

ĐÁNH GIÁ ĐỘ TIN CẬY CẦU DÀN THÉP XÉT ĐẾN PHÂN PHỐI PHI CHUẨN CỦA KÍCH THƯỚC TIẾT DIỆN

PHẠM XUÂN TÙNG*
TRẦN QUANG HUY
TRƯƠNG THÀNH CHUNG
ĐẶNG QUỐC MỸ

Khoa Xây dựng, Trường Đại học Nha Trang
**Email: tungpx@ntu.edu.vn*

Phản biện: TS. Lê Thanh Cao
 TS. Trần Quang Duy

TÓM TẮT:

Nghiên cứu này trình bày việc đánh giá độ tin cậy chuyển vị giữa nhịp của cầu dàn thép dựa trên phương pháp mô phỏng Monte Carlo, trong đó xét đến các bất định của diện tích tiết diện, mô đun đàn hồi của thép và tải trọng tác dụng. Trọng tâm của nghiên cứu là đánh giá ảnh hưởng của cách mô hình hóa diện tích tiết diện đến kết quả phân tích độ tin cậy. Hai cách tiếp cận mô hình hóa diện tích tiết diện khác nhau được áp dụng và so sánh. Trong cách tiếp cận thứ nhất, các kích thước hình học của tiết diện được xem là các biến ngẫu nhiên tuân theo phân phối phi chuẩn Pearson Type III, từ đó diện tích tiết diện được xác định thông qua quan hệ hình học giữa các kích thước thành phần. Trong cách tiếp cận thứ hai, diện tích tiết diện được giả định trực tiếp là một biến ngẫu nhiên tuân theo phân phối chuẩn, với các tham số thống kê tương ứng. Thông số của các biến ngẫu nhiên khác như cường độ vật liệu, mô đun đàn hồi và tải trọng trong các hai cách tiếp cận được chọn giống nhau. Kết quả được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng khi lựa chọn dạng phân phối xác suất của diện tích tiết diện đến kết quả phân tích độ tin cậy.

Từ khóa: Độ tin cậy kết cấu, phân phối phi chuẩn, cầu dàn thép, xác suất phá hủy

ABSTRACT:

This study presents the reliability assessment of a steel truss bridge on the displacement at mid-span based on Monte Carlo simulation. Area of cross section, Young's modulus, and applied loads are considered as random variables. The focus of the study is the influence of the area of cross-section distribution on the reliability analysis results. Two different approaches are applied and compared. In the first approach, the dimensional geometries of the cross-section are considered as random variables with a non-normal Pearson Type III distribution, from which the cross-sectional area is determined through the geometric relationship between the component dimensions. In the second approach, the area of cross section is directly assumed to be a random variable with a normal distribution, with corresponding statistical parameters. The parameters of other random variables such as material strength, elastic modulus, and loads are chosen to be the same in both approaches. The results are used to assess the impact of specific areas of cross-section distributions on the reliability of the analysis results.

Keywords: Reliability assessment, Non-Normal, steel truss bridge, probability of failure

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các công trình xây dựng là hệ thống kỹ thuật phức tạp đối mặt với nhiều yếu tố bất định trong tất cả các giai đoạn làm việc. Một số yếu tố bất định phải được tính đến trong công tác thiết kế công trình. Đánh giá độ tin cậy của kết cấu là phương pháp xác định xác suất phá hoại hoặc hư hỏng của kết cấu dựa trên mô hình hoá các yếu tố bất định hay còn gọi là biến ngẫu nhiên bằng thông số thống kê [1]. Trên nền tảng này, nhiều nghiên cứu đã được thực hiện nhằm đánh giá xác suất hư hỏng của các loại kết cấu khác nhau. Chẳng hạn,

phân tích độ nhạy toàn cục của kết cấu dựa trên phương pháp Cliff's Delta để đánh giá độ tin cậy mà không cần sử dụng mô hình huấn luyện [2] và đánh giá độ tin cậy ứng xử động của của cầu dàn thép hiện hữu sử dụng phần mềm phân tử hữu hạn SAP2000 và đo đạc tại hiện trường [3].

Trong phân tích độ tin cậy kết cấu, các đặc trưng hình học của tiết diện thường được coi là biến ngẫu nhiên. Mục đích là kể đến dung sai sản xuất hoặc các khuyết tật trong quá trình thi công. Một số các nghiên cứu ứng dụng tính bất định của đặc trưng hình học tiết

diện một cách đơn giản là giả định thành biến ngẫu nhiên có phân phối chuẩn để thuận tiện trong tính toán [4-6]. Ngoài ra, một số nghiên cứu cũng có xét đến kích thước hình học tiết diện là biến ngẫu nhiên như đánh giá độ tin cậy theo hướng phi tất định [7], khảo sát độ tin cậy phụ thuộc thời gian của dầm cầu bằng thép chữ I chịu ăn mòn [8], phân tích độ tin cậy phụ thuộc thời gian cho dầm thép, xét đồng thời các bất định về tải trọng, cường độ vật liệu và suy giảm tiết diện do ăn mòn [9]. Trong các nghiên cứu này, các biến ngẫu nhiên là kích thước hình học được xem xét theo phân bố chuẩn và giả sử là độc lập với nhau. Điều

này gián tiếp giả định rằng phân phối của diện tích có thể được xấp xỉ bởi phân phối chuẩn.

Tuy nhiên, các đặc trưng hình học của tiết diện như diện tích tiết diện là sự kết hợp của các kích thước hình học, bao gồm chiều cao tổng thể, bề rộng cánh và chiều dày các tấm thép. Các kích thước này thực tế đều có thể xem là biến ngẫu nhiên có hệ số biến thiên và tương quan với nhau [10]. Các đặc tính này gây ra độ lệch cho diện tích và ảnh hưởng đến xác suất phá hoại.

Trong bài báo này, phân phối phi chuẩn Pearson Type III đặc trưng bởi độ lệch (skewness) và độ nhọn (kurtosis) được sử dụng để mô phỏng các kích thước của tiết diện trong đánh giá độ tin cậy của cầu dàn thép. Đồng thời so sánh với mô phỏng diện tích tiết diện bằng phân phối chuẩn và độ lệch chuẩn tương ứng. Kết quả cho thấy tầm quan trọng của việc mô hình hoá thích hợp của các yếu tố bất định trong đánh giá độ tin cậy.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu này trình bày việc đánh giá độ tin cậy sức kháng dọc trục và chuyển vị giữa nhịp của cầu dàn thép dựa trên phương pháp mô phỏng Monte Carlo. Các bất định được xem xét bao gồm diện tích tiết diện, mô đun đàn hồi của thép, và tải trọng tác dụng, tất cả đều được mô hình hóa như các biến ngẫu nhiên.

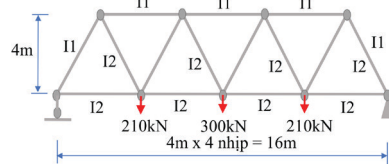
Đối với diện tích tiết diện, hai cách tiếp cận mô hình hóa khác nhau được áp dụng và so sánh. Trong cách tiếp cận thứ nhất, các kích thước hình học của tiết diện được xem là các biến ngẫu nhiên tuân theo phân phối phi chuẩn Pearson Type III, từ đó diện tích tiết diện được xác định thông qua quan hệ hình học giữa các kích thước thành phần. Trong cách tiếp cận thứ hai, diện tích tiết diện được giả định trực tiếp là một biến ngẫu nhiên tuân theo phân phối chuẩn, với các tham số thống kê tương ứng.

Việc so sánh hai phương pháp mô hình hóa này cho phép đánh giá

ảnh hưởng của dạng phân phối xác suất của diện tích tiết diện đến kết quả phân tích độ tin cậy.

2.1. Mô hình cầu dàn

Trong nghiên cứu này, độ tin cậy một nhịp cầu dàn thép đơn giản chịu tải trọng tập trung được khảo sát. Sơ đồ dàn, vị trí đặt tải và tiết diện thanh được cho trong Hình 1, với kích thước tiết diện thanh bằng thép hình chữ I được tổng hợp trong Bảng 1.



Hình 1. Mô hình kết cấu nhịp cầu dàn thép L = 16m

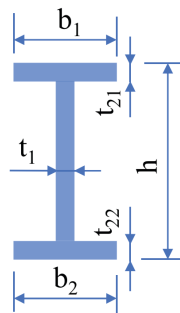
2.2. Biến ngẫu nhiên

Trong cách tiếp cận thứ nhất, các thanh trong kết cấu có tiết diện chữ I, với các kích thước hình học được trình bày trong Hình 2. Các thông số thống kê của các kích thước tiết diện được tham khảo từ tài liệu [10], trong đó các biến hình học được mô hình hóa bằng các phân phối phi chuẩn Pearson Type III, đặc trưng bởi độ lệch (skewness) và độ nhọn (kurtosis) như trình bày trong Bảng 2.

Các kích thước hình học của tiết diện không được xem là các biến ngẫu nhiên độc lập, mà tồn tại mối

Bảng 1. Tiết diện của các cấu kiện thanh dàn

Thép hình chữ I in×lb/ft (mm×kg/m)	Diện tích (mm ²)	d (mm)	b (mm)	t _f (mm)	t (mm)
W10×22 (W250×32,7)	4190	258	146	9,1	6,1
W10×19 (W250×28,4)	3630	260	102	10,0	6,3



Hình 2. Tiết diện chữ I

Bảng 2. Thông số thống kê của kích thước tiết diện

Kích thước	Mean	COV	Độ lệch	Độ nhọn
h	1,0009	0,0044233	-0,4088	3,0305
b ₁	1,0124	0,010103	-0,3042	4,0460
b ₂	1,0154	0,0093995	-0,4069	3,3635
t ₁	1,0540	0,039053	0,5306	4,9671
t ₂₁	0,9878	0,043528	-0,3029	2,6657
t ₂₂	0,9977	0,047625	-0,0059	2,7161

tương quan thống kê giữa chúng. Mối tương quan này được mô tả thông qua ma trận tương quan, được trình bày trong Công thức (1).

$$K \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0,06 & 0,07 & -0,07 & -0,11 \\ 0 & 1 & 0,61 & -0,20 & -0,26 & -0,12 \\ 0,06 & 0,61 & 1 & -0,18 & -0,15 & -0,01 \\ 0,07 & -0,20 & -0,18 & 1 & 0,24 & 0,25 \\ -0,07 & -0,26 & -0,15 & 0,24 & 1 & 0,76 \\ -0,11 & -0,12 & -0,01 & 0,25 & 0,76 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Với cách tiếp cận thứ hai, diện tích tiết diện được xem là biến ngẫu nhiên có phân phối chuẩn [2], giá trị cụ thể cho trong Bảng 3.

Bảng 3. Thông số đầu vào ngẫu nhiên là diện tích tiết diện

Biến ngẫu nhiên	Giá trị	Mean	COV	Loại phân phối
Tiết diện thanh I ₁	4190	1,0	0,05	Chuẩn
Tiết diện thanh I ₂	3630			

Các biến ngẫu nhiên khác bao gồm tải trọng và mô đun đàn hồi được trình bày trong Bảng 4 [9].

Bảng 4. Thông số đầu vào ngẫu nhiên là tải trọng và mô đun đàn hồi

Biến ngẫu nhiên	Giá trị	Mean	COV	Loại phân phối
Ngoại lực 1	210 kN	1,05	0,25	Chuẩn
Ngoại lực 2				

Mô đun đàn hồi	2,1×108 kPa	0,993	0,034	Chuẩn
Cường độ chảy	245 MPa	1,1	0,06	Chuẩn

2.3. Hàm trạng thái giới hạn và sai số

Hàm trạng thái giới hạn xây dựng dựa trên chuyển vị cho phép giữa nhịp cho trong Công thức (2) và sức kháng dọc trục cho phép cho trong Công thức (3) do tải trọng gây ra theo đề xuất của AASHTTO [12] hay TCVN 11823:2017 [13]. Kết cấu được xem như là phá hoại khi một trong hai công thức $g_1(u)$ hoặc $g_2(u)$ nhận giá trị âm.

$$g_1(u) = L/800 - u_i = 2 - u_i \text{ (cm)} \quad (2)$$

$$g_2(u) = \phi_c P_{ni} - P_{ui} = 0,9P_{ni} - P_{ui} \text{ (daN)} \quad (3)$$

Số lượng mẫu N của mỗi biến ngẫu nhiên cần đủ lớn để đảm bảo độ chính xác cho xác suất phá hoại. Kiểm tra thông qua sai số cho phép bé hơn 5%, cụ thể trong công thức (4).

$$\%Error = 200 \sqrt{\frac{1 - P_f}{NP_f}} \leq 5\% \quad (4)$$

Trong đó, P_f là xác suất phá hoại của kết cấu.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Phân tích độ tin cậy của kết cấu dàn thép được thực hiện bằng phương pháp mô phỏng Monte Carlo, trong đó số lượng mẫu của các biến ngẫu nhiên được tăng dần cho đến khi xác suất phá hoại ước lượng thỏa mãn tiêu chí sai số theo Công thức (4).

Kết quả phân tích được tổng hợp trong Bảng 5, cho thấy xác suất phá hoại của kết cấu thu được theo cách tiếp cận thứ nhất, trong đó các kích thước hình học của tiết diện được mô hình hóa bằng các phân phối phi chuẩn, luôn nhỏ hơn so với kết quả thu được từ cách tiếp cận thứ hai. Khi xác suất phá hoại đạt đến ngưỡng sai số cho phép, độ chênh lệch tương đối giữa hai cách tiếp cận được xác định là 20,51%.

Bảng 5. Xác suất phá hoại của cầu dàn thép

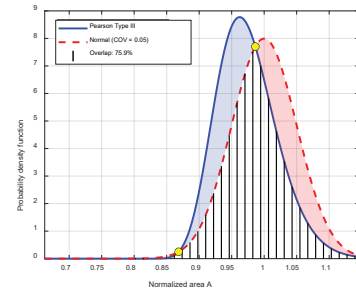
Số lượng mẫu	Phi chuẩn	Chuẩn	Chênh lệch %
1000	0,0490	0,0570	16,33
2000	0,0420	0,0535	27,38
5000	0,0386	0,0494	27,98
10 000	0,0390	0,0475	21,79
20 000	0,0385	0,0459	19,22
50 000	0,0388	0,0465	19,85

Để lý giải sự chênh lệch giữa hai cách tiếp cận, biểu đồ hàm mật độ xác suất (PDF - Probability Density Function) của diện tích tiết diện được xây dựng và so sánh. Đối với cách tiếp cận thứ nhất, 200 000 mẫu ngẫu nhiên được phát sinh theo các phân phối phi chuẩn của các kích thước hình học, sau đó diện tích tiết diện được tính cho từng mẫu và sử dụng để xây dựng biểu đồ PDF thực nghiệm của diện tích tiết diện. Đối với cách tiếp cận thứ hai, do diện tích tiết diện được giả định tuân theo phân phối chuẩn, biểu đồ PDF có thể được xác định trực tiếp từ hàm mật độ xác suất lý thuyết mà không cần phát sinh mẫu ngẫu nhiên.

Biểu đồ so sánh hai cách tiếp cận được trình bày trong Hình 3. Kết quả cho thấy mặc dù phân phối Pearson Type III của diện tích tiết diện có xu hướng lệch về phía trái (giá trị nhỏ hơn) so với phân phối chuẩn Normal. Nhưng phần diện tích chồng lấp (overlap) được gạch sọc đứng trên biểu đồ chiếm đến 75,9% tổng diện tích biểu đồ của phân phối chuẩn. Phần chồng lấp này là xác suất diện tích của phân phối phi chuẩn lớn hơn diện tích cho bởi phân phối chuẩn. Do diện tích tiết diện có mối quan hệ trực tiếp với độ cứng và độ bền của kết cấu cầu dàn, việc gia tăng xác suất cho ra diện tích lớn hơn của phân phối phi chuẩn dẫn đến xác suất phá hoại nhỏ hơn so với trường hợp giả định phân phối chuẩn.

Như vậy, việc lựa chọn mô hình hoá các biến ngẫu nhiên thích hợp

đóng vai trò then chốt trong phân tích xác suất phá hoại của kết cấu. Việc đánh giá xác suất phá hoại thấp có thể tiềm ẩn nguy hiểm và hư hỏng cho công trình. Nhưng ngược lại, nếu đánh giá xác suất phá hoại quá cao có thể gây lãng phí do kinh phí đầu tư lớn. Vì vậy, mô hình hoá các biến ngẫu nhiên với thông số thống kê phù hợp là rất cần thiết để có thể cân bằng giữa yếu tố an toàn và kinh tế.



Hình 3. Biểu đồ PDF của hai cách tiếp cận

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, độ tin cậy sức kháng dọc trục và chuyển vị giữa nhịp của cầu dàn thép đã được đánh giá bằng mô phỏng Monte Carlo, có xét đến các bất định bao gồm tiết diện, đặc trưng vật liệu và tải trọng. Hai cách tiếp cận mô hình hóa diện tích tiết diện đã được so sánh nhằm làm rõ ảnh hưởng của dạng phân phối xác suất của đại lượng này đến kết quả phân tích độ tin cậy.

Kết quả cho thấy rằng, khi các kích thước hình học của tiết diện được mô hình hóa bằng các phân phối phi chuẩn Pearson Type III và có xét đến mối tương quan sử dụng để tính diện tích tiết diện và giả định trực tiếp diện tích tiết diện là phân phối chuẩn dẫn đến chênh lệch đáng kể trong xác suất phá hoại.

Từ các kết quả thu được cho thấy tầm quan trọng của việc mô hình hoá thích hợp các yếu tố bất định trong đánh giá độ tin cậy. Sự khác biệt trong các thông số thống kê có thể dẫn tới sự chênh lệch đáng kể kết quả độ tin cậy của kết cấu. ■

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. A. Haldar and S. Mahadevan, Probability, "Reliability and Statistical Methods in Engineering Design," New York: John Wiley & Sons, 2000.
- [2]. Z. Kala, "Global Sensitivity Analysis of Structural Reliability Using Cliff Delta," Mathematics, vol. 12, 2129, 2024.
- [3]. Dimas Aryo Suseno, Pariatmono, "Reliability Analysis for Dynamic Behaviour, Stiffness, and Strength of Existing Steel Truss Bridge BH77," Journal Eduvest. Vol. 4, no. 11, pp. 11072-11088, 2024.
- [4]. Y. Fang, L. Wang, and F. T. Kong, "Analysis of the steel structural reliability under the big data," in Proc. World Symposium on Smart Materials and Applications (WSSMA 2020), IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, vol. 958, no. 1, Art. no. 012001, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/958/1/012001.
- [5]. Á. Rózsás and L. G. Vigh, "On the reliability of steel frames exposed to snow load considering the effect of epistemic uncertainty," in Proc. EUROSTEEL 2014, Naples, Italy, Sep. 10-12, 2014.
- [6]. D. L. S. Mapa, M. S. R. Freitas, R. A. M. Silveira, and A. R. D. Silva, "Structural reliability of two-dimensional nonlinear steel frames," in Proc. XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE 2017), Florianópolis, SC, Brazil, Nov. 5-8, 2017.
- [7]. H. Q. Jebur and S. R. Al-Zaidee, "Non-deterministic approach for reliability evaluation of steel beam," Journal of Engineering, vol. 26, no. 1, pp. 121-141, Jan. 2020.
- [8]. M. S. Darmawana, A. N. Refania, M. Irmawana, R. Bayuajia, and R. B. Anugraha, "Time-dependent reliability analysis of steel I bridge girder designed based on SNI T-02-2005 and SNI T-3-2005 subjected to corrosion," Procedia Engineering, vol. 54, pp. 270-285, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.03.025.
- [9]. S.-M. Nguyen, V.-L. Phan, N.-L. Tran, X.-H. Nguyen, and T.-H. Nguyen, "Time-dependent reliability assessment of a continuous I-shaped steel beam considering corrosion effects," Engineering, Technology & Applied Science Research, vol. 12, no. 6, pp. 9523-9526, 2022.
- [10]. Z. Kala, J. Melcher, and L. Puklický, "Material and geometrical characteristics of structural steels based on statistical analysis of metallurgical products," Journal of Civil Engineering and Management, vol. 15, no. 3, pp. 299-307, 2009.
- [11]. S. Zhang and W. Zhou, "System reliability assessment of 3d steel frames designed per AISC LRFD specifications," Advanced Steel Construction Vol. 9, No. 1, pp. 77-89, 2013.
- [12]. AASHTO, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 4th Edition, Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007.
- [13]. TCVN 11823:2017, "Tiêu chuẩn thiết kế cầu đường bộ," Bộ Khoa học và công nghệ, Hà Nội, 29/12/2017.

Ngày nhận bài 20/01/2026;

Ngày chấp nhận đăng: 28/3/2026

