

**ĐÁNH GIÁ ĐỘ TIN CẬY CỦA DẦM THÉP TRÊN NỀN ĐÀN HỒI CHỊU TẢI TRỌNG
DI ĐỘNG SỬ DỤNG MÔ PHỎNG MONTE CARLO VÀ PHƯƠNG PHÁP LẤY MẪU
HYPERCUBE LATIN**

**RELIABILITY EVALUATION OF STEEL BEAM RESTING ON ELASTIC FOUNDATION
SUBJECTED TO MOVING LOAD USING MONTE CARLO SIMULATION AND LATIN
HYPERCUBE SAMPLING**

NGUYỄN DUY DUẤN^a, PHAN XUÂN THỰC^a, NGUYỄN TRỌNG HÀ^{a,*}

^aKhoa xây dựng, Trường Đại học Vinh, 182 Lê Duẩn, Thành phố Vinh, Nghệ An

*Tác giả đại diện: Email: trongha@vinhuni.edu.vn

Ngày nhận 20/7/2023, Ngày sửa 24/8/2023, Chấp nhận 31/8/2023

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2023.vi.vol3-2>

Tóm tắt: Dầm thép đặt trên nền đàn hồi là kỹ thuật được ứng dụng để giảm thiểu sự tác động của độ co giãn nhiệt và chấn động lên các công trình cầu đường, dân dụng và các công trình cần độ chính xác cao nhờ tính linh hoạt và khả năng chịu tải trọng lớn. Trong thực tế, quá trình sử dụng dầm thép đặt trên nền đàn hồi bị ảnh hưởng bởi tính ngẫu nhiên như vượt qua khả năng chịu tải, biến dạng không mong muốn, nền đất mất tính đàn hồi hoặc sự ăn mòn của môi trường. Bài báo này đề xuất phương pháp đánh giá xác suất tin cậy của dầm thép đặt trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động với các tham số đầu vào là ngẫu nhiên rời rạc bằng kỹ thuật lấy mẫu hypercube Latin và mô phỏng Monte Carlo. Từ kỹ thuật đề xuất, độ tin cậy của dầm thép đặt trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động đã được so sánh với phương pháp Monte Carlo truyền thống. Kết quả này cho thấy rằng kỹ thuật đề xuất có độ chính xác cao và tiết kiệm tài nguyên máy tính so với phương pháp Monte Carlo truyền thống. Cuối cùng ảnh hưởng của các tham số ngẫu nhiên đầu vào cũng đã được xem xét thông qua chỉ số độ nhạy Sobol'.

Từ khóa: Xác suất tin cậy, dầm thép, nền đàn hồi, mô phỏng Monte Carlo, phương pháp lấy mẫu Hypercube Latin, chỉ số độ nhạy Sobol'.

Abstract: Steel beams resting on the elastic foundation are an applied technique to minimize the impact of thermal expansion and vibrations on civil engineering structures such as bridges and buildings, due to their flexibility and ability to withstand large loads. In practice, the performance of steel beams resting on elastic foundations is affected by random factors such as exceeding load-bearing capacity, undesirable deformations, loss of soil resilience, or environmental corrosion. This study proposes a technique to evaluate the reliability of steel beams resting on the elastic foundation subjected to moving loads using discrete random input parameters through the Latin hypercube sampling and Monte

Carlo simulation method. The reliability of steel beams obtained from the proposed method is then compared to that of the traditional Monte Carlo simulation. The results reveal that the proposed technique provides a high accuracy and computational resource savings compared to the traditional Monte Carlo method. Finally, the influence of the random input parameters is also assessed based on the Sobol' sensitivity index.

Keywords: Reliability, steel beams, elastic foundation, Latin hypercube sampling, Monte Carlo simulation, Sobol' sensitivity index.

1. Đặt vấn đề

Dầm đặt trên các nền đàn hồi khác nhau đã được ứng dụng rộng rãi vì chúng có thể được mô hình hóa nhiều kết cấu như đường ray xe lửa, đường sân bay, các đường ống kỹ thuật trong lòng đất [1, 2]. Hơn nữa, dầm trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động là dạng kết cấu được ứng dụng nhiều trong thực tế nên đã thu hút được nhiều nghiên cứu của các nhà khoa học trên thế giới quan tâm [3-5]. Nghiên cứu dao động của dầm trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động bằng phương pháp phần tử hữu hạn đã được Thambiratnam và cộng sự thực hiện [6]. Hügül [7] đã phân tích phản ứng động của dầm và khung chịu tải trọng chuyển động bằng phương pháp phần tử hữu hạn và phương pháp tích phân Newmark. Wang và cộng sự [8] đã nghiên cứu phản ứng giới hạn của dầm với nền đàn hồi, trong đó các tác giả đã đánh giá ảnh hưởng của các thông số khác nhau đến ứng xử động của dầm dưới tác dụng của tải trọng điểm và tải trọng áp lực.

Phân tích độ tin cậy kết cấu là quá trình đánh giá khả năng và xác suất tin cậy của một công trình xây dựng, hệ thống kỹ thuật, hoặc bất kỳ kết cấu nào để đáp ứng yêu cầu và mục tiêu cụ thể. Điều này liên

quan đến việc đo lường và đánh giá các yếu tố không chắc chắn có thể ảnh hưởng đến hiệu suất và an toàn của kết cấu trong điều kiện thực tế [9]. Cho đến nay, các phương pháp phân tích độ tin cậy phổ biến bao gồm phương pháp phân tích độ tin cậy bậc nhất (First-order probability method-FORM), phương pháp phân tích độ tin cậy bậc hai (Second-order probability method-SORM), phương pháp độ phức tạp (Subset simulation method), phương pháp phân tích độ tin cậy theo thời gian khi biến ngẫu nhiên liên tục (Time-dependent reliability analysis), và phương pháp mô phỏng Monte Carlo (MCS). Các nghiên cứu về phân tích độ tin cậy kết cấu sử dụng các phương pháp trên đã được thực hiện khá đầy đủ [10-13].

Phương pháp lấy mẫu hypercube Latin (LHS) là một công cụ để cải thiện hiệu quả của phương pháp lấy mẫu Monte Carlo truyền thống vốn tốn nhiều thời gian và tài nguyên máy tính. Phương pháp LHS lần đầu tiên được đề xuất bởi McKay [14], và sau đó được cải tiến thêm bởi các nghiên cứu khác [15, 16]. Có nhiều phương pháp để thực hiện LHS dựa trên sự ngẫu nhiên và cân nhắc để đảm bảo tính ngẫu nhiên và hiệu quả của quá trình như phương pháp Coordinate Exchange (CE), phương pháp Modified Shuffle (MS), phương pháp Minimax Distance (MD), và phương pháp Multidimensional Uniform Deviates (MUD). Điểm chung của các phương pháp trên đều có mục tiêu đảm bảo rằng LHS được tạo ra có tính ngẫu nhiên cao và đáp ứng yêu cầu của bài toán cụ thể. Tuy nhiên, việc kết hợp LHS và MCS để đánh giá độ tin cậy của dầm thép đặt trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động là chưa được nghiên cứu đầy đủ.

Mục tiêu của bài báo này đề xuất kỹ thuật đánh

$$N_{1i} = 1 - 3\left(\frac{x}{l}\right)^2 + \left(\frac{x}{l}\right)^3; N_{2i} = x\left(\frac{x}{l} - 1\right)^2; N_{3i} = 3\left(\frac{x}{l}\right)^2 - 2\left(\frac{x}{l}\right)^3; N_{4i} = x\left[\left(\frac{x}{l}\right)^2 - \frac{x}{l}\right].$$

trong đó, i là số phần tử chịu tải trọng di động.

Để giải phương trình (1) phương pháp Newmark tích phân từng phần đã được sử dụng và thực hiện trên chương trình MATLAB.

2.2 Kiểm chứng kết quả

Xét bài toán kiểm chứng ví dụ trong tài liệu [6] như trên Hình 1. Các thông số đầu vào của dầm bao gồm: Mô đun đàn hồi của dầm $E = 2.05e11 \text{ N/m}^2$, hệ số Poisson của dầm $\nu = 0.3$, mô men quán tính tiết diện dầm $I = 1.844e - 4 \text{ m}^4$, tải trọng di động với vận tốc $V = 16.7 \text{ m/s}$ (60 km/h), hệ số nền $k_e = 1.14e6$. Kết quả hệ số động của dầm (θ_D) thu được từ

giá xác suất tin cậy của dầm thép trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động xem xét các tham số đầu vào là ngẫu nhiên rời rạc bằng kỹ thuật kết hợp LHS và MCS. Từ kỹ thuật đề xuất, xác suất tin cậy của dầm thép đã được so sánh với phương pháp MCS truyền thống. Kết quả này cho thấy rằng kỹ thuật đề xuất có độ chính xác cao và tiết kiệm tài nguyên máy tính so với phương pháp MCS truyền thống. Cuối cùng, ảnh hưởng của các tham số ngẫu nhiên đầu vào cũng đã được xem xét thông qua chỉ số độ nhạy Sobol'.

2. Mô hình dầm thép trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động

2.1 Biểu thức phân tử hữu hạn

Xét dầm thép đặt trên nền đàn hồi với một lực di động tập trung đặt vuông góc với trục của dầm như Hình 1. Giả sử dầm được rời rạc hóa thành i phần tử, để phân tích độ cứng của dầm phương trình chuyển động của dầm được biểu diễn dưới dạng sau.

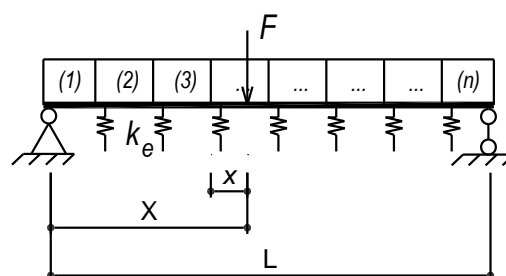
$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{f\} = [N]^T f_0 \quad (1)$$

trong đó: $[M]$ là ma trận khối lượng của dầm, $[C]$ là ma trận lực cản, $[K]$ là ma trận độ cứng, f_0 là độ lớn của lực tập trung di động, $\{q\}$, $\{\dot{q}\}$ và $\{\ddot{q}\}$ tương ứng là chuyển vị, vận tốc và gia tốc của dầm. $[N]^T$ là ma trận chuyển vị của các phần tử dầm tại các vị trí của lực di động. Nếu bỏ qua hiệu ứng giảm chấn, ma trận $[N]$ được xác định theo biểu thức sau.

$$[N] = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ N_{1i} \ N_{2i} \ N_{3i} \ N_{4i} \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots] \quad (2)$$

Trong biểu thức (2), các giá trị $N_{1i} \ N_{2i} \ N_{3i} \ N_{4i}$ được xác định như sau:

chương trình MATLAB và kết quả công bố trong [6] được trình bày trong Bảng 1. Trong Bảng 1, τ là thời gian di chuyển của lực từ đầu bên phải sang đầu bên trái; t là thời gian sau khi di chuyển vào dầm của tải trọng.



Hình 1. Mô hình dầm trên nền đàn hồi chịu tải di động

Bảng 1. Giá trị kiểm chứng hệ số động (ϕ_D)

t/τ	Hệ số động (ϕ_D)		
	Chương trình MATLAB	Kết quả trong [6]	Sai số (%)
0.1	1.040	1.040	0.000
0.5	1.332	1.330	0.150
1.0	1.705	1.710	1.183
1.234	1.722	1.723	0.058
1.5	1.628	1.630	1.242
2.0	1.506	1.500	0.398

Từ Bảng 1 có thể thấy rằng hệ số động theo thời gian của chương trình tính trên nền MATLAB trong nghiên cứu này theo phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) và kết quả của công bố trong [6] có sai số nhỏ hơn 2%. Kết quả này khẳng định chương trình tính toán đề xuất là đáng tin cậy và nó được sử dụng trong bài toán phân tích độ tin cậy của dầm thép trên nền đàn hồi ở các mục tiếp theo.

3. Phương pháp lấy mẫu Hypercube Latin và mô phỏng Monte Carlo

3.1 Phương pháp lấy mẫu Hypercube Latin

Phương pháp LHS là một công cụ để cải thiện hiệu quả của phương pháp lấy mẫu theo mô phỏng Monte Carlo truyền thống vốn tốn thời gian và tài nguyên máy tính. Phương pháp LHS được đề xuất bởi McKay vào năm 1979 [14], và được cải tiến thêm bởi các nghiên cứu sau đó [15, 16]. Cách tiếp cận của LHS là chia phạm vi của từng biến thành các khoảng cách nhau có xác suất bằng nhau và một giá trị được chọn ngẫu nhiên từ mỗi khoảng. Xét một hệ thống thống kê được mô tả bởi mối quan hệ:

$$Y = F(\mathbf{X}) \text{ trong đó } \mathbf{X} = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\} \quad (3)$$

trong đó \mathbf{X} là véc tơ ngẫu nhiên độc lập và xác định trên không gian S mô tả n biến ngẫu nhiên đầu vào với phân phối P . F là toán tử của sự lan truyền không chắc chắn trong hệ thống. Phương pháp MCS truyền thống dựa trên phương pháp lấy mẫu ngẫu nhiên đơn giản (SRS) của \mathbf{X} : $x_k, k = 1, 2, \dots, N$ (mẫu) như sau:

$$x_{ki} = P_{X_i}^{-1}(U_i); i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

trong biểu thức (4), U_i là các mẫu được phân phối đồng đều trên khoảng $[0, 1]$.

Trong khi đó, phương pháp LHS chia dãy véc tơ thành phần $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ thành các tập con rời rạc

có xác suất bằng nhau. Các mẫu của từng thành phần véc tơ được rút ra từ tập con tương ứng như sau:

$$x_{ki} = P_{X_i}^{-1}(U_{ij}) \quad (5)$$

trong biểu thức (5), $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m, n$ để chỉ tổng số thành phần của véc tơ; m là số lượng tập con trong cùng một thiết kế; k là chỉ số biểu thị một mẫu cụ thể. U_{ij} là các mẫu phân bố đều trên $[\xi_j, \xi_j']$.

$$\xi_j = \frac{j-1}{m}; \xi_j' = \frac{j}{m} \quad (6)$$

Mẫu $x_k = [x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn}]$, $k = 1, 2, \dots, N$ được lắp ráp bằng cách nhóm ngẫu nhiên các thành phần véc tơ được tạo. Theo cách tiếp cận LHS, phạm vi của tất cả các biến đầu vào ngẫu nhiên được chia thành n khoảng có xác suất bằng nhau, được giới hạn trong khoảng tương ứng để tránh nhược điểm của việc phân cụm lại với nhau.

3.2 Hư hỏng kết cấu, độ tin cậy và phương pháp mô phỏng Monte Carlo

Xét một hệ kết cấu, xác suất hư hỏng trong một thời gian cố định được xác định theo mối quan hệ sau:

$$\bar{p}_f = Prob\{G(\mathbf{X}) \equiv R - S \leq 0\} = \int_{G(\mathbf{X}) \leq 0} f(\mathbf{X})d\mathbf{X} \quad (7)$$

trong đó, \bar{p}_f là xác suất phá hoại, R là khả năng của kết cấu (trong nghiên cứu này chính là hệ số động của dầm (ϕ_D), được định nghĩa là tỷ số lớn nhất giữa chuyển vị động và chuyển vị tĩnh của dầm), S là hiệu ứng tác động của ngoại lực lên kết cấu, $\mathbf{X} = [\mathbf{X}^R, \mathbf{X}^S]$ là các véc tơ ngẫu nhiên. Phần bù của xác suất hư hỏng p_f là xác suất an toàn và được xác định $p_r = 1 - p_f$.

Mô phỏng Monte Carlo tương ứng với việc tính toán số nguyên trong phương trình (7). Tuân theo luật số lớn, công cụ ước tính Monte Carlo về xác suất phá hỏng được xác định như sau:

$$\bar{P}_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(\mathbf{X}_i) \quad K(\mathbf{X}_i) = \begin{cases} f(\mathbf{X})/G(\mathbf{X}) & \text{với } G(\mathbf{X}_i) \leq 0 \\ 0 & \text{với } G(\mathbf{X}_i) > 0 \end{cases} \quad (8)$$

trong đó, $f(\mathbf{X})$ là hàm phân phối xác suất, $G(\mathbf{X})$ là hàm lấy mẫu quan trọng.

4. Xác suất tin cậy của dầm thép chịu tải trọng di động đặt trên nền đàn hồi

Xét mô hình dầm trên nền đàn hồi như Hình 1, với các tham số đầu vào bao gồm giá trị và quy luật phân bố xác suất cho ở Bảng 2.

Bảng 2. Giá trị và quy luật phân bố xác suất của các biến đầu vào

	Ký hiệu	Giá trị trung bình	Độ lệch	Phân phối xác suất
Dầm (Rail - UIC60)				
Mô đun đàn hồi của thép	E	201 Gpa	10.05 Gpa	Chuẩn
Trọng lượng bản thân	ρ	7850 kg/m ³	392.5 kg/m ³	Chuẩn
Diện tích tiết diện	A	7.69e-3 m ²	3.84e-3 m ²	Chuẩn
Mô men quán tính	I	3.055e-5 m ⁴	1.5275e-06 m ⁴	Chuẩn
Chiều dài của dầm	L	18 m	0.09 m	Chuẩn
Nền đàn hồi				
Hệ số đàn hồi	k_e	3.5e7 N/m ²	1.75e6 N/m ²	Chuẩn
Tải trọng di động				
Độ lớn của tải trọng	F	65 kN	3.9 kN	Chuẩn
Vận tốc của tải trọng	V	10 m/s	0.6 m/s	Chuẩn

4.1 Điều kiện an toàn

Hệ số động của dầm (ϕ_D) được định nghĩa là tỷ số lớn nhất giữa chuyển vị động và chuyển vị tĩnh của dầm, đây là thông số quan trọng đánh giá ảnh hưởng của tải trọng di động và đất nền đến phản ứng của dầm. Vì vậy trong nghiên cứu này điều kiện an toàn của dầm thép đặt trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động chính là xác suất tin cậy của hệ số động (ϕ_D). Điều kiện an toàn được xác định theo biểu thức sau.

$$\phi_D \leq \phi_{CR} \quad (9)$$

trong đó, ϕ_D là hệ số động tính toán của dầm, ϕ_{CR} là hệ số động cho phép của dầm.

4.2 Mô hình tất định

Mô hình tất định tính toán hệ số động của dầm

$$\phi_D(E(\omega_E), \rho(\omega_\rho), A(\omega_A), I(\omega_I), L(\omega_L), k_e(\omega_{k_e}), F(\omega_F), V(\omega_V)) \leq \phi_{CR} \quad (11)$$

trong đó (ω_i) là biến ngẫu nhiên.

4.4 Lấy mẫu Hypercube Latin từ các biến ngẫu nhiên đầu vào

Thực hiện LHS từ các biến đầu vào ngẫu nhiên, trong trường hợp của nghiên cứu này các mẫu

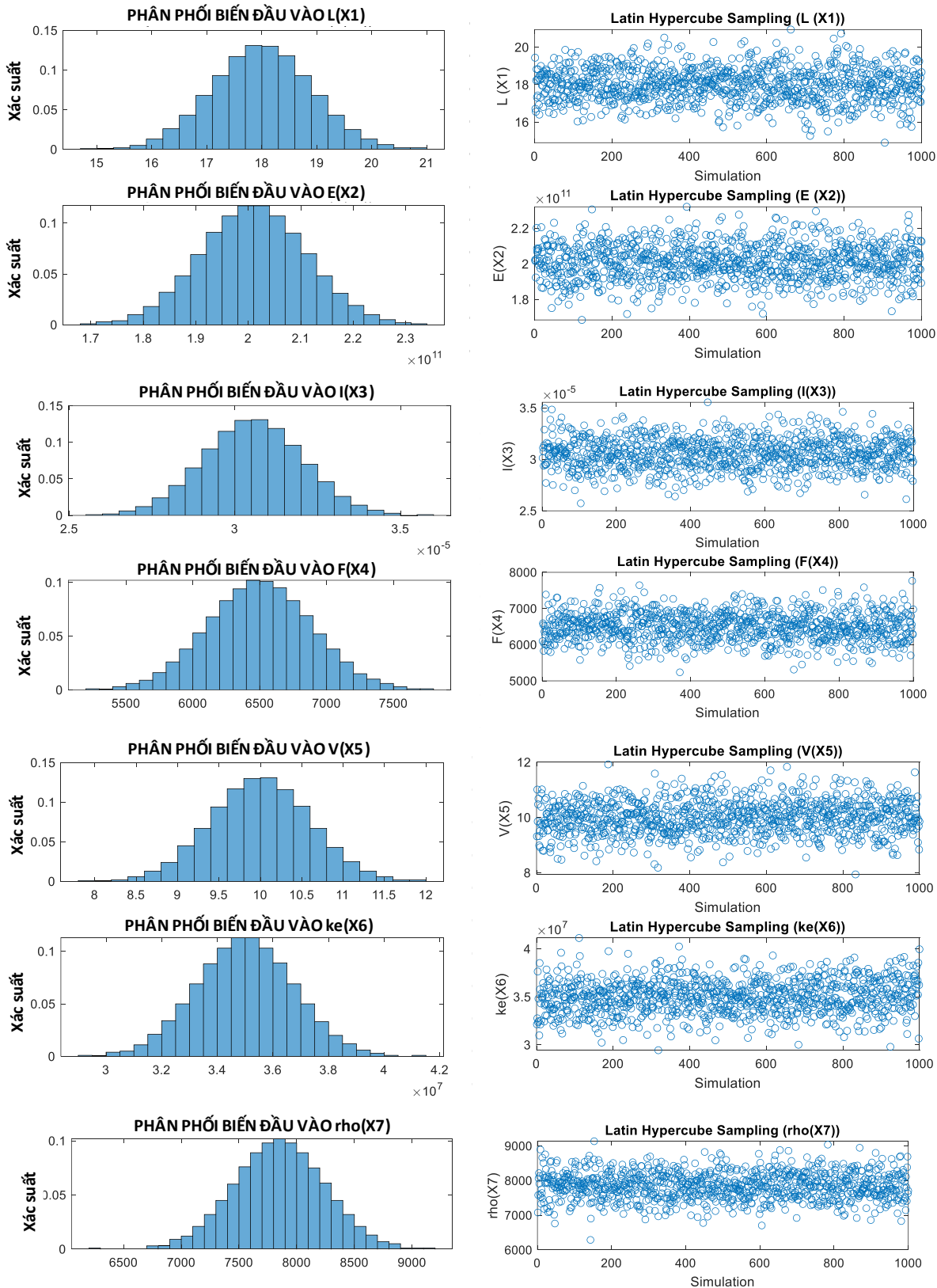
thép đặt trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động được xây dựng bằng cách sử dụng các tham số đầu vào tất định bao gồm $E, \rho, A, I, L, k_e, F, V$. Giá trị của hệ số động được xác định bằng cách giải phương trình (1) sử dụng phương pháp Newmark tích phân từng phần. Mô hình tất định có thể được viết dưới dạng một hàm như sau:

$$\phi_D(E, \rho, A, I, L, k_e, F, V) \leq \phi_{CR} \quad (10)$$

4.3 Mô hình ngẫu nhiên

Mô hình ngẫu nhiên được phát triển dựa trên mô hình tất định khi xem xét các tham số đầu vào bao gồm $E, \rho, A, I, L, k_e, F, V$ là các tham số ngẫu nhiên (ω). Mô hình ngẫu nhiên của hệ số động của dầm thép đặt trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động được viết như sau:

Hypercube Latin được lấy từ các biến ngẫu nhiên chuẩn. Các mẫu ngẫu nhiên chuẩn được biến đổi nghịch đảo, từ đó thay đổi tỷ lệ các mẫu bình thường thành các tham số biến. Việc chuyển đổi các biến được thực hiện trên nền MATLAB và được thể hiện trên Hình 2.



Hình 2. Mẫu Hypercube Latin từ các biến ngẫu nhiên đầu vào

4.5 Sự hội tụ của mô phỏng Monte Carlo

Để đánh giá xác suất tin cậy của hệ số động của dầm thép đặt trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động, kỹ thuật LHS được thực hiện từ các biến ngẫu nhiên đầu vào thông qua 10.000 lần MCS với

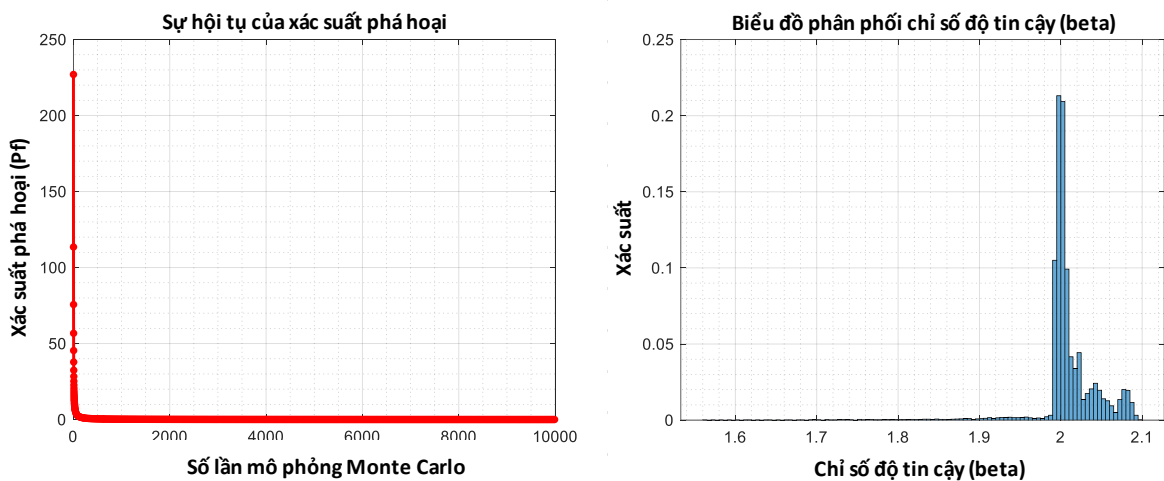
giá trị hội tụ 1.5%. Kết quả thu được bao gồm xác suất phá hoại (P_f) và chỉ số độ tin cậy β được trình bày trong Bảng 3, và biểu đồ phân bố chỉ số độ tin cậy β thể hiện như trên Hình 3. Hình 3 (trái) thể hiện sự hội tụ của mô phỏng Monte Carlo sau

10.000 lần, có thể thấy rằng sự hội tụ xuất hiện khá sớm, điều này một lần nữa khẳng định kỹ thuật LHS rất phù hợp khi nó kết hợp với phương pháp mô phỏng Monte Carlo. Kết quả tính toán xác suất độ tin cậy theo phương pháp đề xuất LHS-MCS trong nghiên cứu này được so sánh với kết quả của phương pháp MCS truyền thống. So sánh kết quả thu được ta nhận thấy rằng kỹ thuật kết hợp

LHS và MCS đánh giá xác suất tin cậy của dầm thép đặt trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động là đáng tin cậy. Ngoài ra, một điều quan trọng cần được nhấn mạnh là kỹ thuật LHS ứng dụng trong MCS chỉ cần 356 giây để phân tích, trong khi MCS cần đến 923 giây để có được kết quả. Nói cách khác, LHS-MCS đã tiết kiệm tài nguyên máy tính hơn so với phương pháp MCS truyền thống.

Bảng 3. Xác suất an toàn và chỉ số độ tin cậy của hệ số động ϕ_D

	LHS-MCS	MCS
Xác suất không an toàn (P_f)	0.0223	0.0231
Chỉ số độ tin cậy (β)	2.0141	1.9935



Hình 3. Sự hội tụ của mô phỏng MCS-LHS (trái) và phân phối chỉ số độ tin cậy β (phải) sau 10.000 mô phỏng

4.6 Chỉ số độ nhạy Sobol'

Phân tích độ nhạy Sobol' cho phép xác định mức độ ảnh hưởng của các tham số đầu vào đối với kết quả mô hình. Khi kết hợp với phân tích độ tin cậy bằng Monte Carlo không chỉ mức độ ảnh hưởng mà còn cả phạm vi biến đổi của các tham số này đối với kết quả. Điều này giúp cho việc đánh giá tầm quan trọng của từng tham số trong mô hình. Hai chỉ số quan trọng trong phân tích độ nhạy Sobol' là độ nhạy tuần hoàn riêng (First-order Sobol' index) và độ nhạy chung tuần hoàn (Total Sobol' index) được sử dụng trong nghiên cứu này. Các chỉ số này được nhiều tác giả sử dụng bởi tính ưu việt về đo lường độ ảnh hưởng của từng tham số [17, 18].

Độ nhạy tuần hoàn riêng dùng để đo lường ảnh hưởng tuần hoàn của một biến đầu vào tới chính nó thông qua các tương tác tuyến tính. Biểu thức giá trị độ nhạy tuần hoàn riêng được xác định như sau:

$$S_i = \frac{D_i}{D} \quad (12)$$

Trong khi đó, độ nhạy chung tuần hoàn đo lường ảnh hưởng tổng thể của một biến đầu vào, bao gồm cả ảnh hưởng tuần hoàn với chính nó thông qua các tương tác phi tuyến tính. Biểu thức giá trị độ nhạy chung tuần hoàn được xác định như sau:

$$S_{Ti} = \frac{D_{Ti}}{D} \quad (13)$$

trong đó, D_{Ti} là phương sai của đầu ra được giải thích bởi tham số i ; $D = Var(Y)$ là phương sai tổng thể của đầu ra.

Xét các biến đầu vào cho ở Bảng 2 sau 10.000 lần mô phỏng Monte Carlo, giá trị độ nhạy tuần hoàn riêng và giá trị độ nhạy chung tuần hoàn thu được thể hiện trong Bảng 4 và Hình 4. Từ Bảng 4 và Hình 4 ta nhận thấy rằng giá trị độ nhạy tuần hoàn riêng của các tham số đầu vào phân bố cho các biến lần lượt là X_1 (L) chiếm tỷ lệ lớn nhất 49.0%, các tham số X_2 (E) và X_3 (I) chiếm tỷ lệ 11.0%, những tham số còn lại lần lượt chiếm 9.0% và 6.0%. Kết quả này nói lên mức độ ảnh hưởng của từng tham số độc lập

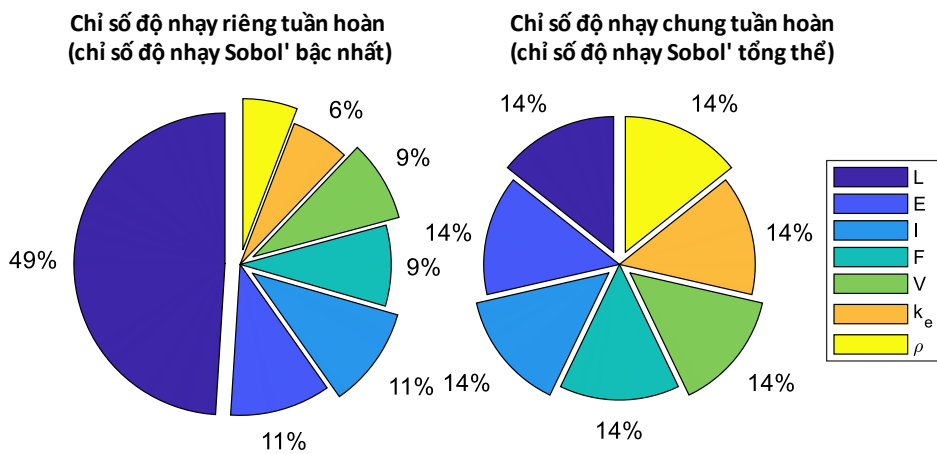
KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

tuyến tính không xét đến tương tác của các biến ở các mức độ khác nhau. Trong khi đó, giá trị độ nhạy chung tuần hoàn khi kể đến các tương tác phi tuyến tính của hàm mục tiêu và các biến đầu vào thì mức độ ảnh hưởng của các biến đầu vào có giá trị bằng

nhau 14.0%. Điều này cho chúng ta thấy rằng khi xét mức độ tương tác phi tuyến của các biến đầu vào để xác định hệ số động của dầm thép đặt trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động thì mức độ đóng góp của các biến đầu vào là như nhau.

Bảng 4. Ảnh hưởng của các tham số đầu vào sau 10.000 lần mô phỏng MSC

Tham số đầu vào	Độ nhạy tuần hoàn riêng	Độ nhạy chung tuần hoàn
$X_1 (L)$	0.7943	0.1428
$X_2 (E)$	0.1744	0.1428
$X_3 (I)$	0.1749	0.1428
$X_4 (F)$	0.1403	0.1428
$X_5 (V)$	0.1409	0.1428
$X_6 (k_e)$	0.1016	0.1428
$X_6 (\rho)$	0.0947	0.1428



Hình 4. Độ nhạy riêng tuần hoàn và độ nhạy chung tuần hoàn của các tham số đầu vào lên xác suất tin cậy hệ số động của dầm thép đặt trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động

5. Kết luận

Bài báo này đã đề xuất kỹ thuật đánh giá xác suất tin cậy của dầm thép đặt trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động với các tham số đầu vào là ngẫu nhiên rời rạc bằng kỹ thuật lấy mẫu Hypercube Latin (LHS) và phương pháp mô phỏng Monte Carlo (MCS). Để đạt được kết quả của bài báo, một mô hình tắt định tính toán hệ số động của dầm thép đặt trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động đã được xây dựng bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Từ mô hình tắt định, mô hình ngẫu nhiên được sử dụng để giải thích cho tính ngẫu nhiên của các biến đầu vào. Sau đó, mô hình ngẫu nhiên được sử dụng để đánh giá xác suất độ tin cậy hệ số động của dầm thép đặt trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động bằng kỹ thuật kết hợp LHS-MCS. Kết quả thu được từ phương pháp LHS-MCS được so sánh với phương pháp MCS truyền thống. Ngoài ra, ảnh hưởng của các tham số đầu vào lên xác suất tin cậy cũng đã được đánh giá thông qua chỉ số độ nhạy Sobol'. Các kết luận được rút ra như sau:

(1) Xây dựng được chương trình tính toán hệ số động của dầm thép đặt trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động đã được xây dựng bằng phương pháp phần tử hữu hạn bằng MATLAB và kiểm chứng chương trình cho thấy kết quả đáng tin cậy;

(2) Đề xuất được kỹ thuật đánh giá xác suất tin cậy của dầm thép đặt trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động với các tham số đầu vào là ngẫu nhiên rời rạc bằng kỹ thuật LHS và phương pháp MCS dựa trên mô hình ngẫu nhiên;

(3) Ảnh hưởng của các tham số đầu vào lên xác suất tin cậy của dầm thép đặt trên nền đàn hồi chịu tải trọng di động được đánh giá thông qua chỉ số độ nhạy Sobol'. Giá trị độ nhạy tuần hoàn riêng của các tham số đầu vào $X_1 (L)$ chiếm tỷ lệ lớn nhất 49.0%, các tham số $X_2 (E)$ và $X_3 (I)$ chiếm tỷ lệ 11.0%. Ngoài ra, giá trị độ nhạy chung tuần hoàn khi kể đến các tương tác phi tuyến tính của hàm mục tiêu và các biến đầu vào thì mức độ ảnh hưởng của các biến đầu vào có giá trị bằng nhau 14.0%.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Y. Wang, L. Tham, and Y. Cheung (2005), "Beams and plates on elastic foundations: a review," *Progress in Structural Engineering and Materials*, vol. 7, no. 4, pp. 174-182.
- [2] N. D. Beskou and D. D. Theodorakopoulos (2011), "Dynamic effects of moving loads on road pavements: a review," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 31, no. 4, pp. 547-567.
- [3] R. T. Corrêa, F. Simões, and A. P. da Costa (2017), "Moving loads on beams on Winkler foundations with passive frictional damping devices," *Engineering Structures*, vol. 152, pp. 211-225, 2017.
- [4] P. C. Jorge, F. Simões, and A. P. Da Costa (2015), "Dynamics of beams on non-uniform nonlinear foundations subjected to moving loads," *Computers & Structures*, vol. 148, pp. 26-34.
- [5] H. Ding, L.-Q. Chen, and S.-P. Yang (2012), "Convergence of Galerkin truncation for dynamic response of finite beams on nonlinear foundations under a moving load," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 331, no. 10, pp. 2426-2442.
- [6] D. Thambiratnam and Y. Zhuge (1996), "Dynamic analysis of beams on an elastic foundation subjected to moving loads," *Journal of sound and vibration*, vol. 198, no. 2, pp. 149-169.
- [7] S. Hügül (2005), "Vibration Analysis Of Systems Subjected To Moving Loads By Using The Finite Element Method," Yüksek Lisans.
- [8] Y. Wang, Y. Wang, B. Zhang, and S. Shepard (2011), "Transient responses of beam with elastic foundation supports under moving wave load excitation," *International journal of engineering and technology*, vol. 1, no. 2, pp. 137-143.
- [9] J. J. Bartko and W. T. Carpenter Jr (1976), "On the methods and theory of reliability," *The Journal of nervous and mental disease*, vol. 163, no. 5, pp. 307-317, 1976.
- [10] X.-C. Nguyen (2000), "Phương pháp đánh giá độ tin cậy của khung bê tông cốt thép thiết kế theo tiêu chuẩn Việt Nam," Viện KHCN Xây dựng (IBST), Hà Nội.
- [11] D.-D. Nguyen and T.-H. Nguyen (2022), "Reliability assessment for the critical buckling load of SDTS columns with the tubular cross-section," *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, pp. 3786-3790.
- [12] D.-D. Nguyen and T.-H. Nguyen (2022), "Reliability evaluation of 2D semi-rigid steel frames accounting for corrosion effects," *Journal of Materials and Engineering Structures «JMES»*, vol. 9, no. 3, pp. 339-353, 2022.
- [13] N. L. Tran and T. H. Nguyen (2020), "Reliability Assessment of Steel Plane Frame's Buckling Strength Considering Semi-rigid Connections," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 10, no. 1, pp. 5099-5103, 2020.
- [14] M. D. McKay (1992), "Latin hypercube sampling as a tool in uncertainty analysis of computer models," in *Proceedings of the 24th conference on Winter simulation*, pp. 557-564
- [15] J.-S. Park (1994), "Optimal Latin-hypercube designs for computer experiments," *Journal of statistical planning and inference*, vol. 39, no. 1, pp. 95-111.
- [16] P. Z. Qian (2012), "Sliced Latin hypercube designs," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 107, no. 497, pp. 393-399.
- [17] N.-L. Tran and T.-H. Nguyen (2023), "Global sensitivity of reliability for the crane runway girder," *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 24, no. 5, pp. 1257-1266.
- [18] C. Xu et al. (2004), "Sensitivity analysis in ecological modeling," *Ying yong sheng tai xue bao= The Journal of Applied Ecology*, vol. 15, no. 6, pp. 1056-1062.