

Nghiên cứu mô hình tham số biểu diễn rủi ro khi thi công công trình hố đào sâu trong khu vực đô thị ở Việt Nam

Lê Thị Phương Loan¹, Lê Hồng Hà^{1*}, Nguyễn Ngọc Thoan¹, Nguyễn Anh Đức¹

¹Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

TỪ KHOÁ

Mô hình tham số

Rủi ro

Hố đào sâu

Đô thị

Việt Nam

TÓM TẮT

Bài báo đề xuất một mô hình tham số để đánh giá rủi ro các công trình thi công hố đào sâu tại các khu vực đô thị ở Việt Nam. Mô hình tham số này tích hợp 12 yếu tố rủi ro chính trong đó có mất ổn định và sụp nền đất, nước ngầm xâm nhập, hư hỏng các công trình lân cận và mất an toàn lao động. Mô hình sử dụng các phương trình vi phân ngẫu nhiên (SDEs) để xác định sự thay đổi theo thời gian của từng rủi ro, đồng thời tính đến sự tương tác giữa các rủi ro và tác động của các biện pháp can thiệp. Thiết kế của mô hình cho phép mô phỏng thực tế sự thay đổi của rủi ro, sự giảm dần theo thời gian của các rủi ro khi thực hiện các chiến lược can thiệp hiệu quả và loại bỏ các rủi ro không xảy ra trong thực tế. Thông qua mô phỏng Monte Carlo, mô hình được chạy thử và hiệu chỉnh bằng cách sử dụng dữ liệu thực nghiệm từ các dự án tương tự và kiến thức chuyên gia; các tham số của mô hình - chẳng hạn như ma trận tương tác và các hàm độ biến động - được ước tính từ ý kiến chuyên gia. Các chuyên gia đánh giá mô hình tham số này có khả năng mô hình hoá sự biến thiên của từng rủi ro riêng lẻ cũng như rủi ro tổng thể cho loại công trình thi công hố đào sâu và nhấn mạnh cách tiếp cận tham số này có thể hỗ trợ các nhà quản lý xây dựng trong việc giảm thiểu rủi ro tích lũy, từ đó hỗ trợ ra quyết định chủ động trong phân bổ nguồn lực và lập kế hoạch giảm thiểu rủi ro. Việc kiểm định thông qua dữ liệu tổng hợp chứng minh khả năng của mô hình trong việc dự đoán quỹ đạo rủi ro và cải thiện kết quả quản lý rủi ro trong các dự án đào sâu phức tạp ở đô thị.

KEYWORDS

Parametric model

Risk

Deep Excavation Construction

Urban

Vietnam

ABSTRACT

The paper proposes a parametric model to assess the evolving risk profile of deep excavation construction in urban areas of Vietnam. This parametric model integrates 12 key risk factors—synthesized from various studies—including soil instability and collapse, groundwater ingress, damage to adjacent structures, and worker safety hazards. The model employs stochastic differential equations (SDEs) to capture the time-varying dynamics of each risk, while accounting for interactions between risks and the effects of mitigation measures. The design of the model allows for realistic simulation of risk evolution, ensuring that risks gradually decrease over time as effective mitigation strategies are implemented and unrealized risks are reduced. Through Monte Carlo simulations, the model is tested and calibrated using empirical data from similar projects, expert knowledge, and its parameters—such as the interaction matrix and volatility functions—are estimated based on expert input. Experts evaluate this parametric model as realistic in modeling the variability of individual risks as well as the overall risk for excavation projects. They emphasize that this parametric approach can support construction managers in minimizing cumulative risks, thereby aiding proactive decision-making in resource allocation and risk mitigation planning. Validation through synthetic data demonstrates the model's ability to predict risk trajectories and improve risk management outcomes in complex urban deep excavation projects.

1. Mở đầu

Trong các dự án xây dựng, đặc biệt là ở khu vực đô thị, rủi ro liên quan đến thi công hố đào sâu rất phức tạp, xảy ra thường xuyên và có tác động lớn đến sự thành công của dự án. Những rủi ro này phát sinh từ đặc điểm nội tại của công trình cũng như môi trường xung quanh. Ở các môi trường đô thị đông đúc, ví dụ Hà Nội và thành phố

Hồ Chí Minh, những thách thức này trở nên trầm trọng hơn do các công trình rất gần với các cơ sở hạ tầng lân cận, các hệ thống tiện ích và khu dân cư. Nếu không được quản lý đúng cách, hoạt động thi công đào sâu trong bối cảnh này có thể dẫn đến các hậu quả nghiêm trọng, bao gồm hư hỏng kết cấu, gián đoạn công năng các công trình lân cận, tai nạn an toàn lao động và gây ô nhiễm môi trường.

*Liên hệ tác giả: halh@huce.edu.vn

Nhận ngày 24/09/2023, sửa xong ngày 18/11/2024, chấp nhận đăng ngày 20/11/2024

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.06.2024.826>

Quản lý rủi ro theo cách truyền thống dựa trên dữ liệu thực nghiệm và phán đoán của chuyên gia để ước lượng các rủi ro tiềm ẩn. Tuy nhiên, bản chất động của các dự án có đào sâu, kết hợp với các yếu tố bất định phát sinh trong quá trình thi công, đòi hỏi các phương pháp phức tạp hơn để có thể dự đoán sự thay đổi của rủi ro theo thời gian. Do vậy, nghiên cứu này triển một mô hình tham số để phát hiện và cập nhật rủi ro và sự biến đổi của chúng cho các dự án có thi công đào sâu ở khu vực đô thị.

Trước tiên, nghiên cứu tổng quan xác định được các rủi ro chính liên quan đến các dự án đào sâu ở khu vực đô thị tại Việt Nam. Tiếp theo, nghiên cứu xây dựng một mô hình mô phỏng các rủi ro và sự phát triển của chúng trong suốt quá trình thi công, đồng thời cũng xem xét các tương tác giữa các rủi ro và hiệu quả của các biện pháp can thiệp bằng cách sử dụng các phương trình vi phân ngẫu nhiên (SDEs). Một trong những đóng góp mới của mô hình này là khả năng tính đến bản chất động của việc giảm thiểu rủi ro khi các chiến lược can thiệp được thực hiện, cũng như sự giảm dần của các rủi ro không xảy ra trong thực tế. Điều này làm cho mô hình đặc biệt hữu ích cho các nhà quản lý dự án, có thể dự đoán được các giai đoạn thi công có rủi ro cao và phân bổ nguồn lực một cách hiệu quả.

Bài báo này bao gồm các nội dung sau: tổng quan lý thuyết các rủi ro liên quan đến thi công hố đào sâu; trình bày lý thuyết toán học xây dựng mô hình tham số, bao gồm việc xây dựng các biến rủi ro và các quá trình ngẫu nhiên điều chỉnh sự phát triển của chúng; kiểm định mô hình bằng dữ liệu từ một dự án thực tế với sự tham gia của các chuyên gia trong ngành; cuối cùng là kết luận và khuyến nghị cho việc áp dụng mô hình và định hướng nghiên cứu trong tương lai.

2. Tổng hợp các rủi ro liên quan đến thi công hố đào sâu trong môi trường đô thị

Trong bối cảnh phát triển các dự án đô thị ở Việt Nam, các kết cấu công trình có liên quan đến đào sâu trong đất ngày càng phổ biến nhằm tăng hiệu quả sử dụng đất. Các nhà quản lý cần hiểu biết toàn diện về các rủi ro liên quan để lập kế hoạch và triển khai dự án đào sâu một cách hiệu quả. Các tài liệu nghiên cứu đã xác định nhiều rủi ro có thể phát sinh trong quá trình thực hiện các công trình dạng này, bao gồm sự bất ổn và sụp đổ đất, nước ngầm xâm nhập, hư hỏng các công trình lân cận, và các rủi ro khác.

Mất ổn định và sụp nền đất là một rủi ro thường gặp trong các dự án đào sâu, đặc biệt ở những vùng đất yếu, ví dụ sét mềm. Nhiều nghiên cứu nhấn mạnh rằng sự biến dạng quá mức của nền đất có thể dẫn đến lún không đồng đều và gây nứt vỡ các công trình xung quanh, đòi hỏi phải có các biện pháp kiểm soát biến dạng chặt chẽ [1], [2], [3]. Nghiên cứu của Moormann đã phân tích sự chuyển động của tường chắn và mặt đất do các dự án đào sâu trên đất mềm, chỉ ra rằng sự bất ổn có thể gây ra thiệt hại nghiêm trọng cho công trình [4]. Ngoài ra, khả năng làm việc hiệu quả của tường chắn đất dưới các điều kiện tải tĩnh và động đất cũng rất quan trọng trong việc giảm thiểu rủi ro sụp đổ vách hố đào [5], [6].

Nước ngầm xâm nhập là một rủi ro tiếp theo thường được nhắc đến bởi các tài liệu nghiên cứu. Kiểm soát nước ngầm là yếu tố quyết định trong các dự án đào sâu. Một số nhà khoa học thảo luận về những thách thức khi tiến hành đào dưới mực nước ngầm, nhấn mạnh sự cần thiết của các chiến lược thoát nước hiệu quả để ngăn chặn nước ngầm thấm vào, có thể gây mất ổn định cho khu vực đào [5], [7]. Goh và cộng sự phân tích thêm về ảnh hưởng của sự sụt giảm mực nước ngầm, cho rằng việc quản lý không đúng cách có thể dẫn đến lún đất nghiêm trọng và các rủi ro liên quan [8]. Wang và cộng sự nhấn mạnh tầm quan trọng của các biện pháp chống thấm nước để giảm thiểu các tai nạn liên quan đến nước trong quá trình đào sâu [9].

Nguy cơ hư hỏng các công trình lân cận tăng lên do sự chuyển vị của mặt đất gây ra bởi quá trình đào sâu. Nếu không có các biện pháp kiểm soát độ lệch của tường chắn và sự lún của mặt đất, các công trình lân cận có thể bị hư hỏng đáng kể [2], [10], [11]. Do đó, các biện pháp kiểm soát biến dạng là rất cần thiết được tích hợp trong các hệ thống giám sát để ngăn chặn sự cố kết cấu trong quá trình đào [12].

Gián đoạn công năng các công trình xung quanh là rủi ro phổ biến trong các dự án đào sâu ở đô thị. Liu và cộng sự nhấn mạnh rằng sự biến dạng do đào có thể ảnh hưởng đến các tiện ích-công năng ngầm, dẫn đến nguy cơ gián đoạn dịch vụ [3]. Điều này đặc biệt quan trọng ở các khu vực đô thị đông dân, nơi các hệ thống công năng được bố trí dày đặc.

Gián đoạn giao thông thường là hệ quả không thể tránh khỏi của các dự án đào sâu ở khu vực đô thị. Các hoạt động xây dựng có thể dẫn đến việc phải tạm dừng hoặc chuyển hướng giao thông, ảnh hưởng đến các tuyến đường trong khu vực. Các yếu tố như quản lý dự án hiệu quả và sự phối hợp với chính quyền địa phương là cần thiết để giảm thiểu gián đoạn [13].

Ô nhiễm không khí và tiếng ồn là những mối quan ngại lớn về môi trường liên quan đến hoạt động đào sâu. Một số nghiên cứu chỉ ra rằng các hoạt động xây dựng góp phần làm tăng lượng phát thải và mức độ tiếng ồn, gây ảnh hưởng tiêu cực đến cộng đồng xung quanh [14]. Ngoài ra, các nhà thầu cần thực hiện các biện pháp bền vững để giảm thiểu những tác động này trong các dự án đào sâu [15].

Mất ổn định mái dốc là rủi ro đặc biệt hay xảy ra tại các khu vực có địa hình dốc, đất yếu, hoặc lựa chọn phương án đào mở. Khi mái dốc bị mất ổn định, toàn bộ nền đất xung quanh bị chuyển vị lớn và có thể dẫn đến phá hoại tổng thể [1], [16], [17]. Các biện pháp ổn định mái dốc hiệu quả là cần thiết để ngăn chặn xói mòn và đảm bảo an toàn cho khu vực thi công [5].

Chậm tiến độ do thời tiết thường xuyên xuyên diễn ra đối với các dự án đào sâu [17], [18]. Ví dụ, các cơn mưa gây ra ngập nước trong hố đào không thoát kịp; việc ngập nước còn gây ra mất ổn định cho nền đất, vốn đã đang ở ngưỡng của ổn định.

Hư hỏng, sụp đổ kết cấu chống đỡ tạm thời có thể dẫn đến các tai nạn nghiêm trọng tại các công trường đào sâu. Do đó, các hệ thống chống đỡ cần được đảm bảo chắc chắn để duy trì tính toàn vẹn của khu vực đào [3]. Việc sử dụng các vật liệu tiên tiến và kỹ thuật hiện đại là điều cốt yếu để đảm bảo độ tin cậy của các kết cấu này.

Thiếu hụt vật liệu và vượt ngân sách là những vấn đề phổ biến trong các dự án xây dựng nói chung. Các biến động trong việc cung cấp

vật liệu có thể dẫn đến sự chậm trễ và tăng chi phí của dự án [19]. Điều này đặc biệt có liên quan trong bối cảnh các dự án đào sâu ở đô thị, nơi nhu cầu vật liệu cho các dự án xây dựng thường cao.

Mất an toàn lao động cũng là rủi ro quan trọng trong các dự án đào sâu. Các rủi ro liên quan đến điều kiện làm việc trong không gian hạn chế và gần các máy móc nặng đòi hỏi phải có các quy định an toàn nghiêm ngặt. Các rủi ro này nếu xảy ra sẽ ảnh hưởng nặng nề đến nhà thầu và chủ đầu tư, cả về tiến độ lẫn chi phí. Các nghiên cứu cho thấy việc tuân thủ các quy định an toàn có thể giảm đáng kể số lượng tai nạn tại công trường [20].

Ô nhiễm nước ngầm, nước mặt cũng là một rủi ro ngày càng được nhắc đến nhiều hơn và pháp luật liên quan cũng ngày càng chặt chẽ hơn. Các nghiên cứu chỉ ra rằng quản lý không đúng cách nước thải từ khu vực đào có thể dẫn đến ô nhiễm các nguồn nước gần đó, đòi hỏi phải triển khai các biện pháp bảo vệ môi trường hiệu quả [21].

Thông qua nghiên cứu tổng quan lý thuyết trong nước và quốc tế, các tác giả đã tổng hợp được 12 loại rủi ro có thể xảy ra khi thi công hố đào sâu. Các rủi ro này có xác suất xảy ra và hậu quả khác nhau, tùy thuộc vào mỗi dự án cụ thể. Nhận thức được sự hiện diện của các rủi ro này, các nhà quản lý có thể lên kế hoạch để phòng tránh, ứng phó, cũng như giảm nhẹ tác hại của chúng đối với các dự án thi công đào sâu trong môi trường đô thị.

3. Xây dựng mô hình tham số

Mục tiêu chính của bài báo này là xây dựng một mô hình tham số để biểu diễn hồ sơ rủi ro biến đổi của dự án đào sâu tại các khu vực đô thị ở Việt Nam, cụ thể là 12 yếu tố rủi ro chính đã được xác định. Mô hình này được xây dựng dựa trên các quá trình ngẫu nhiên và sự tương tác giữa các rủi ro, nhằm cung cấp một công cụ linh hoạt có thể thích ứng với các yếu tố bất định thay đổi theo thời gian trong quá trình thi công.

3.1. Định nghĩa các biến rủi ro

Ký hiệu $R_i(t)$ là cường độ rủi ro i ở thời điểm t , trong đó $i \in \{1, 2, \dots, 12\}$ tương ứng với 12 loại rủi ro:

$$R(t) = [R_1(t), R_2(t), \dots, R_{12}(t)]^T \quad (1)$$

Các rủi ro đã được xác định là:

- $R_1(t)$: Mất ổn định và sụp đổ nền đất
- $R_2(t)$: Nước ngầm xâm nhập
- $R_3(t)$: Hư hỏng các công trình lân cận
- $R_4(t)$: Giảm đoạn công năng xung quanh
- $R_5(t)$: Giảm đoạn giao thông
- $R_6(t)$: Ô nhiễm không khí và tiếng ồn
- $R_7(t)$: Mất ổn định mái dốc và xói mòn
- $R_8(t)$: Chạm tiến độ do thời tiết
- $R_9(t)$: Hư hỏng/sập đổ kết cấu tạm
- $R_{10}(t)$: Thiếu vật liệu và vượt ngân sách
- $R_{11}(t)$: Mất an toàn lao động

- $R_{12}(t)$: Ô nhiễm nước ngầm, nước mặt

Mỗi rủi ro $R_i(t)$ phát triển theo thời gian và bị ảnh hưởng bởi các yếu tố quyết định và ngẫu nhiên. Quá trình này được biểu diễn bằng phương trình vi phân:

$$dR_i(t) = \left(\sum_j^{12} a_{ij} R_j(t) + \mu_i(t) - M_i(t) \right) dt + \sigma_i(t) dW_i(t) \quad (2)$$

Trong đó:

- $\mu_i(t)$: Thành phần quyết định đại diện cho tốc độ thay đổi của rủi ro do các yếu tố như hoạt động xây dựng, tác động môi trường hoặc sự chậm trễ của dự án.
- $M_i(t)$: Thành phần giảm thiểu rủi ro, giúp giảm rủi ro nếu các biện pháp giảm thiểu được thực hiện.
- $\sigma_i(t)$: Độ biến động của rủi ro, phản ánh sự không chắc chắn trong việc dự đoán sự phát triển của rủi ro.
- $dW_i(t)$: Quá trình Wiener (chuyển động Brown) đại diện cho các tác động ngẫu nhiên từ bên ngoài lên rủi ro.

3.2. Sự tương tác giữa các rủi ro

Các rủi ro có sự tương tác với nhau, và sự tương tác này được mô hình hóa bởi một ma trận tương tác $A \in \mathbb{R}^{12 \times 12}$. Tương tác giữa rủi ro R_i và R_j được lượng hoá bởi phần tử a_{ij} của ma trận. Sự phát triển của vector rủi ro $\mathcal{R}(t)$ được cho bởi:

$$dR(t) = AR(t)dt + \Sigma(t)dW(t) - M(t)dt \quad (3)$$

Trong đó:

- $A = [a_{ij}]$ là ma trận tương tác, với mỗi a_{ij} đại diện cho mức độ ảnh hưởng của rủi ro j lên rủi ro i .

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1,12} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2,12} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{12,1} & a_{12,2} & \dots & a_{12,12} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Các giá trị này được xác định từ dữ liệu lịch sử và kiến thức chuyên gia. Ví dụ, khi đã xảy ra xâm nhập nước ngầm (R_2) hoặc sập đổ/mất ổn định kết cấu tạm (R_9) thì rủi ro bị mất ổn định nền đất (R_1) bị tăng cao; trong khi đó, chậm tiến độ do thời tiết (R_8) cũng ảnh hưởng tới và bị ảnh hưởng bởi mất ổn định mái dốc và xói mòn (R_7).

- $\Sigma(t) \in \mathbb{R}^{12 \times 12}$ là ma trận độ biến động, mô tả sự không chắc chắn phụ thuộc theo thời gian trong mỗi rủi ro.

- $M(t) = [M_1(t), M_2(t), \dots, M_{12}(t)]^T$ đại diện cho các yếu tố giảm thiểu phụ thuộc theo thời gian, giúp giảm mức độ rủi ro dựa trên các biện pháp can thiệp được thực hiện ở các thời điểm khác nhau của dự án.

- $dW(t) = [dW_1(t), dW_2(t), \dots, dW_{12}(t)]^T$ là một vector của các quá trình Wiener độc lập.

3.3. Mô hình cụ thể cho sự phát triển của rủi ro với yếu tố giảm thiểu

Để đảm bảo mô hình phản ánh giống thực tế, yếu tố quyết định $\mu_i(t)$ và yếu tố giảm thiểu $M_i(t)$ được điều chỉnh động dựa trên điều kiện của dự án. Ví dụ:

- Nếu rủi ro $R_i(t)$ (ví dụ, nước ngầm xâm nhập) không xảy ra trong một khoảng thời gian nhất định, yếu tố giảm thiểu $M_i(t)$ sẽ được kích hoạt, làm giảm mức độ rủi ro tổng thể.

- Đối với một số rủi ro phổ biến trong giai đoạn đầu của việc đào (ví dụ: mất ổn định và sụp đổ), mức độ rủi ro sẽ giảm dần theo thời gian khi các mốc quan trọng của dự án (ví dụ: đổ xong bê tông sàn tầng hầm) được hoàn thành.

Ứng xử của các yếu tố này có thể được mô hình hóa như sau:

- $\mu_i(t)$ phụ thuộc theo thời gian, tăng lên ở giai đoạn đầu của dự án và giảm khi các mốc quan trọng được hoàn thành.

- $M_i(t)$ tăng theo thời gian khi các chiến lược can thiệp được triển khai (ví dụ: đổ bê tông tường chắn hoặc cải thiện hệ thống thoát nước).

3.4. Độ biến động và sự không chắc chắn theo thời gian

Độ biến động $\sigma_i(t)$ đại diện cho sự không chắc chắn trong việc dự đoán rủi ro tại thời điểm t . Điều này có thể thay đổi do các điều kiện tại hiện trường, thời tiết, hoặc các giai đoạn khác nhau của dự án. Để nắm bắt sự phụ thuộc theo thời gian, ta định nghĩa:

$$\sigma_i(t) = \sigma_{i,0} + \gamma_i(t) \quad (5)$$

Trong đó:

- $\sigma_{i,0}$ là mức độ biến động cơ bản cho rủi ro i , phản ánh sự không chắc chắn dài hạn.

- $\gamma_i(t)$ là một thành phần biến đổi theo thời gian, mô hình hóa sự dao động ngắn hạn trong độ biến động, chẳng hạn như trong các hoạt động xây dựng cụ thể hoặc những thay đổi thời tiết theo mùa.

3.5. Hàm tổng rủi ro

Hồ sơ tổng rủi ro của một công trình đào sâu được đại diện bởi một hàm tổng rủi ro, tổng hợp các rủi ro riêng lẻ $R_i(t)$. Ta định nghĩa tổng rủi ro ở thời điểm t là:

$$R_{total}(t) = \sum_{i=1}^{12} \omega_i R_i(t) \quad (6)$$

Trong đó:

- ω_i là một trọng số đại diện cho tầm quan trọng tương đối của rủi ro i đối với toàn bộ dự án. Các trọng số này được xác định dựa trên các ưu tiên của dự án, chẳng hạn như các quy định của luật pháp, độ ảnh hưởng tới các cơ sở hạ tầng quan trọng, hoặc do các yếu tố an toàn khác.

3.6. Bài toán tối ưu: Giảm thiểu tổng rủi ro

Mặc dù mục tiêu tối ưu này nằm ngoài phạm vi của bài báo này, các nghiên cứu mở rộng có thể giải bài toán tối ưu hoá làm giảm tổng rủi ro trong thời gian của dự án T như sau:

$$\min \int_0^T R_{total}(t) dt \quad (7)$$

Tích phân này đại diện cho tổng rủi ro tích lũy trong suốt thời gian dự án. Bằng cách giảm thiểu đại lượng này, ta có thể xác định các

chiến lược tốt nhất để giảm thiểu các rủi ro quan trọng nhất, chẳng hạn như điều chỉnh lịch trình thi công, triển khai thêm các biện pháp an toàn, hoặc thay đổi các phương pháp đào.

3.7. Hiệu chỉnh Mô hình và Ước lượng Tham số

Các tham số của mô hình, bao gồm ma trận tương tác A , ma trận độ biến động $\Sigma(t)$, và các trọng số ω_i , cần được ước lượng dựa trên dữ liệu thực nghiệm từ các dự án đào sâu trước đây tại các khu vực đô thị. Việc hiệu chỉnh mô hình bao gồm việc khớp mô hình với dữ liệu quan sát và điều chỉnh các tham số để đạt được khả năng dự báo tốt nhất.

Các phương pháp cụ thể để ước lượng tham số bao gồm:

- Phân tích dữ liệu lịch sử: Sử dụng dữ liệu từ các dự án tương tự để ước lượng rủi ro cơ bản và sự tương tác giữa các rủi ro.

- Lấy ý kiến chuyên gia: Tham khảo ý kiến từ các chuyên gia trong ngành để xác định mức độ phụ thuộc giữa các rủi ro.

- Dữ liệu giám sát thời gian thực: Kết hợp dữ liệu từ các cảm biến và cập nhật thời gian thực để điều chỉnh độ biến động $\sigma_i(t)$, các xu hướng quyết định $\mu_i(t)$, và các nỗ lực giảm thiểu $M_i(t)$.

4. Ví dụ áp dụng phương pháp và thảo luận

Dựa trên các đề xuất ở phần trước, một thuật toán được phát triển để tính toán cường độ của các rủi ro cơ bản – có biến thiên theo thời gian và được tích hợp các yếu tố tăng, giảm, và ngẫu nhiên theo chuỗi thời gian. Các bước chính của thuật toán được biểu diễn thông qua mã giả như sau:

4.1. Đầu vào

T: Tổng tiến độ xây dựng có liên quan đến đào sâu (ngày)

N: Số lượng nhân tố rủi ro (chẳng hạn, $N = 12$)

mu_cao, mu_thap: Tỷ lệ tăng và giảm của mỗi nhân tố rủi ro

sigma: Ma trận biến thiên của mỗi nhân tố rủi ro

ma_tran_tuong_quan: Ma trận NxN thể hiện mối tương quan giữa các rủi ro

điều_khien_khởi_tạo: Giá trị khởi tạo của các rủi ro trong các trường hợp (rủi ro thấp, trung bình, cao)

khoảng_thời_gian: Mảng thời gian với bước từ 0 đến T

ngưỡng_thời_gian: Khoảng thời gian mà sau đó mức độ rủi ro sẽ giảm đi nếu như các rủi ro không xảy ra

wiener_process: Quá trình ngẫu nhiên cho sự ngẫu nhiên trong quá trình tiến hóa rủi ro

4.2. Thuật toán

For each trường hợp rủi ro (thấp, trung bình, cao):

Khởi tạo mức độ rủi ro dựa trên điều_khien_khởi_tạo

For each bước thời gian t trong khoảng_thời_gian:

Tính mức độ tương quan: ma_tran_tuong_quan_rui_ro

Tính toán phần ngẫu nhiên bằng cách sử dụng wiener_process và sigma

If $t < \text{ngưỡng_rủi_ro}$:

Dùng μ_high cho độ tăng rủi ro

Else:

Dùng μ_low cho độ giảm rủi ro

Cập nhật mức độ rủi ro bằng ma trận tương quan, biến đổi thời gian, và khoảng/ngưỡng thời gian

Chuẩn hoá ma trận để mức độ rủi ro luôn > 0 bằng toán tử $\max(\text{mức_rủi_ro}, 0)$

4.3. Đầu ra

Số liệu rủi ro riêng biệt theo thời gian thi công

Rủi ro tổng theo kịch bản và theo thời gian thi công

Thuật toán này tính toán sự tiến triển của từng rủi ro và tổng rủi ro theo thời gian. Các tương tác rủi ro được nắm bắt thông qua ma trận tương tác và tính ngẫu nhiên trong hành vi rủi ro được mô hình hóa bằng quy trình Wiener. Thuật toán đảm bảo rằng mức độ rủi ro không giảm xuống dưới 0 tại bất kỳ bước thời gian nào.

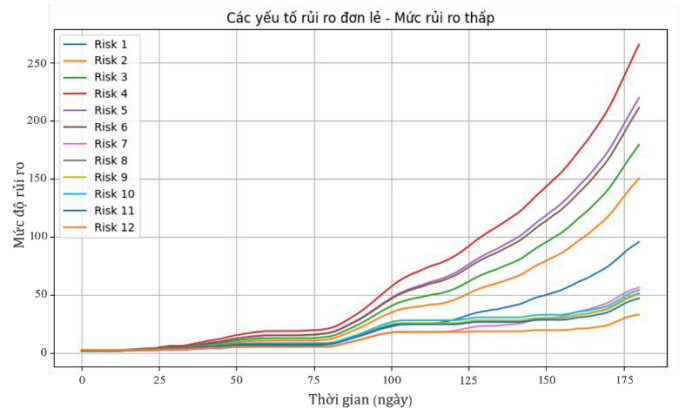
4.4. Áp dụng trên dự án thực tế

Để kiểm định thuật toán, mô hình tham số đề xuất được áp dụng cho một dự án đào móng sâu khoảng 10m tại một khu vực trên địa bàn thành phố Hà Nội (dự án chưa khởi công); tiến độ phần nền móng là 180 ngày. Các dữ liệu của dự án được trao đổi với ba chuyên gia có hơn 15 năm kinh nghiệm trong thi công nền móng, đào sâu ở khu vực đô thị tại Việt Nam. Từ các dữ liệu nhận được, các chuyên gia ước tính 3 trường hợp cho rủi ro ban đầu (mức độ thấp, mức độ trung bình, mức độ cao). Các số liệu đầu vào như cường độ rủi ro ban đầu, các hệ số tương tác giữa các rủi ro, tỉ lệ tăng trưởng và giảm thiểu, cũng như các tham số biến động cũng được cung cấp bởi các chuyên gia thông qua kinh nghiệm, dữ liệu lịch sử, và thảo luận của các chuyên gia.

4.5. Kết quả mô phỏng

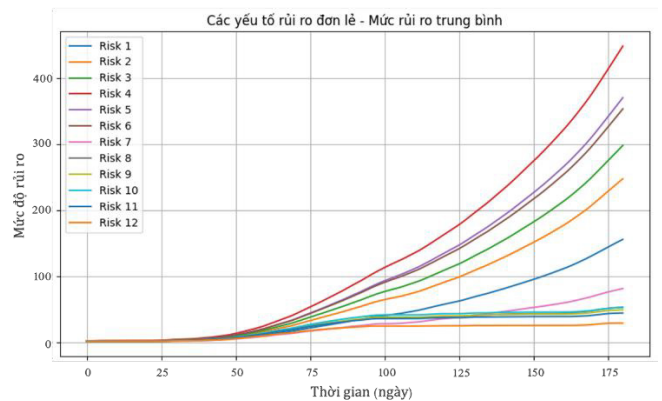
Từ các thông tin đầu vào, các tác giả sử dụng mô phỏng Monte Carlo để chạy thuật toán cho các kịch bản của rủi ro (thấp, trung bình, cao) trong thời gian tiến độ của dự án với 5,000 lần lặp. Các đồ thị thu được nắm bắt cách rủi ro phát triển động do tương tác, tăng trưởng và hiệu ứng ngẫu nhiên.

Hình 1 thể hiện một trường hợp của kịch bản rủi ro thấp. Trong đó, mức tăng của các rủi ro tương đối chậm trong suốt vòng đời của phần xây dựng ngầm, và mức rủi ro tích lũy vẫn tương đối thấp do các điều kiện ban đầu thuận lợi và biến động thấp hơn.



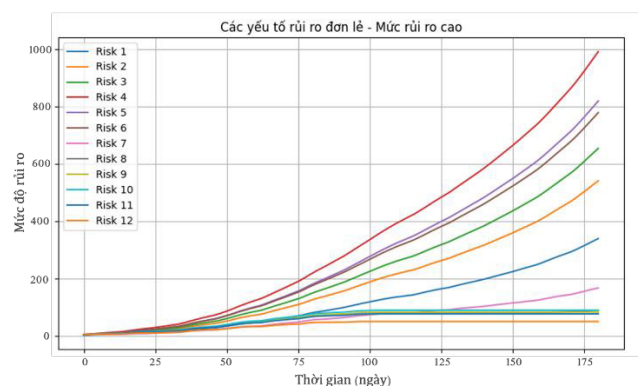
Hình 1. Sự phát triển của các rủi ro đơn lẻ - trường hợp rủi ro thấp.

Hình 2 thể hiện một trường hợp của kịch bản rủi ro trung bình. Có thể thấy các rủi ro riêng lẻ thể hiện mức tăng trưởng vừa phải. Sự tương tác giữa các rủi ro khiến một số rủi ro tăng nhanh hơn những rủi ro khác.



Hình 2. Sự phát triển của các rủi ro đơn lẻ - trường hợp rủi ro trung bình.

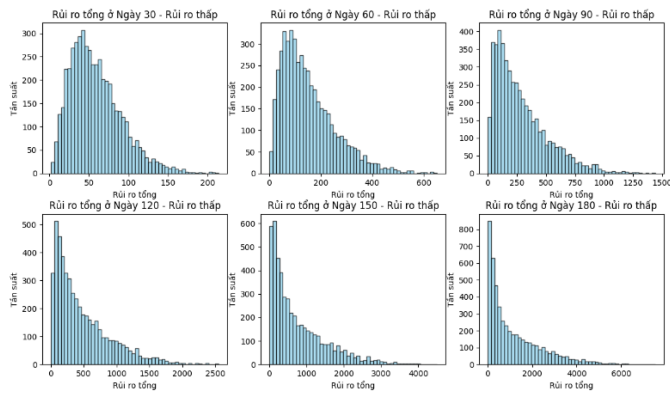
Đồ thị trên Hình 3 thể hiện một trường hợp trong kịch bản rủi ro cao. Các rủi ro trong trường hợp này tăng nhanh và có mức tích lũy cao nhất do các yếu tố biến động và tương tác lẫn nhau.



Hình 3. Sự phát triển của các rủi ro đơn lẻ - trường hợp rủi ro cao.

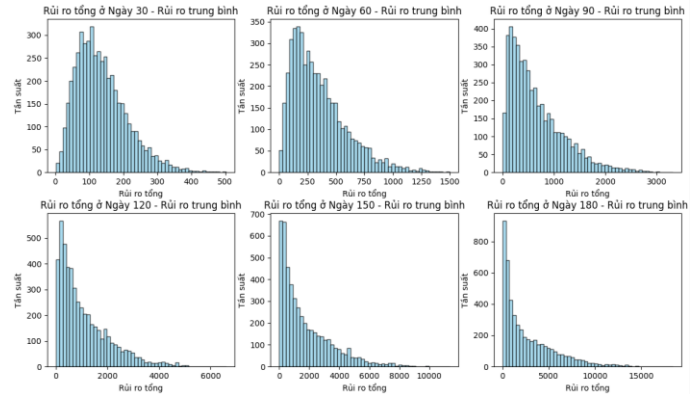
Có thể nhận thấy, trong cả 3 trường hợp, rủi ro R_4 (gián đoạn công năng xung quanh) đều có mức tích lũy rất cao trong cả giai đoạn xây dựng. Điều này là hợp lý, bởi bất kì rủi ro nào cũng đều ảnh hưởng tới công năng của hạ tầng liên quan xung quanh, và do đó giá trị phần tử của ma trận tương tác liên quan đến R_4 cũng hợp lý. Trong khi đó, rủi ro ảnh hưởng môi trường tới nước ngầm, nước mặt (R_{12}) luôn tích lũy ở mức thấp nhất trong cả 3 trường hợp. Có thể trong nhận thức của các chuyên gia, rủi ro này ảnh hưởng tới các khách thể bên ngoài dự án hơn là trong nội bộ dự án, và cũng có thể do tại Việt Nam, nhận thức về bảo vệ môi trường vẫn chưa trở thành mối quan tâm lớn nhất khi thi công xây dựng công trình.

Các nhận định về sự biến động của các rủi ro riêng lẻ khá quan trọng ở từng thời điểm, nó giúp các nhà quản lý xây dựng nhận thức được tình hình thực tế và trợ giúp đưa ra quyết định liên quan đến việc xử lý các rủi ro nào cấp thiết nhất. Tuy nhiên, tổng rủi ro cũng rất quan trọng khi nó giúp người quản lý nắm được tình hình một cách tổng thể, từ đó đưa ra các dự đoán có ích về các ứng xử của dự án. Các Hình 4, 5, 6 thể hiện thống kê của rủi ro tổng thể của lần lượt 3 trường hợp thấp, trung bình, và cao. Trong đó, phân phối rủi ro tổng được kiểm tra ở khoảng thời gian ở ngày thứ 30, 60, 90, 120, 150, và 180.

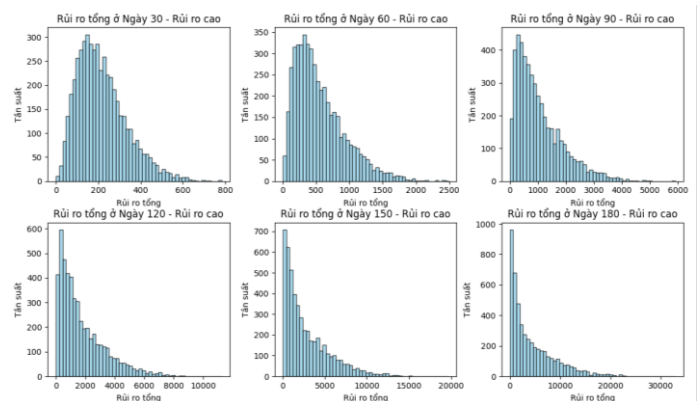


Hình 4. Phân phối rủi ro tổng thể - trường hợp rủi ro thấp - tại một số thời điểm của dự án.

Dữ liệu cho Trường hợp rủi ro thấp cho thấy sự dao động đáng kể trong mức độ rủi ro suốt thời gian dự án. Giai đoạn đầu của dự án, giá trị rủi ro ở mức thấp. Ví dụ ở ngày thứ 30, khoảng biến thiên từ 10 đến hơn 200 đơn vị. Về cuối dự án, thậm chí khoảng biến thiên lớn nhất đến hơn 6000 đơn vị. Xu hướng tăng lên này cho thấy khi dự án chuyển từ giai đoạn lập kế hoạch sang triển khai, các yếu tố bất định và các vấn đề tiềm ẩn trở nên rõ ràng hơn. Các yếu tố góp phần có thể bao gồm các hoạt động xây dựng phức tạp, hạn chế nguồn lực hoặc điều kiện hiện trường không như mong đợi.



Hình 5. Phân phối rủi ro tổng thể - trường hợp rủi ro trung bình - tại một số thời điểm của dự án.



Hình 6. Phân phối rủi ro tổng thể - trường hợp rủi ro cao - tại một số thời điểm của dự án.

Ở cả ba trường hợp, phân phối rủi ro tổng thể càng ngày càng lệch phải ở các thời điểm kiểm tra phía sau, thể hiện hiệu ứng cộng hưởng của từng rủi ro riêng lẻ và rủi ro tổng thể. Cần chú ý, các biểu đồ được vẽ với “góc nhìn” từ ngày số 0, nghĩa là hồ sơ rủi ro thực tế của các ngày 30, 60, 90, 120, 150, 180 không được cập nhật. Nếu áp dụng cho dự án thực tế theo đúng tiến độ, các dự đoán sẽ chụm hơn với hình dáng phân phối giảm được độ lệch phải vì độ bất định giảm đi. Ví dụ, ở thời điểm ngày 60, nếu muốn dự đoán cho thời gian còn lại, mô hình sẽ được tính toán với toàn bộ hồ sơ rủi ro thực tế cho đến ngày 60 đã được cập nhật một cách chính xác.

4.6. Thảo luận và đề xuất của chuyên gia

Sau khi nghiên cứu các phân phối thống kê và các giá trị rủi ro thu nhận được, các chuyên gia đánh giá rằng phương pháp này phản ánh sự biến đổi của từng rủi ro và cách chúng tổng hợp thành rủi ro tổng thể. Các chuyên gia lưu ý rằng các hiệu ứng tương tác giữa các rủi ro đã được thể hiện hợp lý, phù hợp với kinh nghiệm của họ khi quan sát các dự án có hồ đào sâu. Một số thảo luận về mặt ứng dụng trong quản lý xây dựng được các chuyên gia đề xuất như sau:

- a. Các thảo luận liên quan đến hiệu quả của mô hình:

Mô hình phân tích sự thay đổi trong phân phối tổng rủi ro mang lại nhiều lợi ích:

- *Khả năng dự đoán.* Bằng cách xác định các mô hình trong phân phối rủi ro, mô hình cho phép các nhà quản lý dự án dự đoán các giai đoạn có rủi ro cao. Ví dụ, nhận biết sự gia tăng rủi ro giữa dự án trong trường hợp 2 giúp các nhà quản lý thực hiện các biện pháp chủ động để giảm thiểu các vấn đề tiềm ẩn.

- *Hỗ trợ ra quyết định.* Mô hình cung cấp thông tin hỗ trợ các quyết định quan trọng liên quan đến phân bổ nguồn lực, lập tiến độ và chiến lược giảm thiểu rủi ro. Nó hỗ trợ cách tiếp cận dựa trên dữ liệu, từ đó nâng cao hiệu quả của các hành động quản lý.

- *Khả năng tùy chỉnh.* Mô hình có thể được điều chỉnh cho các dự án khác nhau, tùy thuộc vào các yếu tố rủi ro và đặc điểm cụ thể của từng dự án. Điều này đảm bảo tính ứng dụng của nó trong nhiều bối cảnh xây dựng khác nhau.

- *Tiềm năng nâng cao kết quả quản lý dự án.* Việc sử dụng hiệu quả mô hình có thể dẫn đến việc giảm thiểu các trì hoãn, tiết kiệm chi phí và nâng cao chất lượng dự án. Bằng cách quản lý rủi ro một cách chủ động, các dự án có nhiều khả năng đạt được các mục tiêu và đáp ứng sự mong đợi của các bên liên quan.

b. Các thảo luận liên quan đến quản lý rủi ro và quản lý dự án:

- *Phân bổ nguồn lực.* Việc phân bổ nguồn lực hiệu quả trong các giai đoạn có rủi ro cao là rất quan trọng. Ví dụ trong trường hợp 1 (rủi ro thấp), sự gia tăng rủi ro trong giai đoạn giữa cho thấy cần tăng cường giám sát công trường hoặc tăng cường sự phối hợp giữa các nhà thầu phụ hoặc bộ phận để xử lý các vấn đề tiềm ẩn.

- *Chiến lược giảm thiểu rủi ro.* Việc điều chỉnh các chiến lược giảm thiểu rủi ro theo hồ sơ rủi ro của dự án là rất quan trọng. Ví dụ trong trường hợp 2 (rủi ro trung bình), việc đầu tư vào lập kế hoạch chi tiết và tham gia đầy đủ các bên liên quan ngay từ đầu có thể giúp giải quyết các rủi ro cao ngay từ ban đầu. Các phương pháp có thể bao gồm nghiên cứu tính khả thi toàn diện và sự tham gia sớm của các nhà thầu.

- *Lập tiến độ dự án.* Việc điều chỉnh tiến độ dự án dựa trên mức độ rủi ro có thể giúp dự án tiến triển thuận lợi hơn. Ví dụ trong tất cả các trường hợp trên, việc thêm các khoảng đệm thời gian trong giai đoạn giữa—khi rủi ro cao—có thể giúp giải quyết các sự cố bất ngờ và trì hoãn tiềm ẩn. Đối với trường hợp 2, việc hoàn thành các hoạt động sớm hơn có thể giúp giảm rủi ro trong giai đoạn đầu.

- *Giao tiếp với các bên liên quan trên công trường.* Việc giao tiếp minh bạch về mức độ rủi ro sẽ tăng cường sự tự tin của các bên liên quan và tạo điều kiện cho việc quản lý rủi ro theo cách hợp tác. Báo cáo rủi ro thường xuyên và việc các bên liên quan tham gia vào quá trình giảm thiểu rủi ro có thể cải thiện kết quả dự án.

c. Các thảo luận liên quan đến nâng cao năng lực dự báo và ứng phó rủi ro của nhà thầu:

- *Thực hiện đánh giá rủi ro liên tục.* Việc cập nhật thường xuyên các phân tích rủi ro giúp nhận diện kịp thời các rủi ro mới phát sinh. Sử dụng các công cụ và công nghệ để thu thập dữ liệu theo thời gian thực có thể tăng cường độ chính xác của mô hình trong việc dự đoán.

- *Tùy chỉnh kế hoạch quản lý rủi ro.* Phát triển các kế hoạch quản lý rủi ro phản ánh chính xác hồ sơ rủi ro của dự án sẽ nâng cao hiệu quả. Đối với các dự án tương tự như trường hợp 1, kế hoạch cần tập trung vào việc tăng cường nỗ lực giảm thiểu trong giai đoạn giữa.

- *Nâng cao thu thập dữ liệu.* Việc cải thiện chất lượng và chi tiết của dữ liệu rủi ro cho phép mô hình hóa chính xác hơn. Việc ghi chép chi tiết về các sự kiện rủi ro, tác động của chúng và các biện pháp giảm thiểu giúp cải thiện quá trình phân tích và ra quyết định.

- *Đầu tư vào đào tạo.* Trang bị cho các nhóm dự án các kỹ năng trong phân tích và quản lý rủi ro đảm bảo họ có thể sử dụng hiệu quả mô hình và thực hiện các chiến lược phù hợp.

5. Kết luận

Nghiên cứu này đề xuất một mô hình tham số để đánh giá và kiểm soát rủi ro trong các dự án có thi công đào sâu ở khu vực đô thị Việt Nam. Qua các bước xây dựng, kiểm chứng và áp dụng, nghiên cứu đã đạt được một số kết quả quan trọng, không chỉ về mặt lý thuyết mà còn mở ra những ứng dụng thực tiễn có giá trị cho lĩnh vực quản lý rủi ro trong xây dựng.

Trước tiên, nghiên cứu đã tổng hợp được 12 yếu tố rủi ro chính thường gặp trong các dự án đào sâu. Những yếu tố rủi ro này bao gồm các vấn đề như sự mất ổn định và sụp đổ nền đất, nước ngầm xâm nhập, hư hỏng các công trình lân cận, gián đoạn các công năng và nguy hiểm về an toàn lao động. Các rủi ro này đã được xác nhận thông qua quá trình tham khảo ý kiến của các chuyên gia có nhiều kinh nghiệm trong lĩnh vực xây dựng, từ đó đảm bảo tính khả thi và thực tiễn của các rủi ro khi áp dụng vào bối cảnh Việt Nam.

Thứ hai, nghiên cứu đã phát triển một mô hình tham số, được xây dựng dựa trên các phương trình vi phân ngẫu nhiên để mô tả sự phát triển động của các rủi ro theo thời gian. Mô hình này được thể hiện tường minh về mặt toán học, với việc định lượng sự tương tác giữa các yếu tố rủi ro thông qua ma trận tương tác. Độ chính xác và tính hợp lý của mô hình này được đảm bảo thông qua các phương trình mô tả chi tiết sự ảnh hưởng của các yếu tố tăng trưởng, sự giảm thiểu và độ bất định của các rủi ro. Bằng việc tích hợp các biến động ngẫu nhiên, mô hình có thể mô phỏng sự tăng trưởng của các rủi ro với mức độ hợp lý, đảm bảo rằng các rủi ro giảm dần khi các biện pháp can thiệp hiệu quả được áp dụng hoặc khi các rủi ro – mặc dù được dự báo – không hiện thực hóa.

Thứ ba, nghiên cứu đã chứng minh tính ứng dụng của mô hình thông qua việc áp dụng vào một ví dụ mẫu, trong đó các yếu tố rủi ro được mô phỏng và phân tích dựa trên điều kiện thực tiễn của một dự án đào sâu điển hình tại khu vực đô thị ở Việt Nam. Kết quả cho thấy mô hình không chỉ đưa ra những dự báo hợp lý về sự phát triển của từng yếu tố rủi ro mà còn có khả năng dự báo tổng rủi ro tích lũy của dự án. Quan trọng hơn, những kết quả này được thể hiện một cách dễ hiểu và rõ ràng, giúp các nhà quản lý dự án có thể sử dụng các kết quả từ mô hình này để truyền đạt và thuyết phục các bên liên quan một

cách hiệu quả. Đây là một bước tiến quan trọng trong việc tích hợp các công cụ kỹ thuật hiện đại vào quản lý dự án.

Ngoài ra, nghiên cứu đã gợi ý một công cụ quản lý rủi ro mới cho việc dự báo và kiểm soát rủi ro trong các dự án xây dựng. Mô hình này không chỉ giúp dự báo rủi ro tại từng giai đoạn của dự án mà còn cung cấp phương pháp để điều chỉnh các biện pháp can thiệp một cách linh hoạt theo thời gian. Với khả năng mô phỏng các kịch bản rủi ro khác nhau và phản ứng với dữ liệu thực tế, mô hình này trở thành một công cụ quản lý rủi ro tiên tiến và hiệu quả. Đặc biệt, nó cung cấp một cách tiếp cận chủ động cho các nhà quản lý trong việc dự đoán các giai đoạn có mức độ rủi ro cao và phân bổ nguồn lực hợp lý nhằm giảm thiểu các nguy cơ tiềm ẩn.

Mặc dù có một số hạn chế, ví dụ như chưa theo dõi dự án mẫu đến hết vòng đời dự án, hoặc ma trận tương tác mới chỉ được xây dựng từ một số ít các chuyên gia, nghiên cứu này không chỉ cung cấp một mô hình tham số mới để đánh giá và kiểm soát rủi ro mà còn đóng góp một cách tiếp cận khoa học để quản lý các dự án xây dựng phức tạp trong bối cảnh đô thị. Mô hình này có tiềm năng được áp dụng rộng rãi trong các dự án đào sâu và các dự án xây dựng khác, nơi mà các yếu tố rủi ro cần được dự đoán và kiểm soát một cách hiệu quả. Nghiên cứu cũng mở ra nhiều hướng phát triển mới, bao gồm việc mở rộng mô hình để tích hợp thêm các yếu tố rủi ro khác, chẳng hạn như rủi ro tài chính, rủi ro về pháp lý hoặc các yếu tố môi trường. Hoặc mô hình tham số cũng có thể được sử dụng để lựa chọn các quyết định quản lý tối ưu làm giảm tối đa mức độ rủi ro tổng cộng đối với dự án. Ngoài ra, việc ứng dụng mô hình này vào các dự án thực tế sẽ cung cấp thêm dữ liệu để kiểm định và hiệu chỉnh các tham số của mô hình, đảm bảo tính chính xác và linh hoạt của mô hình trong các điều kiện khác nhau.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Trường Đại học Xây dựng Hà Nội cho đề tài mã số 23-2024/KHXD. Bài báo này là sản phẩm của đề tài trên.

Tài liệu tham khảo

[1]. Chu Tuấn Hạ, "Nghiên cứu phân tích mô hình đất nền Hà Nội cho hố đào sâu," Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội, 2011.

[2]. Ngô Văn Quân, "Nghiên cứu tác động của biện pháp thi công đến chuyển vị hố móng công trình thủy lợi trong điều kiện nền đất yếu," *Tạp Chí Khoa Học Và Công Nghệ Thủy Lợi*, vol. 79, 2023.

[3]. H. Liu, W. Bin Li, and H. T. Liu, "Analysis and process control of the deformation for deep excavation in soft clay," in *Applied Mechanics and Materials*, 2014. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.395.

[4]. C. Moormann, "Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database," *Soils and Foundations*, vol. 44, no. 1, 2004, doi: 10.3208/sandf.44.87.

[5]. N. D. Đ. Khoa, Đ. T. Sỹ, and P. T. Hải, "Đánh giá những nhân tố gây ảnh hưởng đến chất lượng tường vây, tường chắn đất trong các dự án xây dựng ở Việt Nam," *Tạp chí Vật liệu & Xây dựng - Bộ Xây dựng*, vol. 11, no. 05, 2022, doi: 10.54772/jomc.05.2021.236.

[6]. T. Bahr, M. A. H. Hassan, A. A. A. M, and H. Hemeida, "PERFORMANCE OF DIAPHRAGM WALL IN COHESIVE SOILS UNDER STATIC AND SEISMIC LOADING CONDITIONS," *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, vol. 13, no. 48, 2018, doi: 10.21608/aej.2018.18973.

[7]. E. Pujades, A. Jurado, J. Carrera, E. Vázquez-Suñé, and A. Dassargues, "Hydrogeological assessment of non-linear underground enclosures," *Eng Geol*, vol. 207, 2016, doi: 10.1016/j.enggeo.2016.04.012.

[8]. A. T. C. Goh, R. H. Zhang, W. Wang, L. Wang, H. L. Liu, and W. G. Zhang, "Numerical study of the effects of groundwater drawdown on ground settlement for excavation in residual soils," *Acta Geotech*, vol. 15, no. 5, 2020, doi: 10.1007/s11440-019-00843-5.

[9]. J. C. Wang, J. J. Liu, and W. H. Hou, "Risk assessment based on fuzzy fault tree for waterproofing accidents in deep excavation," in *Advanced Materials Research*, 2013. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.739.732.

[10]. H. W. Ying, K. Cheng, L. S. Zhang, C. Y. Ou, and Y. W. Yang, "Evaluation of excavation-induced movements through case histories in Hangzhou," *Engineering Computations (Swansea, Wales)*, vol. 37, no. 6, 2020, doi: 10.1108/EC-06-2019-0256.

[11]. P. Q. Tú and N. N. Toàn, "Phân tích rủi ro trong thi công hố đào sâu," *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCNXD) - ĐHXD*, vol. 14, no. 5V, 2020, doi: 10.31814/stce.nuce2020-14(5v)-09.

[12]. H. K. Nangulama and Z. Jian, "Deformation Control Monitoring of Basement Excavation at Field Construction Site: A Case of Hydraulic Servo Steel Enhancement Geotechnology," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/6234581.

[13]. J. H. Wang, J. J. Chen, and M. G. Li, "Concept and characters of deep excavation groups in urban underground space development," in *15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ARC 2015: New Innovations and Sustainability*, 2015. doi: 10.3208/jgssp.ATC6-07.

[14]. A. M. Hajji and P. Lewis, "Development of productivity-based estimating tool for energy and air emissions from earthwork construction activities," *Smart and Sustainable Built Environment*, vol. 2, no. 1, 2013, doi: 10.1108/20466091311325863.

[15]. X. Ouyang, J. Nie, and X. Xiao, "Study of Improved Grey BP (Back Propagation) Neural Network Combination Model for Predicting Deformation in Foundation Pits," *Buildings*, vol. 13, no. 7, 2023, doi: 10.3390/buildings13071682.

[16]. C. Li, W. Chunlong, W. Xi, and C. Kexu, "Stability Analysis of Surrounding Rock of Large Section Ultradeep Shaft Wall," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/4391759.

[17]. N. D. Đ. Khoa, Đ. T. Sỹ, and P. T. Hải, "Nhận định những rủi ro chính khi thi công nhà cao tầng trong giai đoạn ngầm khi áp dụng phân tích mạng lưới xã hội Social Network Analysis (SNA)," *Tạp chí Vật liệu & Xây dựng - Bộ Xây dựng*, vol. 13, no. 02, 2023, doi: 10.54772/jomc.02.2023.482.

[18]. D. Wang, S. Ye, and J. Zhang, "Risk Reduction Measures and Monitoring Analysis of Deep Foundation Pit with Water in a Metro Station in Hefei," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 16, 2023, doi: 10.3390/w15163007.

[19]. C. Cao *et al.*, "Novel Excavation and Construction Method for a Deep Shaft Excavation in Ultrathick Aquifers," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/1827479.

[20]. N. SHI, Z. SHI, C. TONG, and X. JIN, "Construction Mechanics of Ultra Deep Ventilation Shaft in Subway Station under Complex Engineering Environment," *DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences*, no. eece, 2019, doi: 10.12783/dteees/eece2019/31562.

[21]. E. Pujades *et al.*, "Deep enclosures versus pumping to reduce settlements during shaft excavations," *Eng Geol*, vol. 169, 2014, doi: 10.1016/j.enggeo.2013.11.017.