



TẠP CHÍ XÂY DỰNG - eISSN 3030-4482

Phương pháp Phân tích rủi ro cho các công trình hạ tầng

A Risk Analysis method for infrastructure projects

➤ **PGS.TS Bùi Trọng Cầu**

Trường Đại học Giao thông vận tải

Email: buitrongcau@utc.edu.vn

THÔNG TIN BÀI BÁO

Chuyên mục: Khoa học công nghệ

Ngày nhận bài: 09/4/2026

Ngày sửa bài: 17/4/2026

Ngày chấp nhận đăng: 28/4/2026

Ngày xuất bản Online: 24/5/2026

Tác giả liên hệ:

Email: buitrongcau@utc.edu.vn

TÓM TẮT

Nhu cầu ngày càng tăng về phát triển các công trình hạ tầng do sự gia tăng dân số, quá trình đô thị hóa, công nghiệp hóa càng đặt ra những thách thức to lớn đối với việc quản lý rủi ro toàn diện và hiệu quả các công trình hạ tầng. Việc quản lý rủi ro của các công trình hạ tầng ngày một lớn và hiện đại hơn sẽ ngày một khó khăn và tốn kém chi phí hơn do nhiều nguyên nhân khác nhau. Bài báo giới thiệu một phương pháp phân tích rủi ro cho các công trình hạ tầng dựa trên lý thuyết xác suất, có thể áp dụng cho cả các công trình hạ tầng độc lập và các công trình hạ tầng có quan hệ chặt chẽ với nhau trong một hệ thống hạ tầng mang tính tổng thể. Bài báo tập trung sâu vào vấn đề mô hình hóa rủi ro và các khía cạnh đánh giá của quản lý rủi ro nhằm cung cấp một công cụ để tính toán và xem xét các giải pháp đối với việc phân bổ các nguồn lực quý giá nhằm bảo đảm sự an toàn và hiệu quả của các công trình hạ tầng.

Từ khóa: Công trình hạ tầng; rủi ro; nhận biết; mô hình hóa; đánh giá; quản trị; phân tích đánh đổi Lợi - Hại.

ABSTRACT

Growing demand of developing infrastructure projects and systems by expanding population, urbanization and industrialization creates critical challenges for comprehensive risk management for infrastructure projects. The risk management for great and modern infrastructure projects will become increasingly difficult and costly because of many different reasons. This paper presents a Risk Analysis Method for

infrastructure projects based on probability theory that can be applied to risk management for both independent infrastructure projects and infrastructure systems. The paper especially focuses on the risk modelling and assessment of risk management to provide a tool for calculating and considering alternatives to allocate precious resources for safety and efficiency of infrastructure projects.

Keywords: Infrastructure projects; risk, identification; modelling; assessment; administration; trade-off analysis.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việc bảo vệ các công trình hạ tầng khỏi các thảm họa tự nhiên và các nguyên nhân do chính con người gây ra phụ thuộc vào chiến lược quản lý rủi ro một cách toàn diện và hiệu quả. Chiến lược toàn diện này bao gồm từ việc nhận biết, đánh giá các rủi ro tới việc vạch ra các biện pháp phòng ngừa nhằm loại trừ các rủi ro hoặc ít nhất là giảm thiểu các tác động tiêu cực do các yếu tố rủi ro gây ra. Nhu cầu ngày càng tăng về phát triển các công trình hạ tầng do sự gia tăng dân số, quá trình đô thị hóa, công nghiệp hóa càng đặt ra những thách thức to lớn đối với việc quản lý rủi ro toàn diện và hiệu quả các công trình hạ tầng. Việc quản lý rủi ro của các công trình hạ tầng ngày càng lớn và hiện đại hơn sẽ làm cho khó khăn và tốn kém chi phí hơn do nhiều nguyên nhân khác nhau. Vì vậy, việc thấu hiểu các yêu cầu, các mối đe dọa, thách thức cũng như các giải pháp đề phòng, loại trừ các rủi ro hoặc ít nhất là giảm thiểu các tác động tiêu cực từ các yếu tố rủi ro đóng vai trò hết sức quan trọng.

Bài báo giới thiệu một phương pháp phân tích rủi ro cho các công trình hạ tầng dựa trên lý thuyết xác suất, có thể áp dụng cho cả các công trình hạ tầng độc lập và các hệ thống hạ tầng, trong đó các công trình hạ tầng có quan hệ chặt chẽ với nhau trong một hệ thống hạ tầng mang tính tổng thể (sau đây gọi chung là các công trình hạ tầng). Nó bao gồm việc nhận biết, đánh giá các tác động rủi ro tiềm năng, đưa ra các yêu cầu về nguồn lực và chi phí cho những người ra quyết định. Bài báo tập trung sâu vào mô hình hóa rủi ro và các khía cạnh đánh giá của quản lý rủi ro nhằm cung cấp một công cụ để tính toán, xem xét các biện pháp hiệu quả đối với việc phân bổ các nguồn lực quý giá nhằm bảo đảm sự an toàn của các công trình hạ tầng. Bài báo cũng xem xét các công cụ để đưa ra các giải pháp khác nhau và đánh giá lựa chọn giải pháp tốt nhất. Vấn đề phân tích “đánh đổi lợi - hại” (trade - off analysis) của các giải pháp khả thi để quản lý rủi ro hiệu quả cũng sẽ được đề cập.

2. KHÁI NIỆM VỀ QUẢN LÝ RỦI RO

Một cách khái quát, quản lý rủi ro bao gồm các bước:

2.1. Nhận biết rủi ro

Rủi ro có thể xảy ra bởi rất nhiều nguyên nhân khách quan và chủ quan và được phân loại theo nhiều cách khác nhau. Việc lập bảng kê các nguyên nhân và các yếu tố rủi ro vẫn là công cụ đơn giản nhưng hữu ích và phổ biến trong phân tích rủi ro. Tuy nhiên, phương pháp nhận biết rủi ro truyền thống này cũng có nhiều nhược điểm.

2.2. Đánh giá rủi ro

Đánh giá rủi ro bao gồm việc đánh giá xác suất xảy ra rủi ro và những hậu quả khi xảy ra rủi ro. Rủi ro được lượng hóa bằng công thức tổng quát sau:

$$R = P(r) \times H(r) \quad (1)$$

Trong đó, $P(r)$ là xác suất xảy ra rủi ro đang xét; $H(r)$ là những hậu quả khi xảy ra rủi ro.

2.3. Quản trị rủi ro

Quản trị rủi ro là việc vạch ra các giải pháp phòng, chống nhằm loại bỏ rủi ro hoặc giảm thiểu các tác động tiêu cực khi xảy ra rủi ro.

3. PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH RỦI RO CHO CÁC CÔNG TRÌNH HẠ TẦNG

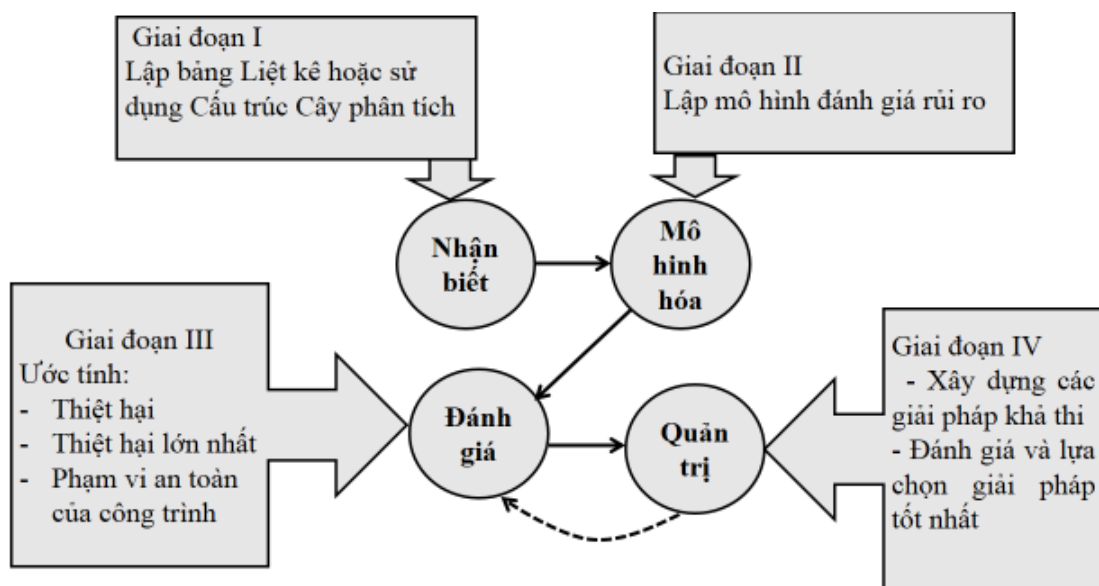
Bài báo này trình bày phương pháp phân tích rủi ro cho các công trình hạ tầng với 4 giai đoạn sau đây (Hình 1).

Giai đoạn I: Nhận biết các rủi ro đối với công trình hạ tầng (đang xét).

Giai đoạn II: Mô hình hóa các rủi ro đối với công trình.

Giai đoạn III: Đánh giá các rủi ro đối với công trình.

Giai đoạn IV: Quản trị các rủi ro đối với công trình.



Hình 1. Bốn giai đoạn phân tích rủi ro cho các công trình hạ tầng

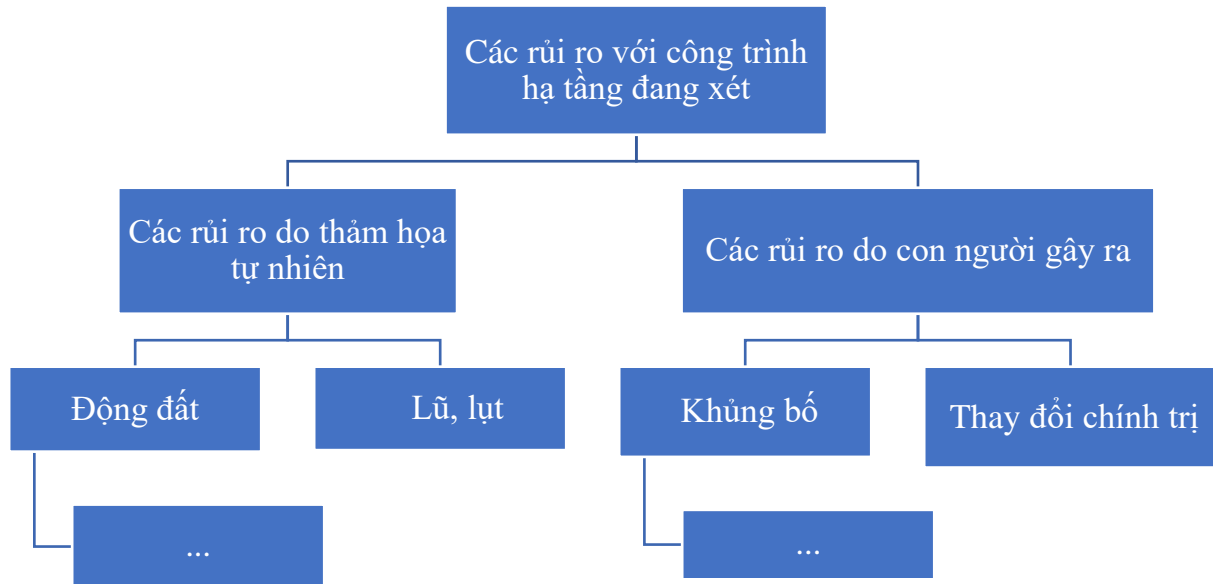
3.1. Giai đoạn I: Nhận biết các rủi ro đối với các công trình hạ tầng

Phương pháp truyền thống được nhiều cơ quan, tổ chức trên thế giới hay dùng là sử dụng bảng liệt kê (Check-list) các rủi ro có thể xảy ra. Đây là công cụ đơn giản nhưng hữu ích và phổ biến. Tuy nhiên, phương pháp gần với tư duy của con người là phương pháp sử dụng cây phân tích (Analytic Hierarchy) như trên Hình 2. Phương pháp này cho phép xem xét các rủi ro ở nhiều góc độ khác nhau theo các cách phân loại khác nhau cũng như cho phép phân tích tỉ mỉ mỗi rủi ro thành các rủi ro thành phần nhỏ hơn một cách dễ dàng. Hơn thế nữa, phương pháp này rất thuận lợi cho Giai đoạn II “Mô hình hóa các rủi ro” và Giai đoạn III “Đánh giá các rủi ro”.

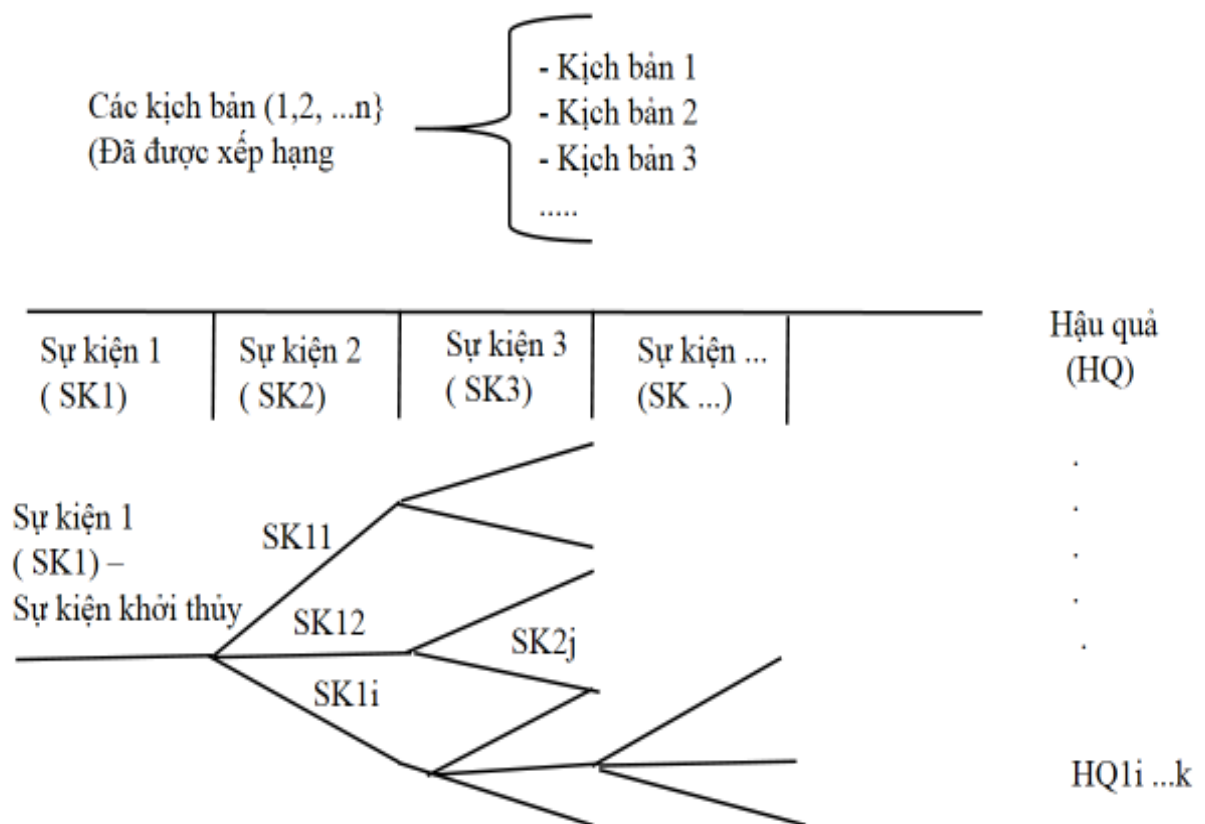
3.2. Giai đoạn II: Mô hình hóa các rủi ro các công trình hạ tầng

Sau khi nhận biết các rủi ro, xếp hạng sự dễ bị tổn thương, thiệt hại, chúng ta có thể tập trung vào việc xây dựng các kịch bản rủi ro khác nhau ở giai đoạn II. Mục tiêu của mô hình rủi ro là cung cấp các thông tin mô tả trạng thái của các hậu quả cho các kịch bản khác nhau. Dưới đây là một thí dụ về “cây sự kiện” được sử dụng như một công cụ để xây dựng mô hình rủi ro cho các công trình hạ tầng (Hình 3). Phân tích cây sự kiện bằng cách đặt ra các câu hỏi “*chuyện gì sẽ xảy ra, nếu...*” để xác định thứ tự xảy ra của các sự kiện dẫn tới các hậu quả. Từ cây sự kiện này, chúng ta có thể xây dựng các hàm mật độ xác suất và xác suất vượt quá các ngưỡng cho phép khi sự kiện nào đó xảy ra,

chẳng hạn như khả năng chịu lực tối đa của công trình cầu khi có động đất hay mực nước cao nhất đê đập có thể ngăn... Cây sự kiện cũng cho phép chúng ta dự báo các kết quả khi áp dụng các biện pháp phòng chống rủi ro hay giảm thiểu các tác động tiêu cực do rủi ro gây ra.



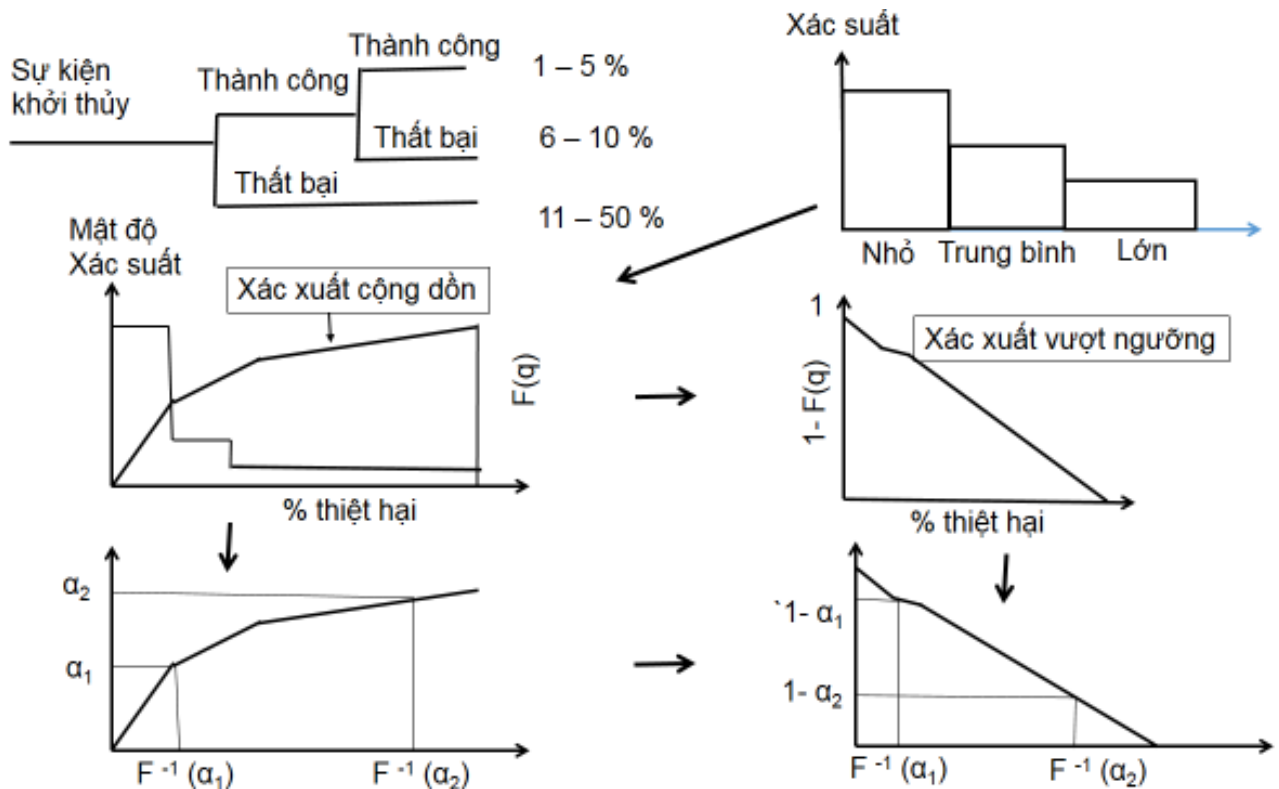
Hình 2. Mô hình cấu trúc cây phân tích nhận biết các rủi ro



Hình 3. Thí dụ về phân tích cây sự kiện

Hình 3 là thí dụ về phân tích cây sự kiện cho trường hợp khủng bố tấn công hệ thống máy tính của một nhà máy điện với mục tiêu phá hoại khả năng cấp điện của nhà

máy chẳng hạn. Giả sử khả năng chúng tấn công là p thì khả năng chúng không tấn công là $(1-p)$. Giả sử nhà máy có hệ thống tường lửa có khả năng ngăn chặn được mọi sự xâm nhập trái phép với xác suất là p_1 thì khả năng hệ thống tường lửa không chống được sẽ là $p_2 = (1 - p_1)$... Bằng cách phân tích tương tự có xét đến các giải pháp bảo vệ, ngăn chặn..., chúng ta có thể xác định được khả năng của mỗi tình huống cũng như những thiệt hại kéo theo có thể. Cuối cùng, chúng ta có thể xác định được hàm mật độ xác suất cho mỗi đường (Hình 4).

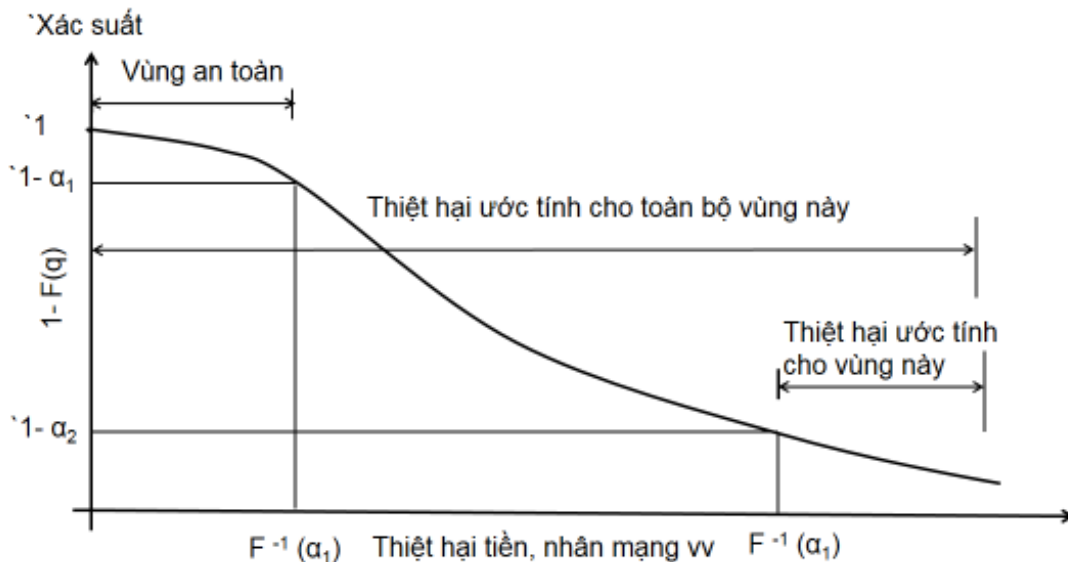


Hình 4. Thí dụ về việc sử dụng cây sự kiện để phân tích rủi ro

Giả sử có thể ước tính được thiệt hại cho mỗi trường hợp hay sự kiện xảy ra, ta có thể xác định được xác suất và thiệt hại ứng với mỗi kịch bản có thể. Nói cách khác, áp dụng công thức (1), ta có thể lượng hóa được mức độ rủi ro có thể xảy ra (Hình 5).

3.3. Giai đoạn III: Đánh giá các rủi ro của các công trình hạ tầng

Áp dụng phương pháp mạo hiểm đa mục tiêu phân hoạch (Partitioned Multi-objective Risk Method) của Asbeck và Haimes [2], giá trị kỳ vọng của các thiệt hại hay hậu quả sẽ được xác định. Điều này không chỉ cho phép những người ra quyết định có thể thấy các giá trị kỳ vọng của các thiệt hại hay hậu quả mà còn hiểu rõ các sự kiện gây “Thiệt hại lớn - Xác suất (xảy ra) nhỏ” và “Thiệt hại nhỏ - Xác suất (xảy ra) lớn”. Nó cũng là công cụ hữu ích thể hiện sự làm việc an toàn của một công trình hay hệ thống hạ tầng. Cách tiếp cận về lượng hóa rủi ro (thông qua xác định $f_2, f_3,$ và f_4 dưới đây) giả định rằng sự kiện khởi thủy đã xảy ra. Cách tiếp cận này xuất phát bởi khái niệm về sự làm việc an toàn của công trình ngay cả khi có một vài loại sự kiện hay biến cố nào đó xảy ra. Việc ước tính các giá trị f_2, f_3, f_4 trong cách tiếp cận này là những sự ước tính về tất cả các trường hợp không an toàn khi có một sự kiện hay biến cố nào đó xảy ra. Theo phương pháp mạo hiểm đa mục tiêu phân hoạch, ta có thể sử dụng 4 hàm rủi ro sau đây để phân hoạch các thiệt hại.



Hình 5. Phương pháp mạo hiểm đa mục tiêu phân hoạch

Gọi:

- Chi phí của một giải pháp nào đó là f_1 ;
- Trường hợp “Thiệt hại nhỏ với xác suất cao” là f_2 ;
- Trường hợp “Thiệt hại lớn với xác suất thấp” là f_3 ;
- Trường hợp kỳ vọng của “Thiệt hại - Chi phí” là f_4 .

Chi phí cho một giải pháp được đề xuất nào đó sẽ được xác định. Mục tiêu là tối thiểu hóa chi phí của giải pháp đang xét:

$$f_1 = \sum (C_i \cdot X_i) \quad i = 1 - n \tag{2}$$

Trong đó:

- C_i là chi phí cho mỗi bộ phận cấu thành giải pháp;
- X_i là các bộ phận cấu thành của giải pháp được đề xuất, $i = 1 - n$. Với mọi giải pháp luôn tồn tại các chi phí để thực hiện, vận hành và bảo trì trong suốt cả đời công trình hay hệ thống hạ tầng.

Đối với phân hoạch xác suất $1/n$ nào đó, một cách toán học, f_2 chính là giá trị kỳ vọng của Q nếu q nhỏ hơn $F^{-1}(\alpha_1)$. Đây là kỳ vọng cho trường hợp tốt nhất. Với một phân hoạch đã biết hoặc giả thiết, $(1 - \alpha_1)$ là xác suất các thiệt hại nhỏ hơn hay tối đa là bằng $F^{-1}(\alpha_1)$. Phân hoạch ứng với $(1 - \alpha_1)$ chính là một đánh giá định tính mà người ra quyết định đưa ra (Hình 4). Ta có:

$$f_2 = E [Q/q < F^{-1}(\alpha_1)] \tag{3}$$

Sau khi đã tính được rủi ro cho một công trình hay hệ thống hạ tầng đang xét, chúng ta có thể tiến hành bước tiếp theo.

Đối với một phân hoạch xác suất $1/n$ nào đó, hàm f_3 là giá trị kỳ vọng của Q với giả thiết rằng q lớn hơn $F^{-1}(\alpha_1)$. Đây là trường hợp tồi tệ nhất. Ta có:

$$f_3 = E [Q/q > F^{-1}(\alpha_2)] \tag{4}$$

Mục tiêu của f_4 là cực tiểu hóa các thiệt hại hay mất mát q , được định nghĩa như là giá trị kỳ vọng của Q , $E[Q]$.

Tóm lại, ta có 4 bước đánh giá rủi ro của các công trình hay hệ thống hạ tầng khi sử dụng phương pháp mạo hiểm đa mục tiêu phân hoạch:

- 1) Xác định xác suất vượt quá các ngưỡng cho phép từ cây phân tích sự kiện

2) Xác định các trường hợp công trình hay hệ thống hạ tầng làm việc an toàn và thiệt hại nghiêm trọng nhất.

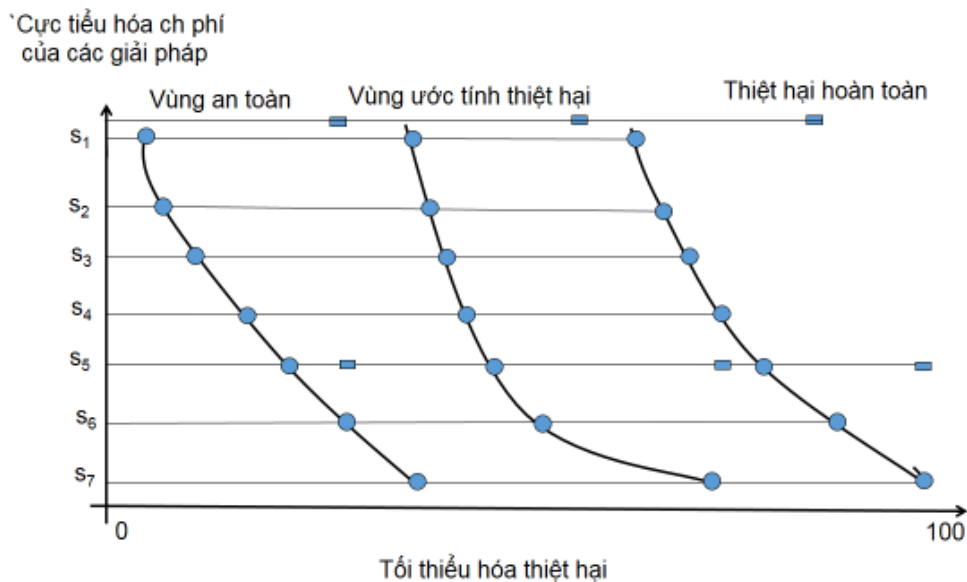
3) Tính toán các trị số của f_4 trong các trường hợp công trình hay hệ thống hạ tầng làm việc an toàn và thiệt hại nghiêm trọng nhất

4) Tính toán các trị số của f_4 cho toàn bộ các trường hợp thiệt hại.

3.4. Giai đoạn IV: Quản trị các rủi ro đối với các công trình hạ tầng

Quản trị rủi ro bắt đầu bằng việc nhận biết định tính về sự an toàn của công trình hay hệ thống hạ tầng. Đây là việc làm của những người ra quyết định vì họ là những người phù hợp nhất để đánh giá mức độ rủi ro có thể chấp nhận được hay không. Giai đoạn này bao gồm cả việc đề xuất các giải pháp với mục đích nâng cao khả năng làm việc an toàn của công trình hay hệ thống hạ tầng. Một số nghiên cứu đã đề xuất áp dụng các phương pháp ra quyết định đa mục tiêu song các phương pháp này cũng có nhiều hạn chế. Phương pháp đã trình bày cho phép nhìn vấn đề một cách đơn giản hơn nhưng sâu sắc hơn và thực tế hơn.

Vấn đề rắc rối nhất ở đây là phân tích “đánh đổi Lợi - Hại” (trade-off analysis) cho các giải pháp liên quan tới mức độ rủi ro. Rõ ràng, vấn đề này phụ thuộc vào mỗi công trình hay hệ thống hạ tầng trong các điều kiện cụ thể. Hình 6 mô tả thí dụ về mức độ rủi ro cho một trường hợp giả định.



Hình 6. Thí dụ về phân tích “Đánh đổi Lợi - Hại” (trade-off analysis) đa mục tiêu

4. KẾT LUẬN

Phương pháp phân tích rủi ro cho các công trình hạ tầng dựa trên lý thuyết xác suất mà bài báo đã giới thiệu cung cấp một cách tiếp cận có hệ thống để thực hiện việc nhận biết, mô hình hóa, đánh giá và quản trị rủi ro. Bốn bước chính của phương pháp - nhận biết, mô hình hóa, đánh giá và quản trị - đã bao quát các khía cạnh của quản lý rủi ro. Phương pháp có thể áp dụng cho nhiều loại hình công trình hạ tầng, cả các công trình hạ tầng độc lập và các hệ thống hạ tầng trong đó các công trình có liên quan chặt chẽ với nhau. Vấn đề lớn nhất ở đây là phân tích “Đánh đổi Lợi - Hại” (trade-off analysis) cho các giải pháp liên quan tới mức độ rủi ro. Đây là vấn đề của những người ra quyết định và nó phụ thuộc vào mỗi công trình hay hệ thống hạ tầng trong các điều kiện cụ thể.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Ang, A. and Tang, W. H. Probability concepts in engineering planning and design. Vol. II, decision, risk and reliability, Wiley, New York. Armstrong, 1984.
- [2] Asbeck, E. and Haines, Y. Y. The partitioned multiobjective risk method. Large Scale Sys., 6(1), pp. 13-38, 1984.
- [3] Ezell, B. C. Risks of cyber attack to supervisory control and data acquisition for water supply. University of Virginia, Charlotte, 1998.
- [4] Haines, Y. Y. Hierarchical holographic modeling. IEEE Trans. on Sys., Man and Cybernetics, SMC-11(9), 1981.
- [5] Haines, Y. Y. Risk modeling, assessment and management. Wiley, New York, 1998.
- [6] Kaplan, S. The words of risk analysis, Risk Anal., 17(4). Lowrance, W. W. (1976). Of acceptable risk, William Kaufmann, Los Altos, Calif, 1997.