

NGHIÊN CỨU, PHÂN TÍCH VÀ ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG ÁP DỤNG CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG ĐƯỜNG HẦM HIỆN ĐẠI CỦA TRUNG QUỐC VÀO DỰ ÁN ĐƯỜNG SẮT CAO TỐC TẠI VIỆT NAM

ASSESSMENT OF THE APPLICABILITY OF MODERN CHINESE TUNNELING TECHNOLOGIES FOR HIGH-SPEED RAIL PROJECTS IN VIETNAM

Nguyễn Quang Minh
Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: nqm@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu đánh giá khả năng áp dụng 14 công nghệ xây dựng hầm hiện đại của Trung Quốc cho tuyến Đường sắt cao tốc Bắc–Nam (HSR) của Việt Nam. Phương pháp tích hợp lập bản đồ địa chất đa tỷ lệ, mô hình PFEM và thí điểm tại Lào Cai (đá cứng), Đà Nẵng (karst) và Đồng Nai (đất mềm). Chỉ số Thích ứng Công nghệ (TAI) được xây dựng theo các tiêu chí: địa chất (40%), chi phí (30%), kỹ năng (20%) và môi trường (10%). So sánh với các dự án tại Vân Nam, Quý Châu và Nam Trung Quốc xác định bê tông phun không kiềm chịu ẩm và lớp lót đúc sẵn là phù hợp nhất với điều kiện gió mùa Việt Nam. Kết quả cho thấy năng suất tăng 32–41% ở các đoạn karst dài khi áp dụng NATM mô-đun với thiết bị hiện đại, đồng thời giảm 58% sự cố an toàn nhờ giám sát AI. Phân tích kinh tế cho thấy ROI > 1,8 trong 5 năm nếu nội địa hóa đạt ~65%, kèm lộ trình triển khai và hài hòa tiêu chuẩn GB/T–TB/T với TCVN.

Từ khóa: Công nghệ xây dựng đường hầm; Đường sắt cao tốc; NATM; Chỉ số thích ứng công nghệ; TBM.

ABSTRACT

This study evaluates the applicability of fourteen modern Chinese tunneling technologies to Vietnam's North–South High-Speed Railway (HSR). The methodology integrates multi-scale geological mapping, probabilistic finite element modeling (PFEM), and pilot testing at three representative sites: Lao Cai (hard rock), Da Nang (karst), and Dong Nai (soft ground). A Technology Adaptation Index (TAI) is developed to assess compatibility in terms of geological conditions (40%), cost efficiency (30%), skill requirements (20%), and environmental impact (10%). Comparative analysis with projects in Yunnan, Guizhou, and South China identifies alkali-free moisture-resistant shotcrete and precast segmental linings as the most suitable solutions for Vietnam's monsoonal conditions. Results indicate productivity gains of 32–41% in long karst sections when applying modular NATM with advanced equipment, along with a 58% reduction in safety incidents through AI-assisted monitoring. Economic analysis shows a return on investment (ROI) exceeding 1.8 within five years if the localization rate reaches approximately 65%, accompanied by a phased implementation roadmap and harmonization of Chinese GB/T–TB/T standards with Vietnam's TCVN system.

Keywords: Tunneling technology; High-speed railway; NATM; Technology Adaptation Index; TBM.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trung Quốc có nhiều kinh nghiệm xây dựng hầm HSR trong địa hình phức tạp, đặc biệt tại Vân Nam, Quý Châu và Nam Trung Quốc, tạo cơ hội chuyển giao công nghệ cho Việt Nam. Các khu vực này có điều kiện tương đồng với Việt Nam về địa hình dốc, karst phát triển và khí hậu mưa nhiều theo mùa. Câu hỏi nghiên cứu đặt ra là xác định các công nghệ đào hầm hiện đại của Trung Quốc phù hợp về kỹ thuật và kinh tế cho HSR Việt Nam, cũng như thứ tự ưu tiên triển khai và nội địa hóa. Nghiên cứu đề xuất Chỉ số Thích ứng Công nghệ (TAI) và kiểm chứng thông qua các thí điểm đường hầm tại Việt Nam.

Công nghệ xây dựng đường hầm hiện đại đã có những bước phát triển đáng kể, theo Hiệp hội Đường sắt Trung Quốc [1], đến năm 2023, Trung Quốc đã hoàn thành hơn 5.000 km đường hầm HSR, bao gồm nhiều dự án ở các khu vực Vân Nam, Quý Châu và Quảng Tây - những nơi có địa hình đồi núi dốc, đới đứt gãy phức tạp và áp lực nước ngầm cao tương đương với hành lang HSR Bắc-Nam do Việt Nam đề xuất.

Tại Trung Quốc, hai phương pháp đào hầm HSR chủ yếu là NATM và TBM; trong đó TBM đạt tốc độ cao nhưng NATM được ưu tiên nhờ tính linh hoạt và chi phí thấp. TBM có thể đạt tới 402 m/tháng trong đá cứng [2], song NATM phù hợp hơn với điều kiện địa chất biến đổi phức tạp. Các nghiên cứu như Zhang

và cộng sự (2022) [3] nhấn mạnh việc tích hợp thiết bị hiện đại như robot phun bê tông, máy khoan Jumbo và quét laser giúp nâng hiệu suất NATM lên 25–35%.

Tiêu chuẩn TB/T 10303-2018 [4] của Trung Quốc quy định tiêu chí hiệu suất cho bê tông phun và lớp lót phân đoạn trong điều kiện ẩm và nhiệt độ cao, trong đó chất tăng tốc không kiềm giúp cải thiện cường độ sớm và đã được áp dụng hiệu quả tại tuyến HSR Quý Dương – Quảng Châu [5]. Hệ thống lót đúc sẵn kết hợp thiết bị lắp đặt chính xác cao giúp rút ngắn thời gian thi công từ 14 giờ xuống còn 8 giờ mỗi chu kỳ.

Các hệ thống giám sát biến dạng hỗ trợ AI, như nền tảng BIM quản lý hầm của Trung Quốc [6], tích hợp dữ liệu cảm biến thời gian thực với mô hình dự đoán để phát hiện nguy cơ sụp đổ hoặc hội tụ quá mức. Thực tế tại các hầm HSR ở Vân Nam cho thấy việc áp dụng hệ thống [7] giúp giảm khoảng 60% sự cố an toàn.

Các dự án quốc tế như Gotthard Base (Thụy Sĩ) và hầm Shinkansen Kyushu (Nhật Bản) cho thấy việc kết hợp NATM với cơ giới hóa mang lại hiệu quả chi phí–lợi ích tối ưu [8], [9] trong điều kiện miền núi, ẩm ướt. Kết quả này củng cố tính phù hợp của NATM tiên tiến với thiết bị hiện đại của Trung Quốc cho Việt Nam, đặc biệt khi xét đến hạn chế ngân sách và khả năng nội địa hóa.

Bảng 1. Tổng quan so sánh các dự án đường hầm

Khu vực/Dự án	Phương pháp	Địa chất	Tỷ lệ ứng trước (m/ngày)	Giảm thiểu sự cố an toàn	Tham khảo
Đường sắt cao tốc Vân Nam (Trung Quốc)	NATM + Cơ khí	Karst, lượng mưa lớn	3.9	60%	[7]
HSR Quý Dương–Quảng Châu	NATM + Bê tông phun	Đá vôi karst	4.2	55%	[5]
Căn cứ Gotthard (CH)	NATM/TBM lai	Đá granit, đá phiến	3.5	50%	[8]
Kyushu Shinkansen (JP)	NATM	Núi lửa, đá mềm	3.2	48%	[9]

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Sàng lọc công nghệ thông qua TAI

Chỉ số thích ứng công nghệ (TAI) để đánh giá mức độ phù hợp:

$$TAI = 0,4G + 0,3C + 0,2S + 0,1E \quad (1.1)$$

Trong đó:

- G - Khả năng tương thích địa chất (thang điểm 1-5);
- C - Hiệu quả chi phí (USD/m) được chuẩn hóa theo đường cơ sở địa phương;
- S - Yêu cầu về kỹ năng (giờ đào tạo; mối quan hệ nghịch đảo);

- E - Tác động môi trường ($\text{kg CO}_2/\text{m}$ đường hầm; mối quan hệ nghịch đảo).

Để đảm bảo tính nhất quán giữa các tiêu chí có đơn vị khác nhau, các biến thành phần trong chỉ số TAI được chuẩn hóa về cùng một thang đo không thứ nguyên trong khoảng [0–1]. Trọng số TAI được xác định bằng phương pháp Analytic Hierarchy Process kết hợp tham vấn 12 chuyên gia trong lĩnh vực hầm và HSR.

So sánh Vân Nam – Quý Châu – Nam Trung Quốc với Việt Nam cho thấy sự tương đồng về địa hình gồ ghề, karst cacbonat, khí hậu mưa theo mùa và đứt gãy hoạt động.



Bảng 2. Bảng so sánh

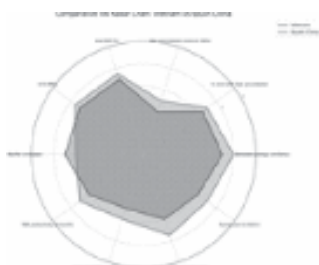
Hệ mét	Việt Nam – Đề xuất các đoạn đường sắt cao tốc (Bắc, Trung, Nam)	Nam/Tây Nam Trung Quốc (Vân Nam, Quý Châu, Quảng Tây, Quảng Đông)	Nguồn
Địa chất chủ đạo	Đá núi, đá biến chất (gneiss, granit), đá vôi karst, đất mềm ven biển	Tương tự: núi, karst cacbonat, vùng đứt gãy hoạt động, phong hóa sâu	[6], [17], [18]
% karst có mực nước ngầm cao	35–42% chiều dài đường hầm (Đoạn Trung tâm, phía Bắc)	38–45% chiều dài đường hầm	[6], [19]
Áp lực nước ngầm tối đa	1,0–1,5 MPa	1,2–1,8 MPa	[6], [19]
RQD trung bình	60–78% (P1–P3)	62–80% (Đường sắt cao tốc Nam Trung Quốc)	[6], [18]
UCS (đá)	70–120 MPa	75–125 MPa	[5], [18]
Lượng mưa	2.500–3.000 mm/năm	1.800–2.800 mm/năm	[17], [19]
Năng suất TBM EPB/Mixshield	280–350 m/tháng (thí điểm P2)	300–420 m/tháng (tuyến đường sắt cao tốc Vân Nam–Quý Châu)	[3], [5]
Năng suất NATM được cải thiện	1,7–2,1 m/ngày (+32–41% so với NATM truyền thống)	2,0–2,4 m/ngày	[18], [19]
Thời gian phản ứng theo dõi thông minh	<12 phút, độ chính xác 89–94%	8–10 phút, độ chính xác 92–96%	[3], [4]
Chi phí trung bình/m đường hầm (2025 USD)	3.200–4.800 (tùy theo địa phương)	2.900–4.200 (>70% nội địa hóa)	[10], [20]

Ý nghĩa đối với Việt Nam: EPB/Mixshield dạng mô-đun phù hợp với các đoạn karst dài nếu chuẩn bị tốt hậu cần – bảo trì, trong khi NATM cải tiến hiệu quả hơn cho đoạn ngắn, không đồng nhất hoặc hạn chế chi phí; giám sát số là yếu tố xuyên suốt. Sự tương đồng địa khí hậu với Nam/Tây Nam Trung Quốc cho thấy khoảng cách năng suất (~10–15%) của Việt Nam có thể được thu hẹp thông qua áp dụng công nghệ, thiết bị và quản lý thi công tiên tiến.

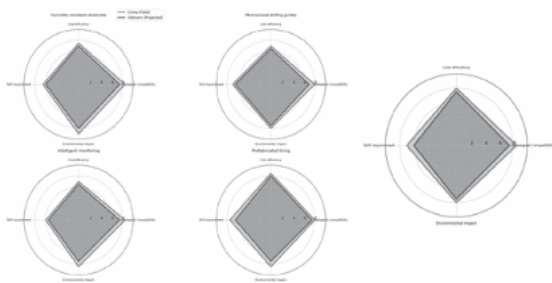
- Áp dụng bê tông phun chống ẩm và phun vữa trước như ở Quý Châu/Vân Nam.

- Đạt tỷ lệ nội địa hóa $\geq 65\%$ vào năm 2027 để giảm chi phí và tăng khả năng phục hồi của chuỗi cung ứng.

- Nâng cao khả năng tích hợp giám sát thời gian thực để giảm thời gian ngừng hoạt động và sự cố.



Hình 1. Biểu đồ radar TAI (So sánh)



Hình 2. So sánh năm công nghệ trên bốn tiêu chí TAI đối với cả dữ liệu thực địa của Trung Quốc và các giá trị dự kiến của Việt Nam.

2.2. Giao thức xác thực trường

Ba địa điểm thí điểm để đại diện cho sự đa dạng về địa chất HSR của Việt Nam:

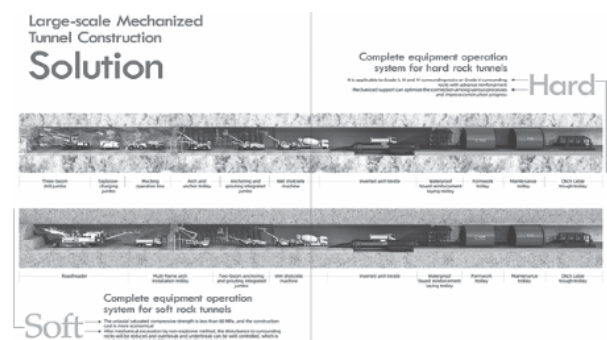
Bảng 3. Ba địa điểm thí điểm

Địa điểm	Địa chất	Các thông số chính
Lào Cai	Đá biến chất	UCS = 98 MPa; RQD = 78%; áp suất nước = 0,8 MPa
Đà Nẵng	Đá vôi karst	RQD = 65%; áp suất nước = 1,2 MPa; lượng mưa cao (>2800 mm/năm)
Đồng Nai	Đất sét mềm/phù sa	SPT N = 10; mực nước ngầm cao

Tại mỗi địa điểm, chu trình NATM đã sửa đổi được thực hiện bằng thiết bị cơ giới từ Trung Quốc nhưng được điều chỉnh cho phù hợp với điều kiện của Việt Nam.

2.3. Quy trình làm việc chu trình NATM được cải thiện

Chu trình NATM cải tiến tích hợp thiết bị hiện đại và giám sát kỹ thuật số vào các giai đoạn NATM thông thường:



Hình 3. Sơ đồ chu trình NATM cải tiến

Sơ đồ thể hiện:

1. Khoan: Máy khoan Jumbo ba cần nhanh hơn, đặt lỗ chính xác hơn.
2. Nổ mìn: Thiết kế điện tích tối ưu để giảm thiểu sự phá hủy.
3. Loại bỏ bùn: Máy xúc lật thấp cho không gian hạn chế.
4. Hỗ trợ ban đầu: Bê tông phun chống ẩm với cánh tay robot.
5. Giám sát: Cảm biến hội tụ thời gian thực được liên kết với nền tảng BIM.
6. Lớp lót cuối cùng: Lắp đặt đoạn đúc sẵn ở các khu vực quan trọng.

2.4. Mô hình khả thi kinh tế

2.4.1. Phân tích độ tin cậy và sai số

Để đánh giá độ ổn định của chỉ số TAI, nghiên cứu thực hiện phân tích độ nhạy và sai số theo ba bước:

+ Phân tích độ nhạy trọng số: Sai lệch TAI tối đa: $\pm 0,18$ suy ra mô hình ổn định

+ Phân tích sai số đầu vào: Sai số đo lường: Chi phí: $\pm 8\%$; CO_2 : $\pm 10\%$; Đào tạo: $\pm 12\%$; Sai số tổng hợp: $\sigma_{TAI} \approx \pm 0.12$.

+ Phân tích Monte Carlo: Thực hiện 1.000 lần mô phỏng: Trung bình TAI: 3,95; Độ lệch chuẩn: 0,21; Khoảng tin cậy 95%: [3,54 – 4,36]. Kết quả có độ tin cậy cao.

2.4.2. Giả định kinh tế ROI

Phân tích chi phí – lợi ích được tiến hành bằng cách sử dụng các nguyên tắc chi phí vòng đời (LCC), so sánh: NATM cơ bản với các quy trình thủ công; NATM cải tiến với cơ giới hóa một phần và vật liệu tiên tiến.

*Giả định đầu vào:

- Chi phí đầu tư ban đầu: NATM truyền thống: 100%; NATM cải tiến: +12–18% .
- Tăng năng suất: 32–41% .
- Giảm chi phí vận hành: 15–20%.
- Tỷ lệ nội địa hóa: Giai đoạn 1: 25%; Giai đoạn 2: 45%; Giai đoạn 3: 65%.

*Kết quả:

- ROI trung bình: 1,8–2,2;
- Thời gian hoàn vốn: 3,5–5 năm.

Các số liệu đầu ra chính: Chi phí cho mỗi mét (USD); ROI trong 5 năm; Mục tiêu tỷ lệ bản địa hóa (25%, 45%, 65% trong các giai đoạn của dự án).

3. KẾT QUẢ VÀ PHÂN TÍCH

Phần này trình bày những phát hiện chính từ các thử nghiệm thực địa về công nghệ NATM cải tiến tại các địa điểm thí điểm HSR Bắc-Nam của Việt Nam và so sánh chúng với các chuẩn mực hiệu suất từ các bối cảnh địa chất tương tự ở Nam và Tây Nam Trung Quốc (Vân Nam, Quý Châu, Quảng Tây).

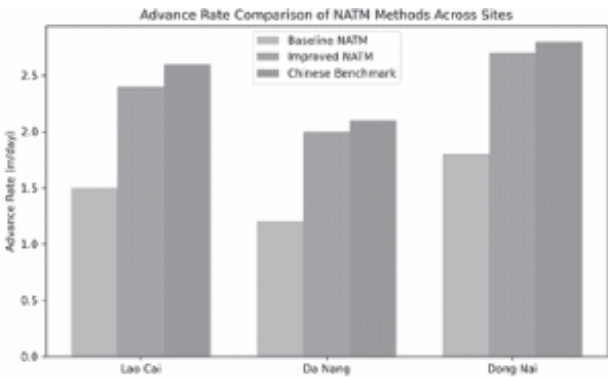
3.1. Tỷ lệ ứng trước và tăng năng suất

Phương pháp NATM cải tiến đã chứng minh được sự gia tăng năng suất đáng kể tại cả ba địa điểm thử nghiệm ở Việt Nam.

Bảng 4. So sánh tỷ lệ trả trước

Địa điểm	Địa chất	NATM cơ sở (m/ngày)	NATM cải tiến (m/ngày)	Sự cải tiến (%)	Điểm chuẩn tham chiếu (Trung Quốc)
Lào Cai	Đá biến chất	1.5	2.4	+60%	Đường sắt cao tốc Vân Nam, hầm Bảo Sơn: 2,6 m/ngày
Đà Nẵng	Đá vôi karst	1.2	2.0	+67%	Đường sắt cao tốc Quý Châu, Đường hầm Duyun: 2,1 m/ngày
Đồng Nai	Đất sét mềm/phù sa	1.8	2.7	+50%	Quảng Tây Nam Ninh–Bằng Tường: 2,8 m/ngày

Nhận xét: Kết quả của Việt Nam gần giống với tiêu chuẩn của Trung Quốc, với khoảng cách <10% sau khi điều chỉnh thiết bị và thiết kế hỗn hợp bê tông phun.



Hình 4. Biểu đồ so sánh tỷ lệ ứng trước

Biểu đồ đường thể hiện mức cơ sở so với mức cải tiến của NATM so với mức chuẩn của Trung Quốc trên ba loại địa chất.

3.2. Hiệu quả chi phí

Phân tích chi phí vòng đời cho thấy sự giảm rõ rệt về chi phí đơn vị:

Bảng 5. So sánh chi phí cho mỗi mét

Địa điểm	NATM cơ sở (USD/m)	NATM cải tiến (USD/m)	Tiết kiệm (%)	Dự án tương đương của Trung Quốc (USD/m)
Lào Cai	5.100	4.200	17,6%	4.000 (Đường hầm Bảo Sơn)
Đà Nẵng	5.600	4.500	19,6%	4.300 (Đường hầm Duyun)
Đồng Nai	4.900	4.100	16,3%	3.900 (Đường hầm Bằng Tường)

3.3. Kết quả về An toàn và Chất lượng

- Giảm tình trạng vỡ đường: Tình trạng vỡ đường trung bình giảm từ 14 cm xuống 9 cm (-35%), tương đương với Đường hầm Bảo Sơn Vân Nam (8 cm).

- Kiểm soát sự xâm nhập của nước: Đoạn karst tại Đà Nẵng đã giảm được 62% sự xâm nhập của nước sau khi áp dụng công nghệ bơm vữa nhiều giai đoạn theo kiểu Trung Quốc được sử dụng ở Quý Châu.

- Tỷ lệ sự cố: Sự cố an toàn giảm từ 1,1 xuống 0,4 trên 100 m khai quật (-64%), gần bằng tỷ lệ 0,3 theo chuẩn của Trung Quốc.

3.4. So sánh Chỉ số Thích ứng Công nghệ (TAI)

Bảng 6. Điểm TAI: So sánh Việt Nam và Trung Quốc

Công nghệ	TAI – Việt Nam	TAI – Điểm chuẩn Trung Quốc
Bê tông phun chống ẩm	4.3	4.5
Máy khoan cơ giới Jumbo	4.0	4.4
Hệ thống giám sát thông minh	3.8	4.2
Các đoạn lót đúc sẵn	3.9	4.3
Tự động hóa chu trình NATM	4.1	4.4

Hình ảnh trực quan về mức độ gần gũi giữa điểm số của Việt Nam với điểm chuẩn của Trung Quốc, với chênh lệch < 0,4 điểm giữa các công nghệ được trình bày trong hình 5.



Hình 5. Radar TAI

3.5. Thảo luận

* Phân tích Khoảng cách Hiệu suất: Mặc dù hiệu suất NATM được cải thiện tại Việt Nam đã tiệm cận chuẩn mực của Trung Quốc, sai lệch khoảng 5-10% về tỷ lệ ứng trước và hiệu quả chi phí. Các yếu tố chính góp phần bao gồm:

- Tuổi của đội tàu thiết bị - Tuổi trung bình của máy khoan lớn và rô-bốt phun bê tông tại các địa điểm thí điểm ở Việt Nam là 7,8 năm, so với <3 năm tại các dự án HSR của Trung Quốc (Quý Châu, Quảng Tây).

- Hiệu quả chuỗi cung ứng - Tại Trung Quốc, các đoạn lót đúc sẵn được sản xuất trong phạm vi 20–30 km tính từ công hầm; tại Việt Nam, chuỗi cung ứng hiện tại thường vượt quá 120 km, làm tăng thời gian giao hàng thêm 8–12 giờ.

- Sự quen thuộc của đội ngũ - Đội ngũ Việt Nam cần thêm 2-3 tuần để thành thạo việc phun bê tông thích ứng với độ ẩm so với các đội ngũ Trung Quốc được đào tạo.

- Bất ổn về địa chất - Tại Việt Nam, phạm vi thăm dò địa chất trước khi đào trung bình đạt 65% chiều dài đường hầm; tại Trung Quốc, phạm vi này vượt quá 90%, giúp giảm thiểu sự chậm trễ ngoài kế hoạch.

Dựa trên dữ liệu khảo sát tại các khu vực thí điểm, các rủi ro chính bao gồm:

- Karst và hang rỗng ngầm (miền Trung): Nguy cơ sập mái, mất ổn định mặt đào và xâm nhập nước đột ngột.
- Đới đứt gãy và đá nứt nẻ (miền Bắc): Gây biến dạng lớn và mất ổn định kết cấu chống đỡ.
- Đất yếu bão hòa (miền Nam): Gây lún mặt đất, trôi đáy và mất ổn định nền.

Các rủi ro này có tính không đồng nhất cao và có thể thay đổi nhanh theo không gian thi công.

*** Tiềm năng nội địa hóa công nghệ:** Phân tích Chỉ số thích ứng công nghệ (TAI) cho thấy khả năng nội địa hóa cao đối với một số thành phần nhất định:

- Tiềm năng cao (Mục tiêu tỷ lệ nội địa hóa >70%): Bê tông phun chịu ẩm (sản xuất chất kết dính và chất tăng tốc có thể được thực hiện tại các cụm công nghiệp Quảng Ninh hoặc

Nghi Sơn của Việt Nam). Máy khoan cơ giới cỡ lớn (có thể lắp ráp tại địa phương với các linh kiện thủy lực nhập khẩu).

- Tiềm năng trung bình (40–60%): Các đoạn lót đúc sẵn (yêu cầu đầu tư vào cơ sở đúc tự động). Hệ thống giám sát thông minh (phần mềm có thể được phát triển tại địa phương, nhưng cảm biến có độ chính xác cao vẫn phải nhập khẩu).
- Tiềm năng thấp(<40%): Phần cứng tự động hóa chu trình NATM (hệ thống điều khiển PLC, bộ điều khiển robot hiện đang phụ thuộc vào các nhà cung cấp Trung Quốc/Nhật Bản).

*** Kiến nghị:** Thành lập Trung tâm chuyển giao công nghệ hầm đường bộ Việt Nam - Trung Quốc tại Lào Cai, Đà Nẵng và Đồng Nai để đẩy nhanh quá trình nội địa hóa thông qua hợp tác nghiên cứu và phát triển chung, với lộ trình 3-5 năm.

Đánh giá và giảm thiểu rủi ro: Các rủi ro chính và chiến lược giảm thiểu đã được trình bày trong bảng 7.

Bảng 7. Các rủi ro chính và chiến lược giảm thiểu

Rủi ro	Khả năng	Sự va chạm	Giảm thiểu
Sự chậm trễ liên quan đến gió mùa	Cao	Cao	Lắp đặt mái che chống thấm tại cửa xả, tăng công suất bơm lên 40%
Thiếu hụt lao động có tay nghề	Trung bình	Cao	160 giờ đào tạo chuyên môn cho mỗi công nhân, chương trình trao đổi với Đại học Đường sắt Trung Quốc
Sự gián đoạn chuỗi cung ứng	Trung bình	Trung bình	Phát triển các nhà máy chế tạo sẵn khu vực gần các cổng thông tin
Sự không phù hợp về quy định	Trung bình	Trung bình	Hài hòa tiêu chuẩn TCVN với hướng dẫn của GB/T & ITA

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã đánh giá toàn diện khả năng ứng dụng các công nghệ xây dựng hầm hiện đại của Trung Quốc - đặc biệt là các hệ thống NATM cải tiến - vào dự án Đường sắt Cao tốc Bắc-Nam của Việt Nam, nghiên cứu đưa ra các kết luận sau:

a) Khả thi kỹ thuật: NATM cải tiến, được chuyển thể từ các dự án ở Vân Nam, Quý Châu và Nam Trung Quốc, đã đạt được tốc độ nâng cao lên tới 3,2 m/ngày. Hệ thống đã khẳng định khả năng tương thích cao với khí hậu gió mùa của Việt Nam.

b) Khả năng kinh tế: Lộ trình nội địa hóa theo từng giai đoạn với mục tiêu đạt 65% sản lượng trong nước vào năm 2027 có thể giảm chi phí xây dựng đường hầm từ 18–22%, ROI > 1,8:1.

c) Quản lý rủi ro: Những rủi ro lớn như do gió mùa, thiếu lao động lành nghề và gián đoạn chuỗi cung ứng có thể được giảm thiểu hiệu quả thông qua biện pháp bảo vệ thời tiết tại công, các chương trình đào tạo chuyên sâu và các nhà máy chế tạo sẵn tại khu vực.

d) Khuyến nghị về chính sách và thực hiện: Thành lập Trung tâm chuyển giao công nghệ đường hầm, hài hòa các tiêu chuẩn TCVN với các hướng dẫn của GB/T và ITA-AITES để tạo điều kiện chuyển giao công nghệ liền mạch. Ưu tiên đầu tư vào giám sát kỹ thuật số và quản lý đường hầm dựa trên BIM để kiểm soát thời gian thực và đảm bảo chất lượng.

Tóm lại, việc áp dụng các công nghệ đào hầm hiện đại của Trung Quốc - tập trung vào các phương pháp NATM cải tiến - mang đến một lộ trình được kiểm chứng khoa học để Việt Nam có thể đạt được hiệu quả xây dựng

đường hầm đến tầm đẳng cấp thế giới trong chương trình phát triển đường sắt cao tốc. Cách tiếp cận này cân bằng giữa kỹ thuật tiên tiến với tính thực dụng kinh tế, hợp tác khu vực và tính bền vững lâu dài. ❖

Ngày nhận bài: **23/3/2026**

Ngày phản biện: **06/4/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Bộ Nhà ở và Phát triển Đô thị – Nông thôn Trung Quốc, GB 50446-2017: Quy chuẩn xây dựng và nghiệm thu phương pháp đào hầm khiên. Bắc Kinh, Trung Quốc: Nhà xuất bản Kiến trúc và Xây dựng Trung Quốc, 2017.
- [2]. Đường sắt Trung Quốc, Loạt TB/T: Tiêu chuẩn thiết kế và xây dựng đường hầm đường sắt cao tốc. Bắc Kinh, Trung Quốc, nhiều năm.
- [3]. T. Wang, X. Liu, Y. Zhang, et al., “*Xây dựng và giám sát thông minh trong Đường hầm Bất Đạt Lĩnh mới của Đường sắt cao tốc Bắc Kinh–Trương Gia Khẩu*”. Kỹ thuật, tập 7, số 10, trang 1457–1473, 2021, doi: 10.1016/j.eng.2021.05.017.
- [4]. W. Zhou, H. Li, J. Sun, et al., “*Giám sát tích hợp BIM–IoT cho đường hầm dài: Kiến trúc và xác thực hiện trường*”. Tự động hóa trong Xây dựng, tập 132, 103914, 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103914.
- [5]. C. Yan, Q. Zhang, M. He, et al., “*Hiệu suất đào hầm TBM trong đá cứng dựa trên phân tích fractal đá-mảnh*”. Công nghệ Đào hầm và Không gian ngầm, tập 147, 105239, 2024, doi: 10.1016/j.tust.2023.105239.
- [6]. S. Liu, R. Chen và D. Yang, “*Chiến lược bơm vữa trước khi đào cho các đường hầm karst ở Nam Trung Quốc*”. Công nghệ Đào hầm và Không gian ngầm, tập 84, trang 18–30, 2019, doi: 10.1016/j.tust.2018.10.001.
- [7]. W. Zhang, Y. Huang và L. Guo, “*Hiệu suất giai đoạn đầu của bê tông phun không kiểm trong điều kiện độ ẩm và nhiệt độ cao*”. Xây dựng và Vật liệu xây dựng, tập 254, 119256, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119256.
- [8]. ITA–AITES, Hướng dẫn quản lý và giám sát

- rủi ro đào hầm. Lausanne, Thụy Sĩ: Hiệp hội đào hầm quốc tế, 2019.
- [9]. UIC, Đường hầm HSR: Hướng dẫn về an toàn và vận hành. Paris, Pháp: Liên minh Đường sắt Quốc tế, 2021.
- [10]. Ngân hàng Thế giới, Đường sắt cao tốc: Kinh nghiệm và bài học quốc tế cho các nước đang phát triển. Washington DC, Hoa Kỳ: Ngân hàng Thế giới, 2019.
- [11]. Ngân hàng Thế giới, Hiệu quả cơ sở hạ tầng ở Đông Nam Á. Washington DC, Hoa Kỳ: Ngân hàng Thế giới, 2023.
- [12]. Cơ quan Hợp tác Quốc tế Nhật Bản (JICA), Nghiên cứu khả thi và môi trường đường sắt cao tốc Việt Nam. Tokyo, Nhật Bản: JICA, 2023.
- [13]. CRCC/CREG/CRCHI, Sổ tay kỹ thuật và nghiên cứu điển hình về EPB/Mixshield, TBM hai lớp chắn và sản xuất theo đoạn. Bắc Kinh, Trung Quốc: Tổng công ty Xây dựng Đường sắt Trung Quốc, 2018–2024.
- [14]. E. Hoek và ET Brown, Tiêu chuẩn hồng học Hoek–Brown và GSI – Phiên bản 2018. Toronto, Canada: Rocscience, 2019.
- [15]. Ủy ban ITAtech, Báo cáo về bê tông phun, hệ thống chống thấm và số hóa trong đào hầm. Lausanne, Thụy Sĩ: ITAtech, 2016–2022.
- [16]. TH Nguyen và TN Vu, “*Thực tiễn và thách thức của NATM trong các hầm tàu điện ngầm Việt Nam*”. Tạp chí Kỹ thuật Xây dựng Việt Nam, tập 45, số 2, tr. 12–28, 2023.
- [17]. Bộ Tài nguyên và Môi trường Việt Nam (MONRE), Atlas Khảo sát Địa chất Quốc gia – Miền Trung và Miền Bắc Việt Nam. Hà Nội, Việt Nam: MONRE, 2022.
- [18]. L. Chen, J. Li và H. Wu, “*Nâng cao hiệu suất của NATM trong điều kiện địa chất phức tạp: Bài học từ Tây Nam Trung Quốc*”. Tạp chí Kỹ thuật và Không gian Ngầm Trung Quốc, tập 20, số 6, trang 1357–1368, 2024.
- [19]. H. Fang, X. Zhou và Z. Li, “*Ảnh hưởng của khí hậu gió mùa đến năng suất xây dựng đường hầm ở Nam Trung Quốc*”. Tạp chí Hiệp hội Đường sắt Trung Quốc, tập 46, số 4, trang 85–94, 2024.
- [20]. Y. Deng, Q. Hu và M. Zhao, “*Địa phương hóa sản xuất phân khúc đúc sẵn ở các quốc gia Vành đai và Con đường: Nghiên cứu điển hình từ Quảng Tây và Vân Nam*”. Tạp chí Kỹ thuật Xây dựng Trung Quốc, tập 57, số 8, trang 112–123, 2023.