

KỸ THUẬT NỔ MÌN TIÊN TIẾN TRONG KHAI THÁC LỘ THIÊN: XU HƯỚNG CÔNG NGHỆ, KIỂM SOÁT RỦI RO VÀ ĐỊNH HƯỚNG PHÁT TRIỂN THÂN THIỆN VỚI MÔI TRƯỜNG

Bùi Xuân Nam^{1, 2, 3, *}, Lê Ngọc Ninh^{3, 4}, Trần Quang Hiếu^{3, 5}

TÓM TẮT

Nổ mìn là khâu then chốt trong chuỗi công nghệ khai thác lộ thiên, có ảnh hưởng quyết định đến hiệu quả đập vỡ, năng suất xúc bốc - vận tải, chi phí sản xuất cũng như mức độ rủi ro an toàn và tác động môi trường. Trong bối cảnh các mỏ lộ thiên Việt Nam ngày càng khai thác xuống sâu, điều kiện địa chất phức tạp và khoảng cách đến khu dân cư ngày càng thu hẹp, yêu cầu đổi mới kỹ thuật nổ mìn theo hướng an toàn, chính xác và thân thiện với môi trường trở nên cấp thiết. Bài báo này tổng quan có hệ thống các xu hướng công nghệ nổ mìn tiên tiến, bao gồm hệ thống khởi nổ chính xác (đặc biệt là kíp điện tử), thuốc nổ nhũ tương và giải pháp nạp nổ hiện đại, thiết kế nổ mìn số 3D, giám sát rung chấn và sóng va đập không khí theo thời gian thực, cùng với ứng dụng trí tuệ nhân tạo và học máy trong dự báo và hỗ trợ ra quyết định. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất khung quản trị rủi ro nổ mìn tích hợp kết hợp giữa kiểm soát kỹ thuật, tổ chức và dữ liệu, đồng thời xây dựng lộ trình áp dụng “nổ mìn xanh” theo ba mức phù hợp với quy mô và điều kiện mỏ tại Việt Nam. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn cho việc nâng cao an toàn, giảm tác động môi trường và thúc đẩy phát triển bền vững trong khai thác mỏ lộ thiên.

Từ khóa: công nghệ nổ mìn tiên tiến, giám sát môi trường, nổ mìn lộ thiên, quản trị rủi ro, thân thiện với môi trường.

¹ Phòng Phát triển bền vững Tài nguyên và Môi trường, Viện Công nghệ Tiên tiến, Trường Đại học Tôn Đức Thắng

² Khoa Môi trường và Bảo hộ Lao động, Trường Đại học Tôn Đức Thắng

³ Hội Kỹ thuật Nổ mìn Việt Nam

⁴ Vụ Môi trường, Bộ Nông nghiệp và Môi trường

⁵ Trường Đại học Mỏ - Địa chất

*Email: buixuannam@tdtu.edu.vn

1. Mở đầu

Trong khai thác mỏ lộ thiên, nổ mìn là khâu mở đầu và mang tính quyết định trong toàn bộ chuỗi công nghệ, từ khoan - nổ mìn, xúc bốc, vận tải đến nghiền sàng và chế biến khoáng sản. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng chất lượng nổ mìn ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng đập vỡ đất đá, hình dạng và độ toi xốp của đồng đá sau nổ, qua đó chi phối năng suất và hiệu quả của các công đoạn tiếp theo (Bhandari, 1997; Jimeno et al., 1995). Nổ mìn không tối ưu làm gia tăng tỷ lệ đá quá cỡ, giảm năng suất xúc bốc, tăng tiêu hao nhiên liệu và chi phí vận hành của thiết bị nghiền sàng (Singh & Singh, 2005; Monjezi et al., 2011).

Bên cạnh hiệu quả kỹ thuật, nổ mìn còn là nguồn phát sinh các rủi ro an toàn và môi trường nghiêm trọng như chấn động nổ mìn, sóng va đập không khí, đá bay, bụi và khí độc, có thể gây ảnh hưởng đến người lao động, công trình và cộng đồng dân cư xung quanh mỏ (ISEE, 2011; Khandelwal & Singh, 2009). Do đó, nổ mìn được xem là một trong những khâu then chốt quyết định đồng thời hiệu quả kinh tế, mức độ an toàn và tính bền vững của khai thác mỏ lộ thiên.

Hoạt động khai thác mỏ lộ thiên tại Việt Nam đang chịu tác động mạnh từ xu thế khai thác xuống sâu, điều kiện địa chất - địa chất công trình ngày càng phức tạp và sự thu hẹp khoảng cách giữa bãi nổ và khu dân cư do quá trình đô thị hóa nhanh. Những yếu tố này làm gia tăng độ nhạy cảm của môi trường xung quanh đối với chấn động, sóng va đập không khí và đá bay (Bui et al., 2019; Khandelwal et al., 2018).

Song song với đó, các yêu cầu pháp lý và tiêu chuẩn kỹ thuật về an toàn, môi trường trong khai thác mỏ ngày càng được siết chặt, tiệm cận với thông lệ quốc tế, đòi hỏi các doanh nghiệp mỏ phải kiểm soát chặt chẽ tác động của nổ mìn thông qua đo đạc, giám sát và dự báo định lượng (ICMM, 2019; Siskind et al., 1980). Trong bối cảnh Cách mạng công nghiệp lần thứ tư, xu hướng “mỏ thông minh - mỏ xanh” với các giải pháp số hóa, tự động hóa, cảm biến và phân tích dữ liệu lớn đang được thúc đẩy mạnh mẽ trong ngành khai khoáng toàn cầu (Drebenstedt & Singhal, 2019; Zhou et al., 2020). Điều này tạo ra động lực rõ ràng cho việc chuyển đổi kỹ thuật nổ mìn từ cách tiếp cận dựa trên kinh nghiệm sang cách tiếp cận dựa trên dữ liệu, mô hình và quản trị rủi ro.

Trước những thách thức nêu trên, bài báo hướng tới việc hệ thống hóa các xu hướng kỹ thuật nổ mìn tiên tiến đang được áp dụng trong khai thác lộ thiên trên thế giới, đồng thời phân tích vai trò của các giải pháp này trong kiểm soát rủi ro và giảm thiểu tác động môi trường (Bhandari, 1997; Jimeno et al., 1995). Trọng

tâm nghiên cứu tập trung làm rõ các công nghệ then chốt như kíp điện tử, thiết kế nổ mìn số, hệ thống giám sát chấn động - sóng và đập không khí và các mô hình dự báo dựa trên trí tuệ nhân tạo (Khandelwal & Singh, 2009; Monjezi et al., 2011).

Bài báo đóng góp một tổng quan có hệ thống về bức tranh công nghệ nổ mìn tiên tiến trong khai thác lộ thiên, làm rõ mối liên hệ giữa công nghệ khởi nổ, thiết kế - mô phỏng, giám sát và phân tích dữ liệu trong kiểm soát rủi ro nổ mìn (ISEE, 2011; ICM, 2019). Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất khung kiểm soát rủi ro tích hợp và định hướng lộ trình áp dụng các giải pháp nổ mìn thân thiện với môi trường phù hợp với điều kiện Việt Nam, góp phần thúc đẩy phát triển bền vững ngành khai khoáng.

2. Tổng quan tác động của nổ mìn lộ thiên và những yêu cầu kiểm soát hiện nay

2.1. Các tác động có hại điển hình của nổ mìn lộ thiên

Hoạt động nổ mìn trong khai thác mỏ lộ thiên, bên cạnh vai trò phá vỡ đất đá, luôn đi kèm với nhiều tác động có hại đến an toàn lao động, môi trường và cộng đồng xung quanh. Các tác động này có mối quan hệ chặt chẽ với đặc điểm địa chất, thông số khoan - nổ mìn, phương tiện khởi nổ và điều kiện không gian mỏ.

2.1.1. Chấn động nổ mìn

Chấn động nổ mìn là một trong những tác động quan trọng và nhạy cảm nhất của nổ mìn lộ thiên, được đặc trưng bởi vận tốc dao động cực đại của hạt (Peak Particle Velocity - PPV), tần số dao động và khả năng gây cộng hưởng với công trình xây dựng. Nhiều nghiên cứu cho thấy PPV là chỉ tiêu được sử dụng phổ biến nhất để đánh giá mức độ ảnh hưởng của chấn động nổ mìn đến công trình và con người (Siskind et al., 1980; Dowding, 1985).

Khi tần số dao động của sóng chấn động trùng hoặc tiệm cận với tần số riêng của công trình, hiện tượng cộng hưởng có thể xảy ra, làm gia tăng đáng kể biên độ rung động và nguy cơ hư hỏng kết cấu, ngay cả khi giá trị PPV không quá lớn (Singh & Singh, 2005). Trong bối cảnh nhiều mỏ lộ thiên ở Việt Nam nằm gần khu dân cư, việc kiểm soát chấn động nổ mìn trở thành yêu cầu bắt buộc nhằm đảm bảo an toàn công trình và giảm thiểu khiếu nại xã hội (Bui et al., 2019).

2.1.2. Sóng va đập không khí

Sóng va đập không khí là dạng sóng áp suất lan truyền trong không khí sinh ra do sự giải phóng năng lượng đột ngột của thuốc nổ và sự chuyển động nhanh của

khối khí tại miệng lỗ mìn. Sóng và đập không khí thường được biểu thị bằng mức áp suất đỉnh, đo bằng đơn vị dB(L) hoặc kPa (ISEE, 2011).

Mặc dù ít gây hư hỏng kết cấu nghiêm trọng như chấn động nền, sóng và đập không khí có thể tạo ra tiếng nổ lớn, làm vỡ kính, gây hoảng sợ cho cộng đồng và là nguồn khiếu nại phổ biến tại các mỏ lộ thiên gần khu dân cư (Siskind et al., 1980). Sóng và đập không khí chịu ảnh hưởng mạnh của điều kiện che chắn miệng lỗ mìn, chất lượng búa, cấu trúc khe nứt đá và điều kiện khí tượng, do đó đòi hỏi phải được kiểm soát đồng thời với chấn động nền trong thiết kế nổ mìn hiện đại (Bhandari, 1997).

2.1.3. Đá bay

Đá bay là một trong những tác động nguy hiểm nhất của nổ mìn lộ thiên do khả năng gây tai nạn nghiêm trọng cho người lao động và công trình xung quanh. Đá bay hình thành khi năng lượng nổ không được sử dụng hiệu quả cho quá trình phá vỡ đất đá mà chuyển hóa thành động năng làm các khối đá văng ra khỏi bãi nổ (Jimeno et al., 1995).

Các nguyên nhân chính gây đá bay bao gồm: burden quá nhỏ, búa không đảm bảo chiều dài và chất lượng, nạp thuốc quá mức, sai lệch vị trí lỗ khoan và điều kiện địa chất không đồng nhất. Phạm vi ảnh hưởng của đá bay có thể lên tới hàng trăm mét trong các vụ nổ lớn, đặc biệt tại các mỏ lộ thiên có mặt tự do lớn và khai thác tầng cao (Monjezi et al., 2011). Do đó, kiểm soát đá bay được xem là ưu tiên hàng đầu trong quản lý an toàn nổ mìn.

2.1.4. Bụi và khí độc sau nổ mìn

Nổ mìn lộ thiên phát sinh một lượng lớn bụi và khí độc, chủ yếu là các khí oxit nitơ (NO_x), carbon monoxide (CO) và khói mìn. Các khí này được tạo ra do quá trình phản ứng nổ không hoàn toàn của thuốc nổ, đặc biệt trong điều kiện lỗ khoan ướt, nạp thuốc không đồng đều hoặc thiếu oxy (ISEE, 2011).

NO_x và CO có thể gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến sức khỏe người lao động, dẫn đến các triệu chứng cấp tính như chóng mặt, khó thở và trong trường hợp nặng có thể gây ngộ độc. Ngoài ra, bụi phát sinh trong nổ mìn góp phần làm suy giảm chất lượng không khí xung quanh mỏ, ảnh hưởng đến môi trường và cộng đồng dân cư lân cận (Monjezi et al., 2011; Jimeno et al., 1995). Vì vậy, kiểm soát bụi và khí độc là một nội dung quan trọng trong xu hướng phát triển nổ mìn thân thiện với môi trường.

2.1.5. Tiếng ồn và rung động thiết bị

Tiếng ồn phát sinh trong quá trình nổ mìn và các hoạt động liên quan như khoan, nạp và dọn bãi mìn có thể vượt quá ngưỡng cho phép đối với môi trường lao động, gây ảnh hưởng đến thính giác và sức khỏe lâu dài của người lao động. Đồng thời, rung động truyền qua thiết bị và nền mỏ có thể làm giảm tuổi thọ máy móc và ảnh hưởng đến độ ổn định của các kết cấu phụ trợ trong mỏ (Dowding, 1985).

2.1.6. Mìn câm, nổ sớm - nổ muộn và sai lệch thời gian vi sai

Mìn câm và hiện tượng nổ sớm hoặc nổ muộn là những rủi ro đặc thù của công tác nổ mìn, liên quan trực tiếp đến độ tin cậy của phương tiện khởi nổ và chất lượng thi công. Sai lệch thời gian vi sai, đặc biệt trong các hệ thống kích truyền thống, có thể dẫn đến hiện tượng trùng nổ, làm tăng tải nổ tức thời, qua đó gia tăng chấn động, sóng va đập không khí và đá bay (ISEE, 2011; Singh & Singh, 2005).

Mìn câm không được phát hiện và xử lý đúng quy trình có thể gây tai nạn nghiêm trọng trong các khâu xúc bốc và khoan tiếp theo. Do đó, giảm thiểu mìn câm và nâng cao độ chính xác thời gian vi sai là yêu cầu then chốt trong các hệ thống nổ mìn tiên tiến hiện nay.

2.2. Hệ thống chỉ tiêu đánh giá tác động và hiệu quả nổ mìn lộ thiên

Để kiểm soát hiệu quả các tác động có hại của nổ mìn lộ thiên đồng thời tối ưu hóa hiệu quả kỹ thuật - kinh tế, việc xây dựng một hệ thống chỉ tiêu đánh giá toàn diện là yêu cầu bắt buộc trong quản lý nổ mìn hiện đại. Các chỉ tiêu này không chỉ phản ánh mức độ an toàn và tác động môi trường của từng vụ nổ, mà còn cung cấp cơ sở dữ liệu định lượng phục vụ thiết kế tối ưu, giám sát liên tục và cải tiến công tác nổ mìn theo hướng tiên tiến và bền vững (Bhandari, 1997; ISEE, 2011).

2.2.1. Chỉ tiêu chấn động nổ mìn

Chấn động nổ mìn thường được đánh giá thông qua PPV và tần số dao động chi phối. PPV là chỉ tiêu phổ biến nhất để đánh giá nguy cơ hư hỏng công trình và mức độ khó chịu đối với con người, trong khi tần số dao động có ý nghĩa đặc biệt quan trọng do hiện tượng cộng hưởng có thể xảy ra khi tần số chấn động tiệm cận tần số riêng của công trình (Siskind et al., 1980; Dowding, 1985). Nhiều nghiên cứu khuyến nghị cần đánh giá đồng thời PPV và tần số để có cái nhìn đầy đủ về mức độ rủi ro chấn động (Singh & Singh, 2005).

2.2.2. Chỉ tiêu sóng va đập không khí

Mặc dù sóng va đập không khí ít gây hư hỏng kết cấu so với chấn động nền, nhưng lại là nguyên nhân chính gây phiền nhiễu, hoảng sợ và khiếu nại từ cộng

đồng dân cư xung quanh mỏ (ISEE, 2011). Do đó, sóng va đập không khí cần được theo dõi song song với chấn động để đánh giá đầy đủ tác động của nổ mìn.

2.2.3. Chỉ tiêu đánh giá chất lượng đập vỡ

Chất lượng đập vỡ đất đá sau nổ mìn là chỉ tiêu phản ánh trực tiếp hiệu quả kỹ thuật của công tác nổ mìn. Các chỉ tiêu được sử dụng phổ biến gồm P80 (kích thước mà 80% khối lượng đá nhỏ hơn), tỷ lệ đá quá cỡ và hệ số nở rời. Phân bố kích thước đá hợp lý sẽ giúp giảm nhu cầu nổ mìn thứ cấp, nâng cao năng suất xúc bốc và giảm chi phí nghiền sàng (Jimeno et al., 1995; Monjezi et al., 2011).

2.2.4. Chỉ tiêu hiệu quả kỹ thuật - kinh tế

Hiệu quả của nổ mìn lộ thiên thường được đánh giá thông qua chỉ tiêu thuốc nổ, chi phí khoan - nổ mìn trên đơn vị thể tích hoặc khối lượng đá và năng suất xúc bốc sau nổ. Các nghiên cứu cho thấy chỉ tiêu thuốc nổ tối ưu không chỉ giúp giảm chi phí thuốc nổ mà còn cải thiện đáng kể hiệu quả các công đoạn khai thác tiếp theo (Bhandari, 1997; Jimeno et al., 1995).

2.2.5. Chỉ tiêu an toàn

An toàn là yếu tố trung tâm trong quản lý nổ mìn. Các chỉ tiêu thường được sử dụng gồm số vụ sự cố và tai nạn, số vụ suýt tai nạn và tỷ lệ mìn câm. Việc theo dõi và phân tích các chỉ tiêu này giúp nhận diện các điểm yếu trong quy trình nổ mìn và đánh giá độ tin cậy của phương tiện khởi nổ, từ đó đề xuất các biện pháp kiểm soát rủi ro phù hợp (ISEE, 2011; Singh & Singh, 2005).

2.2.6. Chỉ tiêu môi trường - xã hội

Các chỉ tiêu môi trường liên quan đến nổ mìn bao gồm nồng độ bụi và các khí độc (NO_x, CO) phát sinh sau nổ, cũng như số lượng khiếu nại của cộng đồng liên quan đến chấn động, tiếng ồn và sóng va đập không khí. Đây là nhóm chỉ tiêu ngày càng được quan tâm trong bối cảnh phát triển mỏ bền vững và yêu cầu nâng cao chấp nhận xã hội đối với hoạt động khai thác mỏ (ICMM, 2019).

Bảng 1. Hệ thống chỉ tiêu đánh giá tác động và hiệu quả nổ mìn lộ thiên

Nhóm chỉ tiêu	Chỉ tiêu cụ thể	Đơn vị	Ý nghĩa đánh giá
Chấn động	PPV; tần số dao động chi phối.	mm/s; Hz	Đánh giá nguy cơ hư hỏng công trình và khó chịu của con người.
Sóng va đập không khí	Mức áp suất đỉnh.	dB(L); kPa	Đánh giá mức độ phiền nhiễu, vỡ kính, khiếu nại cộng đồng.

Nhóm chỉ tiêu	Chỉ tiêu cụ thể	Đơn vị	Ý nghĩa đánh giá
Chất lượng đập vỡ đất đá	P80 (kích thước hạt mà 80% vật liệu nhỏ hơn hoặc bằng kích thước đó); tỷ lệ đá quá cỡ; hệ số toi xóp.	mm; %	Đánh giá chất lượng đập vỡ và khả năng xúc bóc - nghiền sàng.
Hiệu quả	Chỉ tiêu thuốc nổ; chi phí khoan - nổ; năng suất xúc.	kg/m ³ ; USD/m ³ ; m ³ /giờ	Đánh giá hiệu quả kỹ thuật - kinh tế tổng thể.
An toàn	Số sự cố; số vụ suýt tai nạn; tỷ lệ mìn câm.	vụ/năm; vụ/năm; %	Đánh giá mức độ an toàn và độ tin cậy hệ thống.
Môi trường - xã hội	Bụi; NOx; khiếu nại cộng đồng	mg/m ³ ; ppm; số vụ	Đánh giá tác động môi trường và chấp nhận xã hội.

2.3. Khoảng trống thực tiễn trong công tác nổ mìn lộ thiên tại Việt Nam

Mặc dù những năm gần đây ngành khai khoáng Việt Nam đã có những bước tiến đáng kể về công nghệ và quản lý, công tác nổ mìn lộ thiên vẫn tồn tại nhiều khoảng trống thực tiễn so với yêu cầu của khai thác an toàn, hiệu quả và thân thiện với môi trường. Các khoảng trống này xuất hiện đồng thời ở cả khía cạnh kỹ thuật - dữ liệu - quản trị, làm hạn chế khả năng kiểm soát rủi ro và tối ưu hóa nổ mìn.

2.3.1. Thiết kế nổ mìn còn dựa nhiều vào kinh nghiệm, dữ liệu rời rạc

Tại nhiều mỏ lộ thiên ở Việt Nam, thiết kế nổ mìn hiện nay vẫn dựa trên kinh nghiệm của cán bộ kỹ thuật và các thông số truyền thống (đường căn chân tầng, khoảng cách giữa hai lỗ khoan, chiều dài bua, lượng thuốc nổ), trong khi việc sử dụng các công cụ thiết kế số, mô phỏng 3D và tối ưu hóa dựa trên dữ liệu còn hạn chế. Các dữ liệu về địa chất, kết quả nổ mìn trước đó (chấn động, sóng va đập không khí, đá bay, phân bố kích thước đá) thường được lưu trữ phân tán, không đồng bộ, thậm chí chỉ tồn tại dưới dạng báo cáo giấy hoặc file rời, gây khó khăn cho việc phân tích xu thế và cải tiến liên tục (Jimeno et al., 1995; Bhandari, 1997).

Nhiều nghiên cứu quốc tế chỉ ra rằng cách tiếp cận dựa trên kinh nghiệm, thiếu dữ liệu lịch sử có cấu trúc, làm gia tăng sai số trong dự báo tác động nổ mìn và hạn chế khả năng tối ưu hóa tổng thể chuỗi khai thác (Monjezi et al., 2011; Khandelwal

& Singh, 2009). Đây là một khoảng trống rõ rệt khi so sánh với các mô tiên tiến trên thế giới, nơi thiết kế nổ mìn ngày càng dựa trên dữ liệu và mô hình.

2.3.2. Giám sát chấn động chưa liên tục và thiếu chuẩn hóa

Giám sát chấn động nổ mìn tại Việt Nam hiện nay phần lớn mang tính không liên tục, chỉ thực hiện khi có yêu cầu kiểm tra hoặc khi xảy ra khiếu nại từ cộng đồng. Việc bố trí trạm đo chấn động chưa được chuẩn hóa về vị trí, số lượng và phương pháp xử lý dữ liệu, dẫn đến kết quả đo khó so sánh giữa các vụ nổ và giữa các mỏ khác nhau. Trong nhiều trường hợp, dữ liệu chấn động chỉ được sử dụng để chứng minh tuân thủ quy định sau khi nổ, thay vì được khai thác như công cụ chủ động để tối ưu thiết kế và kiểm soát rủi ro (Dowding, 1985; Siskind et al., 1980).

Trong khi đó, thông lệ quốc tế khuyến nghị áp dụng giám sát chấn động liên tục, kết hợp với phân tích PPV - tần số và cơ sở dữ liệu lịch sử để hiệu chỉnh các mô hình dự báo và nâng cao độ tin cậy trong kiểm soát tác động nổ mìn (Singh & Singh, 2005). Khoảng cách giữa thực tiễn trong nước và thông lệ quốc tế cho thấy nhu cầu cấp thiết về chuẩn hóa và số hóa công tác giám sát chấn động.

2.3.3. Chưa phổ biến kíp điện tử và thiếu cơ sở dữ liệu nổ mìn

Mặc dù kíp điện tử đã được chứng minh là giải pháp hiệu quả để kiểm soát chính xác thời gian vi sai, giảm trùng nổ và giảm chấn động, việc ứng dụng kíp điện tử trong các mỏ lộ thiên ở Việt Nam hiện vẫn còn rất hạn chế, chủ yếu do chi phí đầu tư ban đầu, yêu cầu đào tạo nhân lực và thói quen sử dụng các phương tiện nổ truyền thống. Hệ quả là khả năng kiểm soát trình tự nổ và tải nổ tức thời vẫn bị giới hạn, đặc biệt tại các mỏ gần khu dân cư (ISEE, 2011; Orica, 2008).

Bên cạnh đó, phần lớn các mỏ chưa xây dựng được cơ sở dữ liệu nổ mìn tích hợp, lưu trữ có hệ thống các thông tin về thiết kế, thi công, kết quả giám sát và đánh giá sau nổ. Việc thiếu cơ sở dữ liệu nổ mìn làm cho các dữ liệu quý giá từ thực tiễn không được khai thác đầy đủ để phục vụ mô phỏng, dự báo và tối ưu hóa, cản trở quá trình chuyển đổi sang nổ mìn thông minh (Drebenstedt & Singhal, 2019; Zhou et al., 2020).

2.3.4. Quản trị chuỗi vật liệu nổ công nghiệp còn phân tán

Quản trị chuỗi vật liệu nổ công nghiệp bao gồm kho bảo quản, vận chuyển, cấp phát và sử dụng, là một khâu đặc biệt nhạy cảm về an toàn và an ninh. Tại Việt Nam, mặc dù hệ thống pháp lý về quản lý vật liệu nổ công nghiệp đã tương đối đầy đủ, việc triển khai trên thực tế ở một số mỏ và đơn vị sử dụng vẫn còn

mang tính phân tán, thiếu sự liên thông dữ liệu giữa các khâu và các bên liên quan. Công tác theo dõi tồn kho, cấp phát và thu hồi thuốc nổ, kíp nổ chủ yếu dựa trên hồ sơ thủ công hoặc các hệ thống quản lý cục bộ, chưa được số hóa đồng bộ (Government of Vietnam, 2019; Ministry of Industry and Trade, 2019).

Theo kinh nghiệm quốc tế, quản trị chuỗi vật liệu nổ công nghiệp hiệu quả đòi hỏi các hệ thống quản lý khép kín, tích hợp công nghệ số như mã hóa, theo dõi thời gian thực và cơ sở dữ liệu tập trung, nhằm giảm thiểu rủi ro thất thoát, sử dụng sai mục đích và tai nạn liên quan đến vật liệu nổ (ICMM, 2019). Khoảng trống trong quản trị chuỗi vật liệu nổ công nghiệp hiện nay là một trong những rào cản lớn đối với việc triển khai nổ mìn tiên tiến, an toàn và thân thiện với môi trường tại Việt Nam.

3. Xu hướng công nghệ nổ mìn tiên tiến trong khai thác lộ thiên

3.1. Nhóm công nghệ 1: Hệ thống khởi nổ chính xác và an toàn cao

Trong bối cảnh các mỏ lộ thiên ngày càng khai thác xuống sâu, gần khu dân cư và chịu áp lực lớn về an toàn - môi trường, hệ thống khởi nổ đóng vai trò then chốt trong việc kiểm soát tải nổ tức thời, trình tự nổ và các tác động phát sinh. Xu hướng công nghệ hiện nay tập trung vào các giải pháp khởi nổ có độ chính xác cao, độ tin cậy lớn và khả năng tích hợp dữ liệu, tạo nền tảng cho nổ mìn thông minh và quản trị rủi ro hiện đại.

3.1.1. Kíp điện tử

Kíp điện tử được xem là bước tiến quan trọng nhất trong công nghệ khởi nổ hiện đại, cho phép kiểm soát chính xác thời gian vi sai giữa các lỗ mìn ở mức mili giây với sai số rất nhỏ, thường chỉ $\pm 0,005 - 0,03$ ms, vượt trội so với kíp điện và kíp phi điện truyền thống (ISEE, 2011; Orica, 2008). Nhờ khả năng lập trình linh hoạt theo từng lỗ mìn, kíp điện tử cho phép thiết kế các sơ đồ nổ phức tạp, tối ưu hóa trình tự nổ phù hợp với điều kiện địa chất, hình học bãi nổ và yêu cầu kiểm soát chấn động.

Việc kiểm soát chính xác thời gian vi sai giúp giảm hiện tượng trùng nổ, qua đó làm giảm tải nổ tức thời, hạn chế biên độ chấn động nền và sóng va đập không khí. Nhiều nghiên cứu thực nghiệm đã chứng minh rằng áp dụng kíp điện tử có thể làm giảm đáng kể giá trị PPV và đỉnh sóng va đập không khí so với các hệ thống khởi nổ truyền thống, đặc biệt trong điều kiện mỏ gần khu dân cư (Singh & Singh, 2005; Khandelwal & Singh, 2009).

Một ưu điểm nổi bật khác của kíp điện tử là khả năng tạo và lưu trữ dữ liệu. Mỗi kíp được gán một mã định danh, cho phép ghi nhận thông tin về thời gian nổ thực tế, tình trạng mạch, lỗi kết nối và các thông số liên quan trong suốt quá trình đấu nối và kích nổ. Các dữ liệu này được lưu trong hệ thống điều khiển nổ, tạo thành nguồn dữ liệu đầu vào quan trọng cho cơ sở dữ liệu nổ mìn, phục vụ phân tích sau nổ, hiệu chỉnh mô hình dự báo và hỗ trợ quá trình chuyển đổi số trong công tác nổ mìn (Drebenstedt & Singhal, 2019).

3.1.2. Hệ thống phi điện thế hệ mới

Bên cạnh kíp điện tử, các hệ thống phi điện thế hệ mới vẫn giữ vai trò nhất định trong thực tiễn khai thác lộ thiên, đặc biệt tại các mỏ có quy mô vừa và nhỏ hoặc khu vực xa khu dân cư. Các hệ thống này được cải tiến nhằm nâng cao độ tin cậy, giảm nhạy cảm với nhiễu điện từ và cải thiện tính ổn định của thời gian vi sai so với các thế hệ phi điện truyền thống (ISEE, 2011).

Tuy nhiên, so với kíp điện tử, hệ thống phi điện vẫn tồn tại hạn chế về sai lệch thời gian vi sai, khó kiểm soát chính xác trình tự nổ trong các bãi mìn lớn và phức tạp, từ đó làm giảm hiệu quả kiểm soát chấn động và sóng va đập không khí (Bhandari, 1997; Jimeno et al., 1995). Do đó, xu hướng hiện nay là áp dụng khởi nổ lai, kết hợp ưu điểm của kíp điện tử ở các khu vực nhạy cảm (gần dân cư, công trình cần bảo vệ) với hệ thống phi điện ở các khu vực ít nhạy cảm hơn, nhằm cân bằng giữa hiệu quả kỹ thuật và chi phí đầu tư.

3.1.3. Môi nổ và phụ kiện “an toàn - chống nhiễu - chống tĩnh điện”

Cùng với phương tiện khởi nổ, môi nổ và các phụ kiện nổ mìn đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo an toàn và độ tin cậy của toàn bộ mạng nổ. Các môi nổ thế hệ mới được thiết kế với độ nhạy phù hợp, khả năng truyền nổ ổn định và tương thích tốt với thuốc nổ nhũ tương rời, góp phần giảm nguy cơ nổ sớm hoặc không nổ (ISEE, 2011).

Bên cạnh đó, các phụ kiện “an toàn - chống nhiễu - chống tĩnh điện” như dây dẫn chống nhiễu, đầu nối kín nước, thiết bị kiểm tra mạch và hệ thống khóa an toàn trong quá trình đấu nối giúp giảm thiểu sự cố do nhiễu điện từ, tĩnh điện và lỗi thao tác, đặc biệt trong điều kiện mỏ có nhiều thiết bị điện - điện tử hoạt động đồng thời. Việc sử dụng đồng bộ các phụ kiện an toàn này được xem là một trong những biện pháp hiệu quả để nâng cao độ tin cậy của mạng nổ, giảm tỷ lệ mìn câm và tai nạn liên quan đến công tác nổ mìn (Singh & Singh, 2005; Orica, 2008).

3.2. Nhóm công nghệ 2: Thuốc nổ và giải pháp nạp nổ hiện đại, “xanh” hơn

Song song với đổi mới hệ thống khởi nổ, thuốc nổ và công nghệ nạp nổ đang có những chuyển biến quan trọng theo hướng an toàn hơn, kiểm soát tốt hơn tác động môi trường và phù hợp với khai thác bền vững. Xu hướng chung là giảm thiểu rủi ro trong vận chuyển - lưu kho, kiểm soát tốt quá trình phản ứng nổ và hạn chế phát sinh khí độc, bụi sau nổ mìn.

3.2.1. Thuốc nổ nhũ tương rời (*bulk emulsion*) và nhũ tương chịu nước

Thuốc nổ nhũ tương rời ngày càng được sử dụng rộng rãi trong khai thác mỏ lộ thiên nhờ độ an toàn và ổn định cao. Khác với thuốc nổ đóng gói truyền thống, nhũ tương rời thường không nhạy nổ trong điều kiện thông thường, chỉ trở nên nhạy khi được kích hoạt bằng môi nổ phù hợp, do đó làm giảm đáng kể nguy cơ tai nạn trong quá trình vận chuyển, bảo quản và nạp thuốc (ISEE, 2011; Meyer et al., 2007).

Một ưu điểm nổi bật của nhũ tương là khả năng chịu nước tốt, phù hợp với các lỗ khoan ướt - điều kiện phổ biến tại nhiều mỏ lộ thiên ở Việt Nam. Nhũ tương có thể duy trì tính ổn định năng lượng và đảm bảo hiệu quả nổ ngay cả khi lỗ khoan bị ngập nước, giúp giảm hiện tượng phản ứng nổ không hoàn toàn và hạn chế sinh khí độc (Jimeno et al., 1995).

Ngoài ra, mô hình sản xuất - nạp thuốc trực tiếp tại mỏ cho phép giảm đáng kể khối lượng thuốc nổ thành phẩm phải vận chuyển và lưu kho, qua đó giảm rủi ro an toàn và an ninh, đồng thời tăng tính linh hoạt trong điều chỉnh năng lượng nổ theo điều kiện thực tế của từng lỗ khoan (Bhandari, 1997; Orica, 2008). Đây là một trong những yếu tố quan trọng làm cho nhũ tương rời được xem là giải pháp “xanh” và an toàn hơn so với nhiều loại thuốc nổ truyền thống.

3.2.2. Thuốc nổ ít khói, giảm NOx và tối ưu cân bằng oxy

Một trong những vấn đề môi trường đáng quan tâm nhất trong nổ mìn lộ thiên là phát sinh khí độc, đặc biệt là NOx và CO. Khí NOx chủ yếu hình thành khi phản ứng nổ xảy ra trong điều kiện thiếu hoặc thừa oxy, hoặc khi thuốc nổ không phản ứng hoàn toàn do điều kiện lỗ khoan không thuận lợi như nước, khe nứt hoặc nạp thuốc không đồng đều (ISEE, 2011; Meyer et al., 2007).

Xu hướng hiện nay tập trung vào việc phát triển và sử dụng các loại thuốc nổ có cân bằng oxy tối ưu (gần bằng 0), giúp phản ứng nổ diễn ra hoàn chỉnh hơn, từ

đó giảm lượng khí độc phát sinh. Bên cạnh đó, việc thiết kế phương án nạp nổ hợp lý (phân đoạn nạp, kiểm soát chiều dài bua, tránh nạp thừa thuốc) và lựa chọn thuốc nổ phù hợp với điều kiện địa chất - thủy văn của lỗ khoan được xem là giải pháp kỹ thuật hiệu quả để giảm phát thải NOx và khói mìn (Jimeno et al., 1995; Bhandari, 1997).

Kiểm soát chất lượng nạp thuốc cũng đóng vai trò then chốt. Các nghiên cứu cho thấy sự không đồng nhất trong nạp thuốc và sự suy giảm chất lượng nhũ tương do điều kiện bảo quản hoặc thi công không phù hợp có thể làm tăng nguy cơ sinh khí độc và giảm hiệu quả nổ (ISEE, 2011). Do đó, tiêu chuẩn hóa quy trình nạp và kiểm tra điều kiện lỗ khoan trước khi nạp thuốc là yêu cầu bắt buộc trong nổ mìn hiện đại.

3.2.3. Nạp nổ cơ giới hóa và tự động hóa

Cùng với sự phát triển của thuốc nổ nhũ tương rời, nạp nổ cơ giới hóa và tự động hóa đang trở thành xu hướng tất yếu trong các mỏ lộ thiên quy mô vừa và lớn. Các xe nạp nhũ tương chuyên dụng cho phép trộn, định lượng và nạp thuốc trực tiếp vào lỗ khoan theo đúng thiết kế, đảm bảo độ chính xác cao về khối lượng và phân bố năng lượng nổ (Orica, 2008; ISEE, 2011).

Việc áp dụng cơ giới hóa trong nạp nổ giúp giảm đáng kể sự tiếp xúc trực tiếp của công nhân với vật liệu nổ, từ đó giảm rủi ro tai nạn lao động và nâng cao mức độ an toàn tổng thể. Đồng thời, các hệ thống nạp hiện đại có khả năng ghi nhận và lưu trữ dữ liệu nạp thuốc (khối lượng, chiều sâu, thời gian), tạo cơ sở cho việc xây dựng cơ sở dữ liệu nổ mìn và hỗ trợ phân tích, tối ưu hóa trong các vụ nổ tiếp theo (Drebenstedt & Singhal, 2019).

Trong dài hạn, nạp nổ tự động hóa kết hợp với thiết kế nổ mìn số và hệ thống khởi nổ chính xác được xem là nền tảng quan trọng để phát triển nổ mìn thông minh, an toàn và thân thiện với môi trường trong khai thác lộ thiên.

3.3. Nhóm công nghệ 3: Thiết kế nổ mìn số và mô phỏng - tối ưu hóa

Sự phát triển của công nghệ số, phần mềm chuyên dụng và năng lực tính toán đã thúc đẩy mạnh mẽ xu hướng thiết kế nổ mìn dựa trên mô hình 3D, mô phỏng và tối ưu hóa, thay thế dần phương pháp thiết kế dựa chủ yếu vào kinh nghiệm. Nhóm công nghệ này cho phép chuyển từ cách tiếp cận “nổ mìn độc lập” sang tiếp

cận tối ưu hóa toàn chuỗi khai thác, trong đó nổ mìn được xem là khâu đầu vào quyết định hiệu quả các công đoạn xúc bốc - vận tải - nghiền sàng.

3.3.1. Thiết kế nổ mìn 3D và tiếp cận “blast-to-mill”

Thiết kế nổ mìn 3D theo tiếp cận “từ bãi nổ đến trạm nghiền” (blast-to-mill) cho phép tích hợp đồng bộ các dữ liệu địa chất, địa chất công trình và hình học mỏ vào quá trình xây dựng phương án nổ mìn. Trên cơ sở mô hình không gian ba chiều của thân khoáng, cấu trúc khe nứt, điều kiện phân lớp và bề mặt tự do, kỹ sư có thể bố trí lỗ khoan, lượng thuốc nổ và trình tự nổ một cách chính xác hơn so với thiết kế 2D truyền thống (Jimeno et al., 1995; Bhandari, 1997).

Tiếp cận “blast-to-mill” coi nổ mìn là bước khởi đầu của quá trình chế biến khoáng sản, trong đó mục tiêu thiết kế không chỉ dừng lại ở việc phá vỡ đất đá mà còn nhằm tối ưu phân bố kích thước đá phù hợp với năng lực xúc bốc và hệ thống nghiền sàng phía sau. Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng việc điều chỉnh thông số nổ mìn để đạt được phân bố kích thước hợp lý (giảm đá quá cỡ, ổn định P80) có thể làm giảm đáng kể chi phí nghiền, tiêu hao năng lượng và tăng hiệu quả tổng thể của dây chuyền khai thác - chế biến (Eloranta, 2001; Scott et al., 2009).

3.3.2. Mô hình hóa và mô phỏng quá trình nổ mìn

Mô hình hóa và mô phỏng là công cụ quan trọng giúp hiểu rõ cơ chế phá hoại của nổ mìn, dự báo các tác động và hỗ trợ tối ưu hóa thiết kế. Các mô hình mô phỏng hiện nay có thể tái hiện trình tự nổ, sự lan truyền sóng nổ, vùng phá hoại và phân bố ứng suất trong khối đá, từ đó giúp đánh giá ảnh hưởng của các thông số khoan - nổ đến hiệu quả đập vỡ và ổn định bờ mỏ (Bhandari, 1997; Khandelwal & Singh, 2009).

Ở mức tổng quan, ba nhóm phương pháp mô phỏng chính thường được sử dụng:

- Phương pháp phần tử hữu hạn: mô phỏng trường ứng suất - biến dạng và phản ứng của khối đá dưới tác động sóng nổ, phù hợp cho phân tích ổn định bờ mỏ và công trình (Dowding, 1985).

- Phương pháp phần tử rời rạc: mô phỏng quá trình nứt vỡ, chuyển động và tương tác của các khối đá rời sau nổ, đặc biệt hữu ích trong phân tích chất lượng đập vỡ đất đá và đá bay (Cundall & Strack, 1979; Mohanty, 2010).

- Phương pháp động lực học chất lưu: được áp dụng ở mức nghiên cứu để phân tích sự lan truyền khí nổ, sóng va đập không khí và tương tác khí - đá trong một số điều kiện đặc biệt (Meyer et al., 2007).

Việc kết hợp các phương pháp mô phỏng với dữ liệu thực đo cho phép nâng cao độ tin cậy của dự báo và hỗ trợ quá trình ra quyết định trong thiết kế nổ mìn tiên tiến.

3.3.3. Tối ưu hóa các thông số khoan - nổ

Tối ưu hóa thông số khoan - nổ là nội dung cốt lõi của thiết kế nổ mìn hiện đại, nhằm đạt được sự cân bằng giữa hiệu quả đập vỡ, an toàn và giảm thiểu tác động môi trường. Các thông số quan trọng bao gồm: đường căn chân tầng, khoảng cách giữa 2 lỗ khoan trong hàng, chiều dài búa, chiều sâu khoan thêm và phân bố lượng thuốc nổ theo chiều sâu lỗ khoan. Việc lựa chọn và kết hợp hợp lý các thông số này quyết định trực tiếp đến mức độ sử dụng hiệu quả năng lượng nổ và chất lượng đồng đá sau nổ (Jimeno et al., 1995; Bhandari, 1997).

Xu hướng hiện nay là áp dụng nổ mìn vi sai toàn phần, đặc biệt khi kết hợp với kíp điện tử, nhằm kiểm soát chặt chẽ tải nổ tức thời và giảm chấn động. Bên cạnh đó, các kỹ thuật nổ mìn tạo biên ngày càng được sử dụng để bảo vệ bờ mỏ, giảm phá hoại ngoài thiết kế và nâng cao ổn định sườn tầng, nhất là trong các mỏ khai thác xuống sâu hoặc gần công trình cần bảo vệ (Hoek & Bray, 1981; Jimeno et al., 1995).

Việc tối ưu hóa thông số khoan - nổ dựa trên thiết kế 3D, mô phỏng và dữ liệu thực đo được xem là nền tảng để phát triển nổ mìn chính xác, an toàn và thân thiện với môi trường trong khai thác lộ thiên hiện đại.

3.4. Nhóm công nghệ 4: Giám sát - đo đạc - dữ liệu hóa tác động nổ mìn

Trong xu hướng phát triển nổ mìn tiên tiến, an toàn và thân thiện với môi trường, giám sát - đo đạc - dữ liệu hóa được xem là trụ cột quan trọng, cho phép chuyển từ kiểm soát bị động sang quản lý chủ động dựa trên dữ liệu. Nhóm công nghệ này giúp đánh giá định lượng các tác động của nổ mìn, hỗ trợ hiệu chỉnh thiết kế, kiểm soát rủi ro và nâng cao mức độ chấp nhận xã hội đối với hoạt động khai thác mỏ lộ thiên.

3.4.1. Giám sát chấn động nổ mìn và sóng va đập không khí theo thời gian thực

Giám sát chấn động nổ mìn và sóng va đập không khí theo thời gian thực là yêu cầu cơ bản trong quản lý nổ mìn hiện đại, đặc biệt tại các mỏ lộ thiên gần khu dân cư và công trình nhạy cảm. Các thiết bị đo chuyên dụng hiện nay cho phép ghi nhận đồng thời PPV, phổ tần số chấn động và mức đỉnh của sóng va đập không

khí với độ chính xác cao, đáp ứng các tiêu chuẩn quốc tế về đo chấn động (Dowding, 1985; ISEE, 2011).

Việc bố trí điểm đo cần được thực hiện có hệ thống, bao gồm các vị trí đại diện cho khu vực nhạy cảm nhất (nhà dân, công trình hạ tầng, bờ mỏ) và các điểm tham chiếu trong mỏ. Dữ liệu thu thập được truyền về trung tâm quản lý để lưu trữ, xử lý và phân tích, tạo thành chuỗi dữ liệu lịch sử phục vụ đánh giá xu thế và hiệu chỉnh mô hình dự báo (Siskind et al., 1980).

Trên cơ sở dữ liệu đo đạc, các mỏ tiên tiến thiết lập ngưỡng cảnh báo cho PPV và sóng va đập không khí theo tiêu chuẩn và điều kiện địa phương. Khi giá trị đo tiệm cận hoặc vượt ngưỡng, hệ thống sẽ phát tín hiệu cảnh báo, cho phép kỹ sư kịp thời điều chỉnh thiết kế nổ mìn hoặc áp dụng biện pháp kiểm soát bổ sung trong các vụ nổ tiếp theo (Singh & Singh, 2005). Cách tiếp cận này góp phần giảm thiểu sự cố và nâng cao tính minh bạch trong quản lý tác động nổ mìn.

3.4.2. Ứng dụng UAV, LiDAR và photogrammetry trong đánh giá sau nổ mìn

Sau nổ mìn, việc đánh giá nhanh và chính xác hiện trạng bãi nổ là yếu tố quan trọng để kiểm soát hiệu quả kỹ thuật và an toàn. UAV kết hợp với công nghệ đo ảnh và công nghệ đo khoảng cách và tạo mô hình không gian 3D bằng tia laser (LiDAR) cho phép thu thập dữ liệu không gian độ phân giải cao, phục vụ đánh giá đồng đá sau nổ, độ tơi xốp, phân bố kích thước đá, biến dạng tầng và bề mặt tự do với độ chính xác vượt trội so với phương pháp khảo sát truyền thống (Bui et al., 2022; James et al., 2019).

Ngoài việc đánh giá chất lượng đập vỡ, UAV và LiDAR còn được sử dụng để đo dịch chuyển, phát hiện biến dạng bờ mỏ và kiểm soát ổn định sườn tầng chịu ảnh hưởng của nổ mìn. Các mô hình số bề mặt và mô hình số địa hình được xây dựng từ dữ liệu UAV/LiDAR cho phép so sánh trước và sau nổ, từ đó nhận diện sớm các khu vực có nguy cơ mất ổn định và hỗ trợ ra quyết định về biện pháp gia cố hoặc điều chỉnh phương án nổ mìn (Drebenstedt & Singhal, 2019; Mohanty, 2010).

3.4.3. Cơ sở dữ liệu nổ mìn và dashboard quản lý

Một xu hướng quan trọng trong quản lý nổ mìn tiên tiến là xây dựng cơ sở dữ liệu nổ mìn tích hợp, trong đó toàn bộ thông tin liên quan đến từng vụ nổ được số hóa và lưu trữ có hệ thống. Dữ liệu bao gồm hộ chiếu nổ mìn (thiết kế, thông số khoan - nổ), thông tin thi công (nạp thuốc, đầu nối), kết quả đo đạc (PPV, sóng va đập không khí, mức độ đập vỡ của đất đá) và đánh giá sau nổ (ISEE, 2011).

Trên nền tảng cơ sở dữ liệu, các bảng điều khiển trực quan hiển thị các dữ liệu quản lý (dashboard) được phát triển nhằm trực quan hóa dữ liệu theo thời gian thực, cho phép người quản lý theo dõi tình trạng an toàn, mức độ tuân thủ ngưỡng cho phép và hiệu quả của từng vụ nổ. Khả năng truy vết dữ liệu từ thiết kế đến kết quả thực tế giúp tăng cường tính minh bạch, hỗ trợ phân tích nguyên nhân sự cố và tạo nền tảng cho các ứng dụng nâng cao như dự báo chấn động bằng trí tuệ nhân tạo và tối ưu hóa thiết kế nổ mìn trong tương lai (Zhou et al., 2020; Drebenstedt & Singhal, 2019). Việc dữ liệu hóa toàn diện công tác nổ mìn được xem là bước đi không thể thiếu để tiến tới nổ mìn thông minh, an toàn và thân thiện với môi trường trong khai thác mỏ lộ thiên.

3.5. Nhóm công nghệ 5: Ứng dụng trí tuệ nhân tạo và học máy (AI/ML) hỗ trợ dự báo và ra quyết định trong nổ mìn lộ thiên

Trong những năm gần đây, trí tuệ nhân tạo (Artificial Intelligence - AI) và học máy (Machine Learning - ML) đã được ứng dụng ngày càng rộng rãi trong lĩnh vực nổ mìn, đặc biệt là trong dự báo tác động và hỗ trợ ra quyết định kỹ thuật. Khác với các mô hình kinh nghiệm truyền thống, AI/ML có khả năng xử lý các mối quan hệ phi tuyến, đa biến giữa thông số khoan - nổ mìn, điều kiện địa chất và các tác động phát sinh, từ đó nâng cao độ chính xác của dự báo và hiệu quả kiểm soát rủi ro (Khandelwal & Singh, 2009; Monjezi et al., 2011).

3.5.1. Ứng dụng AI/ML trong dự báo tác động nổ mìn

Một trong những hướng ứng dụng phổ biến nhất của AI/ML trong nổ mìn lộ thiên là dự báo PPV. Nhiều nghiên cứu đã chứng minh rằng các mô hình như mạng nơ-ron nhân tạo (ANN), máy véc-tơ hỗ trợ (SVR), rừng ngẫu nhiên (Random Forest) và XGBoost cho kết quả dự báo PPV chính xác hơn so với các công thức kinh nghiệm cổ điển, đặc biệt trong điều kiện địa chất phức tạp và dữ liệu biến động lớn (Khandelwal & Singh, 2009; Singh & Singh, 2005).

Ngoài PPV, AI/ML còn được áp dụng để dự báo sóng va đập không khí, đá bay và chất lượng đập vỡ. Các mô hình học máy có thể tích hợp đồng thời nhiều biến đầu vào như lượng thuốc nổ trên một đơn vị thể tích, khoảng cách đến điểm đo, đặc điểm khối đá, điều kiện lỗ khoan và trình tự nổ, từ đó cung cấp dự báo định lượng phục vụ thiết kế và kiểm soát nổ mìn (Monjezi et al., 2011; Ghasemi et al., 2013).

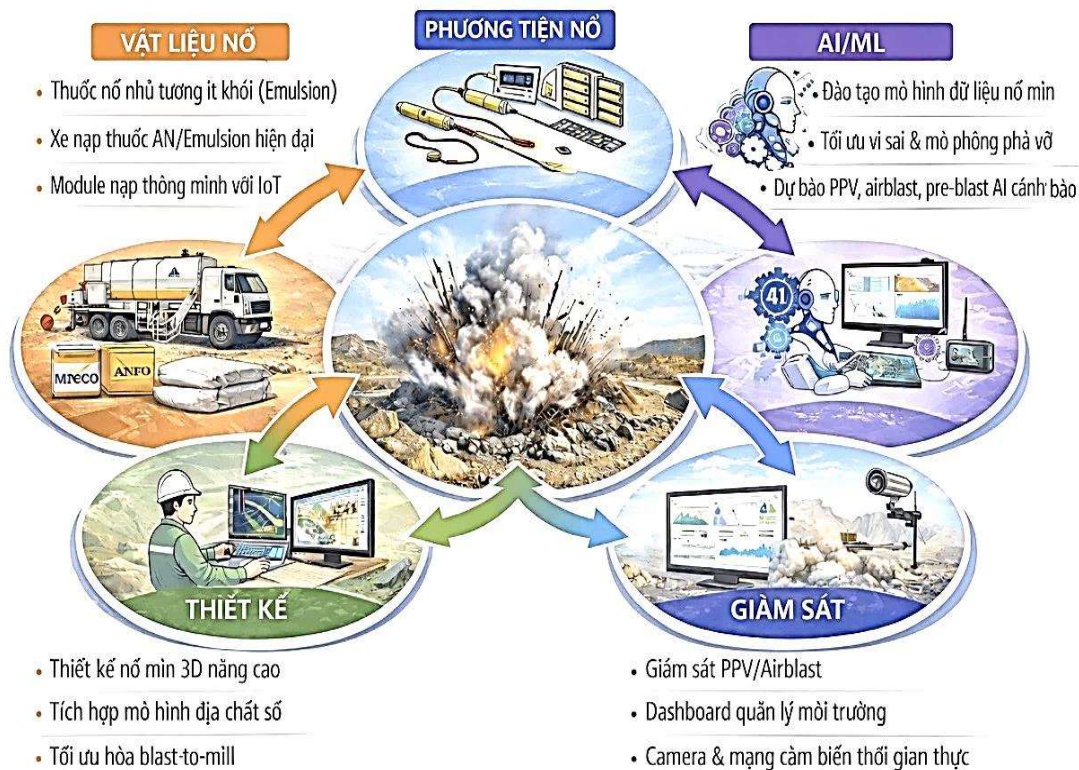
Những kết quả này cho thấy AI/ML là công cụ tiềm năng để chuyển từ kiểm soát sau nổ sang dự báo trước nổ, góp phần giảm thiểu rủi ro và tác động môi trường trong khai thác mỏ lộ thiên.

3.5.2. Điều kiện để AI/ML phát huy hiệu quả

Hiệu quả của các mô hình AI/ML phụ thuộc chặt chẽ vào chất lượng và tính sẵn có của dữ liệu đầu vào. Các nghiên cứu đều chỉ ra rằng dữ liệu nổ mìn cần đủ lớn, được chuẩn hóa, làm sạch và gắn với bối cảnh địa chất cụ thể để mô hình học được các quy luật ẩn một cách tin cậy (Monjezi et al., 2011; Zhou et al., 2020).

Bên cạnh đó, AI/ML chỉ thực sự phát huy hiệu quả khi được tích hợp vào vòng phản hồi liên tục, trong đó kết quả dự báo được so sánh với số liệu thực đo sau nổ, từ đó hiệu chỉnh và cập nhật mô hình. Việc kết nối AI/ML với cơ sở dữ liệu nổ mìn, hệ thống giám sát chấn động và các dashboard quản lý giúp tạo nên một hệ sinh thái dữ liệu khép kín, nâng cao độ tin cậy và khả năng ứng dụng thực tế của các mô hình học máy (Drebenstedt & Singhal, 2019).

3.5.3. Vai trò của AI/ML trong hỗ trợ ra quyết định kỹ thuật



Hình 1. Bản đồ công nghệ nổ mìn lộ thiên tiên tiến trong bối cảnh chuyển đổi số và khai thác bền vững

Mặc dù mang lại nhiều lợi ích, AI/ML trong nổ mìn cần được nhìn nhận đúng với vai trò là công cụ hỗ trợ ra quyết định, chứ không phải là giải pháp thay thế hoàn toàn cho kỹ sư nổ mìn. Các mô hình học máy có thể cung cấp các kịch bản dự báo, cảnh báo rủi ro và gợi ý phương án tối ưu, nhưng quyết định cuối cùng vẫn cần dựa trên kinh nghiệm chuyên môn, hiểu biết thực địa và trách nhiệm của con người (Khandelwal & Singh, 2009; Singh & Singh, 2005).

Trong bối cảnh Việt Nam, việc áp dụng AI/ML cần được triển khai từng bước, gắn với đào tạo nhân lực, chuẩn hóa dữ liệu và kết hợp chặt chẽ với các công nghệ nền tảng như kíp điện tử, thiết kế nổ mìn số và hệ thống giám sát thời gian thực (Hình 1). Cách tiếp cận này giúp bảo đảm rằng AI/ML trở thành công cụ hỗ trợ hiệu quả, góp phần nâng cao an toàn, giảm thiểu tác động môi trường và thúc đẩy chuyển đổi số trong nổ mìn khai thác lộ thiên.

4. Kiểm soát rủi ro trong nổ mìn lộ thiên theo tiếp cận hiện đại

4.1. Nhận diện rủi ro theo chuỗi giá trị nổ mìn

Theo tiếp cận quản trị rủi ro hiện đại, kiểm soát rủi ro nổ mìn cần bắt đầu từ nhận diện rủi ro theo toàn bộ chuỗi giá trị thay vì chỉ tập trung vào thời điểm kích nổ. Cách tiếp cận theo quá trình giúp đảm bảo mọi mối nguy được nhận diện đầy đủ và có biện pháp kiểm soát phù hợp ở từng công đoạn, phù hợp với nguyên lý quản trị rủi ro theo ISO 31000 (International Organization for Standardization [ISO], 2018) và quản lý an toàn nghề nghiệp theo ISO 45001 (ISO, 2018b).

4.1.1. Chuỗi giá trị nổ mìn và các điểm rủi ro chính

Chuỗi giá trị nổ mìn trong mỏ lộ thiên có thể khái quát theo trình tự: thiết kế - khoan - nạp thuốc - đấu nối/kiểm tra mạng - kích nổ - kiểm tra sau nổ. Ở mỗi công đoạn, các rủi ro phát sinh có đặc điểm khác nhau:

(i) *Thiết kế nổ mìn*: rủi ro do lựa chọn thông số không phù hợp (burden/spacing/bua/phân bố thuốc), không tích hợp điều kiện địa chất - địa chất công trình, không kiểm soát lượng thuốc nổ nổ đồng thời lớn nhất (Maximum Instantaneous Charge - MIC), dẫn đến tăng PPV/sóng và đập không khí/đá bay và phá hoại ngoài thiết kế (Bhandari, 1997; Jimeno et al., 1995).

(ii) *Khoan*: rủi ro sai lệch vị trí - góc - chiều sâu lỗ khoan, gặp đới khe nứt/đứt gãy, lỗ khoan sập, lỗ khoan ướt; những sai lệch này thường là “nguyên nhân gốc” gây đá bay, nổ không hoàn toàn, tăng chấn động và phát sinh khí độc (ISEE, 2011; Jimeno et al., 1995).

(iii) *Nạp thuốc*: rủi ro nạp sai khối lượng, phân bố thuốc không đúng thiết kế, lựa chọn thuốc nổ không phù hợp điều kiện lỗ khoan (khô/ướt), chất lượng nhũ tương suy giảm, mồi nổ/booster không phù hợp; đây là nhóm rủi ro ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả đập vỡ và phát thải NO_x/CO (ISEE, 2011; Meyer et al., 2007).

(iv) *Đầu nối - kiểm tra mạng*: rủi ro lỗi kết nối, nhầm vi sai, hở mạch, nhiễu điện từ/tĩnh điện, thao tác sai quy trình vận hành tiêu chuẩn (Standard Operating Procedure); các lỗi này làm tăng nguy cơ mìn câm hoặc sai trình tự nổ, kéo theo tăng PPV/sóng va đập không khí (ISEE, 2011).

(v) *Kích nổ*: rủi ro liên quan vùng cấm, kiểm soát người - phương tiện, sai quy trình cảnh giới, điều kiện thời tiết bất lợi; đây là nhóm rủi ro “hậu quả lớn - xác suất thấp” nhưng cần kiểm soát bằng kỷ luật vận hành và có giấy phép thực hiện công việc có rủi ro (Permit-to-Work) (ISO, 2018b; ISEE, 2011).

(vi) *Kiểm tra sau nổ*: rủi ro tồn tại mìn câm, đá treo, ổn định bờ tầng suy giảm, khí độc tồn dư; kiểm tra không đầy đủ có thể gây tai nạn nghiêm trọng trong xúc bốc và khoan tiếp theo (ISEE, 2011; Dowding, 1985).

4.1.2. Phân loại rủi ro theo bản chất

Để quản trị hiệu quả, rủi ro nổ mìn nên được phân loại theo 4 nhóm bản chất:

(i) *Rủi ro kỹ thuật*: sai số thiết kế, sai số khoan, sai trình tự nổ, lựa chọn thuốc nổ - kíp nổ không phù hợp, thiết bị đo/giám sát không đảm bảo.

(ii) *Rủi ro con người*: năng lực, đào tạo, tuân thủ quy trình vận hành tiêu chuẩn, mệt mỏi, áp lực tiến độ, hành vi không an toàn; nhóm này thường là tác nhân kích hoạt “chuỗi sai lệch” (Reason, 1997; ISO, 2018b).

(iii) *Rủi ro tổ chức*: thiếu quy trình chuẩn, thiếu kiểm tra chéo, quản lý thay đổi quy trình quản lý và đánh giá rủi ro (Management of Change) yếu, văn hóa an toàn chưa cao, báo cáo near-miss không hiệu quả (ISO, 2018; ISO, 2018b).

(iv) *Rủi ro môi trường - cộng đồng*: PPV/sóng va đập không khí vượt ngưỡng, đá bay, bụi/khí độc, tiếng ồn, khiếu nại cộng đồng, mất “giấy phép xã hội để hoạt động” (ICMM, 2019; Siskind et al., 1980).

4.1.3. Rủi ro chuỗi vật liệu nổ công nghiệp

Ngoài rủi ro tại bãi nổ, chuỗi vật liệu nổ công nghiệp gồm kho - vận chuyển - cấp phát - thu hồi/hoàn trả là lĩnh vực nhạy cảm về an toàn và an ninh. Rủi ro bao gồm: bảo quản không đúng điều kiện, thất thoát/nhầm lẫn cấp phát, vận chuyển

không đảm bảo, truy vết kém, quản lý tiền chất chưa đồng bộ. Thông lệ quốc tế nhấn mạnh quản trị chuỗi cung ứng bằng quy trình chuẩn, truy vết và kiểm soát tiếp cận, kết hợp kiểm tra định kỳ và dữ liệu hóa (ISEE, 2011; ICMM, 2019).

4.2. Khung quản trị rủi ro đề xuất

Dựa trên nguyên tắc quản trị rủi ro theo ISO 31000 và tiếp cận hệ thống an toàn theo ISO 45001, kết hợp quy chuẩn kỹ thuật có liên quan đến công tác nổ mìn (ISEE), bài báo đề xuất khung quản trị rủi ro gồm 5 cấu phần liên hoàn (ISO, 2018; ISO, 2018b; ISEE, 2011). Khung này có thể trình bày thành một hình vòng phản hồi hoặc sơ đồ tăng.

4.2.1. Kế hoạch và thiết kế dựa trên dữ liệu

- Chuẩn hóa “hệ chiếu nổ mìn” và dữ liệu đầu vào: địa chất - đứt gãy - khe nứt, điều kiện lỗ khoan (khô/ướt), khoảng cách tới công trình nhạy cảm.

- Thiết kế kiểm soát nổ tức thời, tối ưu vi sai, lựa chọn thuốc nổ phù hợp.

- Thiết lập mục tiêu kiểm soát (PPV/sóng va đập không khí/đá bay/khí độc) và ngưỡng chấp nhận theo điều kiện cụ thể của mỏ (Dowding, 1985; Siskind et al., 1980).

4.2.2. Kiểm soát kỹ thuật

Áp dụng “hàng rào kỹ thuật” để giảm xác suất và/hoặc giảm hậu quả:

- Kíp điện tử/vi sai chính xác để giảm trùng nổ và kiểm soát nổ tức thời.

- Thiết kế phân đoạn nạp, tối ưu chiều dài bua, kiểm soát đường cản, khoảng cách giữa lỗ khoan theo cấu trúc đá (Jimeno et al., 1995).

- Nổ mìn tạo biên bảo vệ bờ mỏ, giảm sự sai khác biên giới mỏ với thiết kế (Hoek & Bray, 1981).

- Giám sát chấn động và điều chỉnh thiết kế dựa trên dữ liệu thực đo (Dowding, 1985).

4.2.3. Kiểm soát tổ chức và quy trình

- Xây dựng và cập nhật quy trình vận hành tiêu chuẩn cho từng khâu (khoan - nạp - đấu nối - cảnh giới - xử lý mìn câm).

- Áp dụng giấy phép thực hiện công việc có rủi ro cho các hoạt động rủi ro cao; phân định rõ vai trò, kiểm tra chéo, và quyền “dừng công việc” khi điều kiện không an toàn (ISO, 2018b).

- MOC khi thay đổi thuốc nổ/kíp nổ/thiết kế/quy trình/thiết bị (ISO, 2018; ISO, 2018b).

- Đào tạo định kỳ và đánh giá năng lực, đặc biệt về xử lý mìn cảm và kiểm soát vùng cấm (ISEE, 2011).

4.2.4. Giám sát - cảnh báo - phản hồi sau nổ

- Giám sát PPV/sóng va đập không khí theo thời gian thực; lưu trữ dữ liệu có cấu trúc để phân tích xu thế (Dowding, 1985).

- Thiết lập ngưỡng cảnh báo theo tiêu chuẩn và bối cảnh địa phương; kích hoạt quy trình điều chỉnh thiết kế khi tiệm cận ngưỡng.

- Đánh giá sau nổ: chất lượng đập vỡ đất đá, đá quá cỡ, tình trạng bờ tàng, khí độc tồn dư, điểm bất thường (ISEE, 2011).

- Tạo vòng phản hồi dữ liệu phục vụ tối ưu vụ nổ tiếp theo (ISO, 2018).

4.2.5. Điều tra sự cố và cải tiến liên tục

- Thu thập và phân tích số vụ suýt tai nạn như một nguồn dữ liệu “cảnh báo sớm”.

- Điều tra nguyên nhân gốc, xác định lỗ hổng “hàng rào an toàn” (Reason, 1997).

- Cập nhật quy trình vận hành tiêu chuẩn, quy trình quản lý và đánh giá rủi ro và chương trình đào tạo; chuẩn hóa bài học kinh nghiệm thành tri thức tổ chức (ISO, 2018b).

4.3. Các biện pháp kiểm soát theo nhóm tác động trong nổ mìn lộ thiên

Kiểm soát rủi ro nổ mìn theo tiếp cận hiện đại đòi hỏi áp dụng các biện pháp kỹ thuật và tổ chức chuyên biệt cho từng nhóm tác động, dựa trên nguyên tắc giảm tải nổ tức thời, sử dụng hiệu quả năng lượng nổ và tăng cường các “hàng rào an toàn” ở nhiều lớp (Bhandari, 1997; ISEE, 2011).

4.3.1. Kiểm soát và giảm chấn động nổ mìn

Chấn động nổ mìn phụ thuộc mạnh vào lượng thuốc nổ nổ đồng thời lớn nhất, đặc điểm địa chất và trình tự nổ. Các biện pháp kiểm soát hiệu quả bao gồm:

- Tối ưu lượng thuốc nổ nổ đồng thời lớn nhất thông qua phân đoạn nạp thuốc và điều chỉnh vi sai giữa các lỗ, nhằm tránh hiện tượng trùng nổ gây gia tăng biên độ chấn động (Siskind et al., 1980; Dowding, 1985).

- Nổ mìn vi sai toàn phần, đặc biệt khi kết hợp với kíp điện tử, cho phép kiểm soát chính xác thời gian nổ và giảm đáng kể PPV so với hệ thống khởi nổ truyền thống (ISEE, 2011).

- Bố trí hướng nổ hợp lý theo điều kiện mặt tự do và cấu trúc khối đá để định hướng năng lượng nổ vào vùng cần phá vỡ, hạn chế lan truyền sóng rung về phía khu vực nhạy cảm (Jimeno et al., 1995).

4.3.2. Kiểm soát sóng va đập không khí

Sóng va đập không khí chịu ảnh hưởng lớn bởi điều kiện che chắn miệng lỗ mìn và chất lượng nạp thuốc:

- Kiểm soát chiều dài và chất lượng búa nhằm hạn chế thoát khí đột ngột tại miệng lỗ mìn - nguyên nhân chính gây sóng va đập không khí (ISEE, 2011).

- Tránh nạp thừa thuốc, đặc biệt tại các lỗ khoan sát mặt tự do, để giảm áp suất khí dư thừa sau nổ (Bhandari, 1997).

- Bịt kín khe nứt, lỗ rỗng trên bề mặt bãi nổ bằng vật liệu thích hợp nhằm hạn chế đường thoát khí.

- Trong điều kiện đặc biệt, che chắn bãi nổ bằng vật liệu hoặc kết cấu phù hợp có thể giúp giảm đáng kể sóng va đập không khí phát sinh (Siskind et al., 1980).

4.3.3. Kiểm soát và giảm đá bay

Đá bay là một trong những tác động nguy hiểm nhất của nổ mìn lộ thiên và cần được ưu tiên kiểm soát:

- Kiểm soát đường căn chân tảng và chiều dài búa là biện pháp cơ bản để hạn chế chuyển hóa năng lượng nổ thành động năng làm đá văng ra khỏi bãi nổ (Jimeno et al., 1995).

- Đánh giá điều kiện mặt tự do và cấu trúc khối đá trước khi nổ nhằm tránh các vùng dễ phát sinh đá bay.

- Phủ lưới hoặc thảm chắn đá bay có thể được áp dụng trong các bãi nổ nhỏ, gần công trình hoặc khu vực nhạy cảm, mặc dù cần cân nhắc tính khả thi và chi phí (ISEE, 2011).

- Thiết lập và kiểm soát nghiêm ngặt vùng cấm và khu vực an toàn là biện pháp tổ chức bắt buộc để giảm thiểu hậu quả nếu đá bay xảy ra.

4.3.4. Kiểm soát bụi và khí độc sau nổ mìn

Bụi và khí độc NO_x, CO phát sinh chủ yếu do phản ứng nổ không hoàn toàn:

- Tối ưu cân bằng oxy của thuốc nổ nhằm bảo đảm phản ứng nổ hoàn chỉnh, giảm phát sinh khí độc (Meyer et al., 2007).

- Kiểm soát điều kiện lỗ khoan ướt, lựa chọn thuốc nổ chịu nước và tránh nạp thuốc không đồng đều.

- Giảm tình trạng nạp thừa thuốc và phân đoạn nạp hợp lý để hạn chế phản ứng nổ dư thừa.

- Bố trí thời gian thông gió tự nhiên phù hợp sau nổ, đặc biệt tại các moong sâu hoặc điều kiện khí tượng bất lợi, nhằm giảm nguy cơ phơi nhiễm khí độc cho người lao động (ISEE, 2011).

4.3.5. Kiểm soát mìn câm và sự cố khởi nổ

Mìn câm và sai lệch trình tự nổ là nguồn rủi ro nghiêm trọng trong khai thác mỏ:

- Quản lý chất lượng kíp nổ và phụ kiện, kiểm tra nguồn gốc, điều kiện bảo quản và tương thích với thuốc nổ.

- Kiểm tra mạng nổ bằng thiết bị chuyên dụng trước khi kích nổ nhằm phát hiện hở mạch hoặc lỗi kết nối (ISEE, 2011).

- Đào tạo và đánh giá năng lực của đội ngũ nổ mìn, đặc biệt về xử lý mìn câm.

- Áp dụng quy trình xử lý mìn câm chuẩn hóa, tuân thủ nghiêm ngặt quy trình vận hành tiêu chuẩn và giấy phép thực hiện công việc có rủi ro, nhằm giảm thiểu tai nạn trong các khâu sau nổ (Dowding, 1985).

4.4. Bộ KPI quản trị rủi ro nổ mìn lộ thiên

Để bảo đảm kiểm soát rủi ro hiệu quả và cải tiến liên tục, công tác nổ mìn cần được theo dõi bằng bộ chỉ số đánh giá hiệu suất (Key Performance Indicators - KPI), phản ánh đồng thời các khía cạnh kỹ thuật, an toàn, môi trường - xã hội và mức độ số hóa (ISO, 2018; ICMM, 2019).

Bảng 2. Bộ KPI đề xuất cho quản trị rủi ro nổ mìn lộ thiên

Nhóm KPI	Chỉ tiêu	Ý nghĩa quản trị
Kỹ thuật	PPV95 (giá trị PPV tương ứng với mức tin cậy 95%); Airblast95 (sóng va đập không khí tại mức tin cậy 95%).	Đánh giá mức độ kiểm soát chấn động và sóng va đập không khí trong điều kiện bất lợi.

Nhóm KPI	Chỉ tiêu	Ý nghĩa quản trị
	P80 (kích thước hạt mà 80% vật liệu nhỏ hơn hoặc bằng kích thước đó); tỷ lệ đá quá cỡ.	Đánh giá chất lượng đập vỡ và hiệu quả xúc bốc - nghiền sàng.
An toàn	Số vụ suýt tai nạn/100 vụ nổ.	Chỉ báo sớm rủi ro và hiệu quả văn hóa an toàn.
	Tỷ lệ mìn câm.	Đánh giá độ tin cậy của hệ thống khởi nổ.
	Tỷ lệ tuân thủ.	Mức độ tuân thủ quy trình vận hành tiêu chuẩn, giấy phép thực hiện công việc có rủi ro và quy định an toàn.
Môi trường - xã hội	Số phản ánh/khiếu nại cộng đồng.	Đánh giá chấp nhận xã hội đối với hoạt động nổ mìn.
	Bụi, NOx, CO.	Kiểm soát tác động môi trường và sức khỏe.
	Tiếng ồn.	Đánh giá mức độ phiền nhiễu môi trường.
Số hóa	Tỷ lệ vụ nổ có dữ liệu đầy đủ.	Mức độ hoàn thiện cơ sở dữ liệu nổ mìn.
	Thời gian cập nhật cơ sở dữ liệu.	Khả năng phản hồi nhanh và quản lý theo thời gian thực.

Việc theo dõi các KPI này theo thời gian cho phép nhận diện xu thế rủi ro, đánh giá hiệu quả của các biện pháp kiểm soát và cung cấp cơ sở định lượng cho quy trình cải tiến liên tục trong quản trị nổ mìn lộ thiên.

5. Định hướng phát triển nổ mìn thân thiện với môi trường cho Việt Nam

5.1. “Nổ mìn xanh” trong bối cảnh mở lộ thiên Việt Nam

Khái niệm “nổ mìn xanh” (green blasting) được hiểu là việc thiết kế, tổ chức và thực hiện nổ mìn theo hướng giảm thiểu tối đa các tác động bất lợi đến môi trường và xã hội, đồng thời duy trì hoặc nâng cao hiệu quả kỹ thuật - kinh tế của

khai thác mỏ. Trong bối cảnh các mỏ lộ thiên Việt Nam ngày càng khai thác xuống sâu, phân bố gần khu dân cư và chịu áp lực lớn về môi trường, “nổ mìn xanh” không chỉ là lựa chọn công nghệ mà còn là yêu cầu tất yếu của phát triển bền vững ngành khai khoáng.

5.1.1. Giảm phát thải và tác động môi trường của nổ mìn

Một trong những mục tiêu cốt lõi của nổ mìn xanh là giảm phát thải và các tác động môi trường trực tiếp như chấn động nền, sóng va đập không khí, bụi và khí độc sau nổ. Các nghiên cứu cho thấy việc áp dụng kíp điện tử, nổ mìn vi sai chính xác và tối ưu hóa tải nổ tức thời có thể làm giảm đáng kể giá trị PPV và sóng va đập không khí tại các điểm nhạy cảm, qua đó hạn chế nguy cơ ảnh hưởng đến công trình và môi trường xung quanh.

Bên cạnh đó, lựa chọn thuốc nổ phù hợp, tối ưu cân bằng oxy và kiểm soát chặt chẽ điều kiện lỗ khoan (đặc biệt là lỗ ướt) góp phần giảm phát sinh khí độc NO_x, CO,... cải thiện chất lượng không khí trong và ngoài khu vực mỏ. Việc kết hợp các biện pháp kỹ thuật với giám sát môi trường liên tục giúp chuyển từ kiểm soát bị động sang quản lý chủ động dựa trên dữ liệu, phù hợp với xu hướng mỏ xanh và mỏ thông minh.

5.1.2. Tối ưu năng lượng nổ và giảm hiện tượng khối đá bị phá vỡ vượt ra ngoài ranh giới hình học đã thiết kế

“Nổ mìn xanh” không đồng nghĩa với giảm cường độ phá vỡ một cách cơ học, mà nhấn mạnh tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng nổ. Khi năng lượng nổ được phân bố hợp lý vào quá trình phá vỡ khối đá, phần năng lượng thất thoát gây chấn động, đá bay và hiện tượng khối đá bị phá vỡ vượt ra ngoài ranh giới hình học đã thiết kế sẽ giảm đáng kể. Thiết kế nổ mìn 3D, phân đoạn nạp thuốc, kiểm soát đường căn chân tầng - khoảng cách giữa hai lỗ khoan trong hàng và áp dụng nổ mìn tạo biên là những giải pháp hiệu quả để giảm sự sai khác biên giới mỏ so với thiết kế, bảo vệ bờ mỏ và giảm khối lượng đất đá cần xử lý bổ sung.

Nhiều nghiên cứu chỉ ra rằng tối ưu hóa nổ mìn giúp giảm chi tiêu thuốc nổ, giảm tỷ lệ đá quá cỡ và nâng cao hiệu quả các công đoạn xúc bốc - nghiền sàng phía sau, từ đó mang lại lợi ích kép về kinh tế và môi trường. Trong bối cảnh chi phí năng lượng và yêu cầu giảm phát thải ngày càng gia tăng, tối ưu năng lượng nổ là một trụ cột quan trọng của nổ mìn xanh.

5.1.3. Giảm khiếu nại cộng đồng và nâng cao chấp nhận xã hội

Đối với các mỏ lộ thiên Việt Nam nằm gần khu dân cư, tác động xã hội của nổ mìn ngày càng trở thành yếu tố quyết định tính bền vững của hoạt động khai thác. Chấn động, tiếng ồn và sóng va đập không khí không chỉ gây ảnh hưởng vật lý mà còn tác động mạnh đến cảm nhận và tâm lý của cộng đồng. Các nghiên cứu và kinh nghiệm quốc tế cho thấy việc minh bạch hóa thông tin nổ mìn, giám sát và công bố dữ liệu chấn động, cùng với cơ chế phản hồi kịp thời là yếu tố quan trọng để giảm khiếu nại và xây dựng niềm tin với cộng đồng xung quanh khu vực khai thác mỏ.

Trong khuôn khổ nổ mìn xanh, việc kết hợp các giải pháp kỹ thuật giảm tác động với quản trị xã hội (truyền thông, tham vấn cộng đồng, xử lý phản ánh) giúp nâng cao sự chấp nhận của xã hội để mỏ hoạt động. Đây là điều kiện then chốt để các mỏ lộ thiên Việt Nam duy trì hoạt động ổn định, lâu dài và phù hợp với định hướng phát triển bền vững của ngành khai khoáng.

5.2. Lộ trình áp dụng nổ mìn thân thiện với môi trường theo ba mức (mỏ nhỏ - vừa - lớn)

Do sự khác biệt đáng kể về quy mô khai thác, điều kiện địa chất - không gian, năng lực tài chính và trình độ nhân lực, việc triển khai nổ mìn xanh tại các mỏ lộ thiên Việt Nam cần được thực hiện theo lộ trình phân cấp, tránh áp dụng đồng loạt gây lãng phí hoặc thiếu khả thi. Trên cơ sở tổng hợp thông lệ quốc tế và điều kiện trong nước, lộ trình áp dụng được đề xuất theo ba mức độ: cơ bản, nâng cao và tiên tiến, tương ứng với mỏ nhỏ, mỏ vừa và mỏ lớn.

5.2.1. Mức 1 - Cơ bản (bắt buộc đối với mọi mỏ lộ thiên)

Mức 1 là nền tảng tối thiểu bắt buộc, nhằm bảo đảm an toàn và tuân thủ quy định pháp luật về nổ mìn, đồng thời tạo tiền đề cho các mức phát triển cao hơn.

Trọng tâm của mức này là chuẩn hóa quy trình và dữ liệu cơ bản, bao gồm:

- Chuẩn hóa hộ chiếu nổ mìn, trong đó thể hiện đầy đủ thông số thiết kế, điều kiện lỗ khoan, loại thuốc nổ - kíp nổ, trình tự nổ và vùng ảnh hưởng dự kiến. Hộ chiếu nổ mìn là tài liệu pháp lý - kỹ thuật quan trọng để truy vết và kiểm soát rủi ro.
- Giám sát chấn động tối thiểu, đặc biệt tại các mỏ gần khu dân cư hoặc công trình cần bảo vệ, nhằm đánh giá tuân thủ các ngưỡng cho phép và làm cơ sở xử lý khiếu nại cộng đồng.

- Xây dựng và áp dụng quy trình vận hành tiêu chuẩn an toàn, bao gồm các quy trình khoan - nạp - đầu nối - cảnh giới - xử lý mìn câm, kết hợp cơ chế có giấy phép thực hiện công việc có rủi ro đối với các hoạt động rủi ro cao.

- Đào tạo và cấp chứng chỉ cho nhân lực nổ mìn, bảo đảm người lao động hiểu rõ rủi ro, quy trình và trách nhiệm cá nhân trong từng công đoạn.

Mức 1 phù hợp với mỏ nhỏ và mỏ quy mô hạn chế, nơi nguồn lực đầu tư còn hạn chế nhưng vẫn phải bảo đảm yêu cầu an toàn và môi trường tối thiểu.

5.2.2. Mức 2 - Nâng cao (khuyến khích cho mỏ vừa và mỏ có điều kiện nhạy cảm)

Mức 2 hướng tới nâng cao hiệu quả kỹ thuật và giảm tác động môi trường thông qua số hóa từng phần, phù hợp với các mỏ vừa, mỏ gần khu dân cư hoặc mỏ có yêu cầu cao về kiểm soát tác động.

Các nội dung trọng tâm bao gồm:

- Thiết kế nổ mìn 3D, tích hợp dữ liệu địa chất - địa chất công trình, giúp bố trí lỗ khoan và lượng thuốc nổ chính xác hơn so với thiết kế 2D truyền thống.

- Cơ giới hóa công tác nạp nổ, đặc biệt là sử dụng xe nạp nhũ tương rời, nhằm nâng cao độ chính xác nạp thuốc, giảm tiếp xúc nguy hiểm của công nhân và kiểm soát tốt hơn chất lượng nạp.

- Xây dựng cơ sở dữ liệu nổ mìn, lưu trữ có hệ thống thông tin thiết kế, thi công và kết quả sau nổ, tạo nền tảng cho phân tích xu thế và cải tiến liên tục (Drebenstedt & Singhal, 2019).

- Ứng dụng dashboard quản lý, trực quan hóa các chỉ tiêu kỹ thuật - an toàn - môi trường, hỗ trợ nhà quản lý theo dõi hiệu quả nổ mìn và ra quyết định kịp thời.

Mức 2 giúp các mỏ chuyển từ quản lý dựa trên kinh nghiệm sang quản lý dựa trên dữ liệu, là bước trung gian quan trọng trước khi triển khai nổ mìn thông minh.

5.2.3. Mức 3 - Tiên tiến (định hướng cho mỏ lớn, mỏ chiến lược)

Mức 3 đại diện cho nổ mìn xanh - thông minh ở cấp độ cao, phù hợp với các mỏ lộ thiên lớn, mỏ chiến lược quốc gia hoặc mỏ có điều kiện đặc biệt nhạy cảm về môi trường - xã hội.

Các giải pháp cốt lõi của mức này bao gồm:

- Áp dụng kip điện tử, cho phép kiểm soát chính xác thời gian vi sai, giảm trùng nổ, giảm chấn động và sóng va đập không khí, đặc biệt hiệu quả tại các mỏ gần khu dân cư (ISEE, 2011).

- Giám sát chấn động và sóng va đập không khí theo thời gian thực, tích hợp cảnh báo sớm và phản hồi nhanh để điều chỉnh thiết kế trong các vụ nổ tiếp theo (Dowding, 1985).

- Ứng dụng AI/ML trong dự báo và hỗ trợ ra quyết định, bao gồm dự báo PPV, sóng va đập không khí, đá bay và chất lượng đập vỡ đất đá, góp phần chuyển từ kiểm soát bị động sang dự báo chủ động (Khandelwal & Singh, 2009; Zhou et al., 2020).

- Tối ưu hóa theo tiếp cận “blast-to-mill”, liên kết chặt chẽ nổ mìn với xúc bốc - nghiền sàng nhằm giảm tiêu hao năng lượng toàn chuỗi và giảm phát thải gián tiếp (Eloranta, 2001; Scott et al., 2009).

- Quản trị chuỗi vật liệu nổ công nghiệp số hóa, cho phép truy vết, kiểm soát tồn kho và cấp phát vật liệu nổ theo thời gian thực, nâng cao an toàn và minh bạch (ICMM, 2019).

Mức 3 là định hướng dài hạn cho ngành khai khoáng Việt Nam, gắn với chiến lược chuyển đổi số, mở thông minh và phát triển bền vững.

Bảng 3. Lộ trình ba mức áp dụng cho các mỏ lộ thiên Việt Nam

Mức áp dụng	Đối tượng mỏ phù hợp	Mục tiêu chính	Nội dung công nghệ - quản lý cốt lõi	Kết quả kỳ vọng
Mức 1 - Cơ bản (bắt buộc)	Mỏ nhỏ; mỏ xa khu dân cư; nguồn lực hạn chế.	Đảm bảo an toàn tối thiểu và tuân thủ pháp lý.	- Chuẩn hóa hộ chiếu nổ mìn. - Quy trình vận hành tiêu chuẩn an toàn cho toàn chuỗi khoan - nổ. - Giám sát PPV/sóng va đập không khí tối thiểu tại điểm nhạy cảm. - Đào tạo và chứng chỉ cho nhân sự nổ mìn. - Thiết lập giấy phép thực hiện cho công việc rủi ro cao.	- Giảm sự cố nghiêm trọng. - Tuân thủ quy định an toàn - môi trường. - Cơ sở dữ liệu ban đầu cho cải tiến.
Mức 2 - Nâng cao (khuyến khích)	Mỏ vừa; mỏ gần khu dân cư/công trình.	Nâng cao hiệu quả kỹ thuật và kiểm soát tác động.	- Thiết kế nổ mìn 3D tích hợp địa chất. - Cơ giới hóa nạp nổ (nhũ tương rời). - Cơ sở dữ liệu nổ mìn (thiết kế - thi công - kết quả). - Dashboard quản lý KPI kỹ thuật - an toàn - môi trường.	- Giảm rung chấn, đá bay, đá quá cỡ. - Tối ưu mức độ đập vỡ và xúc bốc. - Giảm khiếu nại cộng đồng.

Mức áp dụng	Đối tượng mô phù hợp	Mục tiêu chính	Nội dung công nghệ - quản lý cốt lõi	Kết quả kỳ vọng
			- Kiểm soát lượng thuốc nổ nổ đồng thời lớn nhất, nổ mìn vì sai toàn phần.	
Mức 3 - Tiên tiến (định hướng)	Mỏ lớn; mỏ chiến lược; điều kiện nhạy cảm cao	Nổ mìn xanh - thông minh, dựa trên dữ liệu.	- Kíp điện tử và mạng nổ số hóa. - Giám sát chấn động và sóng va đập không khí thời gian thực. - AI/ML dự báo PPV, sóng va đập không khí, đá bay và chất lượng đập vỡ đất đá. - Tối ưu hóa theo tiếp cận blast-to-mill liên kết nổ mìn - nghiền. - UAV/LiDAR đánh giá bãi nổ và kiểm soát ổn định bờ mỏ. - Quản trị chuỗi VLNCN số hóa.	- Giảm mạnh chấn động, khí nổ và tác động môi trường. - Tối ưu toàn chuỗi khai thác - chế biến. - Tăng minh bạch dữ liệu và quản trị rủi ro. - Hình thành hệ thống nổ mìn xanh - thông minh

5.3. Khuyến nghị chính sách - tiêu chuẩn - quản lý cho nổ mìn thân thiện với môi trường

5.3.1. Chuẩn hóa yêu cầu giám sát và báo cáo dữ liệu nổ mìn

Một trong những hạn chế hiện nay là thiếu chuẩn hóa thống nhất về giám sát, lưu trữ và báo cáo dữ liệu nổ mìn giữa các mỏ. Do đó, cần ban hành các yêu cầu tối thiểu bắt buộc đối với giám sát chấn động, sóng va đập không khí, đá bay, bụi và khí độc sau nổ, đặc biệt tại các mỏ gần khu dân cư và công trình nhạy cảm. Dữ liệu đo đạc cần được lưu trữ có cấu trúc, truy vết theo vụ nổ và sẵn sàng phục vụ thanh tra, đánh giá rủi ro và giải quyết khiếu nại cộng đồng (Dowding, 1985; Siskind et al., 1980).

Khuyến nghị áp dụng khung quản trị rủi ro theo ISO 31000 kết hợp với hệ thống quản lý an toàn nghề nghiệp ISO 45001, trong đó dữ liệu nổ mìn được xem là một phần của hồ sơ rủi ro và cải tiến liên tục (ISO, 2018; ISO, 2018b). Việc số hóa báo cáo và tiến tới cơ sở dữ liệu nổ mìn cấp doanh nghiệp/địa phương sẽ tạo nền tảng cho quản lý dựa trên bằng chứng.

5.3.2. Khuyến khích đầu tư công nghệ giảm chấn động và khí nổ

Để thúc đẩy nổ mìn xanh, cần có cơ chế khuyến khích đầu tư đối với các công nghệ chứng minh được hiệu quả giảm tác động môi trường, như kíp điện tử,

thuốc nổ nhũ tương ít khói, thiết kế nổ mìn 3D, giám sát thời gian thực và các giải pháp tối ưu hóa năng lượng nổ. Các thông lệ quốc tế cho thấy việc đầu tư ban đầu cho công nghệ sạch thường được bù đắp bằng lợi ích dài hạn về an toàn, môi trường và hiệu quả khai thác (ICMM, 2019; Eloranta, 2001).

Ở cấp quản lý nhà nước, có thể xem xét cơ chế ưu đãi (thuế, tín dụng xanh, xếp hạng tuân thủ) cho các mỏ áp dụng công nghệ giảm chấn động/khí thải và đạt các KPI môi trường - xã hội đã công bố. Cách tiếp cận này giúp chuyển từ “tuân thủ tối thiểu” sang khuyến khích vượt chuẩn trong quản lý nổ mìn.

5.3.3. Cơ chế đánh giá rủi ro và chứng chỉ năng lực nhân sự nổ mìn

Bên cạnh công nghệ, nhân tố con người là yếu tố quyết định hiệu quả kiểm soát rủi ro. Do đó, cần thiết lập cơ chế đánh giá rủi ro bắt buộc đối với phương án nổ mìn trong các điều kiện nhạy cảm (gần dân cư, mỏ xuống sâu, địa chất phức tạp), làm căn cứ phê duyệt thiết kế và lựa chọn biện pháp kiểm soát (ISO, 2018).

Song song, việc xây dựng hệ thống chứng chỉ năng lực cho nhân sự nổ mìn (kỹ sư, chỉ huy nổ, thợ mìn) theo các cấp độ phù hợp với mức độ phức tạp của mỏ là cần thiết. Các chứng chỉ này cần được cập nhật định kỳ thông qua đào tạo liên tục, đặc biệt về công nghệ mới, an toàn và quản trị rủi ro (ISEE, 2011; Reason, 1997).

5.4. Phát triển nguồn nhân lực cho nổ mìn tiên tiến, an toàn và bền vững

5.4.1. Yêu cầu năng lực mới đối với kỹ sư nổ mìn

Trong bối cảnh chuyển đổi số và nổ mìn xanh, vai trò của kỹ sư nổ mìn đang thay đổi mạnh mẽ. Bên cạnh kiến thức truyền thống về thuốc nổ và thiết kế khoan - nổ, kỹ sư nổ mìn cần được trang bị:

- Năng lực dữ liệu: thu thập, xử lý và phân tích dữ liệu chấn động, chất lượng đập vỡ đất đá, khí độc.

- Kỹ năng sử dụng phần mềm: thiết kế nổ mìn 3D, mô phỏng, dashboard quản lý.

- Hiểu biết về giám sát và quản trị rủi ro: bao gồm đánh giá xu thế, cảnh báo sớm và phản hồi sau nổ (Drebenstedt & Singhal, 2019; Zhou et al., 2020).

Việc nâng cao năng lực này giúp kỹ sư nổ mìn chuyển từ vai trò “người thực hiện” sang người ra quyết định dựa trên dữ liệu, phù hợp với định hướng mỏ thông minh.

5.4.2. Liên kết đào tạo - nghiên cứu - ứng dụng giữa trường, viện và doanh nghiệp

Phát triển nguồn nhân lực chất lượng cao đòi hỏi liên kết chặt chẽ giữa cơ sở đào tạo, viện nghiên cứu và doanh nghiệp. Trong bối cảnh Việt Nam, mô hình hợp tác giữa các trường đại học chuyên ngành với các doanh nghiệp vật liệu nổ công nghiệp và khai thác mỏ là hướng đi hiệu quả để:

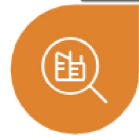
- Gắn đào tạo với nhu cầu thực tiễn của doanh nghiệp.
- Tạo điều kiện cho sinh viên và kỹ sư trẻ tiếp cận công nghệ mới ngay trong quá trình học tập và thực tập.
- Thúc đẩy nghiên cứu ứng dụng, chuyển giao công nghệ và xây dựng bộ dữ liệu nổ mìn phục vụ đào tạo và R&D.
- Liên kết “trường - viện - doanh nghiệp” được xem là nền tảng quan trọng để bảo đảm tính bền vững dài hạn của chiến lược phát triển nổ mìn xanh tại Việt Nam.

Liên kết đào tạo- nghiên cứu-ứng dụng

Hợp tác giữa trường đại học, viện nghiên cứu và doanh nghiệp

Giám sát và quản trị rủi ro

Đánh giá xu thế, cảnh báo sớm và phản hồi sau nổ



Năng lực dữ liệu

Khả năng thu thập, xử lý và phân tích dữ liệu chấn động, chất lượng đập vỡ đất đá và khí độc

Kỹ năng phần mềm

Thành thạo trong thiết kế nổ mìn 3D, mô phỏng và dashboard quản lý

Hình 2. Phát triển nguồn nhân lực cho nổ mìn tiên tiến

6. Kết luận

Bài báo đã tổng hợp, phân tích và hệ thống hóa các xu hướng công nghệ, phương pháp kiểm soát rủi ro và định hướng phát triển nổ mìn thân thiện với môi trường trong khai thác lộ thiên, trên cơ sở tham chiếu thông lệ quốc tế và gắn với điều kiện thực tiễn tại Việt Nam. Từ các kết quả nghiên cứu và thảo luận, có thể rút ra ba thông điệp chính như sau:

Thứ nhất, công nghệ nổ mìn tiên tiến - đặc biệt là sự kết hợp giữa kỹ thuật điện tử, thiết kế nổ mìn số 3D, giám sát chấn động/sóng va đập không khí và dữ liệu

hóa đang trở thành xu hướng tất yếu trong khai thác lộ thiên hiện đại. Các công nghệ này cho phép kiểm soát chính xác tải nổ tức thời, giảm chấn động, đá bay và phát thải khí độc, đồng thời nâng cao hiệu quả đập vỡ và hiệu quả toàn chuỗi khai thác - chế biến. Việc chuyển từ thiết kế dựa trên kinh nghiệm sang thiết kế dựa trên dữ liệu và mô hình là điều kiện then chốt để nâng cao mức độ an toàn và bền vững của hoạt động nổ mìn.

Thứ hai, kiểm soát rủi ro nổ mìn không thể tiếp cận một cách đơn lẻ theo từng biện pháp kỹ thuật, mà cần được triển khai theo khung tích hợp kỹ thuật - tổ chức - dữ liệu. Điều này bao gồm: (i) thiết kế và kiểm soát kỹ thuật phù hợp với điều kiện địa chất và không gian mỏ; (ii) hệ thống quy trình, đào tạo, cấp phép công việc và văn hóa an toàn; và (iii) giám sát, thu thập dữ liệu, phản hồi sau nổ và cải tiến liên tục. Cách tiếp cận tích hợp này giúp chuyển từ quản lý rủi ro bị động sang quản trị rủi ro chủ động dựa trên bằng chứng, phù hợp với yêu cầu an toàn ngày càng cao và kỳ vọng của cộng đồng.

Thứ ba, việc triển khai lộ trình “nổ mìn xanh” tại Việt Nam cần được thiết kế linh hoạt theo quy mô và điều kiện từng mỏ, đồng thời gắn chặt với khung pháp lý, tiêu chuẩn kỹ thuật và năng lực nhân lực trong nước. Lộ trình phân cấp theo ba mức (cơ bản - nâng cao - tiên tiến) cho phép các mỏ từng bước nâng cấp công nghệ, tránh đầu tư dàn trải, đồng thời bảo đảm tuân thủ yêu cầu an toàn - môi trường tối thiểu. Song song, các chính sách khuyến khích công nghệ sạch, chuẩn hóa giám sát dữ liệu và phát triển nguồn nhân lực nổ mìn chất lượng cao là những điều kiện nền tảng để hiện thực hóa mục tiêu nổ mìn an toàn, thân thiện với môi trường và phát triển bền vững ngành khai khoáng Việt Nam.

Tổng thể, bài báo góp phần làm rõ cơ sở khoa học và thực tiễn cho việc chuyển đổi từ nổ mìn truyền thống sang nổ mìn xanh - thông minh, đồng thời cung cấp khung tham chiếu hữu ích cho các nhà quản lý, kỹ sư và nhà nghiên cứu trong quá trình hoạch định chính sách, thiết kế kỹ thuật và đào tạo nhân lực cho khai thác lộ thiên trong giai đoạn tới.

Tài liệu tham khảo

[1] Bhandari, S. (1997). *Engineering rock blasting operations*. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema.

[2] Bui, X.-N., Nguyen, H., Le, H.A., Tran, Q.H., & Nguyen, D.A. (2019). Prediction of blast-induced ground vibration in open-pit mines using machine learning approaches. *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(5), pp. 651-658. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.06.006>.

- [3] Dowding, C. H. (1985). *Blast vibration monitoring and control*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- [4] Drebenstedt, C., & Singhal, R. (2019). Digitalization and automation of surface mining operations. *Mining Technology*, 128(2), pp. 73-84. <https://doi.org/10.1080/25726641.2019.1586474>.
- [5] Eloranta, J. (2001). The influence of blasting on crushing and grinding efficiency. In *Proceedings of the 26th Annual Conference on Explosives and Blasting Technique* (pp. 123-138). Cleveland, OH: International Society of Explosives Engineers.
- [6] Ghasemi, E., Sari, M., & Ataei, M. (2013). Development of a fuzzy model for predicting flyrock in surface blasting. *Safety Science*, 55, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.12.004>.
- [7] Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock slope engineering* (3rd ed.). London, UK: Institution of Mining and Metallurgy.
- [8] International Council on Mining and Metals (ICMM). (2019). *Innovation for cleaner, safer vehicles in mining*. London, UK: ICMM.
- [9] International Organization for Standardization (ISO). (2018). *ISO 31000:2018 Risk management - Guidelines*. Geneva, Switzerland: ISO.
- [10] International Organization for Standardization (ISO). (2018). *ISO 45001:2018 Occupational health and safety management systems - Requirements with guidance for use*. Geneva, Switzerland: ISO.
- [11] International Society of Explosives Engineers (ISEE). (2011). *Blasters' handbook* (18th ed.). Cleveland, OH: ISEE.
- [12] International Society of Explosives Engineers (ISEE). (2019). *Blasters' handbook* (19th ed.). Cleveland, OH: ISEE.
- [13] Jimeno, C. L., Jimeno, E. L., & Carcedo, F. J. A. (1995). *Drilling and blasting of rocks*. Rotterdam, Netherlands: A. A. Balkema.
- [14] Jiskani, I. M., Zhou, W., Lu, X., & Shah, S. A. A. (2020). Application of artificial intelligence techniques in blasting vibration prediction: A review. *Environmental Earth Sciences*, 79, pp. 1-18. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09143-9>.
- [15] Kanchibotla, S. S., Valery, W., & Morrell, S. (1999). Modelling fines in blast fragmentation and its impact on crushing and grinding. *Proceedings of the Explosives and Blasting Conference*. Cleveland, OH: ISEE.
- [16] Khandelwal, M., & Singh, T. N. (2009). Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural network. *International Journal of Rock*

Mechanics and Mining Sciences, 46(7), pp. 1214-1222.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.03.004>.

[17] Meyer, R., Köhler, J., & Homburg, A. (2007). *Explosives* (6th ed.). Weinheim, Germany: Wiley-VCH.

[18] Monjezi, M., Ghafurikalajahi, M., & Bahrami, A. (2011). Prediction of blast-induced ground vibration using artificial neural networks. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(1), pp. 46-50.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2010.05.002>.

[19] Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., & Kojovic, T. (1996). *Mineral comminution circuits: Their operation and optimization*. Brisbane, Australia: JKMRC, University of Queensland.

[20] Owen, J. R., Kemp, D., Lèbre, É., Svobodova, K., & Pérez Murillo, G. (2020). *Catastrophic tailings dam failures and social license to operate*. *Resources Policy*, 65, 101689. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101689>.

[21] Reason, J. (1997). *Managing the risks of organizational accidents*. Aldershot, England: Ashgate.

[22] Scott, A., McKee, D., & Morrell, S. (2009). *The impact of blasting on comminution circuits*. *Minerals Engineering*, 22(1), pp. 44-53.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.05.011>.

[23] Singh, T. N., & Singh, V. (2005). An intelligent approach to prediction and control of ground vibration in mines. *Geotechnical and Geological Engineering*, 23(3), 249-262. <https://doi.org/10.1007/s10706-003-3158-0>.

[24] Siskind, D. E., Stagg, M. S., Kopp, J. W., & Dowding, C. H. (1980). *Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting*. U.S. Bureau of Mines Report of Investigations, 8507.

[25] Zhou, W., Jiskani, I. M., Ahmed, A., Shah, S. A. A., & Lu, X. (2020). *Digital transformation and smart mining technologies in China*. *Resources Policy*, 68, 101733. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101733>.