

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT**



**BÁO CÁO HỌC THUẬT
NĂM HỌC 2025-2026**

**NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG CÁC GIẢI PHÁP THÔNG MINH, TIÊN TIẾN
TRONG THI CÔNG CÔNG TRÌNH NGẦM**

Người báo cáo: PGS.TS Nguyễn Chí Thành

Đơn vị: Bộ môn XDCTN&M

HÀ NỘI, 2026

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT**



**BÁO CÁO HỌC THUẬT
NĂM HỌC 2024-2025**

**NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG CÁC GIẢI PHÁP THÔNG MINH, TIÊN TIẾN
TRONG THI CÔNG CÔNG TRÌNH NGẦM**

Phòng KHCN

Bộ môn XDCTN&M

Người báo cáo

PGS.TS Nguyễn Chí Thành

HÀ NỘI, 2026

Nghiên cứu ứng dụng các giải pháp thông minh, tiên tiến trong thi công công trình ngầm

1, Tổng quan.

Thế kỷ 21 đã chứng kiến sự bùng nổ trong phát triển đường hầm và không gian ngầm để đáp ứng được nhu cầu chất lượng cuộc sống tốt hơn cùng với sự tiến bộ liên tục của trình độ kinh tế xã hội. Hiện nay, các phương pháp xây dựng đường hầm phổ biến có thể được phân loại thành hai nhóm: nhóm phương pháp thi công lộ thiên (đào hở) và nhóm phương pháp đào ngầm.

Các phương pháp thuộc nhóm đào ngầm nói chung bao gồm: phương pháp khoan – nổ mìn thông thường, phương pháp đào hầm kiểu mới của Áo (NATM), phương pháp đào hầm bằng máy đào hầm TBM.

Các phương pháp thi công công trình ngầm bằng nhóm thi công ngầm có một số các đặc điểm chính: Về ưu điểm, đây là các phương pháp có thể tối ưu diện tích mặt bằng, giảm thiểu việc giải phóng mặt bằng, ít ảnh hưởng đến giao thông, đô thị và các công trình hiện hữu trên mặt đất trong suốt quá trình thi công. Về các nhược điểm của các phương pháp thi công ngầm, gồm:

- + **Phụ thuộc chặt chẽ vào điều kiện địa chất & thủy văn:** Độ ổn định của gương đào, áp lực đất đá và nước ngầm quyết định việc lựa chọn công nghệ, biện pháp gia cố tạm thời cũng như tốc độ thi công.

- + **Chi phí đầu tư ban đầu cao:** Yêu cầu máy móc, thiết bị chuyên dụng đắt tiền (như máy TBM, thiết bị phun bê tông, máy khoan hầm) cùng đội ngũ nhân lực có trình độ kỹ thuật cao.

- + **Rủi ro địa chất khó lường:** Luôn tồn tại rủi ro sạt lở, sụt lún mặt đất hoặc biến dạng kết cấu vỏ hầm nếu công tác khảo sát, dự báo trước gương đào hoặc điều khiển áp lực không chính xác.

Đặc điểm riêng của các phương pháp đào ngầm phổ biến

A. Phương pháp đào hầm bằng máy TBM (Tunnel Boring Machine)

- + **Đặc điểm:** Sử dụng máy đào toàn diện kết hợp đào đất đá, vận chuyển bùn/đất và lắp ghép các tấm vỏ hầm đúc sẵn (segments) ngay trong khi tiến máy.

- + **Ưu điểm:** Tốc độ thi công rất nhanh và liên tục; Mức độ an toàn lao động cao, tự động hóa cao; Khả năng kiểm soát sụt lún mặt đất cực tốt nhờ duy trì áp

lực cân bằng tại gương đào (EPB TBM cho đất yếu, Slurry TBM cho đất có áp lực nước ngầm cao).

+ **Nhược điểm:** Chi phí đầu tư thiết bị rất lớn, thời gian huy động và lắp đặt máy lâu; Đòi hỏi chiều dài đoạn hầm đủ lớn mới đạt hiệu quả kinh tế; Kém linh hoạt khi đường kính hầm hoặc hình dạng mặt cắt ngang thay đổi.

B. Phương pháp NATM (New Austrian Tunnelling Method - Phương pháp thi công hầm mới của Áo)

+ **Đặc điểm:** Tận dụng tối đa khả năng tự hỗ trợ chịu lực của khối đất đá xung quanh hầm bằng cách cho phép đất đá biến dạng có kiểm soát, kết hợp gia cố kịp thời bằng neo đá, lưới thép và bê tông phun.

+ **Ưu điểm:** Tính linh hoạt rất cao với nhiều hình dạng mặt cắt hầm và điều kiện địa chất thay đổi; Chi phí thiết bị ban đầu thấp hơn nhiều so với TBM; Dễ dàng xử lý các đoạn giao cắt, ga ngầm hoặc hầm có kích thước mở rộng.

+ **Nhược điểm:** Phụ thuộc lớn vào tay nghề công nhân và kinh nghiệm của kỹ sư tại hiện trường; Đòi hỏi hệ thống quan trắc, đo đạc biến dạng liên tục và nghiêm ngặt (Real-time monitoring); Yêu cầu các biện pháp xử lý bổ sung (như khoan phụt vữa gia cố, hạ mực nước ngầm) nếu thi công trong đất mềm yếu.

C. Phương pháp khoan nổ đá (Drill and Blast)

+ **Đặc điểm:** Khoan các lỗ khoan trên mặt gương đào, nhồi thuốc nổ, nổ theo chu kỳ, sau đó xúc tiến đất đá và gia cố chống đỡ (thường kết hợp nguyên lý NATM trong đá cứng).

+ **Ưu điểm:** Thích hợp cho các công trình ngầm qua vùng địa chất đá cứng đến rất cứng; Thiết bị thi công tương đối đơn giản, linh hoạt điều chỉnh quy mô đào.

+ **Nhược điểm:** Gây chấn động, rung chấn và tiếng ồn lớn, khó áp dụng dưới lòng đô thị; Thi công theo chu kỳ gián đoạn, chu kỳ an toàn lao động đòi hỏi kiểm soát khí độc và đá rơi nghiêm ngặt.

D. Phương pháp kích ống (Pipe Jacking)

+ **Đặc điểm:** Sử dụng các kích thủy lực đặt tại giếng xuất phát để đẩy các ống đúc sẵn tiến dần vào trong lòng đất đằng sau một đầu khoan cắt đất.

+ **Ưu điểm:** Rất phù hợp cho các tuyến cống, đường ống kỹ thuật đô thị có đường kính vừa và nhỏ; Không gây gián đoạn bề mặt giao thông đô thị.

+ **Nhược điểm:** Hạn chế về chiều dài đợt kích (phụ thuộc vào ma sát thành ống và lực kích); Khó điều chỉnh khi tuyến hầm có bán kính cong quá nhỏ.

Phương pháp đào hở hay còn gọi là phương pháp thi công lộ thiên, chia thành 3 phương pháp nhỏ, gồm: phương pháp Bottom Up; phương pháp Topdown và phương pháp Semi Topdown

Phương pháp thi công lộ thiên có sáu đặc điểm chính:

(1) Thi công ngoài trời, trong đó thời gian và chất lượng thi công bị ảnh hưởng đáng kể bởi điều kiện thời tiết;

(2) Nhiều khu vực làm việc với sự tham gia của nhiều ngành nghề khác nhau, dẫn đến tổ chức và thực hiện thi công phức tạp, khó kiểm soát toàn diện;

(3) Thực hiện song song nhiều quy trình trong không gian làm việc ngoài trời, giúp nâng cao hiệu quả thi công;

(4) Thiếu sự phối hợp giữa các quy trình, dẫn đến hiệu quả công việc thấp;

(5) Trình độ chuyên môn hóa thấp của thiết bị xây dựng chuyên nghiệp, với các quy trình như buộc cốt thép hạn chế tiến độ thi công;

(6) Mức độ tự động hóa thấp của máy móc xây dựng.

Tình trạng nghiên cứu về kỹ thuật đường hầm thông minh

Xây dựng công trình ngầm, đường hầm bằng phương pháp thi công lộ thiên được ứng dụng rộng rãi trên toàn thế giới trong các dự án đường sắt đô thị, đường cao tốc và thủy lợi, thường sử dụng các thiết bị cơ giới hóa và thông minh như xe đẩy lát di động và hệ thống ván khuôn vòng kín để nâng cao hiệu quả và chất lượng lát. Hiện tại, phương pháp thi công lộ thiên sử dụng cho các công trình ngầm đã được nâng cấp, tự động hóa toàn bộ quy trình. Tiếp đó, đang chuyển đổi sang xây dựng thông minh, với một số ứng dụng thông minh đã được triển khai.

Với sự phát triển nhanh chóng của khoa học và công nghệ, các công nghệ thông minh đã được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực, bao gồm cả xây dựng công trình ngầm, đường hầm [8]. Trong số đó, nghiên cứu về xây dựng thông minh sử dụng phương pháp khoan nổ và đào hầm bằng khiên chắn đã đặc biệt nổi bật. Liu Feixiang [9] đã tổng kết và hoàn thiện một cách có hệ thống các thiết bị xây dựng thông minh và bốn công nghệ hỗ trợ cho đường hầm khoan nổ: hệ thống nhận dạng và xử lý thông số đá xung quanh, hệ thống định vị và đo lường không gian ba chiều, hệ thống xử lý và chia sẻ dữ liệu lớn, và hệ thống ra quyết định điều khiển thông minh. Chen Dan [10] đề xuất rằng, dựa trên các công nghệ xây dựng của các đường hầm khiên chắn đường sắt hiện có, việc thực hiện tin học hóa, tự động hóa và quản lý thông minh toàn vòng đời của đường hầm là một xu hướng phát triển trong tương lai. Sự tiến bộ của xây dựng thông minh cho đường hầm khiên chắn dựa trên sự phát triển của các công nghệ mới nổi như trực quan

hóa thông tin không gian-thời gian bốn chiều, GIS đám mây, nhận thức và khai thác dữ liệu lớn thông minh, nhận dạng hình ảnh tích hợp trí tuệ nhân tạo và công nghệ thực tế ảo tích hợp Internet. Nghiên cứu hiện có về hệ thống xây dựng thông minh chủ yếu tập trung vào việc phát triển khung công nghệ xây dựng thông minh. Liu Wenfeng [11] đã nghiên cứu khung công nghệ chính của xây dựng thông minh, bao gồm mô phỏng kỹ thuật số và tương tác mô phỏng. You Zhijia et al. [12] đã giới thiệu một khung tổng quát cho hệ thống xây dựng thông minh, bao gồm kiến trúc chức năng và kiến trúc kỹ thuật. Kiến trúc kỹ thuật được xây dựng trên các công nghệ như Internet vạn vật (IoT), điện toán đám mây, Mô hình thông tin xây dựng (BIM), dữ liệu lớn và kiến trúc hướng dịch vụ (SOA), tạo thành một hệ thống vật lý-mạng tích hợp cao. Tuy nhiên, một hệ thống xây dựng thông minh toàn diện không chỉ nên bao gồm một hệ thống kỹ thuật mà còn tích hợp các thiết bị R&D cụ thể với công nghệ song sinh kỹ thuật số và điều khiển từ xa, xem xét tổng thể và kết hợp đầy đủ chúng vào quá trình phát triển hệ thống xây dựng thông minh. Ví dụ, Zhang Hong et al. [13] đề xuất một hệ thống công nghệ xây dựng thông minh thích ứng toàn diện cho cầu, bao gồm thiết kế thông minh, xây dựng và thiết bị thông minh, kết cấu tiên chế, vật liệu hiệu suất cao và bảo trì thông minh.

Với sự phát triển của trí tuệ nhân tạo, công nghệ thị giác máy tính và các thuật toán học sâu đã được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực kỹ thuật xây dựng. Trong lĩnh vực bê tông, việc ứng dụng các thuật toán học sâu chủ yếu thể hiện ở các khía cạnh như chất lượng bề ngoài, độ bền, cấu trúc vi mô và hành vi cơ học vi mô [14]. Wang et al. [15], nhằm giải quyết sự thiếu sót trong việc nhận dạng kém do nhiều loại thông tin nhiễu gây ra trong hình ảnh vết nứt bê tông trong môi trường phức tạp, đã đề xuất một thuật toán nhận dạng vết nứt Single Shot MultiBox Detector (SSD) được cải tiến dựa trên các hộp giới hạn trước đó, đạt được kết quả tốt hơn so với thuật toán SSD ban đầu. Về độ bền bê tông, Shin et al. [16] đã đưa ra một mô hình đánh giá cường độ nén bê tông dựa trên thị giác kỹ thuật số sử dụng mạng nơ-ron tích chập sâu. Niaki et al. [17] đã dự đoán cường độ kéo của vật liệu composite bê tông polymer dựa trên mạng nơ-ron sâu.

2. Tình trạng nghiên cứu về việc ứng dụng kỹ thuật thông minh trong thi công các công trình ngầm, đường hầm bằng phương pháp thi công lộ thiên.

Phương pháp thi công lộ thiên là một kỹ thuật xây dựng công trình ngầm, trong đó, khoảng không gian trong đất được đào trước, tiếp đó, kết cấu chống của công trình được xây dựng ngoài trời, và sau đó là công tác lấp đất hoàn trả lại mặt bằng. So với các phương pháp xây dựng công trình ngầm khác, thi công công trình ngầm bằng phương pháp lộ thiên đòi hỏi bố trí mặt bằng tạm thời rộng hơn do cần có diện tích làm việc lớn hơn để xây dựng hố móng. Hơn nữa, đối với các

dự án hố móng sâu, phải xem xét tác động của nước ngầm, và các biện pháp như bơm hút nước và màn chắn nước thường được áp dụng. Tất cả những yếu tố này hạn chế việc ứng dụng quy mô lớn của phương pháp này trong các dự án xây dựng công trình ngầm bằng phương pháp lộ thiên. Hiện nay, các nghiên cứu có hệ thống về xây dựng thông minh các công trình ngầm, đường hầm bằng phương pháp lộ thiên vẫn còn tương đối hạn chế. Bao Shipeng và cộng sự [19] đã đề xuất một bộ phương pháp mô hình hóa tham số cho các đường hầm lộ thiên và phát triển một chương trình mô hình hóa tương ứng dựa trên phần mềm Revit, sử dụng Dự án Đường gấp Yuzhu của Tuyến tàu điện ngầm Quảng Châu số 13 làm trường hợp nghiên cứu. Haoran Tian [1] đã đề xuất một phương pháp tích hợp kết hợp mô phỏng động học 3D và phân tích an toàn kết cấu. Lấy dự án cống hầm đường sắt làm trường hợp nghiên cứu, nghiên cứu của ông bao gồm việc tiến hành khảo sát thực địa, đo ảnh xiên bằng máy bay không người lái (UAV) và các thử nghiệm trong phòng thí nghiệm-thực địa để thu được dữ liệu phân bố đá rơi và dữ liệu địa chất. Ông đã thiết lập một mô hình dựa trên thực tế 3D để mô tả các đặc điểm của khối đá, thực hiện mô phỏng động học 3D trên các vụ sạt lở đá tiêu biểu bằng phần mềm Rockfall Hunter để phân tích quỹ đạo sau khi xảy ra sự cố và năng lượng tác động lên đường hầm lộ thiên, và đánh giá độ an toàn kết cấu của đường hầm lộ thiên thông qua phân tích phần tử hữu hạn. Ha Jianbo và cộng sự [1] tập trung vào việc xây dựng chống thấm đường hầm. Họ lưu ý rằng các đường hầm chủ yếu áp dụng phương pháp trải vải địa kỹ thuật và tấm chống thấm, trong đó việc trải vải địa kỹ thuật hiện đang dựa vào các bảng ghế đơn giản và công việc thủ công—gây ra nguy hiểm về an toàn và hạn chế chất lượng và hiệu quả. Họ đã phân tích cấu trúc đường hầm trong nước và các phương pháp chống thấm, thiết kế hệ thống phân cứng của hệ thống điều khiển chuyển động xe đẩy dựa trên xe đẩy trải vải địa kỹ thuật đường hầm (bao gồm bộ điều khiển, HMI, bộ truyền động và thiết bị cảm biến), và xác minh tính đầy đủ và độ tin cậy của hệ thống thông qua các thí nghiệm và gỡ lỗi với hệ thống phần mềm. Jeong-ryol Shin và cộng sự [1] đang nghiên cứu phát triển phương pháp xây dựng đường hầm mở theo mô-đun, có thể được sử dụng để xây dựng tàu điện ngầm với chi phí thấp và thời gian xây dựng ngắn. Phương pháp xây dựng này sử dụng tường bê tông đúc sẵn để xây dựng đường hầm: các tường bê tông đúc sẵn đóng vai trò là cấu trúc giữ đất tạm thời trong quá trình xây dựng và trở thành tường vĩnh viễn của đường hầm hộp sau khi đường hầm hoàn thành.

3. Kỹ thuật thông minh được sử dụng cho phương pháp lộ thiên trong thi công các công trình ngầm.

3.1. Xây dựng hệ thống Mô-đun thông minh quản lý cho thi công lộ thiên

Bằng cách tích hợp xây dựng cơ sở dữ liệu đa nguồn không đồng nhất, Mô hình Thông tin Xây dựng (BIM), quét laser ba chiều và các công nghệ thông tin tiên tiến khác, việc phát triển và ứng dụng thiết bị thông minh đang được thúc đẩy để ứng dụng trong phương pháp thi công lộ thiên khi sử dụng cho các công trình ngầm.

Bằng cách tận dụng mô hình kỹ thuật số của mô hình điều khiển toàn quy trình cho việc thi công các công trình ngầm bằng phương pháp lộ thiên, kỹ thuật này được ứng dụng với mục đích đạt được quy trình quản lý xây dựng đa tham số và đa mô-đun tinh chỉnh trong kế hoạch xây dựng ảo ba chiều. Để phân loại một cách có hệ thống các hoạt động chồng chéo và giao thoa trong toàn bộ quy trình thi công công trình công trình ngầm bằng phương pháp lộ thiên và xây dựng mô hình BIM 3D cho từng quy trình, các bước của BIM được chia thành mô hình bốn chiều, mô hình tham số và mô hình kỹ thuật số. Đầu tiên, quy trình xây dựng các công trình ngầm lộ thiên được phân loại và việc ra quyết định thông minh được sử dụng để số hóa chuỗi quy trình. Thứ hai, một hệ thống giám sát chất lượng và cảnh báo sớm được triển khai, cho phép kết hợp dữ liệu đa nguồn động với mô hình BIM để ánh xạ các cảnh động lên mô hình. Cuối cùng, một nền tảng trực quan hóa được xây dựng để hỗ trợ điều khiển từ xa.

Khái niệm mô đun hóa được đề xuất trong hệ thống xây dựng thông minh cho các công trình ngầm lộ thiên, dựa trên toàn bộ quy trình lập trình thi công. Mô đun hóa đề cập đến quá trình giải quyết các vấn đề phức tạp bằng cách chia một hệ thống thành nhiều mô đun từ trên xuống dưới, trong đó mỗi mô đun thực hiện một chức năng phụ cụ thể hoặc tạo thành một cấu trúc đơn lẻ phù hợp cho các tiểu dự án. Sau đó, tất cả các mô đun được lắp ráp theo một cách nhất định để tạo thành một hệ thống hoàn chỉnh tạo thành một tổng thể tích hợp, nhờ đó đáp ứng các chức năng cần thiết cho toàn bộ hệ thống. Quá trình thực hiện mô đun hóa được gọi là xây dựng mô đun [1].

3.2. Công nghệ xây dựng thông minh của phương pháp thi công công trình ngầm lộ thiên

Công nghệ xây dựng thông minh cấu thành cốt lõi của toàn bộ hệ thống xây dựng thông minh. Bằng cách tận dụng các công nghệ thông tin hiện đại để đạt được các mục tiêu thông minh và hỗ trợ xây dựng dự án, đổi mới các phương pháp xây dựng dựa trên kinh nghiệm trước đây: mỗi bước xây dựng được định lượng, kết quả thu được chính xác hơn, đảm bảo tính đồng nhất nghiêm ngặt của tất cả các thành phần và kiểm soát chất lượng đáng tin cậy. Quản lý chất lượng xây dựng đường hầm truyền thống vẫn dựa vào hệ thống Lập kế hoạch-Thực hiện-Kiểm tra-Hành động (PDCA) thông thường [1, 6], phụ thuộc rất nhiều vào khả năng quản lý và tinh thần trách nhiệm của nhân viên quản lý chất lượng toàn

thời gian tại công trường, cũng như kỹ năng xây dựng của người vận hành. Kiểm soát chất lượng được thực hiện thông qua tự kiểm tra, kiểm tra lẫn nhau, kiểm tra chéo, và thậm chí liên quan đến sự giám sát của bên thứ ba thông qua hợp đồng song song.

Phù hợp với khái niệm của bốn mô-đun này đối với đường hầm lộ thiên, bốn công nghệ được đề xuất: công nghệ phát hiện bề mặt đáy chống thấm, công nghệ chuyển đổi hệ thống cốt

3.3. Mô hình ảo phản chiếu kỹ thuật số của công trình ngầm thi công bằng phương pháp lộ thiên

Nghiên cứu về mô hình điều khiển toàn quy trình của công trình ngầm thi công bằng phương pháp lộ thiên dựa trên mô hình ảo phản chiếu kỹ thuật số nhằm mục đích hiện thực hóa quản lý xây dựng đa tham số và đa mô-đun tinh chỉnh trong kịch bản xây dựng ảo 3D. Nó phân loại các hoạt động chồng chéo và giao nhau trong suốt toàn bộ quá trình xây dựng đường hầm lộ thiên và xây dựng mô hình BIM 3D cho mỗi quy trình. Dựa trên mô hình BIM cho toàn bộ quá trình xây dựng, một Giao diện hiển thị tương tác được phát triển để hiển thị trạng thái xây dựng mô phỏng ảo theo thời gian thực sau khi người dùng thao tác. Nó giám sát toàn diện và cảnh báo về trạng thái hoạt động của các nhóm thiết bị, tiến độ xây dựng và dữ liệu giám sát của các chỉ số kiểm soát chất lượng quy trình trong quá trình xây dựng đường hầm, cho phép điều khiển động các hoạt động thiết bị tại chỗ chỉ thông qua máy khách từ xa, do đó đạt được khả năng quản lý tinh vi việc di chuyển, đóng mở thiết bị và chuyển đổi hệ thống trong quá trình xây dựng. Việc ứng dụng công nghệ ảo phản chiếu kỹ thuật số trong công trình ngầm được thi công bằng phương pháp lộ thiên tập trung vào “tương tác ảo-thực và dựa trên dữ liệu”, với khung kỹ thuật thường bao gồm bốn cấp độ: lớp vật lý, lớp truyền dẫn, lớp mô hình và lớp ứng dụng. Lớp vật lý thu thập dữ liệu thời gian thực như biến dạng kết cấu đường hầm, ứng suất đất và trạng thái nước ngầm thông qua các cảm biến; lớp truyền dẫn dựa trên công nghệ truyền thông 5G, Long Range Radio (LoRa) hoặc Beidou để đạt được truyền dữ liệu độ trễ thấp, đặc biệt chú trọng đến việc tối ưu hóa vùng phủ sóng tín hiệu trong các hố móng sâu hoặc môi trường ngầm kín; lớp mô hình xây dựng mô hình song sinh 3D độ chính xác cao dựa trên mô hình tích hợp BIM + GIS (Hệ thống Thông tin Địa lý), kết hợp dữ liệu khảo sát địa chất và các thông số xây dựng, đồng thời tích hợp mô-đun phân tích phần tử hữu hạn (FEA) để dự đoán phản ứng kết cấu. Lớp ứng dụng thực hiện các chức năng như mô phỏng tiến độ thi công, cảnh báo sớm rủi ro và phát lệnh từ xa thông qua giao diện trực quan, trong khi công nghệ điều khiển từ xa tập trung vào việc nâng cấp thông minh thiết bị xây dựng.

Để tối ưu hóa logic quy trình của các hoạt động xây dựng chính, nghiên cứu này giải quyết các điểm nghẽn trong việc phối hợp đa quy trình. Một cơ sở dữ liệu tham số quy trình dựa trên BIM được thiết lập để số hóa các yếu tố xây dựng, trong khi một công cụ logic quy trình cho phép mô phỏng động các trình tự xây dựng và diễn tập ảo các xung đột tiềm tàng. Một vòng lặp kín ra quyết định thông minh—bao gồm tối ưu hóa tham số quy trình, mã hóa hành động thiết bị và phản hồi thực thi tại chỗ—được triển khai, tạo thành một chuỗi quy trình số hóa hoàn toàn cho việc xây dựng đường hầm. Bằng cách tích hợp các cụm kỹ thuật mô-đun với một nền tảng kỹ thuật số, phương pháp này tăng cường một cách có hệ thống tính tiêu chuẩn hóa và tính thông minh của việc xây dựng các công trình ngầm bằng phương pháp lộ thiên. Các kỹ thuật xây dựng thông minh giúp rút ngắn đáng kể chu kỳ xây dựng và giảm chi phí nhân công thông qua việc tự động hóa di chuyển ván khuôn, giám sát kỹ thuật số và vận hành thiết bị phối hợp. Ví dụ, việc sử dụng hệ thống ván khuôn thông minh giúp giảm thiểu việc điều chỉnh thủ công và lao động lắp đi lắp lại, cho phép vận hành liên tục và giảm 20% thời gian xây dựng. Mặc dù chi phí đầu tư ban đầu cao hơn, tổng chi phí dự án có thể giảm khoảng 10-20%.

4. Kết luận.

Nghiên cứu này đã trình bày ngắn gọn về việc ứng dụng kỹ thuật thông minh trong xây dựng các công trình ngầm bằng phương pháp lộ thiên. Dựa trên quy trình xây dựng, phân tách toàn bộ quy trình xây dựng thành các mô-đun từ trên xuống dưới. Bắt đầu từ việc phân tích các đặc điểm kỹ thuật, điều kiện môi trường và khó khăn trong xây dựng riêng của từng mô-đun, nó tích hợp các thiết bị và công nghệ thông minh chuyên biệt cho từng mô-đun để hình thành hệ thống xây dựng mô-đun thông minh cho các đường hầm lộ thiên. Tất cả các mô-đun được tích hợp từ dưới lên trên để tạo thành một hệ thống xây dựng thông minh hoàn chỉnh. Không giống như hầu hết các hệ thống xây dựng thông minh hiện có chỉ bao gồm các hệ thống kỹ thuật, hệ thống được đề xuất bao gồm các công nghệ xây dựng thông minh, thiết bị thông minh, kết nối dữ liệu và cộng tác từ xa giữa các mô-đun thông qua nền tảng bản sao kỹ thuật số, cũng như sự tích hợp sâu rộng của chuỗi công nghệ, chuỗi thiết bị và chuỗi kỹ thuật số. Nó hình thành một chuỗi công nghiệp xây dựng khép kín bao gồm “ra quyết định thông minh - xây dựng tự động - điều chỉnh thời gian thực” và tích hợp các hệ thống đơn vị xây dựng thông minh riêng lẻ vào một hệ thống vận hành dây chuyền lắp ráp dựa trên nhà máy. Công nghệ xây dựng thông minh giảm thiểu sự tiếp xúc của người lao động với môi trường nguy hiểm thông qua điều khiển từ xa và thiết bị tự động. Hệ thống giám sát thời gian thực cung cấp dữ liệu về độ ổn định kết cấu, cho phép phát hiện kịp thời các rủi ro tiềm ẩn. So với các phương pháp truyền thống, tỷ lệ tai nạn lao động giảm đáng kể. Các kỹ thuật thông minh cho phép giám sát liên

tục và phân tích dự đoán, xác định các bất thường như lún đất, tình trạng đông cứng bê tông và tính toán vện kết cấu.

Mặc dù mang lại hiệu quả vượt trội, việc áp dụng kỹ thuật thông minh vào phương pháp thi công công trình ngầm lộ thiên vẫn gặp một số khó khăn sau đây:

- Chi phí đầu tư ban đầu cao: Hệ thống cảm biến IoT chất lượng cao và phần mềm bản quyền yêu cầu ngân sách lớn.

- Đòi hỏi bộ dữ liệu về địa kỹ thuật phải có độ lớn và độ chính xác đáp ứng được yêu cầu. Tính chất bất đồng nhất của đất nền (đặc biệt là vùng đất yếu như Hà Nội hay TP.HCM) đòi hỏi các mô hình AI phải được "huấn luyện" với nguồn dữ liệu rất lớn và đặc thù mới đạt độ chính xác cần thiết.

- Trong quá trình thực hiện, các yêu cầu về bảo mật và chuẩn hóa dữ liệu giữa các đơn vị thực hiện cũng có thể gây ra khó khăn. Hiện tại, chúng ta đang thiếu quy chuẩn chung về tích hợp dữ liệu giữa các nhà thầu, đơn vị thiết kế và quản lý.

Tài liệu tham khảo

1. Yifei Ji, Zhongsheng Tan, Li Liao 2, Dehua Zhang and Zhenliang Zhou. Overview of Intelligent Technology Applications in Open-Cut Tunnel Construction. Buildings 2025, 15, 3704. <https://doi.org/10.3390/buildings15203704>.
2. Wang, M. The 21st Century: A Golden Age of Tunnel and Underground Space Development. Tunn. Constr. 2000, 7–10.
3. Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's Tunnel Engineering Research: 2015. China J. Highw. Transp. 2015, 28, 1–65. [CrossRef]
4. Tian, S.; Gong, J. Statistics of railway tunnels in China as of end of 2019. Tunn. Constr. 2020, 40, 292.
5. Wang, X.; Zhao, Y. Comment on construction of railway tunnels in China by statistical data. Mod. Tunn. Technol. 2006, 7–17+22. [CrossRef]
6. Li, L.; Zou, H.; Liu, H.-L.; Tu, W.; Chen, Y. Research Status and Development Trends in Intelligent Construction of Drill-and-blast Tunnels. China J. Highw. Transp. 2024, 37, 1–21. [CrossRef]

7. Chen, X.; Yu, Y.; Bao, X.; Cui, H.; Xia, C.; Zhou, H.; Zhu, M. Intelligent Construction of Shield Tunnels Based on Resilience Theory. *Mod. Tunn. Technol.* 2022, 59, 14–28.
8. Zhang, L. Overview of Subway Tunnel Construction Techniques and Methods. *China Sci. Technol. Inf.* 2020, 37–39. (In Chinese)
9. Yin, J.; Yi, Y.; Du, Y.; Wang, W.; Luo, G. Hotspot Identification and Development Trend Analysis of Tunnel Intelligent Construction Technology Based on Patent Data. *Mod. Tunn. Technol.* 2025, 62, 27–38.
10. Liu, F. Prospects for Intelligent Construction Equipment Technology Innovation and Collaborative Construction Management of Railway Tunnel. *Tunn. Constr.* 2019, 39, 545–555. (In Chinese).
11. Liu, W. Key Technology System of Intelligent Construction. *Constr. Sci. Technol.* 2020, 72–77. (In Chinese) [CrossRef]
12. You, Z.; Zheng, L.; Feng, L. Basic Theory and Architecture of Intelligent Construction System. *J. Civ. Eng. Manag.* 2021, 38, 105–111+118. [CrossRef]
13. Zhang, H.; Zhang, Y.; Wang, M.; Zheng, H.; Ji, F. Research and Application of an Intelligent, Adaptive Full-Process Bridge Construction System. *Highway* 2021, 66, 124–136.
14. Rong, X.; Xie, A.; Zhao, P.; Chen, W.; Wang, B. Design of Intelligent Curing System for Concrete Beams Based on Machine Vision. *China J. Highw. Transp.* 2025, 1–11. Available online: <https://link.cnki.net/urlid/61.1313.U.20250725.1107.004> (accessed on 11 October 2025).
15. Wang, Y.; He, J.; Zhang, M.; Dai, W.; Xu, H. Concrete crack identification in complex environments based on SSD and pruning neural network. *J. Southeast Univ. (Engl. Ed.)* 2023, 39, 393–399.
16. Shin, H.K.; Ahn, Y.H.; Lee, S.H.; Kim, H.Y. Digital vision based concrete compressive strength evaluating model using deep convolutional neural network. *Cmc-Comput. Mater. Contin.* 2019, 61, 911–928.
17. Niaki, M.H.; Ahangari, M.G.; Pashaian, M. A material-independent deep learning model to predict the tensile strength of polymer concrete. *Compos. Commun.* 2022, 36, 101400. [CrossRef]
18. Mouratidis, A. The “cut-and-cover” and “cover-and-cut” techniques in highway engineering. *Electron. J. Geotech. Eng.* 2008, 13, 1–15.

19. Bao, S.; Xie, T.; Li, Y.; Wu, M. Research on the Application of Parametric Modeling of Open-Cut TunnelsResearch on the Application of Parametric Modeling of Open-Cut TunnelsBased on BIMBased on BI. J. Inf. Technol. Civ. Eng. Archit. 2025, 17, 80–85. (In Chinese) [CrossRef]