



NGHIÊN CỨU KHẢ NĂNG ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ SỐ TRONG GIÁM SÁT, NHẬN DIỆN, CẢNH BÁO CHO CÔNG TÁC XÚC BỐC - VẬN TẢI TRÊN CÁC MỎ LỘ THIÊN THUỘC TKV

Đoàn Văn Thanh¹, Đỗ Văn Triều¹, Đặng Tiến Anh¹, Đinh Bá Lâm¹, Trần Đình Bảo²

¹Viện Khoa học Công nghệ Mỏ - Vinacomin, Số 3, Phan Đình Giót, Hà Nội, Việt Nam

²Trường Đại học Mỏ - Địa chất, 18 Phố Viên, Đông Ngạc, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 03/5/2026

Ngày nhận bài sửa: 06/6/2026

Ngày chấp nhận đăng: 10/6/2026

¹*Tác giả liên hệ:

Email: doanthanh.vimsat@gmail.com

TÓM TẮT:

Công tác xúc bốc và vận tải tại các mỏ lộ thiên của Tập đoàn Công nghiệp Than - Khoáng sản Việt Nam (TKV) đang phải đối mặt với nhiều thách thức ngày càng gia tăng liên quan đến chi phí vận hành, an toàn lao động và tác động môi trường, đặc biệt trong điều kiện khai thác xuống sâu. Trước yêu cầu hiện đại hóa và phát triển bền vững, một khung công nghệ số tích hợp dựa trên nền tảng các công nghệ chủ chốt của cách mạng công nghiệp 4.0 được đề xuất với 03 mô đun cốt lõi về giám sát và tối ưu hiệu suất bằng trí tuệ nhân tạo (Artificial Intelligence - AI); nhận diện nguy cơ (Computer Vision) và cảnh báo an toàn (Time To Collision). Kết quả nghiên cứu cho thấy, việc triển khai khung công nghệ số tích hợp này có khả năng cải thiện đáng kể các chỉ số hiệu suất chính (KPIs) về an toàn, hiệu quả và tính bền vững cho công tác xúc bốc - vận tải trên các mỏ lộ thiên. Qua đó, hệ thống góp phần nâng cao năng lực cạnh tranh và thúc đẩy quá trình chuyển đổi số trong hoạt động khai thác lộ thiên tại TKV.

Từ khóa: Cách mạng công nghiệp 4.0, chuyển đổi số ngành mỏ, AI nhận diện nguy cơ, xúc bốc - vận tải.

@ Hội Khoa học và Công nghệ Mỏ Việt Nam

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Tập đoàn Công nghiệp Than - Khoáng sản Việt Nam (TKV) giữ vai trò chiến lược trong việc đảm bảo an ninh năng lượng quốc gia. Trong cơ cấu sản xuất của TKV, khai thác lộ thiên chiếm một tỷ trọng cao trong tổng sản lượng khai thác khoáng sản của toàn tập đoàn. Để đáp ứng nhu cầu sản xuất, các mỏ lộ thiên đã đầu tư, vận hành các đồng bộ thiết bị cỡ lớn (máy xúc thủy lực dung tích gàu 6,7 – 12 m³, ô tô tải trọng 55 – 96 tấn. Điều này cho thấy công tác xúc bốc - vận tải không chỉ là một khâu công nghệ chính mà còn là một hạng mục đầu tư lớn, quyết định đến hiệu quả kinh tế chung của toàn bộ quá trình sản xuất trên mỏ lộ thiên. Tuy nhiên, hiện nay, với điều kiện địa chất, kỹ thuật thay đổi tại các tầng sâu, công tác xúc bốc - vận tải đang đối mặt với những thách thức ngày

càng nghiêm trọng, tác động trực tiếp đến chi phí, an toàn và hiệu quả của hoạt động khai thác cả về kinh tế và kỹ thuật.

Nhận thức được các thách thức trên, các mỏ đã có những bước đi đầu tiên trong việc hiện đại hóa công tác xúc bốc, vận tải qua các sáng kiến sản xuất, đề tài nghiên cứu ứng dụng vào thực tiễn sản xuất để giải quyết cho từng khâu công nghệ. Mặc dù đây là những bước tiến tích cực nhưng cách tiếp cận vẫn mang nặng tính cục bộ, tập trung vào việc giải quyết các vấn đề đơn lẻ thay vì một giải pháp tổng thể. Thực tế này cho thấy một khoảng trống chiến lược về nền tảng kỹ thuật số tích hợp, có khả năng kết nối, tổng hợp và phân tích dữ liệu từ mọi nguồn (phương tiện, môi trường, con người) để tạo ra một cái nhìn toàn diện, từ đó đưa ra các quyết định quản lý và vận



hành dựa trên dữ liệu (data-driven) một cách thông minh và chủ động.

2. DỮ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Tổng quan cơ sở lý thuyết và các công trình nghiên cứu điển hình

2.1.1. Chuyển đổi số trong ngành khai thác mỏ (Mining 4.0)

Chuyển đổi số (Digital Transformation - DT), hay còn gọi là Công nghiệp 4.0, là quá trình các tổ chức thích ứng với công nghệ hiện đại như tự động hóa, cảm biến, trí tuệ nhân tạo và phân tích dữ liệu lớn để thay đổi căn bản cách thức vận hành và tạo ra giá trị [1]. Trong ngành khai mỏ, một ngành công nghiệp truyền thống, chuyển đổi số đang mở ra những cơ hội chưa từng có.

Diễn đàn Kinh tế Thế giới năm 2025 thống kê rằng các sáng kiến chuyển đổi số sẽ mang lại giá trị hơn 320 tỷ USD cho ngành khai khoáng từ năm 2016 đến 2024, chủ yếu thông qua việc tăng năng suất, tiết kiệm năng lượng và nhiên liệu, và tăng cường an toàn [2].

Tuy nhiên, quá trình này không hề đơn giản. Một nghiên cứu của Gartner [2] chỉ ra rằng có tới 85% các dự án dữ liệu lớn (Big Data) bị thất bại trên tất cả các phân khúc thị trường, và ngành công nghiệp khai khoáng cũng không ngoại lệ [2]. Các rủi ro chính bao gồm việc thiếu hiểu biết rõ ràng về bản chất của chuyển đổi số, xem công nghệ như một "viên đạn bạc", thách thức về kỹ năng của lực lượng lao động

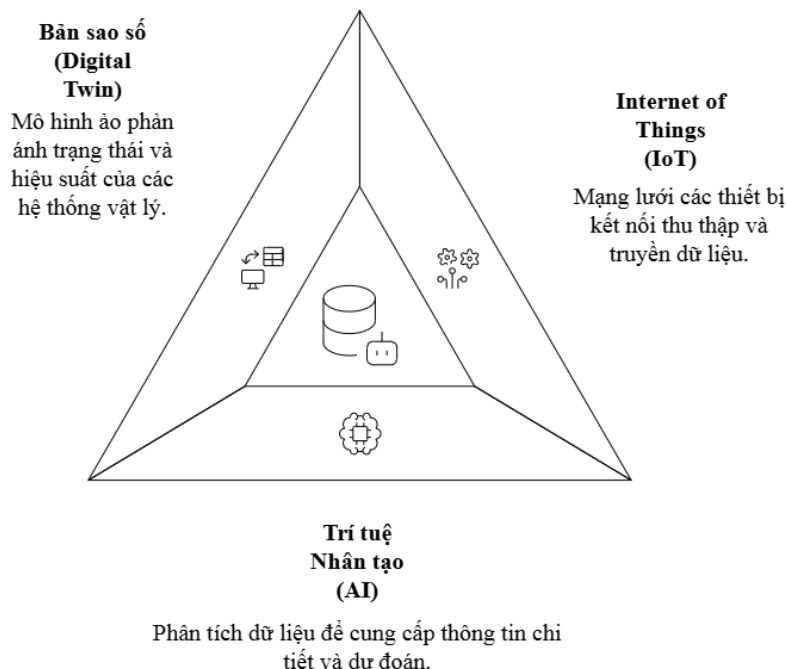
và việc triển khai các sáng kiến một cách rời rạc, thiếu kế hoạch mở rộng quy mô.

2.1.2. Các Công nghệ nền tảng

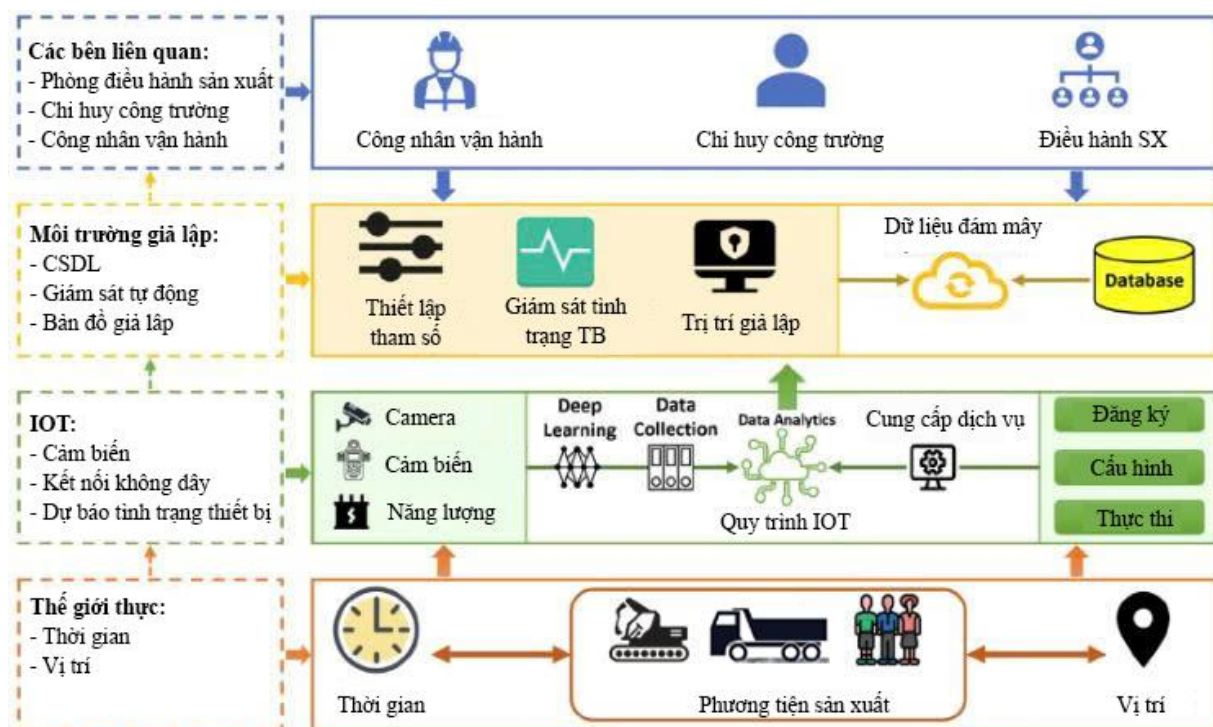
Để xây dựng một hệ thống giám sát và cảnh báo hiệu quả, cần phải tích hợp một loạt các công nghệ nền tảng, mỗi công nghệ đóng một vai trò chuyên biệt nhưng liên kết chặt chẽ với nhau (Hình 1). Sơ đồ Hình 1 cho thấy bộ 3 công nghệ cốt lõi như sau:

- *Internet of Things (IoT):*

IoT là mạng lưới các đối tượng vật lý được trang bị cảm biến (Sensor Networks), phần mềm và các công nghệ khác để kết nối và trao đổi dữ liệu với các thiết bị và hệ thống khác qua internet. Trong khai trường mỏ, một hệ thống IoT (thường được gọi là Mine IoT - MIoT) thường có kiến trúc ba lớp: lớp nhận thức (Perception Layer) bao gồm các cảm biến để thu thập dữ liệu; lớp mạng (Network Layer) để truyền dữ liệu; và lớp ứng dụng (Application Layer) để xử lý và cung cấp dịch vụ [3]. Các thành phần chính trong lớp nhận thức bao gồm các thiết bị viễn thông (Telematics) gắn trên xe, cảm biến GPS, cảm biến lưu lượng nhiên liệu, cảm biến nhiệt độ, cảm biến rung, cảm biến áp suất lốp (TPMS), và camera hành trình. Lớp mạng trong môi trường mỏ đòi hỏi các công nghệ truyền thông mạnh mẽ và linh hoạt như 5G cho các ứng dụng băng thông rộng, độ trễ thấp (video thời gian thực, điều khiển từ xa), và các mạng diện rộng công suất thấp (LPWAN) như Sigfox hay LoRaWAN cho các cảm biến tĩnh, tiêu thụ ít năng lượng.



Hình 1. Các công nghệ nền tảng để nâng cao hiệu quả giám sát, nhận diện, cảnh báo rủi ro cho mỏ lộ thiên



Hình 2. Sơ đồ thực thi bộ ba công nghệ nền tảng trong giám sát, nhận diện, cảnh báo rủi ro cho công tác xúc bốc, vận tải trên mỏ lộ thiên

- Trí tuệ nhân tạo (AI) và thị giác máy tính (Computer Vision - CV):

AI và các nhánh con như học máy (Machine Learning) và học sâu (Deep Learning) đóng vai trò là bộ não phân tích, biến dữ liệu thô từ IoT thành những hiểu biết có giá trị. Thị giác máy tính, một lĩnh vực của AI, cho phép máy tính "nhìn" và diễn giải thế giới hình ảnh [4]. Trong quản lý công tác xúc bốc, vận tải, CV được ứng dụng rộng rãi để

giám sát hành vi của người lái thông qua camera trong cabin, phát hiện các dấu hiệu mệt mỏi (ngáp, mắt lơ đãng), mất tập trung (sử dụng điện thoại, nhìn ra ngoài), và việc không tuân thủ quy định an toàn. Các hệ thống này có thể đưa ra cảnh báo thời gian thực để ngăn chặn tai nạn trước khi chúng xảy ra. Một số nghiên cứu điển hình được thể hiện tại Bảng 1.

Bảng 1. Một số nghiên cứu ứng dụng AI – CV trong giám sát, cảnh báo công tác xúc bốc, vận tải [4]

Năm	Bộ dữ liệu	Mô hình AI	Độ chính xác, %
2023	Bộ kích hoạt cảm xúc Bochum	Yolo v3	64,7
2022	CSDL khuôn mặt ORL	SVM	98,03
2021	Bộ dữ liệu giám sát người lái xe, công tác vận tải xe, nâng hạ gàu xúc	CNN bao gồm: VGG-19 và Inception-v3	96
2019	Nhận diện phương tiện vận tải	Mạng 3D CNN-LSTM	85

- Bản sao số (Digital Twin - DT):

Bản sao số là một mô hình ảo động của một đối tượng hoặc hệ thống vật lý, được cập nhật liên tục bằng dữ liệu thời gian thực từ các cảm biến. Nó không phải là một mô hình 3D tĩnh, mà là một bản sao "sống" phản ánh trạng thái, hành vi và hiệu suất của đối tượng thực. Trong khai mỏ, DT có thể

được tạo ra cho từng thiết bị hoặc cho toàn bộ mỏ [5]. Bằng cách tích hợp dữ liệu từ IoT và phân tích bằng AI, DT cho phép các nhà quản lý giám sát hoạt động từ xa, mô phỏng các kịch bản, dự đoán các vấn đề tiềm ẩn như hỏng hóc thiết bị hoặc các vết nứt trên vách mỏ, và tối ưu hóa toàn bộ chu trình sản xuất.

2.1.3. Các nghiên cứu điển hình

Các tập đoàn khai mỏ hàng đầu thế giới như BHP, Rio Tinto, Vale và Codelco, hoạt động tại các trung tâm khoáng sản lớn như Úc, Chile và Brazil, đang đi tiên phong trong việc áp dụng các công nghệ này để giải quyết các thách thức về năng suất, an toàn và bền vững. Các nghiên cứu điển hình trên toàn cầu cho thấy một xu hướng rõ ràng: sự hội tụ của IoT, AI và bản sao số thành một hệ thống quản lý vận hành duy nhất, thông minh và chủ động.

a. Hệ thống vận hành và giám sát tự động phương tiện xúc bốc, vận tải

- Tại Mỹ: Công ty Freeport-McMoRan đang trong quá trình triển khai 33 xe vận chuyển đất đá tự hành Cat 793 tại mỏ đồng Bagdad, Arizona, sử dụng hệ thống Cat MineStar Command bao gồm kết hợp giữa các cảm biến tiêu hao nhiên liệu, camera 3 chiều giám sát, cảm biến điều khiển [5].

- Tại Úc: BHP và Rio Tinto đang hợp tác với các nhà sản xuất thiết bị hàng đầu là Caterpillar và Komatsu để thử nghiệm xe tải vận tải chạy điện tại vùng Pilbara. Sáng kiến này không chỉ nhằm mục tiêu không phát thải ròng vào năm 2050 mà còn thúc đẩy việc phát triển một hệ sinh thái vận hành hoàn toàn mới trong phối hợp giữa xúc bốc, vận tải [5].

- Tại Thụy Điển: Mỏ Aitik của Boliden đã ứng dụng tự động hóa trong các khâu công nghệ sản xuất dựa trên đồng bộ giữa hệ thống giám sát, cảm biến điều khiển kết nối 5G. Giải pháp này giúp tiết kiệm ròng 2,5 triệu EUR mỗi năm và giảm 1% tổng chi phí hàng năm của mỏ xuống [5].

b. Giám sát, ngăn ngừa chủ động trong công tác an toàn mỏ dựa trên AI và CV

- Giám sát sự mệt mỏi của người lái: Tại một mỏ đồng ở Chile, BHP đã triển khai thành công việc sử dụng mũ bảo hộ gắn dải cảm biến để theo dõi sóng não của người lái xe. Hệ thống AI này phân tích các mẫu sóng não để phát hiện dấu hiệu mệt mỏi và gửi cảnh báo cho cả người lái và phòng điều hành. Tương tự, tại mỏ vonfram Sangdong ở

Hàn Quốc, Almonty Industries đã hợp tác với Korea Telecom để triển khai giải pháp "Mine Safety DX", sử dụng các thiết bị đeo (vòng tay và mũ bảo hiểm thông minh) để thu thập dữ liệu sinh trắc học thời gian thực, cho phép AI phát hiện các dấu hiệu mệt mỏi hoặc căng thẳng thể chất và can thiệp kịp thời [3].

- Hệ thống Tránh va chạm (CAS): Các hệ thống CAS tiên tiến đang được triển khai rộng rãi. Wabtec, một nhà cung cấp hàng đầu, đã trang bị hệ thống CAS thế hệ 3 cho các đối tác lớn như BHP tại Úc. Hệ thống này sử dụng các cảnh báo bằng giọng nói thay vì các cảnh báo truyền thống, đồng thời tích hợp camera thông minh AI để phát hiện người và vật thể không cần thẻ định danh. Việc triển khai CAS không chỉ giúp giảm thiểu tai nạn mà còn cải thiện năng suất thông qua việc tối ưu hóa công tác xúc bốc, vận tải và cho phép tăng cường độ lao động một cách an toàn [3].

c. Bản sao số và Đào tạo Nâng cao Công nghệ thực tế ảo (VR)

- Đào tạo bằng mô phỏng: Rio Tinto sử dụng rộng rãi các trình mô phỏng để đào tạo công nhân vận hành máy xúc, ô tô. Cách tiếp cận này đã được chứng minh là giúp cải thiện khả năng ghi nhớ và do đó, nâng cao an toàn và năng suất tại công trường. Một nghiên cứu điển hình trong ngành khai thác mỏ của Ấn Độ cho thấy việc tích hợp công nghệ VR vào các mô-đun đào tạo đã giúp giảm 30% thời gian đào tạo và cắt giảm 50% chi phí liên quan.

Từ các nghiên cứu điển hình trên cho thấy một xu hướng rõ ràng: Các công nghệ IoT, AI và DT không còn là các giải pháp độc lập mà đang hội tụ thành một nền tảng quản lý vận hành duy nhất, thống nhất. Các hệ thống tiên tiến nhất đang chuyển đổi từ vai trò công cụ giám sát bị động sang các hệ thống điều khiển chủ động, có khả năng dự báo và thậm chí là tự động hóa. Đây chính là mô hình mà một khung công nghệ số TKV hướng tới. Theo đó, vai trò và chức năng trong nhóm công nghệ IoT, AI và DT được thể hiện tại Bảng 2.

Bảng 2. Vai trò chức năng của các công nghệ số cốt lõi

Công nghệ	Nguyên lý	Chức năng chính	Ứng dụng cụ thể trong Khung đề xuất
IoT Sensors	Thu thập dữ liệu vật lý từ môi trường và thiết bị và chuyển đổi thành tín hiệu số.	Thu thập dữ liệu thời gian thực về trạng thái, vị trí và hiệu suất của thiết bị.	Cảm biến GPS, nhiên liệu, nhiệt độ, rung, áp suất lốp, ECU data logger.
Computer Vision	Sử dụng AI để phân tích và hiểu thông tin từ hình ảnh và video.	Nhận diện các đối tượng, sự kiện và hành vi một cách tự động.	Giám sát sự mệt mỏi, mất tập trung của lái xe; phát hiện vật cản; giám sát việc tuân thủ PPE.



Công nghệ	Nguyên lý	Chức năng chính	Ứng dụng cụ thể trong Khung đề xuất
LSTM Networks	Một loại mạng nơ-ron hồi quy có khả năng học các phụ thuộc dài hạn trong dữ liệu chuỗi thời gian.	Dự báo các giá trị trong tương lai dựa trên các chuỗi dữ liệu lịch sử.	Dự báo sự cố nguy hiểm, nhận dạng phương tiện, con người, tuổi thọ phương tiện,...
Digital Twin	Tạo một bản sao ảo, động của một hệ thống vật lý, được cập nhật liên tục bằng dữ liệu thực.	Tích hợp dữ liệu, mô phỏng, giám sát và tối ưu hóa hoạt động của toàn bộ hệ thống.	Bản sao số của mỏ, dùng để mô phỏng lộ trình, lập kế hoạch bảo trì và hỗ trợ ra quyết định.
GPS/GNSS	Hệ thống định vị toàn cầu sử dụng tín hiệu vệ tinh để xác định vị trí chính xác.	Cung cấp dữ liệu vị trí và tốc độ chính xác cho các phương tiện di động.	Theo dõi vị trí phương tiện xúc bốc, vận tải, tính toán tốc độ, làm đầu vào cho hệ thống tránh va chạm và tối ưu hóa lộ trình.

2.2. Đề xuất kiến trúc công nghệ số tích hợp cho giám sát và cảnh báo cho các mỏ lộ thiên thuộc TKV

2.2.1. Hiện trạng kiến trúc chuyển đổi số phục vụ sản xuất tại các mỏ lộ thiên thuộc TKV

Hiện nay, TKV đã xây dựng một kiến trúc tổng thể chuyển đổi số bao gồm: Hạ tầng số và dữ liệu số, đã xây dựng trung tâm dữ liệu (Data Center) và các nền tảng số cốt lõi, đồng thời triển khai phần mềm dùng chung toàn Tập đoàn (phần mềm quản trị điều hành ERP, KPI,...; hệ thống báo cáo thông minh BI); ứng dụng công nghệ thông tin trong quản lý và sản xuất, đã triển khai hệ thống quản lý văn bản, điều hành tác nghiệp, kế toán, tài chính và các ứng dụng công nghệ thông tin khác trong quản trị điều hành doanh nghiệp; Đào tạo và nâng cao nhận thức về chuyển đổi số, đã tổ chức các chương trình đào tạo về chuyển đổi số và ứng dụng AI cho đội ngũ cán bộ quản lý cấp cao, nhằm nâng cao nhận thức và thúc đẩy hành động thực tiễn trong lộ trình chuyển đổi số toàn diện của tập đoàn.

Trên khai trường mỏ lộ thiên, các mỏ đã xây dựng các phòng giám sát, điều khiển sản xuất tập trung qua màn hình ghép, camera giám sát và đầu tư có hiệu quả hệ thống định vị GPS trong công tác giám sát vận tải, giúp giám sát và điều khiển từ xa các công đoạn sản xuất đảm bảo an toàn và hiệu quả. Ngoài ra, các trạm phân phối điện, các tuyến băng tải, bơm thoát nước trong khai thác lộ thiên cũng cơ bản được áp dụng tự động hóa, điều khiển giám sát tập trung.

Dựa trên chỉ số đánh giá mức độ chuyển đổi số doanh nghiệp cho thấy, công tác chuyển đổi số của các mỏ lộ thiên thuộc TKV hiện đang ở mức 2 – Bắt đầu. Đây là nền tảng thuận lợi cho việc phát triển các triển thức chuyển đổi số mang tính tổng thể.

2.2.2. Đề xuất kiến trúc công nghệ số cho khâu xúc bốc – vận tải

Trong điều kiện sản xuất ngày càng khó khăn của các mỏ lộ thiên thuộc TKV khi chiều cao nâng tải, chiều cao bờ mỏ lớn, điều kiện ĐCCT, ĐCTV ngày càng phức tạp, khí hậu cực đoan thì áp lực lên hiệu quả kinh tế, an toàn sản xuất ngày càng lớn. Theo đó, cần một kiến trúc Từ các công nghệ số cốt lõi được ứng dụng tại các mỏ trên thế giới, kiến trúc công nghệ số trong giám sát, cảnh báo được đề xuất phù hợp với điều kiện sản xuất của mỏ lộ thiên thuộc TKV như sau:

2.2.2.1. Mô đun giám sát hoạt động và tối ưu hiệu suất

Mô đun này tập trung vào việc nâng cao hiệu quả kinh tế và kỹ thuật của công tác xúc bốc, vận tải thông qua hai chức năng chính: bảo trì dự báo và tối ưu hóa tiêu thụ nhiên liệu.

a. Bảo trì dự báo

Mục tiêu là chuyển đổi từ phương pháp bảo trì phản ứng (sửa chữa khi hỏng) hoặc bảo trì theo lịch trình cố định sang bảo trì dựa trên tình trạng thực tế và dự báo (predictive maintenance). Điều này giúp giảm thiểu thời gian dừng máy không kế hoạch, tối ưu hóa việc sử dụng phụ tùng và giảm chi phí bảo trì tổng thể.

Để thực hiện điều này, mô đun sử dụng một mô hình học sâu để dự báo tuổi thọ còn lại của các bộ phận quan trọng như động cơ, hộp số, và lốp xe,.... Mạng nơ-ron hồi quy với bộ nhớ dài-ngắn (Long Short-Term Memory - LSTM) được đề xuất do khả năng vượt trội trong việc học các mẫu phụ thuộc theo thời gian trong dữ liệu chuỗi.

- Dữ liệu đầu vào: Các chuỗi dữ liệu thời gian từ các cảm biến rung, nhiệt độ, áp suất, và các mã lỗi từ ECU, được thu thập và lưu trữ trong CSDL. Mô hình sẽ được huấn luyện trên dữ liệu lịch sử vận hành đến khi hỏng hóc (Run-To-Failure) của đội xe



TKV, hoặc có thể bắt đầu với các bộ dữ liệu công khai như C-MAPSS của NASA để xây dựng mô hình cơ sở.

- Kiến trúc mô hình: Một kiến trúc LSTM điển hình bao gồm một lớp đầu vào, một hoặc nhiều lớp LSTM ẩn, và một lớp đầu ra dày đặc (Dense Layer) để dự báo giá trị RUL.

- Công thức cốt lõi: Hoạt động của mỗi tế bào LSTM được điều khiển bởi ba "cổng" (Gate) để quyết định thông tin nào được giữ lại hoặc loại bỏ. Các công thức cho các cổng này tại bước thời gian t là [6]:

Cổng quên (Forget Gate):

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (1)$$

Cổng vào (Input Gate):

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (2)$$

Cổng ra (Output Gate):

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \quad (3)$$

Trong đó, x_t là đầu vào tại thời điểm t ; h_{t-1} là trạng thái ẩn từ thời điểm trước; W và b là các ma trận trọng số và vector độ lệch; và σ là hàm sigmoid. Đầu ra của mô hình là một giá trị RUL dự báo, cho phép đội bảo trì lên kế hoạch can thiệp trước khi sự cố xảy ra.

b. Tối ưu hóa tiêu thụ nhiên liệu

Với chi phí nhiên liệu chiếm tỷ trọng lớn nhất trong chi phí vận tải, việc tối ưu hóa tiêu thụ nhiên liệu mang lại lợi ích kinh tế trực tiếp. Mô-đun này sử dụng một mô hình học máy (Random Forest) hoặc mạng nơ-ron nhân tạo (Artificial Neural Network ANN) để dự đoán và tối ưu hóa việc sử dụng nhiên liệu.

- Dữ liệu đầu vào: Dữ liệu thời gian thực về các biến số ảnh hưởng chính đến nhiên liệu, bao gồm tải trọng (payload), tốc độ xe, tổng lực cản (bao gồm độ dốc và lực cản lăn), vòng tua máy, và thời gian chạy không tải [6].

- Chỉ số KPI và công thức: Một chỉ số hiệu suất chính được sử dụng là chỉ số tiêu thụ nhiên liệu (Fuel Consumption Index - FCI), được định nghĩa là số lít nhiên liệu tiêu thụ để vận chuyển một tấn vật liệu đi được một kilômét (L/t-km) [6].

$$FCI = \frac{\text{Tổng nhiên liệu tiêu thụ (L)}}{\text{Tổng tải trọng (t). Chiều dài quãng đường vận tải (km)}} \quad [4]$$

Mô hình học máy sẽ dự đoán giá trị FCI cho mỗi chu kỳ vận chuyển dựa trên các điều kiện vận hành.

- Hành động tối ưu: Dựa trên dự đoán của mô hình, hệ thống có thể: (1) Cung cấp phản hồi thời gian thực cho người lái trên màn hình trong cabin như: Tốc độ tối ưu cho đoạn đường này là 30 km/h để tiết kiệm nhiên liệu; (2) Gợi ý cho trung tâm điều hành về việc điều chỉnh lộ trình để tránh các đoạn đường hư

hại, ùn ứ; (3) Phân tích và xác định các hành vi lái xe (tăng tốc đột ngột, phanh gấp, chạy không tải kéo dài) gây lãng phí nhiên liệu.

2.2.2.2. Mô đun nhận diện nguy cơ

Mô đun này hoạt động như một "người giám sát ảo", sử dụng thị giác máy tính để tăng cường an toàn cho người lái và những người xung quanh.

- Công nghệ: Sử dụng camera trong cabin kết hợp với một mô hình mạng nơ-ron tích chập (Convolutional Neural Network - CNN), ví dụ như ResNet, đã được huấn luyện trước và tinh chỉnh (fine-tuned) trên dữ liệu đặc thù của môi trường mỏ.

- Chức năng:

+ Phát hiện mệt mỏi: Theo dõi các đặc điểm trên khuôn mặt như tần suất chớp mắt, thời gian nhắm mắt, tần suất ngáp để phát hiện các dấu hiệu buồn ngủ.

+ Phát hiện mất tập trung: Nhận diện các hành vi như sử dụng điện thoại di động, quay đầu nói chuyện quá lâu, hoặc không nhìn thẳng về phía trước.

+ Giám sát tuân thủ PPE: Xác minh việc người lái có thắt dây an toàn hay không.

Cơ chế hoạt động: Khi một hành vi mất an toàn được phát hiện và xác nhận, hệ thống sẽ ngay lập tức ghi lại sự kiện vào CSDL để phục vụ cho việc phân tích và báo cáo sau này. Đồng thời, một cảnh báo bằng âm thanh hoặc hình ảnh không gây giật mình sẽ được phát ra trong cabin để nhắc nhở người lái, và một thông báo có thể được gửi đến giám sát viên tại hiện trường qua ứng dụng di động.

2.2.2.3. Mô đun cảnh báo an toàn

Đây là tuyến phòng thủ cuối cùng để ngăn chặn các tai nạn nghiêm trọng. Mô-đun này tạo ra một "vùng nhận thức 360 độ" xung quanh xe tải.

Thành phần hệ thống: Hệ thống sử dụng phương pháp dung hợp dữ liệu (Sensor Fusion) từ nhiều loại cảm biến để có được một bức tranh toàn cảnh chính xác và đáng tin cậy về môi trường xung quanh xe.

- LiDAR và Radar: Cung cấp khả năng phát hiện khoảng cách và vận tốc tương đối của các đối tượng một cách chính xác, hoạt động tốt trong điều kiện thời tiết xấu hoặc thiếu sáng.

- Camera: Cung cấp thông tin ngữ cảnh, giúp hệ thống phân loại đối tượng (ví dụ: xe khác, người đi bộ, đá tảng).

- GPS/GNSS: Cung cấp thông tin về vị trí và hướng di chuyển của chính chiếc xe và các phương tiện khác được trang bị hệ thống tương tự.

- Logic cốt lõi: Trọng tâm của CAS là việc tính toán liên tục Thời gian đến Va chạm (Time-to-Collision - TTC). TTC là thời gian ước tính còn lại trước khi hai đối tượng va chạm nếu chúng tiếp tục

di chuyển với vận tốc và quỹ đạo hiện tại, được xác định bằng công thức:

$$TCC = \frac{X_{lead} - X_{follow} - L_{lead}}{V_{follow} - V_{lead}} \quad [5]$$

Trong đó: X_{lead} và X_{follow} là vị trí của xe trước và xe sau; V_{lead} và V_{follow} là vận tốc của chúng; và L_{lead} là chiều dài của xe trước. Công thức này chỉ có giá trị khi $V_{follow} > V_{lead}$.

- Hệ thống cảnh báo: Hệ thống sẽ triển khai một cơ chế cảnh báo theo cấp độ, dựa trên giá trị TTC được tính toán:

+ $TTC > 5$ giây (Vùng an toàn): Hiển thị thông tin về các đối tượng xung quanh trên màn hình trong cabin.

+ $2 \text{ giây} < TTC \leq 5$ giây (Vùng cảnh báo): Phát ra cảnh báo bằng hình ảnh (đèn nhấp nháy) và âm thanh ở mức độ vừa phải để thu hút sự chú ý của người lái.

+ $TTC \leq 2$ giây (Vùng nguy hiểm): Phát ra cảnh báo khẩn cấp, liên tục và mạnh mẽ. Trong các phiên bản nâng cao trong tương lai, hệ thống có thể được tích hợp để tự động can thiệp vào hệ thống phanh của xe nhằm giảm thiểu hoặc tránh va chạm.

2.3. Thử nghiệm mô đun kiến trúc công nghệ

Từ khung kiến trúc công nghệ số đề xuất, dựa trên video thu thập được từ công tác vận tải đất đá thải tại mỏ than Cao Sơn, thực hiện thử nghiệm trên 01 mô đun nhận diện phương tiện, xác định chỉ số vận tốc trong mô đun cảnh báo an toàn qua hệ thống Camera, kết quả được thể hiện qua Hình 3.



Hình 3. Nhận diện, theo dõi phương tiện vận tải từ mô đun cảnh báo an toàn



Kết quả thử nghiệm cho thấy, mức độ chính xác trong nhận diện phương tiện đạt 93,2%, tốc độ xử lý nhanh, đáp ứng yêu cầu giám sát, cảnh báo theo thời gian thực tại các phòng điều hành sản xuất trên khai trường mỏ lộ thiên.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

* Đánh giá tác động tiềm năng dựa trên chỉ số hiệu suất chính (kpis)

Việc triển khai thành công khung công nghệ số tích hợp được đề xuất sẽ tạo ra những tác động sâu sắc và có thể đo lường được đối với hoạt động xúc bốc - vận tải tại TKV. Các tác động này có thể được đánh giá thông qua một bộ các chỉ số hiệu suất chính (KPIs) được định nghĩa rõ ràng.

- An toàn: Hệ thống sẽ giúp TKV chuyển đổi từ việc quản lý an toàn dựa trên các chỉ số trễ (Lagging Indicators) như "số vụ tai nạn mỗi năm" sang các chỉ số sớm (Leading Indicators) mang tính phòng ngừa. Các KPI mới như "số lần cảnh

báo TTC được kích hoạt", "số sự kiện mệt mỏi được phát hiện" sẽ cho phép ban quản lý nhận diện các rủi ro tiềm ẩn và can thiệp trước khi tai nạn xảy ra.

- Hiệu suất: Hiệu quả tổng thể của đội xe có thể được đo lường bằng chỉ số Hiệu quả Phương tiện Tổng thể (Modified Overall Vehicle Effectiveness - MOVE), một biến thể của OEE trong sản xuất, được tính bằng cách nhân các tỷ lệ về mức độ sẵn sàng của xe, hiệu quả sử dụng (so sánh với kế hoạch), và chất lượng vận hành. Việc giảm thời gian dừng máy thông qua bảo trì dự báo và tối ưu hóa chu kỳ vận tải sẽ trực tiếp cải thiện chỉ số này.

- Chi phí: Lợi ích về chi phí là rõ ràng nhất. Việc giảm chỉ số tiêu thụ nhiên liệu (FCIndex) sẽ mang lại khoản tiết kiệm trực tiếp và đáng kể. Ngoài ra, chi phí còn được cắt giảm thông qua việc giảm thiểu chi phí liên quan đến tai nạn (sửa chữa, bồi thường) và tối ưu hóa chi phí bảo trì (giảm sửa chữa khẩn cấp, kéo dài tuổi thọ phụ tùng).

Bảng 3. Các chỉ số hiệu suất chính (KPIs) để đánh giá hoạt động vận tải được số hóa

Hạng mục	Tên chỉ số (KPI)	Công thức/ Định nghĩa	Nguồn dữ liệu trong khung	Mục tiêu cải thiện
An toàn	Điểm rủi ro dựa trên TTC (TTC-based Risk Score)	Tổng hợp tần suất và mức độ nghiêm trọng của các sự kiện có TTC thấp.	Mô-đun cảnh báo va chạm	Giảm điểm rủi ro trung bình theo thời gian.
Hiệu suất	Chỉ số tiêu thụ nhiên liệu (FCIndex)	$L/(t \cdot km)$	Cảm biến nhiên liệu, GPS, cảm biến tải trọng	Giảm 5-10% so với mức cơ sở.
Hiệu suất	Hiệu quả phương tiện tổng thể (MOVE)	Mức độ sẵn sàng $\times$ Hiệu quả sử dụng $\times$ Chất lượng	Dữ liệu từ ECU, Lịch trình, GPS	Tăng MOVE lên >85%.
Bảo trì	Thời gian trung bình giữa các hỏng hóc (MTBF)	Tổng thời gian hoạt động / Số lần hỏng hóc	Mô-đun bảo trì dự báo, nhật ký bảo trì	Tăng MTBF cho các bộ phận quan trọng.
Sản xuất	Thời gian chu kỳ trung bình (Average Cycle Time)	Thời gian từ lúc nhận tải đến lúc đổ tải và quay lại.	GPS, cảm biến tải trọng	Giảm thời gian chu kỳ thông qua tối ưu hóa lộ trình và giảm thời gian chờ.
Sản xuất	Tải trọng trung bình (Average Payload)	Tải trọng thực tế trên mỗi chuyến.	Cảm biến tải trọng	Tối ưu hóa tải trọng gần với mức thiết kế, giảm các chuyến xe non tải hoặc quá tải.

* Thách thức triển khai và khuyến nghị cho TKV

Mặc dù tiềm năng là rất lớn, việc triển khai một hệ thống phức tạp như vậy tại TKV sẽ đối mặt với nhiều thách thức cần được lường trước và có giải pháp phù hợp.

- Thách thức về đầu tư: Chi phí ban đầu cho việc trang bị phần cứng (cảm biến, thiết bị mạng), phần mềm (nền tảng cloud, bản quyền), và dịch vụ tích hợp là rất đáng kể.

Khuyến nghị: TKV nên áp dụng một lộ trình triển khai theo từng giai đoạn (Phased Implementation). Bắt đầu bằng một dự án thí điểm tại một mỏ có đủ các yếu tố thách thức và có sự sẵn sàng về công nghệ như: mỏ than Hà Tu hoặc Cao Sơn. Thành công của dự án thí điểm sẽ là cơ sở vững chắc để nhân rộng ra toàn tập đoàn.

- Thách thức về hạ tầng dữ liệu và quản trị: Hệ thống đòi hỏi một hạ tầng mạng truyền thông tại chỗ mạnh mẽ và một nền tảng đám mây có khả năng xử lý dữ liệu lớn. Một trong những nguyên nhân thất bại phổ biến của các sáng kiến chuyển đổi số là việc triển khai trong các dự án riêng lẻ.

Khuyến nghị: Cần xây dựng một chính sách quản trị dữ liệu thống nhất ngay từ đầu, đảm bảo dữ liệu từ tất cả các nguồn có thể được chia sẻ và tích hợp. Khung kiến trúc đề xuất phải được xây dựng dựa trên các tiêu chuẩn mở để đảm bảo khả năng tương tác và tránh bị phụ thuộc vào một nhà cung cấp duy nhất, đặc biệt khi các phương tiện xúc bốc, vận tải của TKV rất đa dạng về chủng loại (Komatsu, Caterpillar, v.v.).

- Thách thức về kỹ năng nguồn nhân lực và quản lý thay đổi: Hệ thống mới đòi hỏi những kỹ năng mới về phân tích dữ liệu, vận hành công nghệ số và bảo trì các thiết bị công nghệ cao. Sẽ có sự phản kháng tự nhiên đối với sự thay đổi, đặc biệt là từ những người lao động đã quen với phương thức làm việc truyền thống.

Khuyến nghị: Cần xây dựng một chương trình đào tạo toàn diện cho tất cả các đối tượng. Quá trình này không chỉ là đào tạo kỹ thuật mà còn là quản lý sự thay đổi văn hóa, chuyển từ tư duy tuân thủ bị động sang tư duy chủ động, dựa trên dữ liệu.

4. KẾT LUẬN

Việc áp dụng các công nghệ số tích hợp không chỉ mang tính tất yếu mà còn đóng vai trò then chốt trong hiện đại hóa ngành khai thác mỏ lộ thiên. Đây là giải pháp nhằm đối phó với áp lực chi phí, nâng cao tiêu chuẩn an toàn lao động, và hiện thực hóa mục tiêu phát triển “mỏ xanh – mỏ hiện đại – mỏ ít người”, giúp TKV duy trì năng lực cạnh tranh và định vị vững chắc trong xu thế chuyển đổi số toàn cầu của ngành công nghiệp khai khoáng. Theo đó các mô đun công nghệ số cốt lõi, toàn diện nhằm giải quyết các thách thức cấp bách trong công tác xúc bốc - vận tải tại các mỏ lộ thiên của TKV. Bằng cách kết hợp sức mạnh của vạn vật kết nối (IoT), trí tuệ nhân tạo (AI), thị giác máy tính (Computer Vision) và bản sao số (Digital Twin), không chỉ là một bản nâng cấp công nghệ đơn thuần mà là một sự chuyển đổi chiến lược trong phương thức quản lý và vận hành □

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

- [1] Aaron Young, Pratt Rogers (2019), A Review Of Digital Transformation In Mining, *Mining, Metallurgy & Exploration*.
- [2] Rockwell Automation (2025), Digital Transformation: Enabling Successful Initiatives In The Mining Industry.
- [3] Huili Zhang, Binghao Li (2023), Recent Advancements In Iot Implementation For Environmental, Safety, And Production Monitoring In Underground Mines, *Internet Of Things Journal PP* (99):1-1
- [4] Fangming Qu, Nolan Dang (2024), Comprehensive Study Of Driver Behavior Monitoring Systems Using Computer Vision And Machine Learning Techniques, *Journal Of Big Data*
- [5] Mihiran Galagedarage Don, Thumeera R. Wanasinghe (2025), Digital Twins And Enabling Technology Applications In Mining: Research Trends, Opportunities, And Challenges, *IEEE Access Pp*(99):1-1
- [6] Carlos Ferreira, Gil Gonçalves (2023), LSTM-BASED-AUTO-BI-LSTM For Remaining Useful Life (RUL) Prediction: The First Round Of Test Results, *General Machine Learning*.



RESEARCH ON THE APPLICABILITY OF DIGITAL TECHNOLOGIES FOR MONITORING, IDENTIFICATION, AND EARLY WARNING OF EXCAVATION AND HAULAGE OPERATIONS AT TKV OPEN-PIT MINES

Van Thanh Doan¹, Do Van Trieu Do¹, Tien Anh Dang¹, Ba Lâm Dinh¹, Dinh Bao Tran²

¹Institute of Mining Science and Technology - Vinacomin, 3, Phan Đình Giót, Hà Nội, Việt Nam

²Hanoi University of Mining and Geology, 18 Viên str. Đông Ngạc, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

ARTICLE INFOR

TYPE: Research Article

Received: 03/5/2026

Revised: 06/6/2026

Accepted: 10/6/2026

* Corresponding author:

Email: doanthanh.vimsat@gmail.com

ABSTRACT

Excavation and transportation operations at open-pit mines under the Vietnam National Coal and Mineral Industries Holding Corporation Limited (TKV) are increasingly facing challenges related to rising operational costs, occupational safety risks, and environmental impacts, especially in the context of deep mining. In response to the demand for modernization and sustainable development, an integrated digital technology framework has been proposed, built upon key technologies of the Fourth Industrial Revolution. This framework comprises three core modules: performance monitoring and optimization (Artificial Intelligence), risk identification (Computer Vision), and safety warning (Time To Collision). The research results demonstrate that the implementation of this integrated digital framework can significantly improve key performance indicators (KPIs) related to safety, efficiency, and sustainability. Consequently, the system contributes to enhancing competitiveness and accelerating the digital transformation of open-pit mining operations at TKV.

Keywords: *AI-driven risk detection, Digitalization of the mining sector, Industry 4.0, Loading and hauling.*

@ Vietnam Mining Science and Technology Association