

**PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCES IN
SURFACE MINING FOR ENVIRONMENTAL PROTECTION AND SUSTAINABLE
DEVELOPMENT 17 OCTOBER 2025, HA NOI, VIET NAM**



**THE 60th ANNIVERSARY
OF SURFACE MINING EDUCATION**

ADVANCES IN SURFACE MINING FOR ENVIRONMENTAL PROTECTION AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT-2025 (ASMES - 2025)



TRANSPORT PUBLISHING HOUSE, HA NOI, VIET NAM



ASMES - 2025

www.khaithacloithien.edu.vn



The necessity of researching and developing a monitoring database and a slope stability warning program for pit walls and waste dumps using digital models integrated with artificial intelligence (AI) for open-pit mines under TKV

Luu Van Thuc¹, Do Van Trieu², Le Ba Phuc², Le Thi Thu Hoa³

¹ Vietnam National Coal and Mineral Industries Holding Corporation Limited

² Institute of Mining Science and Technology, Ha Noi, Vietnam

³ Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

ABSTRACT

In the context of the Fourth Industrial Revolution, the integration of artificial intelligence (AI) into the mineral resources sector has increasingly demonstrated outstanding effectiveness in improving operational efficiency, optimizing management processes, and enhancing the ability to forecast and warn of safety risks. Worldwide, numerous studies have confirmed the potential of advanced machine learning models such as LSTM, SVM..., as well as hybrid approaches combining AI with numerical modeling (AI + LEM/FEM), in analyzing and predicting slope stability of pit walls and waste dumps with high reliability (>85%). These models effectively utilize real-time data sources, including displacement monitoring, geomechanical properties of rock and soil, and hydrological conditions at open-pit mines. Currently, open-pit mines under the Vietnam National Coal and Mineral Industries Group (TKV) possess extensive geological and geodetic datasets, providing favorable conditions for developing and applying AI-based analytical and predictive models for slope and waste dump stability. The research, development, and implementation of a stability forecasting system for pit walls and waste dumps—based on big data, artificial intelligence, and numerical modeling—not only enhance safety monitoring capabilities but also represent a practical solution contributing to the sustainable development of Vietnam's mining industry in general and TKV in particular in the era of digital transformation.

Keywords:

Stability database, Hybrid AI, Pit slope stability, Waste dump stability.

**Corresponding author.*

E-mail address: lethithuhoa@humg.edu.vn



ASMES - 2025

www.khaithaclothien.edu.vn



Nghiên cứu xây dựng cơ sở dữ liệu quan trắc dịch động và chương trình cảnh báo ổn định bờ mỏ, bãi thải bằng mô hình số kết hợp trí tuệ nhân tạo (AI) cho các mỏ lộ thiên thuộc TKV

Lưu Văn Thực¹, Đỗ Văn Triều², Lê Bá Phúc², Lê Thị Thu Hoa³

¹ Tập đoàn Công nghiệp Than – Khoáng sản Việt Nam, Hà Nội, Việt Nam

² Viện Khoa học Công nghệ Mỏ - Vinacomin, Hà Nội, Việt Nam

³ Trường Đại học Mỏ-Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

TÓM TẮT

Trong bối cảnh cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ tư, việc tích hợp các thành tựu của trí tuệ nhân tạo (AI) vào lĩnh vực khoáng sản đang ngày càng chứng minh hiệu quả vượt trội trong việc nâng cao hiệu quả sản xuất kinh doanh, tối ưu hóa công tác quản trị và tăng cường khả năng dự báo – cảnh báo rủi ro về an toàn. Trên thế giới, nhiều nghiên cứu đã khẳng định tiềm năng của các mô hình học máy tiên tiến như LSTM, SVM,... cũng như các mô hình kết hợp giữa trí tuệ nhân tạo và mô hình số (AI + LEM/FEM) trong phân tích và dự báo ổn định bờ mỏ, bãi thải với độ tin cậy cao (>85%). Các mô hình này sử dụng hiệu quả các nguồn dữ liệu quan trắc dịch động, đặc tính cơ lý của đất đá, điều kiện thủy văn,... theo thời gian thực tại các mỏ lộ thiên. Hiện nay, các mỏ lộ thiên thuộc Tập đoàn Công nghiệp Than - Khoáng sản Việt Nam (TKV) có hệ thống dữ liệu địa chất – trắc địa phong phú, là điều kiện thuận lợi để phát triển và ứng dụng các mô hình phân tích – dự báo ổn định bờ mỏ, bãi thải dựa trên AI. Việc nghiên cứu, xây dựng và triển khai hệ thống dự báo ổn định bờ mỏ, bãi thải dựa trên nền tảng dữ liệu lớn và trí tuệ nhân tạo, mô hình số không chỉ góp phần nâng cao năng lực giám sát an toàn mà còn là giải pháp góp phần phát triển bền vững cho ngành khai khoáng Việt Nam nói chung và TKV nói riêng trong thời kỳ chuyển đổi số.

Từ khóa: Cơ sở dữ liệu ổn định, Mô hình AI kết hợp mô hình số, ổn định bờ mỏ, ổn định bãi thải.

1. Mở đầu

Hiện nay, khai thác lộ thiên (KTLT) vẫn giữ vai trò chủ đạo trong ngành công nghiệp khai khoáng tại Việt Nam. Theo Quy hoạch tổng thể về năng lượng quốc gia thời kỳ 2021–2030, tầm nhìn đến 2050 (Quyết định số 893/QĐ-TTg, ngày 26/7/2023) và Quy hoạch thăm dò, khai thác, chế biến và sử dụng khoáng sản (Quyết định số 866/QĐ-TTg, ngày 18/7/2023), sản lượng than nguyên khai tại các mỏ lộ thiên thuộc TKV được duy trì ở mức 11,3–12 triệu tấn/năm đến năm 2030, tương ứng khối lượng đất đá bóc đạt 124–156 triệu m³/năm, tập trung chủ yếu tại vùng Quảng Ninh. Đối với khoáng sản đồng tại Lào Cai (mỏ Sin Quyền, mỏ

Tả Phời), công suất các mỏ đạt từ 1,0–2,05 triệu tấn quặng nguyên khai/năm, khối lượng đất đá bóc từ 5,0 –20,0 triệu m³/năm.

Quá trình khai thác các mỏ lộ thiên ngày càng mở rộng không gian, sắp tới một số mỏ có chiều sâu khai thác lớn như bảng 1.

Bảng 1. Thông số bờ mỏ đặc trưng của một số mỏ lộ thiên lớn thuộc TKV

TT	Tên mỏ	Chiều sâu kết thúc đáy mỏ, m	Chiều cao bờ mỏ, m	Góc dốc bờ mỏ, độ	Ghi chú
1	Mỏ Đèo Nai-Cọc Sáu	-350	395 ÷ 650	25 ÷ 28	
2	Cao Sơn	-325	390 ÷ 490	30 ÷ 31	
3	Hà Tu	-250	385 ÷ 470	32 ÷ 36	
4	Sin Quyền	-307	440 ÷ 550	38 ÷ 40	
5	Khánh Hòa	-400	400 ÷ 430	29 ÷ 34	
6	Na Dương	+18	282 ÷ 310	28 ÷ 33	

Với thông số hình học như bảng 1 thấy rằng nguy cơ mất ổn định bờ mỏ do nhiều yếu tố bất lợi như: Chiều cao bờ lớn, điều kiện địa chất – địa chất thủy văn (ĐCTV) phức tạp, tải trọng tác động lớn, rung chấn do nổ mìn, biến đổi khí hậu. Hiện nay, trượt lở bờ mỏ đã xảy ra tại nhiều mỏ như Đèo Nai, Na Dương, Cọc Sáu, Cao Sơn, Khe Chàm II, Sin Quyền, gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến an toàn và hiệu quả khai thác.

Hiện nay, các bãi thải ở nhiều khu vực có chiều cao lớn cũng tiềm ẩn nhiều nguy cơ xảy ra trượt lở như: Đông Cao Sơn, Nam Khe Tam, Chính Bắc, bãi ngoài Sin Quyền,... có chiều cao từ 100–270 m, mỗi bãi thải từ 5–10 tầng, góc dốc bãi thải từ 30–37°, một số bãi thải gần khu dân cư hoặc các công trình cần bảo vệ. Trận mưa lịch sử tại Quảng Ninh năm 2015 cho thấy các bãi thải khi bão hòa nước sẽ xảy ra trượt lở với khối lượng lớn.

Để giảm thiểu các rủi ro tiềm ẩn trong quá trình khai thác, đổ thải các đơn vị thường xuyên kiểm tra, quan trắc dịch động và đánh giá điều kiện an toàn bờ mỏ, bãi thải, đặc biệt tại các khu vực trọng yếu. Công tác quan trắc dịch động được thực hiện theo chu kỳ, nhờ đó góp phần đưa ra cảnh báo và giải pháp xử lý kịp thời. Với hệ thống dữ liệu quan trắc dịch động định kỳ được các đơn vị thực hiện trong nhiều năm đủ để xây dựng cơ sở dữ liệu (CSDL) kết hợp với mô hình trí tuệ nhân tạo (AI) để đánh giá và cảnh báo ổn định bờ mỏ, bãi thải. Việc ứng dụng các mô hình học máy (hồi quy, phân loại...), phương pháp số (FEM, LEM) cùng với ngôn ngữ lập trình mã nguồn mở sẽ giúp phát triển một chương trình cảnh báo ổn định bờ mỏ – bãi thải theo thời gian thực, phân vùng mức độ nguy cơ trượt lở từ thấp đến cao, nhằm chủ động trong công tác phòng ngừa và xử lý sự cố.

2. Cơ sở dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Khung dữ liệu tích hợp (Integrated Data Framework)

Để xây dựng một chương trình cảnh báo ổn định bờ mỏ, bãi thải có độ tin cậy cao, việc thiết lập một khung dữ liệu toàn diện và được chuẩn hóa là yêu cầu tiên quyết. Hiện nay, thách thức lớn nhất đối với các mỏ lộ thiên là sự phân mảnh của dữ liệu thực tế. Dữ liệu địa chất, trắc địa, thủy văn, và quan trắc dịch động thường được lưu trữ riêng lẻ, không đồng bộ

về thời gian và không gian, gây khó khăn cho việc phân tích tổng hợp. Do đó, sự thay đổi mô hình từ thu thập dữ liệu riêng lẻ sang xây dựng một trung tâm lưu trữ dữ liệu, khi đó các nguồn thông tin được tích hợp và chuẩn hóa. Đây là nền tảng cơ bản cho các mô hình AI (Bui, 2024).

Các nhóm dữ liệu đầu vào cho mô hình bao gồm:

- Dữ liệu địa chất công trình (ĐCCT), bao gồm: Lực dính kết (c), góc nội ma sát (φ), khối lượng riêng (γ), và các thông số biến dạng như mô đun đàn hồi (E) và hệ số Poisson (ν),...

Các dữ liệu này được thu thập từ báo cáo khảo sát ĐCCT (Qing, 2025).

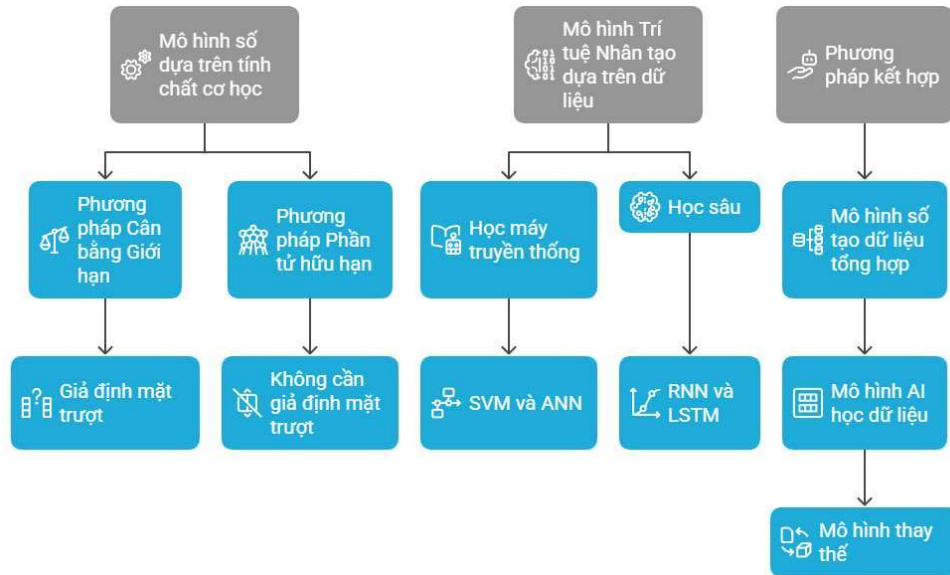


Hình 1. Nhóm dữ liệu đầu vào cho mô hình dự báo AI

- Dữ liệu ĐCTV: Đây là nhóm dữ liệu động, bao gồm áp lực nước lỗ rỗng (ru), chiều cao mực nước ngầm, lưu lượng mưa. Các số liệu này được thu thập từ các trạm đo mưa tự động và các cảm biến đo áp lực nước lỗ rỗng (piezometer) đặt trong bờ mỏ (Qing, 2025).

- Thông số hình học mỏ, bao gồm: Chiều cao bờ mỏ, bãi thải (H), góc dốc bờ mỏ (β) và góc dốc sườn tầng (α).

- Dữ liệu quan trắc chuyển vị: Dữ liệu chuỗi thời gian về tốc độ và gia tốc chuyển vị bề mặt về trạng thái ổn định của bờ mỏ, bãi thải.



2.2. Các phương pháp mô hình hóa

Để giải quyết bài toán dự báo ổn định bờ mỏ, bãi thải, có thể chia thành 3 nhóm chính: (i) Mô hình số dựa trên tính chất cơ học; (ii) Mô hình dựa trên dữ liệu; (iii) Mô hình kết hợp (Hình 2).

Hình 2. Các phương pháp dự báo ổn định bờ mỏ, bãi thải

Từ hình 2 cho thấy, với mô hình số dựa trên tính chất cơ học là các phương pháp: Phương pháp Cân bằng Giới hạn (Limit Equilibrium Method – LEM) và Phương pháp Phần tử hữu hạn (Finite Element Method - FEM); đối với mô hình dựa trên dữ liệu là phương pháp học máy (Machine Learning) và phương pháp học sâu (Deep Learning); với phương pháp kết hợp là phương pháp đồng bộ giữa mô hình số và mô hình trí tuệ nhân tạo

Mô hình số (FEM/DEM) đóng vai trò như một "nhà máy sản xuất dữ liệu tổng hợp", tạo ra một bộ dữ liệu phong phú, có cơ sở khoa học vững chắc mà không thể thu thập được trong thực tế. Sau đó, mô hình AI học các mối quan hệ phức tạp bên trong bộ dữ liệu này, tạo ra một "mô hình thay thế" (surrogate model) vừa có độ chính xác cao, dự báo theo thời gian thực. Cách tiếp cận này là sự liên kết của mô hình số và tốc độ dự báo của AI, tạo ra sự ưu việt so với từng phương pháp riêng lẻ (Verma, 2016).

Bảng 2. Các phương pháp dự báo ổn định bờ mỏ, bãi thải

Phương pháp	Nguyên lý cơ bản	Dữ liệu đầu vào chính	Ưu điểm chính	Ứng dụng phù hợp nhất
LEM	Cân bằng lực/mô-men trên mặt trượt giả định.	c, ϕ , γ , H, β	Nhanh, đơn giản, phổ biến.	Phân tích sơ bộ, thiết kế ban đầu.
FEM	Giải hệ phương trình cân bằng trên lưới phần tử.	c, ϕ , γ , E, ν , ru	Chính xác, không giả định mặt trượt, tính được biến dạng.	Phân tích chi tiết, nghiên cứu cơ chế phá hủy
SVM/ANN	Tìm siêu phẳng phân tách hoặc ánh xạ phi tuyến.	Dữ liệu lịch sử (các tham số và kết quả)	Có khả năng mô hình hóa quan hệ phi tuyến.	Dự báo dựa trên dữ liệu có sẵn.
LSTM	Mạng nơ-ron có bộ nhớ để xử lý chuỗi.	Dữ liệu chuỗi thời gian (chuyển vị, mưa)	Dự báo xu hướng thời gian tốt, nắm bắt phụ thuộc dài hạn.	Dự báo chuyển vị, phân tích chuỗi thời gian.
Mô hình Lai (FEM+AI)	AI học từ dữ liệu do FEM tạo ra.	Dải biến thiên của các tham số địa kỹ thuật, hình học.	Kết hợp độ chính xác vật lý của FEM và tốc độ của AI.	Hệ thống cảnh báo sớm, phân tích rủi ro thời gian thực.

2.3. Ứng dụng mô hình số và AI trong cảnh báo ổn định bờ mỏ, bãi thải ở một số mỏ trên thế giới

Việc áp dụng các phương pháp tiên tiến kết hợp giữa mô hình số và AI đã được triển khai thành công tại nhiều mỏ lộ thiên trên thế giới như: Mỏ than Latrobe Valley, Victoria (Úc), mỏ quặng sắt Choghart (Iran), mỏ quặng đồng Minera Los Pelambres (Chile), mỏ vàng lộ thiên (Papua New Guinea),... (Amini, 2024), (Contador Villegas, 2021).

Bảng 3. Ứng dụng AI trong dự báo ổn định tại một số mỏ trên thế giới

Tên mỏ/nước	Phương pháp/Mô hình AI	Dữ liệu đầu vào	Kết quả chính/Độ chính xác
Mỏ than, Latrobe Valley (Úc)	Mô hình AI phi tuyến	Chiều dày lớp phủ, đặc tính cơ lý đá, góc dốc bờ mỏ	$R^2 = 0.929$
Mỏ sắt Choghart	ANFIS (Hệ thống	Khối lượng riêng, lực dính,	Xác định tường phía nam

Tên mỏ/nước	Phương pháp/Mô hình AI	Dữ liệu đầu vào	Kết quả chính/Độ chính xác
(Iran)	suy luận mờ-nơron)	góc ma sát, chiều cao, góc dốc, áp lực nước lỗ rỗng	là nguy hiểm nhất (FS = 0.81)
Mỏ đồng Minera Los Pelambres (Chile)	Mạng Nơ-ron (NN)	Dữ liệu chuỗi thời gian về chuyển vị bề mặt từ radar	Tăng tỷ lệ phát hiện sụt lở nhỏ từ 43% lên 82%
Mỏ vàng lộ thiên (Papua New Guinea)	Mô hình số 3D (LEM & FEM) + Dữ liệu Radar	Dữ liệu radar thời gian thực, dữ liệu áp lực nước lỗ rỗng	Xác thực cơ chế phá hoại, đánh giá tác động của bão hòa, đề xuất giải pháp khắc phục
Bãi thải quặng đuôi	Mô hình lai FDM + XGBoost/RF	767 mô hình số (FDM) với các tham số: H, θ , w, lực dính, góc ma sát, độ bão hòa	Mô hình XGBoost hiệu quả nhất ($R^2 = 98.22\%$)
Mỏ lộ thiên, Tây Nam (Trung Quốc)	5 mô hình ML + UAV & GIS	Dữ liệu đa nguồn: UAV (hình ảnh), GIS (độ dốc, hướng dốc), địa chất (thạch học, đứt gãy)	Kết hợp ML và dữ liệu đa nguồn cho kết quả dự báo chính xác, hiệu quả
Mỏ lộ thiên Rize, (Thổ Nhĩ Kỳ)	XGBoost, RF, ANN, SVM, C4.5, NB	13 yếu tố (độ dốc, thạch học, sử dụng đất, NDVI, khoảng cách đến đường/sông, v.v.)	Mô hình XGBoost vượt trội với độ chính xác 92.58% và AUC 0.923

Kết quả tổng hợp tại Bảng 2 cho thấy, việc tích hợp AI và các công nghệ giám sát hiện đại vào thực tiễn sản xuất đã được những kết quả đáng khích lệ trong quản lý rủi ro về an toàn bờ mỏ và bãi thải.

3. Nghiên cứu xây dựng cơ sở dữ liệu và hệ thống cảnh báo ổn định bờ mỏ, bãi thải bằng phương pháp số

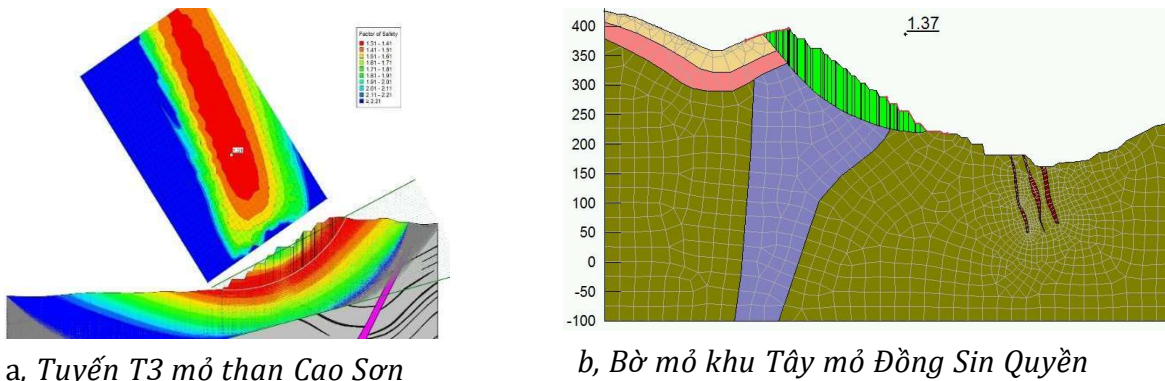
3.1. Hiện trạng công tác quan trắc và dự báo ổn định bờ mỏ, bãi thải tại các mỏ lộ thiên thuộc TKV

Hàng năm, các mỏ lộ thiên thuộc TKV thực hiện quan trắc dịch động bờ mỏ và bãi thải tại các khu vực có biến dạng, nhằm đánh giá ổn định và tiềm ẩn rủi ro về an toàn. Các thông số quan trọng như: Độ lún, dịch chuyển ngang, véc tơ và tốc độ dịch chuyển. Kết quả quan trắc dịch động tại một số tuyến đặc trưng ở một số mỏ được thể hiện tại Bảng 4 (Cao Sơn, 2023) (Đèo Nai, 2023) (IMSAT, 2023).

Bảng 4. Tổng hợp kết quả quan trắc dịch động một số mỏ lộ thiên giai đoạn 2022 - 2023

TT	Đại lượng dịch chuyển	Đơn vị	Mỏ than Cao Sơn		Mỏ than Khe Chàm II	Mỏ than Đèo Nai	Mỏ đồng Sin Quyền
			Bờ mỏ (Tuyến T3)	Bãi thải Bàng Nâu (Tuyến T8)	Bờ mỏ (Tuyến B)	Bờ mỏ (Tuyến 3)	Bờ mỏ Khu Tây
1	Độ lệch hướng tuyến cực đại	mm	2.519	1.728	2.522	1.841	-
2	Độ lún cực đại	mm	-352	-1.976	-2.193	-14.429	- 40
3	Dịch động ngang cực đại	mm	293	2.016	5.634	585	89
4	Véc tơ dịch chuyển	mm	3.102	1.976	4.762	14.432	72 ÷ 97
5	Tốc độ dịch chuyển	mm/ngđ	6,00	3,875	9,337	34,4	5,2 ÷ 6,9

Quá trình đánh giá, dự báo ổn định được thực hiện theo 02 phương pháp chính: Phương pháp giải tích và phương pháp mô hình số (LEM/FEM). Các thông số đưa vào chủ yếu như sau: *Thông số kỹ thuật*: Mô hình (mặt cắt 2D hoặc mô hình 3D) thể hiện hình dạng và các thông số bờ mỏ, bãi thải; *các yếu tố tự nhiên*: Thể trọng, tấn/m³; lực dính kết, kG/cm²; góc nội ma sát trong, độ; chiều cao mực nước ngầm, m; các lớp đất đá, than và hướng cảm đất đá (đối với bờ mỏ). Một số kết quả dự báo bằng phương pháp số được thể hiện tại Hình 3.



Hình 3. Kết quả dự báo ổn định với mô hình LEM và FEM tại một số mỏ lộ thiên

Kết quả quan trắc dịch động bờ mỏ của một số mỏ lộ thiên thuộc TKV giai đoạn 2022 ÷ 2023, các đơn vị đã có giải pháp xử lý kịp thời các khu vực có nguy cơ trượt lở, giảm thiểu rủi ro về an toàn trong sản xuất. Tuy nhiên, việc đánh giá ổn định bờ mỏ, bãi thải còn độc lập theo mỗi phương pháp.

3.2. Nghiên cứu, đề xuất xây dựng hệ thống giám sát, cảnh báo sớm trượt lở bờ mỏ, bãi thải bằng phương pháp số

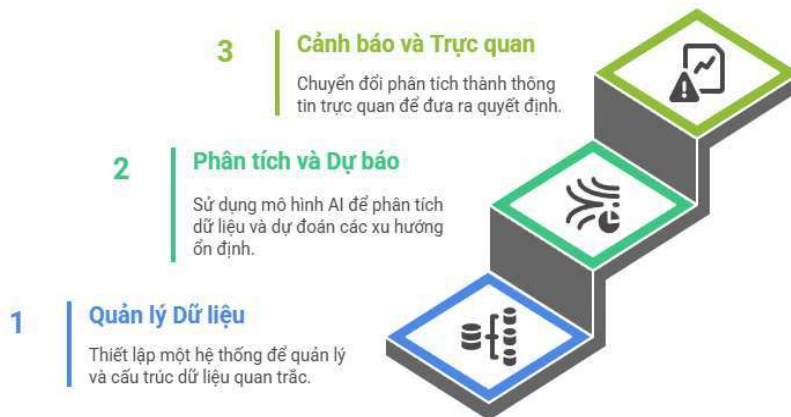
a. Kiến trúc hệ thống giám sát, cảnh báo an toàn

Dựa trên phương pháp luận đã trình bày, một kiến trúc hệ thống tổng thể được đề xuất, bao gồm 3 module chính hoạt động phối hợp để tạo thành một chu trình xử lý thông tin khép kín, từ thu thập dữ liệu tại hiện trường đến cung cấp cảnh báo cho người ra quyết định (Hình 4).

Sơ đồ hình 4 cho thấy:

- **Module 1- Quản lý Dữ liệu:** Đây là nền tảng của toàn bộ hệ thống, chịu trách nhiệm quản lý dữ liệu quan trắc dịch động, dữ liệu ĐCCT, ĐCTV của bờ mỏ, bãi thải.

Tại đây, dữ liệu được gán nhãn thời gian (timestamp), tham chiếu không gian (georeference), sàng lọc, phân loại theo mục tiêu dự báo.



Hình 4. Kiến trúc hệ thống giám sát, cảnh báo ổn định

- **Module 2- Phân tích và dự báo:** Đây là "bộ não" của hệ thống, nơi các mô hình AI đã

được huấn luyện và xử lý dữ liệu gần thời gian thực, bao gồm:

+ Mô hình dự báo FS (XGBoost/RF,... và LEM/FEM): Mô hình này liên tục nhận dữ liệu cập nhật về các yếu tố ảnh hưởng, đặc biệt là áp lực nước ngầm (từ piezometer) hoặc từ một mô hình thủy văn dự báo dựa trên lượng mưa, để xác định hệ số an toàn (FS) tức thời cho các khu vực khác nhau của bờ mỏ, bãi thải.

+ Mô hình dự báo chuyển vị (LSTM): Mô hình này chuyên phân tích chuỗi dữ liệu chuyển vị bề mặt thu thập từ dữ liệu quan trắc dịch động. Bằng cách nhận dạng các mẫu hình biến dạng trong quá khứ, nó có thể ngoại suy và dự báo xu hướng chuyển vị trong tương lai gần (ví dụ: trong 24-72 giờ tới).

- *Module 3- Cảnh báo và trực quan:* Module này có nhiệm vụ chuyển đổi các kết quả phân tích phức tạp thành thông tin trực quan, dễ hiểu và giúp cho cán bộ có thẩm quyền ra quyết định kịp thời.

+ Trực quan theo không gian: Hiển thị trạng thái ổn định của toàn bộ bờ mỏ, bãi thải thông qua các bản đồ màu 3D, thể hiện giá trị FS hoặc tốc độ chuyển vị theo các cấp độ khác nhau.

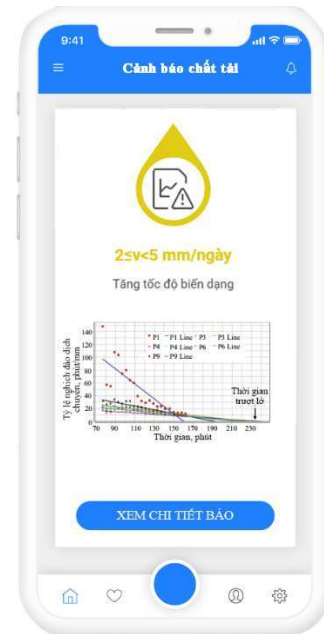
+ Trực quan theo thời gian thực: Hiển thị theo thời gian của các thông số như chuyển vị tích lũy, tốc độ, gia tốc, lượng mưa, và mực nước ngầm, biểu đồ đường dự báo của mô hình LSTM theo dữ liệu thực tế.

Hệ thống cảnh báo tự động: Khi bất kỳ một thông số nào (FS, tốc độ chuyển vị) vượt qua các ngưỡng an toàn theo quy phạm, hệ thống sẽ tự động kích hoạt cảnh báo đa kênh: Hiển thị pop-up trên dashboard, gửi tin nhắn SMS và email đến những người có thẩm quyền, trường hợp khẩn cấp có thể kích hoạt còi báo động tại hiện trường.

b. Thiết kế ngưỡng cảnh báo sớm về an toàn

Một hệ thống cảnh báo yêu cầu phải có các ngưỡng (thresholds) được xác định cụ thể, khi các thông tin vượt ngưỡng sẽ kích hoạt các cảnh báo. Tốc độ chuyển vị là thông số quan trọng nhất để cảnh báo sớm trượt lở bờ mỏ, bãi thải. Tốc độ chuyển vị phản ánh trực tiếp trạng thái động học của khối trượt với mô hình phá hủy đất đá theo 3 giai đoạn: (i) Biến dạng ban đầu (primary creep), (ii) biến dạng ổn định (secondary creep), (iii) biến dạng gia tốc (tertiary creep) dẫn đến phá hủy. Giai đoạn chuyển tiếp từ biến dạng ổn định sang biến dạng gia tốc là thời điểm tối ưu để phát đi cảnh báo.

Theo nguyên tắc trên, một hệ thống cảnh báo đa cấp cho phép các đơn vị sản xuất có những ứng phó phù hợp với mức độ rủi ro. Các giá trị ngưỡng cảnh báo được thiết lập phù hợp cho từng khu vực dựa trên đặc điểm của bờ mỏ, bãi thải và dữ liệu quan trắc dịch động (Hình 4).



Hình 5. Ứng dụng hiển thị thông báo cảnh báo ổn định



Hình 4. Sơ đồ hệ thống cảnh báo dựa trên tốc độ chuyển vị của bờ mỏ, bãi thải

Hình 4 cho thấy: **Cấp độ 1** (Xanh lá): Trạng thái ổn định hoặc biến dạng nhỏ, cần quan trắc theo chu kỳ bình thường; **Cấp độ 2** (Vàng): Xuất hiện gia tăng tốc độ biến dạng, cần tăng chu kỳ quan trắc; **Cấp độ 3** (Cam): Tốc độ biến dạng gia tăng rõ rệt, nguy cơ sạt trượt cao, cần hạn chế hoạt động hoặc tạm dừng hoạt động của người và thiết bị trong khu vực ảnh hưởng, chuẩn bị sẵn sàng các biện pháp ứng phó; **Cấp độ 4** (Đỏ): Biến dạng gia tốc mạnh, phá hủy có thể xảy ra bất cứ thời điểm nào, cần di chuyển người và thiết bị ngay lập tức ra khỏi khu vực ảnh hưởng, kích hoạt kế hoạch ứng cứu khẩn cấp.

Với nghiên cứu, đề xuất như trên, việc xây dựng cơ sở dữ liệu quan trắc dịch động và chương trình cảnh báo ổn định bờ mỏ, bãi thải bằng mô hình số kết hợp trí tuệ nhân tạo (AI) cho các mỏ lộ thiên thuộc TKV là một yêu cầu cấp thiết, giúp cho các đơn vị khai thác lộ thiên giảm thiểu các rủi ro về an toàn, nâng cao hiệu quả sản xuất kinh doanh.

4. Kết luận

Trong điều kiện khai thác của các mỏ lộ thiên sâu của TKV, các yếu tố ĐCCT, ĐCTV và biến đổi khí hậu đang trở thành những thách thức lớn, ảnh hưởng trực tiếp đến độ ổn định bờ mỏ, bãi thải, cũng như hiệu quả sản xuất kinh doanh. Do đó, việc giám sát và dự báo ổn định bờ mỏ, bãi thải bằng hệ thống cảnh báo sớm tích hợp, ứng dụng mô hình số kết hợp với trí tuệ nhân tạo (AI) là cần thiết. Mô hình này cho phép tận dụng dữ liệu quan trắc lớn (Big Data), tăng cường khả năng dự báo theo thời gian thực và hỗ trợ ra quyết định ứng phó kịp thời. Đây là tiền đề quan trọng góp phần nâng cao năng lực quản lý rủi ro, hiệu quả vận hành và đảm bảo an toàn trong ngành công nghiệp mỏ Việt Nam.

Tài liệu tham khảo:

Amini, V. K. (2024). Slope stability analysis of the open-pit walls using artificial intelligence. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 58(3), 271-279.

Bui, D. K. (2024). Integrating machine learning workflow into numerical simulation for optimizing oil recovery in sand-shale sequences and highly heterogeneous reservoir. *Geotechnics*, 1081-1105.

Công ty Cổ phần than Cao Sơn - TKV (2023). *Báo cáo Thi công thành lập lưới khống chế, đo vẽ bản đồ địa hình, quạ trắc dịch động tại Công ty Cổ phần than Cao Sơn - TKV NĂM 2023*.

Contador Villegas, N. H. (2021). Artificial intelligence applied to the detection and early warning of geotechnical instabilities in mining slopes. *Australian Centre for Geomechanics*, 227-234.

Công ty Cổ phần than Đèo Nai - Vinacomin. (2023). *Báo cáo kết quả quan trắc dịch động bờ mỏ, bãi thải năm 2023 Công ty Cổ phần than Đèo Nai - Vinacomin*.

Viện Khoa học Công nghệ Mỏ - Vinacomin. (2023). *Báo cáo công tác quan trắc dịch động khu vực nứt nẻ bờ mỏ Đồng Sin Quyền*.

Qing, L. X. (2025). Intelligent prediction and numerical simulation of landslide prediction in open-pit mines based on multi-source data fusion and machine learning. *Sensors*, 3131.

Verma, A. K. (2016). A hybrid FEM–ANN approach for slope instability prediction. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 97(3), 171-180.

60 Years
1965 - 2025
THE 60th ANNIVERSARY
OF SURFACE MINING EDUCATION

ISBN: 978-604-76-3193-3



9 786047 631933

NOT FOR SALE