC

Trong nghiên cứu này, mỏ đá vôi Tà Thiết, nằm cách thành phố Hồ Chí Minh 80km về phía nam, thuộc tỉnh Bình Phước sẽ được sử dụng để đánh giá tính hiệu quả của mô hình đề xuất.

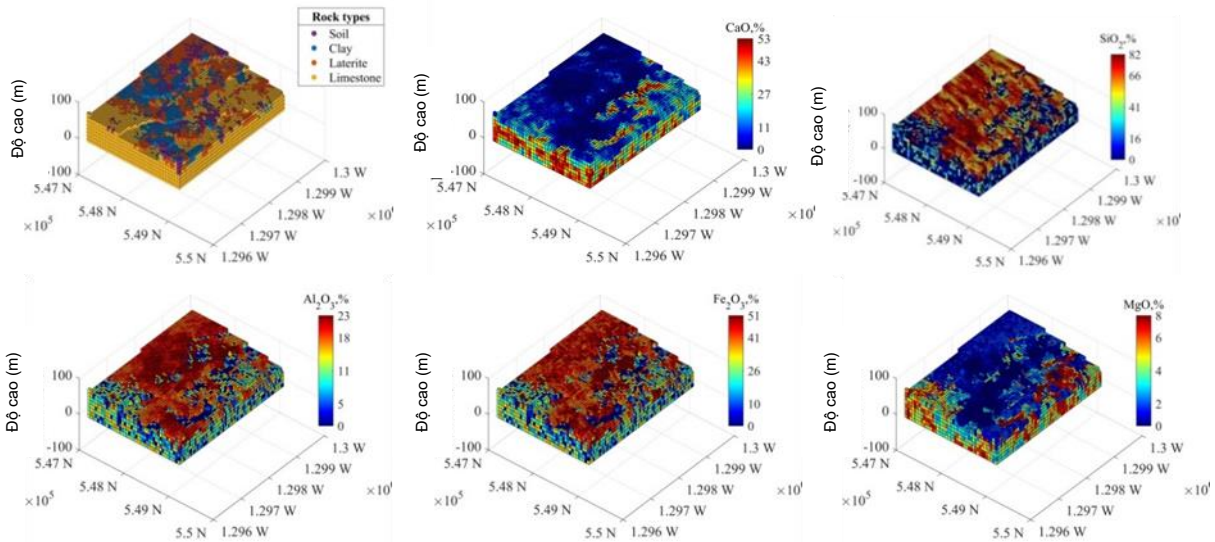
Hiện tại, công ty xi măng Hà Tiên đang khai thác mỏ này sử dụng phương pháp khai thác lộ thiên, cung cấp nguyên liệu thô cho nhà máy xi măng Bình Phước cách mỏ khoảng 7,5 km. Ứng dụng Quarrier được xây dựng và phát triển để tích hợp phương pháp lập kế hoạch đã đề xuất ở trên.

3.1. Mô hình hóa địa chất mỏ đá vôi Tà Thiết

Dữ liệu từ 194 lỗ khoan thăm dò được thu thập, phân tích cho thấy khoáng sàng đá vôi Tà Thiết bao gồm 4 loại đất đá chính, bao gồm đá vôi (limestone), sét (clay), laterit (laterite) và đất (soil), cùng với 6 nhóm hàm lượng chính ảnh hưởng tới chất lượng nguyên liệu đầu vào, đó là CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, and LOI (mất khi nung). Hình 2 biểu diễn dữ liệu thu thập được từ các lỗ khoan thăm dò.



Hình 2. Biểu dữ liệu lỗ khoan thăm dò thu thập được bao gồm loại đất đá (bên trái) và hàm lượng CaO (bên phải)



Hình 3. Mô hình mô phỏng tổng quát phân bố đất đá (đá vôi (limestone), sét (clay), laterit (laterite) và đất (soil) và hàm lượng cho khoáng sàng đá vôi Tà Thiết, Bình Phước

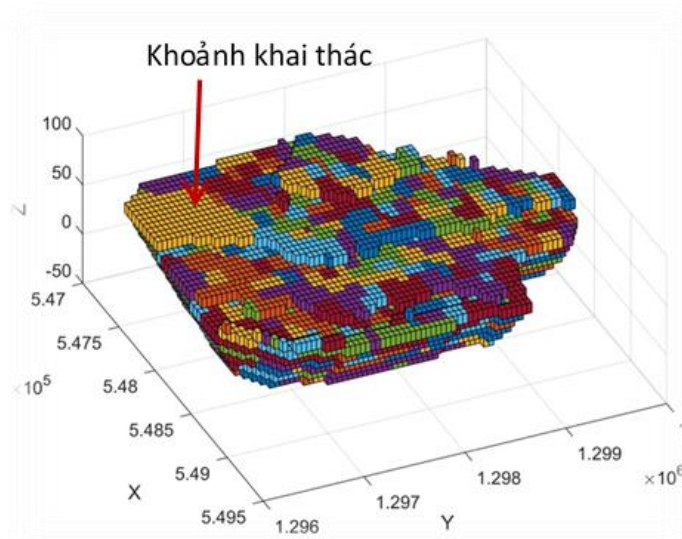
Dữ liệu này sau đó sẽ được mô phỏng và tính toán xác suất xuất hiện. Đầu tiên, 20 mô hình đất đá sẽ được mô phỏng trước bằng kỹ thuật SIS. Trên mỗi mô hình đất đá tương ứng, 20 mô hình hàm lượng được mô phỏng sử dụng kỹ thuật SGS [5]. Kích thước của mỗi khối khai

thác được sử dụng là 50×50×10m [6]. Hình 3 mô hình mô phỏng tổng quát phân bố đất đá (đá vôi (limestone), sét (clay), laterit (laterite) và đất (soil) và hàm lượng cho khoáng sàng đá vôi Tà Thiết, Bình Phước.

3.2 Phân nhóm khoảnh khai thác

Các thuật toán phân nhóm được sử dụng để nhóm 14554 khối khai thác thành 1019 khoảnh khai thác nhằm tăng tính khả thi cho kế hoạch khai thác [6]. Hình 4 minh họa các khoảnh khai

thác được xây dựng sử dụng thuật toán nhóm đã đề xuất. Đây sẽ là dữ liệu đầu vào để tối ưu kế hoạch khai thác dài hạn ở bước tiếp theo.



Hình 4. Xây dựng khoảnh khai thác chọn lọc

3.3. Tối ưu hóa kế hoạch khai thác dài hạn

Quy trình khai thác của mỏ Tà Thiết có sử dụng bãi thải để chứa phần đất phục vụ cho quá trình hoàn nguyên. Mỏ được khai thác bằng phương pháp lộ thiên với chiều cao tầng trung bình 10 và góc dốc bờ công tác 20 độ. Tỷ lệ thu hồi 80% được áp dụng trong quá trình tối ưu.

Mỗi hình khối trong mô hình sẽ được gán một chi phí khai thác dựa trên loại đất đá và vị trí. Bảng 1 và 2 tổng quát các thông số phụ gia và ràng buộc cần thiết cho quá trình lập kế hoạch khai thác dài hạn.

Bảng 1. Chất lượng và chi phí phụ gia (\$/tấn)

Phụ gia	Chi phí	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	LOI
Sét	4	5.27	60	2.14	1.5	0.5	30
Laterit	6	0.72	8	47	19.4	1.06	20
Đá vôi hàm lượng cao	4	65	5	1	0.5	1.06	32
Quặng sắt	8	1.69	10	1.07	70	1.32	10

Bảng 2. Thông số ràng buộc của mô hình tối ưu hóa

Ràng buộc	Giá trị
Số chu kỳ kế hoạch cần lập	10
Sản lượng mỏ (triệu tấn)	12 ÷ 15
Sản lượng nguyên liệu thô (Mt)	10
CaO (%)	58 ÷ 69
SiO ₂ (%)	14 ÷ 28

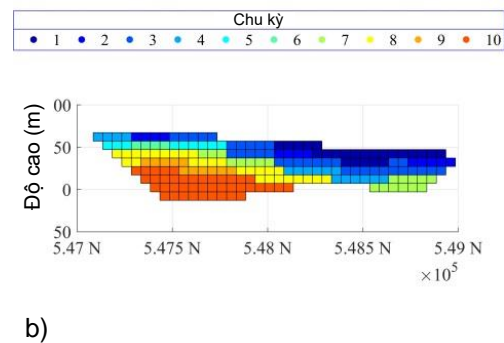
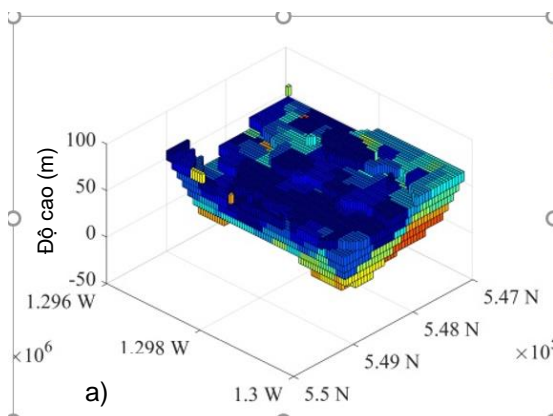
Al_2O_3 (%)	4 ÷ 10
Fe_2O_3 (%)	0.5 ÷ 5
MgO (%)	0 ÷ 3
$AM = Al_2O_3 / Fe_2O_3$	1 ÷ 3
$SR = SiO_2 / (Al_2O_3 + Fe_2O_3)$	1 ÷ 3
$LSF = CaO / (2.8 * SiO_2 + 1.18 * Al_2O_3 + 0.65 * Fe_2O_3)$	0.485 ÷ 1

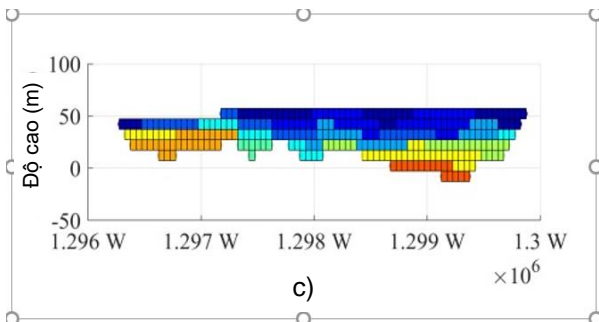
Bảng 3 thể hiện kế hoạch khai thác tối ưu theo 10 chu kỳ sử dụng phần mềm CPLEX [7] và mô phỏng MATLAB [8]. Có thể thấy rằng kế hoạch được tạo ra có khả năng cung cấp liên tục 100 triệu tấn nguyên liệu thô cho nhà máy xi măng đồng thời đảm bảo chất lượng nguyên liệu như mục tiêu đã đề ra trong Bảng 2.

Bảng 3. Kế hoạch sản lượng và chất lượng nguyên liệu thô sau khi được tối ưu hóa

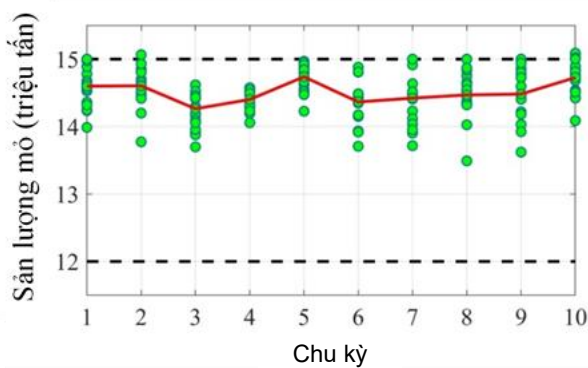
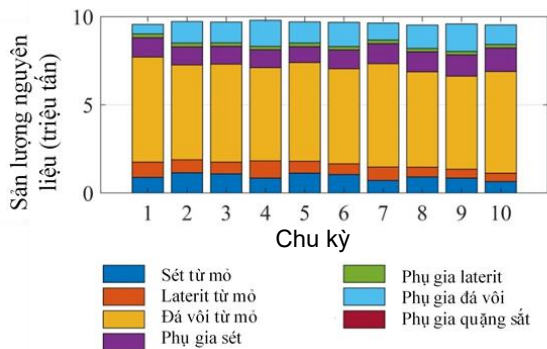
Chu kỳ	Sản lượng (Mt)	CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SR	AM	LSF
1	9.81	58.00	17.85	4.39	4.36	2.25	2.06	1.01	1.00
2	9.92	58.09	17.86	4.41	4.40	2.21	2.04	1.00	1.00
3	9.87	58.02	17.87	4.37	4.34	2.17	2.07	1.01	1.00
4	9.96	58.00	17.84	4.42	4.37	2.02	2.05	1.01	1.00
5	9.88	58.00	17.85	4.40	4.34	1.98	2.06	1.02	1.00
6	9.86	58.00	17.95	4.26	4.16	2.02	2.15	1.03	1.00
7	9.73	58.00	17.95	4.28	4.14	2.03	2.15	1.04	1.00
8	9.70	58.00	17.99	4.25	4.01	2.09	2.21	1.09	1.00
9	9.75	58.00	18.04	4.17	3.92	2.10	2.25	1.08	1.00
10	9.67	58.00	18.12	4.13	3.67	2.23	2.35	1.15	1.00
Tổng/Trung bình	98.15	58.01	17.93	4.31	4.17	2.11	2.14	1.04	1.00

Hình 5 biểu diễn trình tự khai thác trong không gian 3 chiều. Khác với các phương pháp thủ công, phương pháp đề xuất vừa đảm bảo trình tự khai thác vừa quan tâm đến công tác phối trộn nhiên liệu sao cho hợp lý.



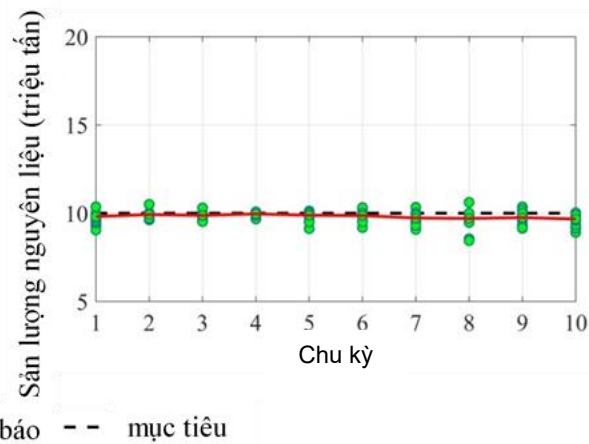


Hình 5. Trình tự khai thác sau khi được tối ưu trên hình phối tổng thể (a), mặt cắt phía Bắc (b) và phía Tây (c)



Hình 6. Hỗn hợp nguyên liệu thu được sau quá trình tối ưu hóa

Một khả năng nữa của mô hình đó là khả năng giải quyết các vấn đề liên quan tới sự không chắc chắn về mặt địa chất bằng cách thiết lập các trình tự khai thác ít rủi ro nhất đồng thời dự đoán được độ sai lệch về sản lượng và hàm lượng có thể xảy ra trong tương lai, giúp người quản lý có kế hoạch sẵn sàng phản ứng với các nguy cơ này. Hình số 7 cho thấy dự báo của mô hình với sản lượng mỏ và nguyên liệu thô qua các chu kỳ. Có thể thấy xác suất cao mỏ sẽ khai thác đúng công suất khác đề ra trong khi sản lượng nguyên liệu thô sẽ có sự sai lệch nhất định đặc biệt ở các giai đoạn về sau do thông thăm dò chưa chắc chắn như các chu kỳ đầu.



Hình 7. Dự báo độ sai lệch của sản lượng mỏ và nguyên liệu thô

4. KẾT LUẬN

Sự thành công của một dự án xi măng phụ thuộc rất nhiều vào khả năng đảm bảo bền vững nguồn nguyên liệu thô. Trong nghiên cứu này, nhóm nghiên cứu đề xuất một phương pháp lập kế hoạch dài hạn mới dựa trên các thuật toán mô phỏng địa chất, phân nhóm khoảng khai thác cũng như tối ưu hóa ngẫu nhiên. Phương pháp này quan tâm đến các yếu tố khai thác và phối trộn một cách đồng thời, cho phép giảm tối đa khối lượng nguyên liệu phụ gia. Phương

pháp này còn cho phép quản lý và tối thiểu hóa các sai lệch về khối lượng và chất lượng do tính không chắc chắn của các yếu tố địa chất.

Phương pháp này đã được tích hợp vào công cụ mang tên Quarrier cho phép người dùng mô phỏng thân khoáng sàng, lập kế hoạch, phân tích các rủi ro sai lệch. Các hình trên đây là một ví dụ về giao diện của Quarrier.

Tuy nhiên, cũng nhận thấy rằng mô hình mới dừng lại ở việc tối ưu hóa cho một mỏ đá đơn lẻ. Chính vì vậy, xây dựng một mô hình mới

quan tâm tới nhiều mỏ cùng cung cấp nguyên liệu cho một hoặc nhiều nhà máy xi măng đồng thời là hướng phát triển trong tương lai của nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. GROENEVELD, B., & TOPAL, E (2011, 212-226). *Flexible open-pit mine design under uncertainty*. Journal of Mining Science
2. TABESH, MOHAMMAD, MIETH, C., & ASKARI-NASAB, H (2014, 273-298). *A multi-step approach to long-term open-pit production planning*. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 5(4).
3. DIMITRAKOPOULOS, R., FARRELLY, C. T., & GODOY, M (2002). *Moving forward from traditional optimization: Grade uncertainty and risk effects in open-pit design*. Institution of Mining and Metallurgy. Transactions. Section A: Mining Technology.
4. VALLÉE, M (2000). *Mineral resource + engineering, economic and legal feasibility = ore reserve*. CIM Bulletin.
5. DEUTSCH, C.V., JOURNEL, A. G (1998). *GSLIB: geostatistical software library and user's guide* (2nd Editio). New York: Oxford University Press.
6. TABESH, M, & ASKARI-NASAB, H (2011,158-169). *Two-stage clustering algorithm for block aggregation in open pit mines*. Mining Technology, 120(3).
7. CPLEX (2009, 46(53), 157). *User's Manual for CPLEX*. International Business Machines Corporation.
8. INC., M (2007). MATLAB (R2007b) Software. Natick, MA, USA.

Thông tin của tác giả:

TS. Vũ Đình Trọng

Giảng viên Khoa Mỏ và Công Trình, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh
Điện thoại: +(84).869.437.970 - Email: vudinhtrong@qui.edu.vn

TS. Nguyễn Tô Hoài

Phó trưởng Bộ môn Kỹ thuật khai thác khoáng sản, Khoa Mỏ và Công Trình, Trường Đại học Công nghiệp Quảng Ninh
Điện thoại: +(84).912.298.997 - Email: nguyentohoai@qui.edu.vn

KS. Tô Hữu Cường

Công ty 91- chi nhánh tổng công ty Đông Bắc
Điện thoại: +(84).934.202.421

OPTIMIZATION OF CEMENT LIMESTONE QUARRY PRODUCTION PLANNING TO CONSISTENTLY SUPPLY RAW MATERIALS FOR CEMENT PLANTS

Information about authors:

Vu Dinh Trong, Ph.D, Quang Ninh University of Industry, email: vudinhtrong@qui.edu.vn

Nguyen To Hoai, Ph.D, Quang Ninh University of Industry , email: nguyentohoai@qui.edu.vn

To Huu Cuong, Engineer, 91 Company - Dong Bac Corporation Branch

ABSTRACT:

Long-term mining production planning for cement limestones quarries is a vital task to supply a sustainable raw materials for cement plants. In normal cases, quarry production planning is completed by manual calculations which meetss technical and technological mining conditions. However, this method is worthy efforts and results in the increase of expenses for purchasing additive materials while varying cement product quality. To eliminate these shortcomings, most cement quarries have applied deposit block models which integrate with optimization algorithms operating in computers. Nevertheless, geological uncertainty leads to the unsustainability and in some cases the depletion in raw material supply. This research proposess a new solution to mitigate those drawbacks. In addition, an application has been introduced based on this solution to evaluate its efficiency in a case study in Tà Thiết limeston quarry.

Keywords: limestone quarry, long-term mine production planning, raw material, additives, optimization, simulation

REFERENCES

1. GROENEVELD, B., & TOPAL, E (2011, 212-226). *Flexible open-pit mine design under uncertainty*. Journal of Mining Science
2. TABESH, MOHAMMAD, MIETH, C., & ASKARI-NASAB, H (2014, 273–298). *A multi-step approach to long-term open-pit production planning*. International Journal of Mining and Mineral Engineering, 5(4).
3. DIMITRAKOPOULOS, R., FARRELLY, C. T., & GODOY, M (2002). *Moving forward from traditional optimization: Grade uncertainty and risk effects in open-pit design*. Institution of Mining and Metallurgy. Transactions. Section A: Mining Technology.
4. VALLÉE, M (2000). *Mineral resource + engineering, economic and legal feasibility = ore reserve*. CIM Bulletin.
5. DEUTSCH, C.V., JOURNEL, A. G (1998). *GSLIB: geostatistical software library and user's guide* (2nd Editio). New York: Oxford University Press.
6. TABESH, M, & ASKARI-NASAB, H (2011,158–169). *Two-stage clustering algorithm for block aggregation in open pit mines*. Mining Technology, 120(3).
7. CPLEX (2009, 46(53), 157). *User's Manual for CPLEX*. International Business Machines Corporation.
8. INC., M (2007). *MATLAB (R2007b) Software*. Natick, MA, USA.

Ngày nhận bài: 11/12/2024;

Ngày gửi phản biện: 16/12/2024;

Ngày nhận phản biện: 28/12/2024;

Ngày chấp nhận đăng: 05/01/2025.