



Article info

Type of article:

Original research paper

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2024.vn.4.4.67-75>

***Corresponding author:**

Email address:

tungpx@ntu.edu.vn

Received: 21/11/2024

Revised: 17/12/2024

Accepted: 21/12/2024

Evaluation of the reliability of the top displacement of a space steel frame under the effect of wind load

Phạm Xuân Tùng*, Trần Quang Huy, Đặng Quốc Mỹ, Trương Thành Chung
Faculty of Civil Engineering, Nha Trang University

Abstract: Structural reliability studies the evaluation of the performance of structures and equipment under the influence of random factors based on probability theory. For important buildings, reliability theory is applied in design to cover all risks. In the civil engineering industry, steel structures are increasingly popular due to their outstanding advantages. This report focuses on evaluating the reliability of the top displacement of a seven-story steel space frame subjected to wind loads, with random factors including material properties, cross-sectional dimensions, and loads. The research results contribute to clarifying the importance of using realistic models in reliability studies.

Keywords: Reliability, Monte Carlo, steel frame, displacement, wind load.



Thông tin bài viết

Dạng bài viết:

Bài báo nghiên cứu

DOI:

<https://doi.org/10.58845/jstt.utt.2024.vn.4.4.67-75>

***Tác giả liên hệ:**

Địa chỉ Email:

tungpx@ntu.edu.vn

Ngày nộp bài: 21/11/2024

Ngày nộp bài sửa: 17/12/2024

Ngày chấp nhận: 21/12/2024

Đánh giá độ tin cậy chuyển vị đỉnh khung thép không gian dưới tác dụng của tải trọng gió

Phạm Xuân Tùng*, Trần Quang Huy, Đặng Quốc Mỹ, Trương Thành Chung
Khoa Xây dựng, Trường Đại học Nha Trang

Tóm tắt: Độ tin cậy kết cấu là một lĩnh vực nghiên cứu tập trung vào việc đánh giá khả năng hoạt động ổn định của các công trình và thiết bị dưới tác động của các yếu tố ngẫu nhiên, dựa trên lý thuyết xác suất. Đối với các công trình quan trọng, lý thuyết độ tin cậy được áp dụng rộng rãi trên thế giới trong thiết kế để đảm bảo bao quát các rủi ro tiềm ẩn. Trong ngành xây dựng dân dụng, kết cấu thép ngày càng được sử dụng phổ biến nhờ các ưu điểm vượt trội. Báo cáo này tập trung đánh giá độ tin cậy chuyển vị đỉnh của một khung thép không gian bảy tầng chịu tải trọng gió, với các yếu tố ngẫu nhiên bao gồm đặc tính vật liệu, kích thước tiết diện và tải trọng. Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ tầm quan trọng của việc sử dụng mô hình sát với thực tế trong các nghiên cứu về độ tin cậy.

Từ khóa: Độ tin cậy, Monte Carlo, kết cấu thép, chuyển vị, tải trọng gió.

1. Đặt vấn đề

Đánh giá độ tin cậy của kết cấu là phương pháp xác định mức độ an toàn của kết cấu dựa trên nền tảng xác suất xảy ra hư hỏng hoặc sự cố. Phương pháp này đánh giá khả năng hoạt động của kết cấu và thiết bị dưới tác động của các yếu tố ngẫu nhiên, bao gồm tải trọng [1], đặc tính vật liệu [2], và điều kiện đất nền [3], nhằm đảm bảo an toàn và tối ưu hóa tính kinh tế cho kết cấu trong môi trường hoạt động đã định.

Azam Abdollahi và cộng sự [4] đã đề xuất một phương pháp mới gọi là Soft Monte Carlo, trong đó không gian các biến ngẫu nhiên được chia thành các tọa độ 1-D cục bộ và coi các tọa độ này như một chiều bổ sung cho các biến có dạng khoảng. Emerson và cộng sự [5] trình bày một phương pháp đánh giá xác suất mất lớp thụ động hóa, là lớp hoàn thiện để chống ăn mòn, trong các kết cấu bê tông cốt thép dưới tác động ăn mòn do cacbonat hóa hoặc clorua khuếch tán. Các sự kiện

ngẫu nhiên được tạo ra bởi mô phỏng Monte Carlo để thiết lập nhiều kịch bản tuổi thọ thiết kế và môi trường khác nhau. Phương pháp này là một công cụ giúp cải thiện độ bền, độ tin cậy và an toàn của các kết cấu bê tông cốt thép. Thomas Most [6] đã trình bày một phương pháp định lượng tầm quan trọng của các tham số đầu vào với xác suất phá hủy bằng cách sử dụng các mô phỏng Monte Carlo để ước tính độ nhạy của các tham số. Ưu điểm của phương pháp này là có thể xử lý các hàm trạng thái giới hạn phi tuyến và các tham số đầu vào không chuẩn. Hafnidar A. Rani và cộng sự [7] đã trình bày một phương pháp sử dụng mô phỏng Monte Carlo để tạo ra nhiều kịch bản khác nhau, từ đó đánh giá xác suất rủi ro về thời gian và chi phí trong các dự án xây dựng. Phương pháp này giúp dự đoán và chuẩn bị các rủi ro tiềm ẩn, từ đó giảm thiểu tác động đến tiến độ và ngân sách của dự án.

Trong lĩnh vực xây dựng dân dụng, kết cấu thép ngày càng được ứng dụng rộng rãi nhờ

những ưu điểm vượt trội như khả năng chịu lực lớn, trọng lượng nhẹ, và tính linh hoạt cao trong thiết kế. Những đặc tính này khiến kết cấu thép trở thành lựa chọn ưu tiên cho các công trình thương mại và công cộng. Đồng thời, kết cấu thép còn phù hợp với xu hướng phát triển bền vững nhờ khả năng tái chế và sử dụng lại nhiều lần. Ngoài ra, các công trình sử dụng kết cấu thép có khả năng tích hợp hiệu quả với công nghệ tiết kiệm năng lượng và vật liệu xanh, góp phần quan trọng vào định hướng phát triển xanh và bền vững. Trong bối cảnh kết cấu thép ngày càng phổ biến, việc đánh giá độ tin cậy của chúng trở thành một nhiệm vụ quan trọng và cấp thiết nhằm đảm bảo hiệu quả và an toàn cho các công trình xây dựng.

Các nghiên cứu về đánh giá độ tin cậy của khung thép thường tập trung vào việc phát triển các phương pháp phân tích mới. Đặng và Nguyễn [8] đã sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn ngẫu nhiên, kết hợp giữa phương pháp phần tử hữu hạn và mô phỏng Monte Carlo, để đánh giá độ tin cậy của kết cấu khung phẳng dựa trên điều kiện ổn định. Một số nghiên cứu khác cũng xem xét độ tin cậy của kết cấu thông qua các dạng tham số đặc biệt như tham số mờ, tham số khoảng, hoặc thay đổi các điều kiện biên, chẳng hạn như liên kết đàn hồi và liên kết nửa cứng.

Cụ thể, Lê và Phan [9] đã đánh giá độ tin cậy của khung ngang phẳng có một nhịp và năm tầng chịu tải trọng động mờ theo thời gian. Lê và Võ [10] thực hiện phân tích độ tin cậy về điều kiện độ bền cho khung thép phẳng một nhịp hai tầng với các thông số đầu vào dạng khoảng. Đặng và cộng sự [11] đã tập trung vào việc đánh giá độ tin cậy của các nút đàn hồi trong khung thép phẳng một tầng một nhịp theo điều kiện độ bền.

Nhìn chung, các nghiên cứu này thường tập trung vào các kết cấu khung thép phẳng đơn giản nhằm giảm độ phức tạp của bài toán và rút ngắn thời gian chạy chương trình. Tuy nhiên, kết quả độ tin cậy thu được trong các nghiên cứu này thường thấp, ví dụ như giá trị độ tin cậy của [9] đạt 0.359713 khi chịu tải trọng lớn nhất, của [10] dao

động từ 0.352404 đến 0.455624 đối với các cấu kiện dầm, và của [11] nằm trong khoảng từ 0.2947 đến 0.9158. Những giá trị này không phù hợp với yêu cầu thực tế của các công trình, vốn đòi hỏi độ tin cậy cao hơn để đảm bảo an toàn và hiệu quả sử dụng lâu dài.

Nhằm đáp ứng yêu cầu đánh giá độ tin cậy của khung thép một cách sát thực tế, các mô hình cần được xây dựng với mức độ phức tạp cao hơn và phải bao gồm kết cấu không gian ba chiều. Đồng thời, độ tin cậy cần đạt các giá trị cao hơn, đảm bảo đáp ứng các tiêu chuẩn thiết kế và an toàn của công trình thực tế. Trong nghiên cứu này, tác giả tập trung đánh giá độ tin cậy của chuyển vị ngang tại đỉnh của một khung thép không gian bảy tầng dưới tác dụng của tải trọng gió, sử dụng phương pháp mô phỏng Monte Carlo. Tải trọng gió thiết kế tuân thủ TCVN 2737:2023, chuyển vị ngang được tính toán thông qua phần mềm SAP2000, một công cụ phổ biến trong phân tích kết cấu. Để tự động hóa quá trình thay đổi các thông số ngẫu nhiên, tác giả sử dụng SM toolbox của Matlab, cho phép tích hợp các dữ liệu ngẫu nhiên từ mô phỏng Monte Carlo vào SAP2000. Quá trình này được lặp lại nhiều lần, đảm bảo phân tích đầy đủ số lượng mẫu của biến ngẫu nhiên có được từ mô phỏng Monte Carlo.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Nguyên lý về đánh giá độ tin cậy

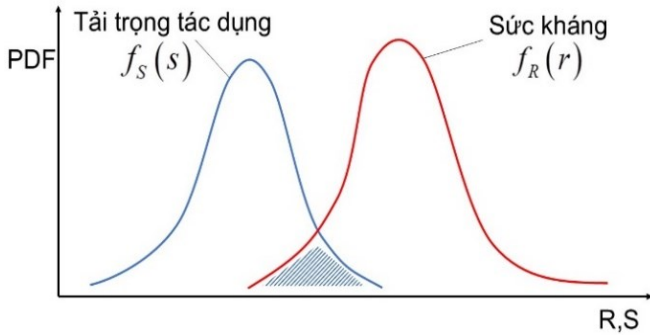
Độ tin cậy của kết cấu [12] có thể được định lượng thông qua xác suất hư hỏng P_f xảy ra khi hàm trạng thái giới hạn $G(R,S) < 0$ được thỏa mãn. Hàm trạng thái giới hạn này được định nghĩa như sau:

$$G = R - S \quad (1)$$

trong đó, R là sức kháng hoặc khả năng chịu tải của kết cấu và S là tải trọng tác dụng.

Cả hai thông số R và S đều là những biến ngẫu nhiên, do đó khó dự đoán một cách chính xác [12]. Chúng được đặc trưng bởi các hàm mật độ xác suất tương ứng $f_S(s)$ và $f_R(r)$ (probability density function, lý hiệu là pdf). Xác suất hư hỏng

trong trường hợp này được xác định bởi diện tích giao nhau giữa hai đường cong mật độ xác suất của R và S. Phần diện tích này, tương ứng với vùng gạch sọc trong Hình 1, biểu diễn xác suất xảy ra tình trạng $S > R$, dẫn đến kết cấu bị phá hủy.



Hình 1. Hàm mật độ xác suất của sức kháng và tải trọng tác dụng

2.2. Mô phỏng Monte Carlo

Mô phỏng Monte Carlo [13] là một phương pháp khởi tạo các số ngẫu nhiên tuân theo một phân phối xác suất đã cho. Phương pháp này thường được sử dụng trong các bài toán đánh giá độ tin cậy do tính đơn giản, khả năng phản ánh chính xác các hiện tượng tự nhiên và đạt độ chính xác cao khi số lượng biến ngẫu nhiên được sinh đủ lớn. Nguyên tắc cơ bản của mô phỏng Monte Carlo là tạo ra N mẫu độc lập của biến ngẫu nhiên (X) dựa trên hàm phân phối xác suất $f_X(x)$ đã biết. Với mỗi mẫu x_i , giá trị của hàm trạng thái giới hạn $g(X)$ được xác định. Nếu $g(X) < 0$, kết cấu được coi là bị phá hủy. Xác suất phá hủy của kết cấu có thể được tính bằng tỷ lệ giữa số mẫu dẫn đến phá hủy $(N)_f$ và tổng số mẫu (N) trong phép thử, được biểu diễn dưới dạng:

$$P_f = \frac{N_f}{N} \tag{2}$$

Trong mô phỏng Monte Carlo, số lượng mẫu N cần được xác định hợp lý vì độ chính xác của phương pháp tăng lên khi kích thước mẫu được mở rộng [13]. Độ chính xác này đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo tính tin cậy của kết quả và được đánh giá dựa trên phần trăm sai số:

$$\%Error = 200 \sqrt{\frac{1 - P_f}{N P_f}} \leq 5\% \tag{3}$$

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kiểm chứng chương trình

Kiểm chứng chương trình với ví dụ 7.5 của Halda [12]. Mục tiêu của bài toán là tính xác suất phá hủy của một sợi cáp có sức kháng R chịu tải trọng S. Trong đó, R và S được giả định là các biến ngẫu nhiên tuân theo phân phối Normal có giá trị trung bình lần lượt là 120kip và 50kip với độ lệch chuẩn tương ứng 18kip và 12kip.

Hàm trạng thái giới hạn được lấy theo công thức (1). Thực hiện tính toán xác suất phá hủy với số lượng mẫu N tăng dần từ 10,000 đến 3,000,000 có được từ mô phỏng Monte Carlo. Kết quả được so sánh với giá trị xác suất phá hủy $P_f = 0.000616$ tính theo phương pháp MVFOSM (Mean Value First Order Second Moment), một kỹ thuật xấp xỉ dựa trên phân tích trung bình và phương sai bậc nhất. Kết quả phân tích được tổng hợp trong Bảng 1 và minh họa trên Hình 2.

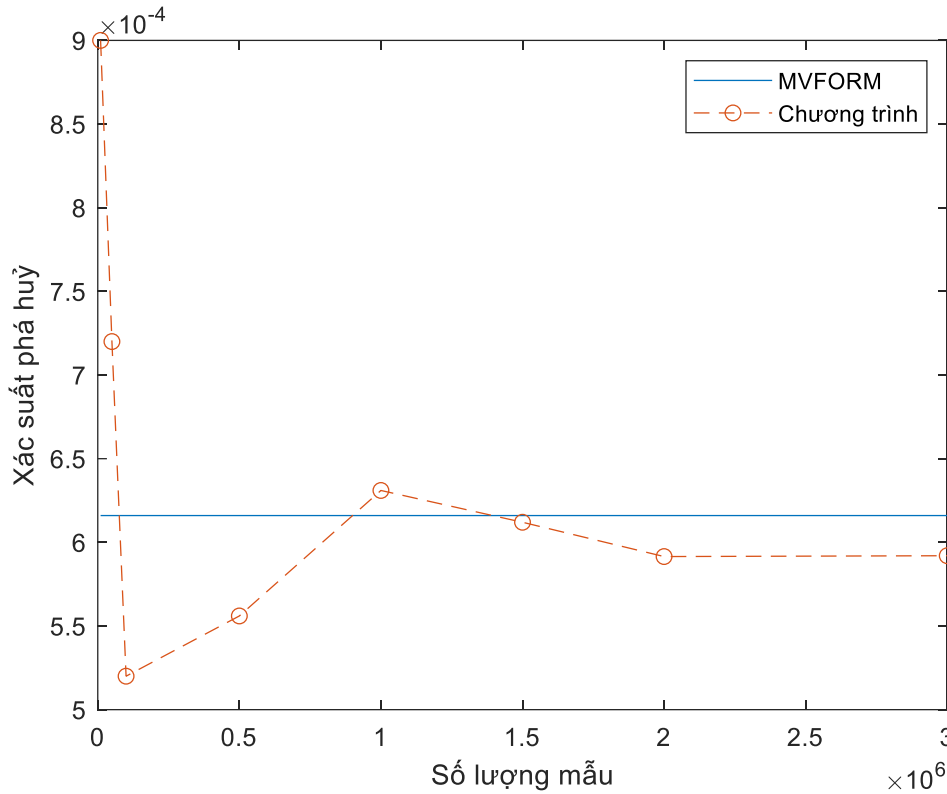
Bảng 1. So sánh xác suất phá hủy với kết quả của phương pháp MVFOSM

N	P_f	%Error	Sai số%
10,000	0.0009	66.64	46.104
50,000	0.00072	33.32	16.883
100,000	0.00052	27.73	15.584
500,000	0.000556	11.99	9.740
1,000,000	0.000631	7.96	2.435
1,500,000	0.000612	6.60	0.649
2,000,000	0.0005915	5.81	3.977
3,000,000	0.000592	4.75	3.896

Kết quả phân tích cho thấy, khi kích thước mẫu tăng lên, giá trị xác suất P_f dần tiến đến giá trị tham chiếu. Đặc biệt, khi đạt 2,000,000 và 3,000,000 mẫu, thì P_f ổn định với sai số dao động nhẹ ở mức 3.977% và 3.896%. Có thể thấy rằng, khi đạt đến điểm dừng phân tích với tiêu chí $\%Error \leq 5\%$, sai số so với kết quả của phương pháp MVFOSM là rất nhỏ (3.896%), chứng tỏ chương trình có độ chính xác đáng tin cậy. Nói cách khác, khi số lượng mẫu trong phương pháp mô phỏng Monte Carlo tăng lên đến vô hạn và giá

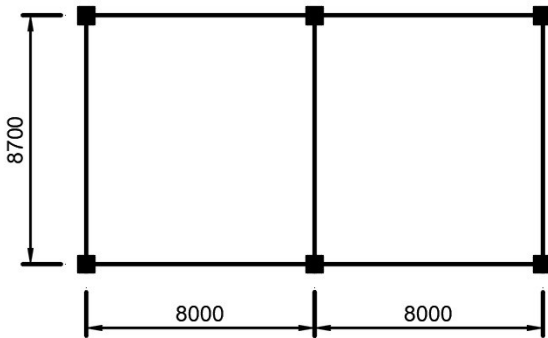
trị P_f đạt trạng thái ổn định, độ chênh lệch giữa giá trị này và kết quả từ phương pháp MVFOSM phản

ánh sai số nội tại của chính phương pháp MVFOSM, do đây là một phương pháp tuyến tính.



Hình 2. Biểu đồ so sánh xác suất phá huỷ với kết quả của phương pháp MVFOSM

3.2. Phân tích độ tin cậy chuyển vị đỉnh của khung thép không gian bảy tầng



Hình 3. Mặt bằng công trình

Bảng 2. Tiết diện của các cấu kiện thanh

Cấu kiện	Tiết diện
Cột	I540×372×30×14
Dầm ngang	I516×212×8×12
Dầm dọc	I392×184×6×12
Giằng	I314×184×6×10

Kết cấu công trình được nghiên cứu là khung thép không gian bảy tầng, có tổng chiều cao 25.2 m và chiều cao mỗi tầng là 3.6 m. Mặt bằng công trình có kích thước 8.7×16m, với hình chiếu đứng

rộng 8.7 m và hình chiếu cạnh dài 16 m được chia thành hai nhịp bằng nhau, mỗi nhịp dài 8 m. Hình dạng và các thông số kích thước chi tiết của kết cấu được minh họa trong Hình 3 và Hình 4. Tiết diện của các thanh trong khung được trình bày trong Bảng 2.

Trong phân tích, các biến ngẫu nhiên được xem xét bao gồm: mô đun đàn hồi của vật liệu thép, diện tích và mômen quán tính của tiết diện thanh, cùng với giá trị tải trọng gió. Thông số của các biến ngẫu nhiên này được tham khảo từ các nghiên cứu trước nhằm giảm thiểu mức độ bất định và đảm bảo rằng các thông số đầu vào của mô hình phản ánh thực tế chính xác hơn.

Bảng 3. Tiết diện của các cấu kiện thanh

Biến ngẫu nhiên	Giá trị	Đơn vị	Hệ số biến thiên	Dạng phân phối
E	2.1×10^4	kN/cm ²	0.034	Normal

Về vật liệu, mô đun đàn hồi của thép được xem là biến ngẫu nhiên với hệ số biến thiên 0.034

và tuân theo phân phối chuẩn (Normal), theo báo cáo của S. Zhang [14]. Các thông tin chi tiết được trình bày trong Bảng 3.

Đối với các đặc trưng hình học của tiết diện chữ I, hệ số biến thiên và dạng phân phối của diện tích được tham khảo từ báo cáo của H. Zhang [15], trong khi các thông số liên quan đến mômen quán tính được lấy từ nghiên cứu của Hawraa và Salah [16]. Thông tin chi tiết được cung cấp trong Bảng 4.

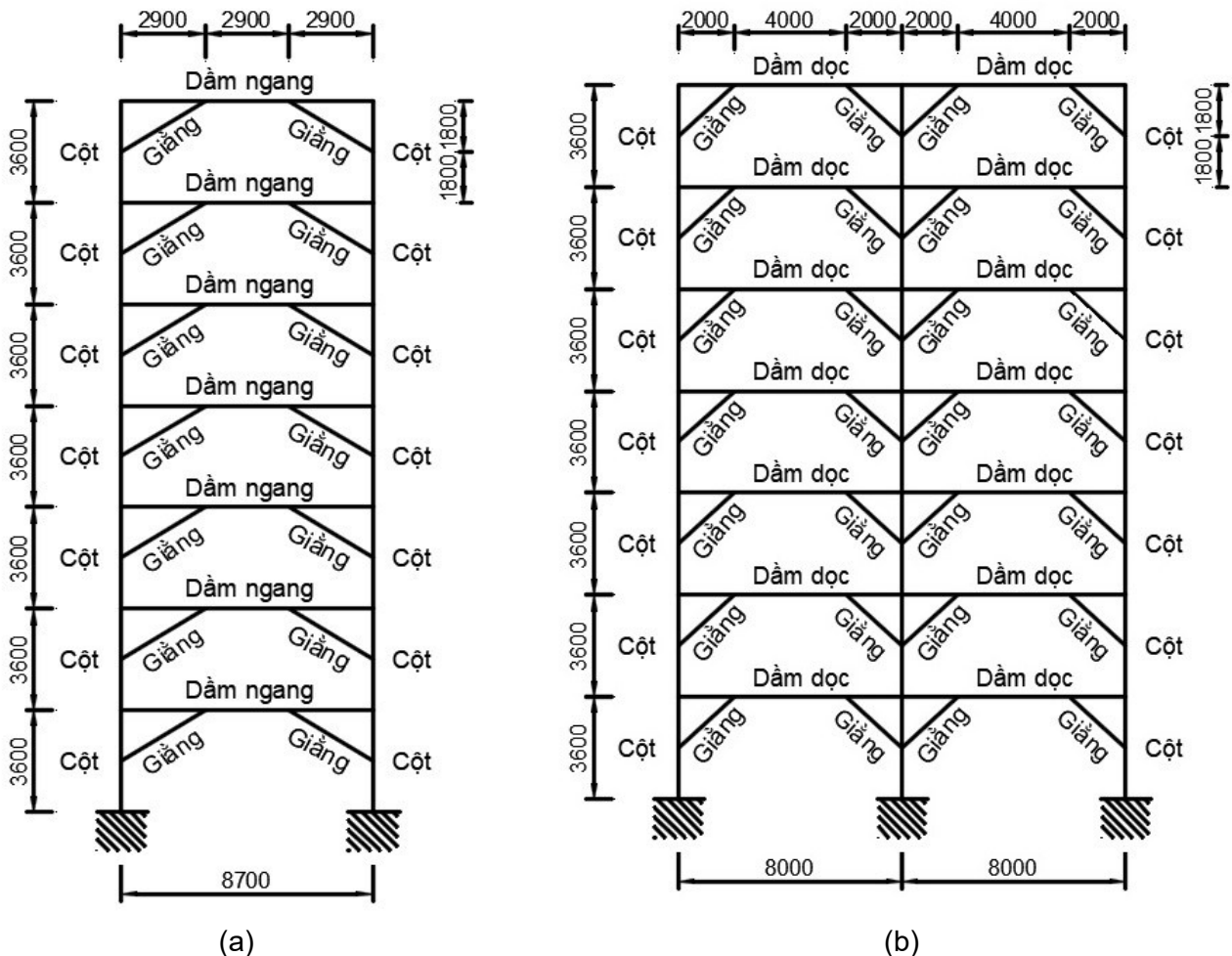
Theo TCVN 2737:2023 [17] chuyển vị đỉnh của công trình được tính toán theo tác dụng của tải trọng gió. Đồng thời, trong tiêu chuẩn cũng quy định áp lực gió cơ sở được tính theo vận tốc gió lớn nhất trong 20 năm phù hợp với dạng phân phối Gumbel, là hàm mô hình hoá cho các hiện tượng cực trị. Do đó, các thông số của biến ngẫu nhiên tải trọng gió tham khảo theo nghiên cứu của S.G. Buonopane & B.W. Schafer [18], chi tiết cho trong

Bảng 5.

Theo TCVN 2737:2023 [17], chuyển vị đỉnh của công trình đối với mỗi giá trị của biến ngẫu nhiên $U(x)$ không được vượt quá giới hạn $H/500$, trong đó H là chiều cao công trình, bằng 25.2 m. Hàm giới hạn được biểu diễn như sau:

$$G(x) = \frac{H}{500} - U(x) = 0.0504 - U(x) \tag{4}$$

Phân tích được thực hiện bằng phương pháp mô phỏng Monte Carlo, với số lượng mẫu của các biến ngẫu nhiên tăng dần cho đến khi đạt độ chính xác yêu cầu $\%Error \leq 5\%$. Trong nghiên cứu này, tác giả sử dụng công cụ SM Toolbox của Matlab để tự động thay đổi các giá trị của biến ngẫu nhiên trong phần mềm SAP2000, thực hiện phân tích và trích xuất giá trị chuyển vị tại đỉnh công trình. Kết quả chuyển vị sau đó được so sánh với hàm giới hạn đã xác định.



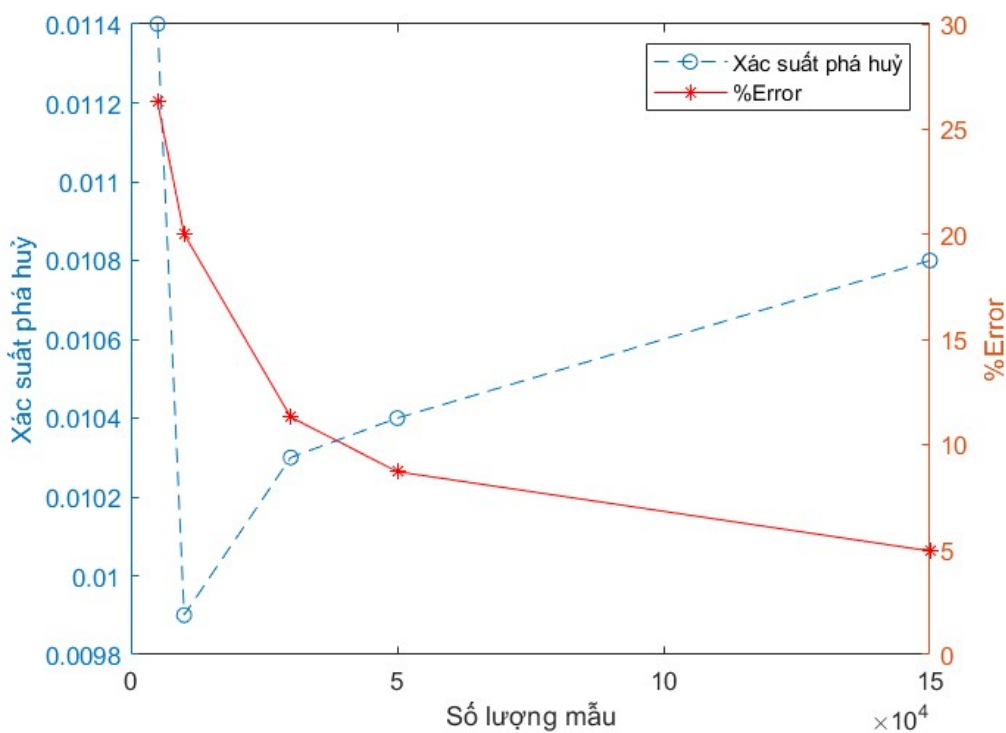
Hình 4. Hình chiếu của công trình: (a) hình chiếu đứng; (b) hình chiếu cạnh

Bảng 4. Tiết diện của các cấu kiện thanh

Biến ngẫu nhiên	Giá trị	Đơn vị	Hệ số biến thiên	Dạng phân phối
Diện tích tiết diện cột	290.4	cm ²	0.033	Normal
Mômen quán tính trục 2 của cột	25750.4	cm ⁴	0.035	Normal
Mômen quán tính trục 3 của cột	158205.6	cm ⁴	0.035	Normal
Diện tích tiết diện dầm dọc	66.24	cm ²	0.033	Normal
Mômen quán tính trục 2 của dầm dọc	1246.56	cm ⁴	0.035	Normal
Mômen quán tính trục 3 của dầm dọc	18438.86	cm ⁴	0.035	Normal
Diện tích tiết diện dầm ngang	90.24	cm ²	0.033	Normal
Mômen quán tính trục 2 của dầm ngang	1907.72	cm ⁴	0.035	Normal
Mômen quán tính trục 3 của dầm ngang	40256.64	cm ⁴	0.035	Normal
Diện tích tiết diện giằng	54.44	cm ²	0.033	Normal
Mômen quán tính trục 2 của giằng	1038.78	cm ⁴	0.035	Normal
Mômen quán tính trục 3 của giằng	9775.95	cm ⁴	0.035	Normal

Bảng 5. Thông số tải trọng gió

Tầng	Giá trị theo phương X (kN)	Giá trị theo phương Y (kN)	Hệ số biến thiên	Dạng phân phối
Tầng 7	111.71	48.72	0.1	Gumbel
Tầng 6	111.71	48.72	0.1	Gumbel
Tầng 5	111.71	48.72	0.1	Gumbel
Tầng 4	98.11	41.52	0.1	Gumbel
Tầng 3	98.11	38.25	0.1	Gumbel
Tầng 2	98.11	36.47	0.1	Gumbel
Tầng 1	98.11	36.47	0.1	Gumbel



Hình 5. Biểu đồ xác suất phá hủy và %Error

Kết quả phân tích được trình bày trong Bảng 6 và Hình 5. Dựa trên Bảng 6, khi số lượng mẫu đạt 150,000, sai số giảm xuống còn 4.93%, thỏa mãn yêu cầu chính xác dưới 5%. Tại số mẫu này, có 1626 trường hợp không thỏa mãn điều kiện của hàm giới hạn, tương ứng với xác suất xảy ra sự không thỏa mãn là 1.08% hay độ tin cậy của chuyển vị đỉnh công trình là 98.92%.

Bảng 6. Kết quả phân tích

Số lượng mẫu	P_f	%Error
5,000	0.0114	26.3
10,000	0.0099	20.0
30,000	0.0103	11.3
50,000	0.0104	8.7
150,000	0.0108	4.93

So sánh kết quả với độ tin cậy chuyển vị đỉnh 35.97% của khung phẳng năm tầng dưới tác động của biên độ tải trọng lớn nhất trong nghiên cứu [9] cho thấy sự khác biệt đáng kể về khả năng đáp ứng trạng thái giới hạn. Điều này phản ánh rõ rệt sự khác biệt giữa kết cấu khung phẳng đơn giản được lựa chọn trong nghiên cứu [9], với độ tin cậy thấp, và kết cấu không gian bảy tầng trong nghiên cứu này, vốn có độ phức tạp cao hơn và độ tin cậy lớn hơn. Kết quả nhấn mạnh vai trò của việc phân tích kết cấu phù hợp với điều kiện thực tế nhằm đảm bảo độ an toàn và hiệu quả trong thiết kế.

Trong nghiên cứu [19], độ tin cậy của khung thép vát chịu tác động của tải trọng gió được ước tính dao động trong khoảng 90-93%, khi sử dụng mô đun đàn hồi của thép là 210 GPa. Kết quả này thấp hơn không nhiều so với các phân tích so sánh được thực hiện. Nguyên nhân chủ yếu là các thông số thiết kế của khung thép vát trong nghiên cứu [19] được lựa chọn rất sát với các điều kiện thực tế, giúp đảm bảo tính đại diện cao của mô hình. Nếu khung thép trong nghiên cứu [19] được xem xét làm việc không gian, có sự gia cố của hệ giằng giúp giảm chuyển vị thì sẽ gia tăng độ tin cậy.

4. Kết luận

Bài báo trình bày việc áp dụng phương pháp mô phỏng Monte Carlo để đánh giá độ tin cậy chuyển vị đỉnh của kết cấu khung thép không gian bảy tầng. Đây là phương pháp được đánh giá có

độ chính xác cao, đặc biệt khi số lượng mẫu đủ lớn, do khả năng mô phỏng các yếu tố ngẫu nhiên ảnh hưởng đến kết cấu. Để tính toán chuyển vị của công trình, tác giả sử dụng phần mềm SAP2000, một công cụ hiệu quả cho việc phân tích các công trình phức tạp, đặt ra nhiều thách thức khi giải bài toán phần tử hữu hạn.

So sánh với các nghiên cứu khác, bài báo nhấn mạnh tầm quan trọng của việc sử dụng các mô hình phân tích phù hợp với điều kiện thực tế. Các nghiên cứu thường tập trung vào kết cấu đơn giản để rút ngắn thời gian tính toán, nhưng việc áp dụng các mô hình phản ánh sát thực tế có vai trò quan trọng trong việc nâng cao độ tin cậy của kết quả nghiên cứu.

Hướng nghiên cứu tiếp theo được đề xuất bao gồm:

- Bổ sung phân tích độ nhạy để xem xét tầm quan trọng của các yếu tố ngẫu nhiên khác như mô đun đàn hồi, tải trọng gió, hoặc đặc tính vật liệu để xác định các biến số có ảnh hưởng lớn nhất đến độ tin cậy.
 - Nghiên cứu các điều kiện biên khác như sự hình thành khớp dẻo, ảnh hưởng của nền móng đàn hồi, hoặc các điều kiện tác động động lực phức tạp hơn như động đất hoặc tải trọng chu kỳ.
 - Phát triển thêm các hàm trạng thái giới hạn để mở rộng phạm vi ứng dụng của phương pháp.
- Những đề xuất này không chỉ giúp cải thiện độ tin cậy của phân tích kết cấu mà còn đóng góp vào việc tối ưu hóa thiết kế kết cấu trong thực tế.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi nguồn ngân sách khoa học và công nghệ của Trường Đại học Nha Trang trong đề tài mã số TR2024-13-14.

Tài liệu tham khảo

[1]. P.M. Shah, M. Stewart, H. Fok. (2009). Reliability assessment of a typical steel truss bridge. *7th Austroads Bridge Conference, Auckland, New Zealand.*

[2]. A.I. Khvostov, S.I. Zhukov, S.N. Tropkin, A.Y. Chauskin. (2021). Evaluation of the reliability of building structures in simulia abaqus: modeling

- of stochastic material properties. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 17(3), 182-189.
- [3]. B. Tiliouine, B. Chemali. (2017). Reliability analysis of tall building structures with uncertain parameters. *Conference: Transactions, SMIRT-24 BEXCO, Busan, Korea*.
- [4]. A. Abdollahi, H. Shahraki, M.G.R. Faes, M. Rashki. (2024). Soft Monte Carlo Simulation for imprecise probability estimation: A dimension reduction-based approach. *Structural Safety*, 106, 102391.
- [5]. E.F. Félix, I.d.S. Falcão, L.G.d. Santos, R. Carrazedo, E. Possan. (2023). A Monte Carlo-Based Approach to Assess the Reinforcement Depassivation Probability of RC Structures: Simulation and Analysis. *Buildings*, 13(4), 993.
- [6]. T. Most. (2023). Efficient variance-based reliability sensitivity analysis for Monte Carlo methods. *14th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, ICASP14, Dublin, Ireland*.
- [7]. H.A. Rani, J. Amin, A. Ayob, D.A. Rahmatillah. (2022). Risk Probability of Time and Cost on Building Construction Project: A Monte Carlo Simulation. *Journal of Innovation and Technology*, 3(2), 60-68.
- [8]. X.H. Đặng, T.H. Nguyễn. (2016). Đánh giá độ tin cậy của kết cấu khung phẳng theo điều kiện ổn định bằng phương pháp phần tử hữu hạn ngẫu nhiên. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 10(2), 23-30.
- [9]. C.D. Lê, D.T. Phan. (2024). Đánh giá độ tin cậy mờ theo thời gian của kết cấu khung phẳng chịu tải trọng động. *Tạp chí Xây dựng*, 02(2024), 75-79.
- [10]. C.D. Lê, X.T. Võ. (2016). Đánh giá độ tin cậy kết cấu khung thép có liên kết nửa cứng với tham số đầu vào không chắc chắn dạng khoảng. *Tạp chí KHCN Xây dựng*, 02(2016), 18-25.
- [11]. X.H. Đặng, T.H. Nguyễn. (2017). Đánh giá độ tin cậy của khung thép theo điều kiện bền của nút khung đàn hồi. *Hội nghị Cơ học toàn quốc lần thứ X. Hà Nội, Việt Nam*.
- [12]. A. Haldar, S. Mahadevan. (2000). Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design. *Wiley, USA*.
- [13]. A.H.S. Ang và W.H. Tang. (2007). Probability concepts in engineering. *Wiley, USA*.
- [14]. S. Zhang và W. Zhou. (2013). System Reliability Assessment of 3D Steel Frames Designed Per AISC LRFD Specifications. *Advanced Steel Construction*, 9(1), 77-89.
- [15]. H.Q. Jebur, S.R. Al-Zaidee. (2019). Non-deterministic Approach for Reliability Evaluation of Steel Beam. *Journal of Engineering*, 26(1), 121-141.
- [16]. H. Zhang, B.R. Ellingwood, K.J.R. Rasmussen. (2014). System reliabilities in steel structural frame design by inelastic analysis. *Engineering Structures*, 81, 341-348.
- [17]. Bộ Khoa học và Công nghệ. (2023). Tiêu chuẩn Quốc gia TCVN 2737:2023, Tải trọng và tác động.
- [18]. S.G. Buonopane, B.W. Schafer. (2006). Reliability of Steel Frames Designed with Advanced Analysis. *Journal of Structural Engineering*, 132(2), 267.
- [19]. T.T. Phạm, H.S. Nguyễn, T.T. Vũ. (2022). Đánh giá độ tin cậy của khung thép vát liên kết nửa cứng chịu tải trọng gió bằng phương pháp phần tử hữu hạn ngẫu nhiên. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ*, 58(3), 68-72.