■Ngày nhận bài: 24/9/2025 ■Ngày sửa bài: 06/10/2025 ■Ngày chấp nhận đăng: 14/10/2025

Nghiên cứu xây dựng khung tiêu chuẩn đánh giá an toàn công trình hầm đường sắt trong quá trình khai thác tại Việt Nam

Development of a standards framework for the safety assessment of railway tunnel structures during operation in Vietnam

> THS BÙI DUY LONG[1,*], KS NGUYỄN HUY NGHĨA[2]
[1]Công ty CP Tư vấn Đầu tư và Xây dựng Đăng Minh
[2]Trường Đại học Giao thông vận tải
[*]Email: buiduylongtv@gmail.com

TÓM TẮT

Hệ thống hầm đường sắt quốc gia tại Việt Nam với nhiều công trình có tuổi thọ gần 100 năm đang đối mặt với những thách thức lớn về an toàn do sự xuống cấp theo thời gian và thiếu một bộ tiêu chuẩn đánh giá chuyên biệt. Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu từ đề tài cấp Bộ mã số DT24304, tập trung vào việc xây dựng một khung phương pháp luận toàn diện để đánh giá an toàn công trình hầm đường sắt đang khai thác. Dựa trên cơ sở tổng quan kinh nghiệm quốc tế và phân tích thực trạng pháp lý, kỹ thuật tại Việt Nam, nhóm tác giả đề xuất một phương pháp đánh giá kết hợp hai hợp phần chính an toàn kết cấu chịu lực và an toàn vận hành khai thác. Các bộ tiêu chí chi tiết cùng hệ thống phân loại mức độ an toàn theo 4 cấp (A, B, C, D) cho kết cấu và 3 cấp (A, B, C) cho vận hành đã được xây dựng. Việc áp dụng thí điểm thành công tại một công trình hầm điển hình đã khẳng định tính khả thi và hiệu quả của khung phương pháp luận. Kết quả nghiên cứu là cơ sở khoa học và thực tiễn quan trọng, định hướng cho việc ban hành tiêu chuẩn quốc gia (TCVN), góp phần lấp đầy khoảng trống pháp lý và nâng cao hiệu quả quản lý, bảo trì hạ tầng hầm đường sắt dựa trên tiếp cận rủi ro.

Từ khóa: An toàn hầm đường sắt; đánh giá an toàn kết cấu; an toàn vận hành; tiêu chuẩn kỹ thuật; bảo trì công trình; quản lý hạ tầng đường sắt.

ABSTRACT

The national railway tunnel system in Vietnam, with quite a few structures approaching 100 years of service life, is facing significant safety challenges due to long-term degradation and the absence of specialized assessment standards. This paper presents the research outcomes of the ministerial-level project coded DT24304, focusing on the development of a comprehensive methodological framework for evaluating the safety of in-service railway tunnels. Based on a review of international practices and an analysis of Vietnam's current legal and technical context, the authors propose an assessment approach that integrates two key components: structural safety and operational safety. Detailed evaluation criteria and a safety classification system-with four levels (A, B, C, D) for structural conditions and three levels (A, B, C) for operational aspects-have been established. Successful pilot application in a representative tunnel demonstrates the feasibility and effectiveness of the proposed framework. The research results provide an essential scientific and practical foundation for formulating a national standard (TCVN), helping to fill existing legal gaps and enhance the management and maintenance of railway tunnel infrastructure through a risk-based approach.

Keywords: Railway tunnel safety; structural safety assessment; operational safety; technical standards; infrastructure maintenance; railway infrastructure management.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các công trình hầm đường sắt là hợp phần thiết yếu của hạ tầng giao thông hiện đại, giúp tối ưu hóa mạng lưới vận tải quốc gia bằng cách vượt qua các rào cản địa hình phức tạp [5]. Tuy nhiên, việc đảm bảo an toàn cho các công trình có vòng đời hàng trăm năm này là một thách thức kỹ thuật và quản lý to lớn. Các quốc gia tiên tiến đã chuyển dịch từ phương pháp bảo trì truyền thống sang cách tiếp cận dựa trên đánh giá rủi ro và triết lý thiết kế theo trạng thái giới hạn (Limit state design), thể hiện rõ trong các tiêu chuẩn của Hoa Kỳ (AASHTO LRFD) [6] và Trung Quốc (TB 10003-2016) [4].

Tại Việt Nam, thực trạng này trở nên đặc biệt cấp thiết. Hệ thống đường sắt quốc gia đang vận hành 39 hầm, phần lớn được xây dựng gần một thế kỷ trước với công nghệ thô sơ và đã gần hết tuổi thọ thiết kế [1]. Sự xuống cấp do điều kiện khí hậu khắc nghiệt và gia tăng tải trọng khai thác đang tiềm ẩn nhiều nguy cơ mất an toàn. Mặc dù đã có các quy định chung về quản lý và bảo trì công trình như Nghị định 06/2021/NĐ-CP [2] cũng như QCVN 08:2018/BGTVT [3], Việt Nam vẫn đối mặt với một khoảng trống pháp lý và kỹ thuật nghiêm trọng: Thiếu một bộ tiêu chuẩn chuyên ngành để đánh giá an toàn hầm đường sắt một cách khoa học và định lượng. Điều này dẫn đến công tác quản lý hiện hữu còn bị động, chủ yếu dựa vào kinh nghiệm kiểm tra trực quan thay vì phòng ngừa chủ động [1], trái ngược hoàn toàn với thông lệ quốc tế vốn yêu cầu xem xét toàn diện các yếu tố rủi ro [4, 7] thông qua các phương pháp phân tích xác suất và hỗ trợ ra quyết định tiên tiến [8].

Nghiên cứu này được thực hiện nhằm giải quyết khoảng trống đó bằng cách xây dựng một khung tiêu chuẩn toàn diện để đánh giá an toàn hầm đường sắt đang khai thác tại Việt Nam. Phương pháp luận đề xuất kết hợp các phương pháp định tính và định lượng, được "bản địa hóa" để phù hợp với điều kiện đặc thù về lịch sử công trình và hạn chế dữ liệu. Kết quả nghiên cứu sẽ là cơ sở khoa học quan trọng cho việc ban hành Tiêu chuẩn Quốc gia (TCVN), góp phần chuyển đổi phương thức quản lý hạ tầng hầm đường sắt sang cách tiếp cận chủ động dựa trên rủi ro, đảm bảo an toàn bền vững.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ TỔNG QUAN TÀI LIỆU

Phương pháp luận đánh giá an toàn hầm đường sắt trên thế giới đã tiến hóa rõ rệt từ cách tiếp cận định tính dựa trên kinh nghiệm chuyên gia sang các khung định lượng gắn kết chặt chẽ với các nguyên lý cơ học và xác suất. Các phương pháp hiện hành ưu tiên những khung đánh giá có khả năng lượng hóa độ tin cậy và hỗ trợ ra quyết định bảo trì. Phổ biến nhất là phương pháp đánh giá dựa trên rủi ro, với nguyên lý cốt lõi là nhận dạng, phân tích và định lượng các sự kiện không mong muốn để ưu tiên các biện pháp phòng ngừa. Về mặt kỹ thuật, khung này thường được tích hợp với triết lý thiết kế theo trạng thái giới hạn (LSD), vốn xác định các ngưỡng an toàn mà kết cấu không được vượt qua dưới các điều kiện tải trọng và suy giảm vật liệu thực tế. Triết lý này là nền tảng của các tiêu chuẩn quốc tế lớn như LRFD của AASHTO và TB 10003-2016 của Trung Quốc [4, 6]. Xu hướng nghiên cứu hiện nay còn mở rộng sang các phương pháp luận tinh vi hơn như đánh giá dựa trên độ tin cậy và khả năng phục hồi của hệ thống sau sự cố [5]. Để triển khai các khung lý thuyết này, nhiều công cụ phân tích đã được phát triển, từ kỹ thuật ra quyết định đa tiêu chí (MCDM) để tổng hợp nhiều yếu tố, phân tích kịch bản sự cố bằng sơ đồ cây lỗi đến các mô hình xác suất như mô phỏng Monte Carlo và mạng Bayes để lượng hóa rủi ro trong điều kiện không chắc chắn [8].

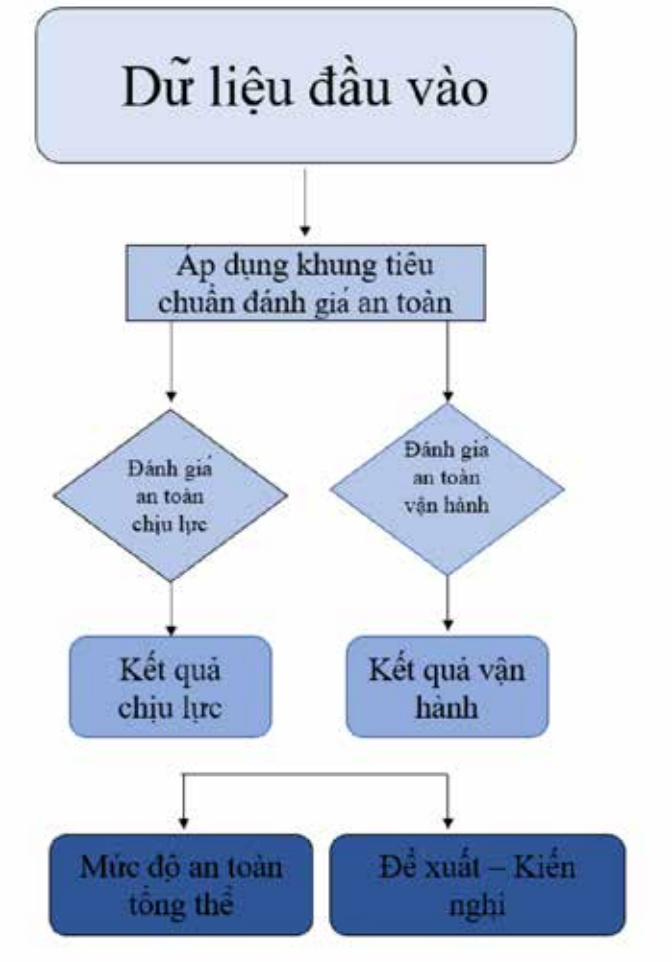
Tuy nhiên, việc áp dụng trực tiếp các phương pháp luận và tiêu chuẩn quốc tế này vào Việt Nam gặp nhiều hạn chế do các điều kiện đặc thù, tạo ra một khoảng trống nghiên cứu rõ rệt. Thứ nhất, về đặc điểm lịch sử và công nghệ thi công, nhiều hầm hiện hữu tại Việt Nam có tuổi đời lớn, được xây dựng bằng kỹ thuật truyền thống và vật liệu tại chỗ, cùng với hồ sơ hoàn công không đầy đủ, làm tăng sự không chắc chắn khi đánh giá khả năng chịu lực thực tế. Thứ hai, điều kiện môi trường địa phương với khí hậu nhiệt đới ẩm và lượng mưa lớn đã thúc đẩy quá trình suy thoái vật liệu, ăn mòn và xói mòn, làm tăng tốc độ suy giảm khả năng chịu lực của kết cấu. Cuối cùng, sự hạn chế về dữ liệu và việc thiếu một cơ sở dữ liệu quốc gia tổng hợp về tình trạng, lịch sử bảo trì và quan trắc hệ thống đã khiến việc áp dụng các mô hình định lượng tiên tiến trở nên khó khả thi.

Từ những thực trạng trên, tồn tại nhu cầu cấp thiết phải phát triển một khung đánh giá an toàn được "bản địa hóa" một phương pháp luận linh hoạt có khả năng tích hợp thẩm định của chuyên gia, tận dụng dữ liệu hạn chế, đồng thời tương thích với các thông lệ quốc tế. Nghiên cứu này hướng tới lấp đầy khoảng trống đó bằng cách đề xuất một khung phương pháp kết hợp kỹ thuật định lượng dựa trên LSD và mô hình xác suất với các thủ tục MCDM để xử lý thông tin chuyên gia khi dữ liệu thiếu, đồng thời xây dựng lộ trình triển khai cơ sở dữ liệu có hệ thống cho hầm đường sắt tại Việt Nam.

3. KHUNG TIÊU CHUẨN ĐÁNH GIÁ AN TOÀN HẦM ĐƯỜNG SẮT ĐỀ XUẤT

3.1. Cấu trúc và nguyên tắc của khung đánh giá

Khung đánh giá tách thành hai hợp phần chính an toàn chịu lực kết cấu và an toàn vận hành/khai thác mỗi hợp phần được đánh giá bằng tập hợp các nhóm chỉ tiêu và các chỉ tiêu thành phần chi tiết. Mức độ an toàn của từng chỉ tiêu được lượng hóa trên thang điểm chuẩn rồi tổng hợp để sinh chỉ số an toàn tổng thể của công trình, từ đó hỗ trợ phân loại rủi ro và ưu tiên biện pháp bảo trì. Phương pháp này đã được thử nghiệm thành công tại hầm Bãi Gió, chứng minh tính khả thi và hiệu quả ứng dụng thực tế.



Hình 1. Sơ đồ đánh giá an toàn

3.2. Đánh giá an toàn chịu lực kết cấu

An toàn chịu lực được xác định từ khảo sát/kiểm định các bộ phận kết cấu chính và phân thành 4 cấp A-D theo mức độ nguy hiểm của khuyết tật, Bảng 1 sẽ định nghĩa chi tiết.

Bảng 1. Phân loại mức độ an toàn chịu lực

Mức độ	Tình trạng	Mô tả và hành động đề xuất
A	Tốt	Công trình đảm bảo an toàn, khai thác bình thường, không có khuyến cáo nào
B	Trung bình	Công trình đảm bảo an toàn nhưng có hư hỏng nhỏ, cần có khuyến cáo cụ thể về công tác bảo trì, theo dõi để tiếp tục khai thác
C	Yếu	Công trình vẫn đảm bảo an toàn khai thác nhưng cần thực hiện khảo sát, kiểm định chi tiết để có giải pháp sửa chữa, khắc phục
D	Nguy hiểm	Đề nghị cấp có thẩm quyền xem xét dừng khai thác để thực hiện ngay việc khảo sát, sửa chữa, gia cố nhằm đảm bảo an toàn

Các nội dung chính cần đánh giá bao gồm: Tuổi thọ công trình, tình trạng kết cấu vỏ hầm, ổn định nền đường trong hầm, kết cấu cửa hầm và mái ta-luy khu vực cửa hầm.

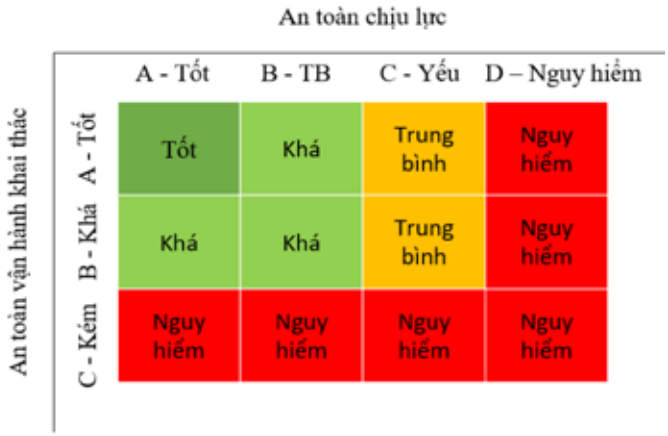
3.3. Đánh giá an toàn vận hành, khai thác

An toàn vận hành được đánh giá qua tĩnh không, thoát nước, hệ thống tín hiệu và điều kiện môi trường trong hầm, được phân loại thành 3 cấp A-C theo Bảng 2.

Bảng 2. Phân loại mức độ an toàn vận hành khai thác

Mức độ	Tình trạng	Mô tả và hành động đề xuất
A	Tốt	Đảm bảo an toàn, khai thác bình thường, không có khuyến cáo nào
B	Chấp nhận được	Được phép khai thác nhưng có các khuyến cáo cụ thể (ví dụ: Hạn chế tốc độ, sửa chữa nhỏ hệ thống phụ trợ) để đảm bảo an toàn
C	Không đảm bảo	Không đảm bảo an toàn. Đề nghị dừng khai thác để thực hiện các biện pháp khắc phục ngay lập tức

Các nội dung chính cần đánh giá bao gồm: Khổ giới hạn tiếp giáp kiến trúc, các yếu tố kỹ thuật đường sắt (bình diện, trắc dọc, thủy bình, cự ly ray...), chất lượng kiến trúc tầng trên và tình trạng hoạt động của các hệ thống phụ trợ (thoát nước, chiếu sáng, thông tin tín hiệu, hang tránh nạn...).



Hình 2. Ma trận xác định mức độ an toàn tổng thể của công trình hầm

3.4. Đánh giá mức độ an toàn tổng thể và chỉ số an toàn hầm

Để ra kết luận, nghiên cứu đề xuất kết hợp kết quả từ hai hợp phần theo nguyên tắc quản lý rủi ro mức độ an toàn tổng thể được xác định từ việc ghép mức an toàn của từng hợp phần độc lập. Ma trận đề xuất Bảng 3 xây dựng dựa trên logic kết hợp trực tiếp các cấp đã định nghĩa ở Bảng 1 và Bảng 2, theo đó công trình chỉ được xem là an toàn khi cả hai hợp phần đều ở trạng thái an toàn và sẽ bị xếp hạng theo mức nguy hiểm nhất nếu bất kỳ hợp phần nào ở trạng thái kém.

4. ÁP DỤNG KHUNG TIÊU CHUẨN ĐÁNH GIÁ AN TOÀN HẦM BÃI GIÓ

4.1. Hiện trạng công trình

Bảng 3. Tóm tắt các thông số cơ bản của công trình nghiên cứu

Tiêu chí	Thông tin
Tên công trình	Hầm Bãi Gió
Vị trí	Km1231+007,84 đến Km1231+410,42 tuyến Hà Nội - TP.HCM, tỉnh Khánh Hòa
Niên đại	Xây dựng 1923-1926
Chiều dài	402,58 m
Vật liệu vỏ hầm	Bê tông không cốt thép; một số đoạn là vách đá tự nhiên
Tốc độ khai thác	Hạn chế 30 km/h (so với tốc độ thiết kế khu gian 50 km/h)
Tình trạng khai thác	Tuổi gần 100 năm; vận tốc khai thác giới hạn 30 km/h (thiết kế khu gian 50 km/h)

4.2. Phương pháp và kết quả đánh giá

4.2.1. An toàn chịu lực của kết cấu

Bảng 4. Tổng hợp kết quả đánh giá an toàn chịu lực

Hạng mục	Kết quả khảo sát	Xếp loại	Nhận xét
Tuổi thọ công trình	Khai thác ≈ 100 năm	D	Vượt tuổi thiết kế, yếu tố tuổi tác ảnh hưởng lớn đến độ bền còn lại
Hiện trạng vỏ hầm bê tông		C	Hư hỏng cốt lõi tại vỏ hầm làm suy giảm khả năng chịu lực, cần can thiệp gia cố khẩn cấp ở các đoạn nguy hiểm
Cửa hầm và mái ta-luy		B	Các cấu kiện biên tương đối ổn, chưa là điểm suy giảm chịu lực chính

Kết luận hợp phần an toàn chịu lực ở mức C (Yếu), tức khả năng chịu lực của kết cấu ở trạng thái đáng quan ngại, có nguy cơ ảnh hưởng đến an toàn công trình nếu không xử lý.

4.2.2. An toàn vận hành khai thác

Bảng 5. Tổng hợp kết quả đánh giá an toàn vận hành

Hạng mục	Kết quả khảo sát	Xếp loại	Nhận xét
Khổ giới hạn kiến trúc	12/36 mặt cắt ngang vi phạm khổ	B	Mặc dù một số mặt cắt vi phạm, đầu máy/toa vẫn lưu thông khi giới hạn tốc độ; cần kiểm soát và khắc phục từng đoạn
Hệ thống thoát nước	Không đảm bảo; nước mưa tràn vào gây ngập bề mặt đá ballast	C	Khiếm khuyết nghiêm trọng, gây nguy cơ làm tăng quá trình hư hỏng kết cấu và tác động xấu đến an toàn vận hành
Hệ thống phụ trợ	Không có chiếu sáng/ thông gió theo tiêu chuẩn mới; hang tránh nạn còn chức năng cơ bản	B	Thiếu thiết bị hiện đại nhưng không gây dừng khai thác ngay lập tức đề xuất cải tiến theo lộ trình

Kết luận hợp phần vận hành ở mức B (Chấp nhận được) công trình vẫn khai thác được dưới các điều kiện hạn chế.

4.3. Xác định mức độ an toàn tổng thể và phân tích

Việc tổng hợp hai hợp phần được thực hiện bằng ma trận tích hợp: An toàn chịu lực × An toàn vận hành → Mức độ an toàn tổng thể.

- An toàn chịu lực = C (Yếu)
- An toàn vận hành = B (Chấp nhận được)

Dựa vào ma trận đánh giá ở Hình 2, mức độ an toàn tổng thể được xác định là: Trung bình.

Kết quả cho thấy bức tranh đa chiều về mặt vận hành, hầm có thể tiếp tục phục vụ nhưng ở mức hạn chế. Ngược lại, năng lực chịu lực của kết cấu, vỏ hầm đang ở trạng thái yếu, là điểm nguy hiểm chủ yếu. Do đó, ưu tiên can thiệp khẩn cấp phải hướng vào việc gia cố, phục hồi khả năng chịu lực của kết cấu hơn là chỉ xử lý các vấn đề vận hành bề mặt. Kết quả cũng khẳng định tính ứng dụng của khung giúp phân tách rõ ràng các yếu tố rủi ro và hướng dẫn đưa ra thứ tự ưu tiên can thiệp dựa trên rủi ro.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã giải quyết một vấn đề cấp thiết trong hạ tầng đường sắt Việt Nam, đó là thiếu một phương pháp luận khoa học, chuẩn hóa để đánh giá an toàn hầm trong giai đoạn khai thác bằng cách hệ thống hóa cơ sở lý luận, tổng hợp kinh nghiệm quốc tế và phân tích có trọng tâm các điều kiện đặc thù của Việt Nam. Kết quả chính là một khung phương pháp luận toàn diện, có cấu trúc logic, phân tách rõ hai hợp phần trọng yếu, an toàn chịu lực và an toàn vận hành, cho phép lượng hóa trạng thái công trình một cách khách quan và khắc phục hạn chế của kiểm tra định tính truyền thống. Bộ tiêu chí chi tiết, hệ thang điểm và ma trận ghép mức an toàn được đề xuất vừa thể hiện tính khoa học vừa chứng tỏ tính khả thi cung cấp cảnh báo sớm, hỗ trợ ra quyết định có hệ thống và giúp ưu tiên công tác bảo trì, sửa chữa theo mức độ nguy hiểm thực tế. Việc triển khai thí điểm tại hầm Bãi Gió khẳng định giá trị thực tiễn của khung kết quả phân tích tương thích với hiện trạng khảo sát và cung cấp cơ sở kỹ thuật để đề xuất can thiệp khẩn cấp.

Tóm lại, nghiên cứu là một đóng góp tiên phong tại Việt Nam, tạo nền tảng khoa học quan trọng cho việc soạn thảo tiêu chuẩn quốc gia và chuyển đổi quản lý hầm từ phản ứng sang quản lý chủ động, dựa trên đánh giá rủi ro.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ đề tài khoa học công nghệ cấp Bộ mã số DT24304, được tài trợ bởi Bộ Xây dựng. Nhóm tác giả xin chân thành cảm ơn sự hỗ trợ quý báu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Cục Đường sắt Việt Nam, Bộ Xây dựng (2025), Báo cáo tổng kết đề tài Nghiên cứu định hướng xây dựng tiêu chuẩn đánh giá an toàn công trình hầm đường sắt trong quá trình khai thác, mã số DT24304.

[2]. Chính phủ (2021), Nghị định số 06/2021/NĐ-CP quy định chi tiết một số nội dung về quản lý chất lượng, thi công xây dựng và bảo trì công trình xây dựng.

[3]. Bộ Giao thông vận tải (2018), QCVN 08:2018/BGTVT - Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về khai thác đường sắt.

[4]. Design of railway tunnel (TB10003-2016-Chinese), Cục Đường sắt Quốc gia Cộng hòa Nhân dân Trung Hoa.

[5]. Kolymbas, D. (2005), Tunnelling and Tunnel Mechanics: A Rational Approach to Tunnelling. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

[6]. AASHTO (2017), LRFD Road Tunnel Design and Construction Guide Specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

[7]. Ministry of Regional Development of the Russian Federation (2012), SP 122.13330.2012: Tunnels for Railways and Highways.

[8]. Sharafat, A., & Dolati, A. (2020), A state-of-the-art review on risk assessment and management of tunnels. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 7(5), 655-677.