

PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN TRONG NGHIÊN CỨU ĐỘ TIN CẬY CỦA KHUNG THÉP VÁT LIÊN KẾT NỬA CỨNG CHỊU TẢI TRỌNG GIÓ FINITE ELEMENT METHOD STUDYING THE RELIABILITY OF TAPER STEEL FRAME WITH SEMI-RIGID CONNECTED IMPACT WIND LOAD

Phạm Trung Thành

Viện Khoa học công nghệ xây dựng

Email: phamthanh.ibst@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.59382/pro.intl.con-ibst.2023.ses1-24>

TÓM TẮT: Bài báo nghiên cứu ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH) ngẫu nhiên (Stochastic Finite Element Method-SFEM) ứng dụng phân tích khung vát có liên kết nửa cứng chịu tải trọng gió khi các thông số liên kết và tải trọng là các đại lượng ngẫu nhiên. Thuật toán phân tích ứng xử của kết cấu là sự kết hợp của phương pháp PTHH và mô phỏng Monte-Carlo. Chương trình tính sau đó được sử dụng để đánh giá độ tin cậy của khung thép vát có liên kết nửa cứng chịu tải trọng gió.

TỪ KHOÁ: PTHH; PTHHNN; khung thép vát; liên kết nửa cứng.

ABSTRACT: *This article studies the application of the Stochastic Finite Element Method (SFEM) to analyze beveled frames with semi-rigid connections subjected to wind loads when the connection and load parameters are random quantities. The structural behavior analysis algorithm is a combination of the SFEM method and Monte-Carlo simulation. The calculation program was then used to evaluate the reliability of the semi-rigidly connected beveled steel frame subjected to wind loads.*

KEYWORDS: *PTHH, PTHHNN; beveled steel frame; semi-hard bond.*

1. MỞ ĐẦU

Gần đây, khung thép vát bắt đầu được nghiên cứu và ứng dụng trong xây dựng dân dụng và công nghiệp do tối ưu được vật liệu mà vẫn đảm bảo độ bền, độ cứng vững của kết cấu. Tuy nhiên, các kết quả mới chỉ dừng lại ở bài toán khung thép vát liên kết đàn hồi chịu tải trọng tĩnh hoặc bài toán dao động riêng. Ngoài ra việc đánh giá độ tin cậy của kết cấu là công việc cần thiết để đảm bảo an toàn tuyệt đối trước khi đưa vào sử dụng.

Trên thế giới, việc nghiên cứu khung thép được thực hiện khá sớm. Có thể kể đến một số công bố tiêu biểu như: XiaoDong Tang và cộng sự (XiaoDong Tang và ctv, 1993) đã xuất bản công trình nghiên cứu về hàm dạng của cấu kiện dầm, cột tiết diện vát. Trong nghiên cứu này, tác giả cũng cung cấp ma trận độ cứng của của dầm với các tiết diện khác nhau như hình chữ nhật, hình tròn, hình khuyên. M. Rezaiee-Pajand và M. Moayedian (M. Rezaiee-Pajand và ctv, 2000) đã xây dựng công thức xác định độ cứng của dầm chữ I tiết diện vát bằng phương pháp PTHH. Trong khi, Samson Takele và cộng sự (Samson Takele và ctv, 2002) đã xây dựng ma trận độ cứng của dầm tiết diện bất kỳ. Vensko (Vensko và ctv, 2003) sử dụng phương pháp PTHH để phân tích ổn định xoắn của dầm có mặt cắt với tiết diện biến đổi. Al-Fatlawi (Al-Fatlawi

và ctv, 2005) nghiên cứu dao động tự do của dầm hộp tiết diện vát sử dụng phần mềm NASTRAN. Zhang và cộng sự (Zhang, L và ctv, 2008) nghiên cứu mất ổn định cánh của dầm chữ I tiết diện vát sử dụng phần mềm ANSYS. Louie và cộng sự (Louie L. Yaw và ctv 2009) cung cấp công thức xác định độ cứng cho dầm 2D tiết diện vát trong nghiên cứu của mình. Rishi Kumar Shukla và cộng sự (Rishi Kumar Shukla và ctv, 2013) đã phân tích dao động của dầm tiết diện vát sử dụng hàm đa thức Chebyshev. Hơn nữa, Issa và cộng sự (Issa và ctv, 2010) sử dụng phương pháp độ cứng trực tiếp (*Direct stiffness method*) để phân tích khung thép mái dốc có gờ.

Trong nước, nghiên cứu ứng xử cơ học của khung thép cũng được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu từ những năm 2000. Có thể kể đến một số tác giả như: Vũ Quốc Anh và Nguyễn Thanh Hoa (Vũ Quốc Anh và ctv, 2011) đã phân tích ứng xử của khung thép xét đến sự làm việc đàn hồi của liên kết dựa trên tiêu chuẩn thực hành kết cấu thép công trình dân dụng và cầu của Hoa Kỳ. Cho đến năm 2013, Vũ Quốc Anh đã xuất bản cuốn sách “*tính toán và thiết kế khung thép liên kết đàn hồi*” tại Nhà xuất bản Xây dựng làm tài liệu tham khảo cho kỹ sư, cán bộ kỹ thuật, cán bộ nghiên cứu ngành Xây dựng khi tính toán và thiết kế khung thép với liên kết đàn hồi cho những công trình thực tế. Trước đó, Nguyễn Hồng Sơn (2006) đã phân tích dao động

của khung thép phẳng liên kết nửa cứng phi tuyến kể đến biến dạng dẻo chịu tác động đồng thời của nhiều tải trọng bằng phương pháp PTHH.

Từ tổng quan về tình hình nghiên cứu trong nước và trên thế giới, mục tiêu chính của bài báo là phân tích ứng xử cơ học của khung thép vát có liên kết nửa cứng và đánh giá độ tin cậy của kết cấu. Nghiên cứu của bài báo này là sự kế thừa các nghiên cứu đã có trước đây, do đó bài báo rất mong muốn đóng góp một phần nhỏ bé vào công cuộc nghiên cứu độ tin cậy và tải trọng gió.

2. CÔNG THỨC PTHH NGẪU NHIÊN

2.1. Thuật toán giải bài toán động lực học khung vát có liên kết nửa cứng chịu tác dụng của tải trọng động

Xét hệ khung bất kỳ được mô hình hóa bằng phương pháp PTHH, chịu tác dụng của một tải trọng biến đổi theo thời gian t . Phương trình vi phân dao động toàn hệ có dạng:

$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = F(t) \quad (1)$$

trong đó: các ma trận M, C, K lần lượt là ma trận độ cứng, ma trận độ cản và ma trận khối lượng của bản thân hệ khung, không phụ thuộc vào tải tác dụng, chỉ cần tính một lần.

Véc tơ F tại mỗi thời điểm sẽ thay đổi theo quy luật của hàm tác dụng. Do đó, nó cần được tính trong từng bước thời gian. Phương trình (1) được tính bằng phương pháp tích phân trực tiếp Newmark các bước như sau:

- Gán điều kiện đầu:

$$q_0 = 0; \dot{q}_0 = 0 \quad (2)$$

$$A = M + \gamma dt C + \beta dt^2 K \quad (3)$$

với dt là bước tích phân và các hằng số sai phân:

$$\beta = \frac{1}{4}; \gamma = \frac{1}{2} \quad (4)$$

- Gia tốc tại bước $(n+1)$:

$$\ddot{q}_{n+1} = A^{-1} \left(F - C(\dot{q}_n + (1-\gamma)dt\dot{q}_n) - K \left(q_n + dt\dot{q}_n + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) dt^2 \ddot{q}_n \right) \right) \quad (5)$$

$$- K \left(q_n + dt\dot{q}_n + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) dt^2 \ddot{q}_n \right)$$

- Vận tốc tại bước $(n+1)$:

$$\dot{q}_{n+1} = \dot{q}_n + (1-\gamma)dt\ddot{q}_n + \gamma dt\ddot{q}_{n+1} \quad (6)$$

- Chuyển vị tại bước $(n+1)$:

$$q_{n+1} = q_n + dt\dot{q}_n + dt^2 \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{q}_n + dt^2 \beta \ddot{q}_{n+1} \quad (7)$$

Chương trình phân tích kết cấu hệ khung chịu tải trọng biến đổi theo thời gian được lập trình bằng phần mềm MATLAB. Để đơn giản, ma trận cản phần tử C_e được xác định theo lý thuyết cản Rayleigh và được biểu diễn tuyến tính qua ma trận khối lượng và ma trận độ cứng phần tử:

$$C_e = aM_e + bK_e \quad (8)$$

với a, b được xác định qua tỷ số cản và hai tần số dao động riêng đầu tiên của kết cấu. Giả thiết rằng tỉ số cản $\zeta_1 = \zeta_2 = \zeta$, khi đó a, b được xác định theo công thức sau:

$$\begin{Bmatrix} a \\ b \end{Bmatrix} = \frac{2\zeta}{\omega_1 + \omega_2} \begin{Bmatrix} \omega_1 \omega_2 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

2.2. Phương pháp mô phỏng Monte Carlo

Phương pháp Monte Carlo thực chất là một phương pháp dùng các số giả ngẫu nhiên để mô phỏng tính chất ngẫu nhiên của các biến và trực tiếp ước lượng độ tin cậy trên cơ sở luật số lớn. Bản chất của vấn đề là phải tính tích phân trong các biểu thức hàm công năng. Viết lại biểu thức này trong bài toán cụ thể với véc tơ ngẫu nhiên đầu vào

$\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ và miền an toàn được định nghĩa bởi điều kiện $f(\mathbf{X}) > 0$. Xác suất không an toàn của hệ sẽ được xác định như sau:

$$P_f = \int_{f(\mathbf{X}) < 0} f_{\mathbf{X}}(x) dx = E \left[I_{f(\mathbf{X}) < 0} \right] \quad (10)$$

trong đó:

$$I_{f(\mathbf{X})} = \begin{cases} 1 & \text{khi } f(\mathbf{X}) < 0 \\ 0 & \text{khi } f(\mathbf{X}) \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

Theo lý thuyết xác suất thông kê, nếu chúng ta có N các thể hiện của véc tơ ngẫu nhiên \mathbf{X} , chúng ta sẽ tính được một mẫu gồm N các giá trị của hàm

$I_{f(\mathbf{X}) < 0}$. Khi đó kỳ vọng của $I_{f(\mathbf{X}) < 0}$ có thể tính xấp xỉ trung bình cộng của mẫu.

$$\hat{P}_f = E \left[I_{f(\mathbf{X}) < 0} \right] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{f(\mathbf{X})}^i \quad (12)$$

Theo Lemaire tác giả đã chỉ ra rằng, ước lượng là hội tụ và khoảng tin cậy ở 95% của giá trị P_f được tính như sau:

$$\hat{P}_f \left(1 - 200 \sqrt{\frac{1 - \hat{P}_f}{N \hat{P}_f}} \right) \leq \hat{P}_f \quad (13)$$

$$\leq \hat{P}_f \left(1 + 200 \sqrt{\frac{1 - \hat{P}_f}{N \hat{P}_f}} \right)$$

Độ tin cậy của hệ được tính theo biểu thức:

$$\hat{P}_s = 1 - \hat{P}_f \quad (14)$$

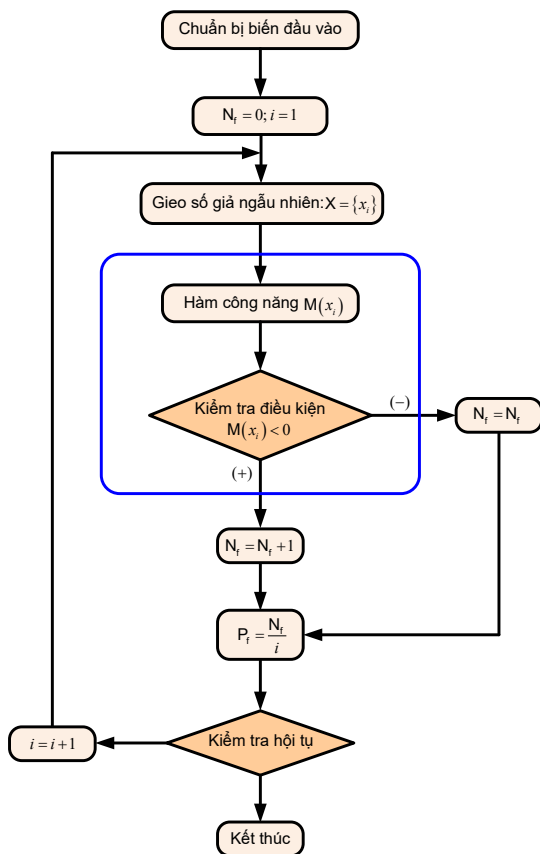
Khi đó chỉ số tin cậy được tính như sau:

$$\hat{\beta} = -\Phi^{-1}(\hat{P}_f) \quad (15)$$

Chúng ta nhận thấy rằng, trong phương pháp này các biến ngẫu nhiên đầu vào không nhất thiết phải là các biến chuẩn. Hơn nữa, phương pháp này có thể áp dụng được ngay cả khi hàm trạng thái không có dạng biểu thức giải tích cũng như không có dạng tuyến tính. Việc ghi nhận kết quả thực chất là đếm số lần kết quả rơi vào miền an toàn N_s trong tổng số N lần mô phỏng. Độ tin cậy hay xác suất rơi vào miền an toàn sẽ được ước lượng bằng tỷ số giữa số lần kết quả rơi vào miền an toàn trên tổng số lần gieo theo biểu thức (16). Điều kiện hội tụ chứng tỏ độ tin cậy của giá trị xác suất ước lượng được

$$\hat{P}_s = \frac{N_s}{N} \quad (16)$$

Ưu điểm của phương pháp này là có thể áp dụng phân tích các bài toán lớn, có mô hình phức tạp với hàm công năng đa mục tiêu. Tuy nhiên phương pháp này có nhược điểm lớn nhất là có khối lượng tính toán lớn và yêu cầu cao về cấu hình máy tính. Mặc dù vậy cùng với sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ thông tin thì phương pháp Monte Carlo ngày càng được ứng dụng rộng rãi.



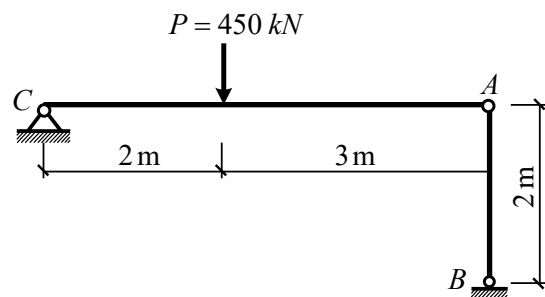
Hình 1. Sơ đồ thuật toán của phương pháp mô phỏng Monte Carlo

3. KHẢO SÁT SỐ

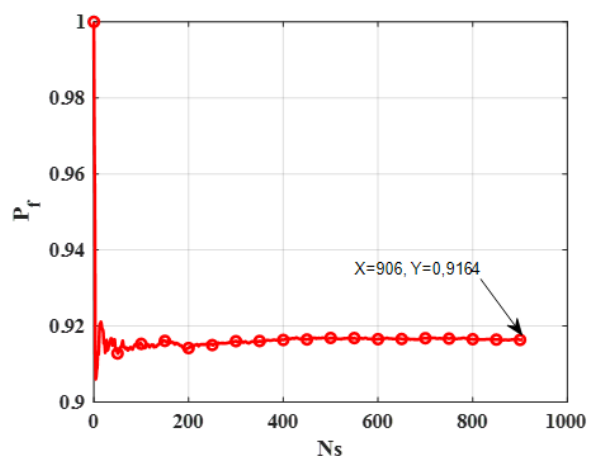
3.1. Độ tin cậy của mô phỏng Monte Carlo

Bằng phương pháp mô phỏng Monte Carlo, bài báo tiến hành kiểm tra độ tin cậy của kết cấu khung phẳng ABC có sơ đồ kết cấu cho trên Hình 2 với thanh chống AB có liên kết và chịu lực như hình vẽ, thanh chống AB bằng gỗ, mặt cắt chữ nhật kích thước 6×8 (cm²), mô đun đàn hồi $E = 0,75 \cdot 10^4$ kN/cm². Tham số đầu vào ngẫu nhiên được giả định là tải trọng tác dụng lên thanh AC có hệ số biến động $v = 0,15$ (hệ số biến động là tỷ số giữa độ lệch chuẩn và kỳ vọng $v = \sigma / \mu$) và hệ số an toàn của lực tới hạn là $n = 1,1$. Lực tới hạn trong bài toán ổn định của thanh chịu nén AB được xác định theo công thức Euler: $P_{th} = \frac{\pi^2 EJ_{min}}{l^2} = 266,48 kN$.

Kết quả phân tích được thể hiện trên Hình 3. Có thể thấy rằng, giá trị của xác suất ổn định hội tụ tại giá trị 0,9164 sau 906 vòng lặp tương ứng với giá trị độ tin cậy của kết cấu là 91,64%. Tiêu chuẩn hội tụ 2,5% chứng minh sự tin cậy của giá trị xác suất mất ổn định ước lượng được. Kết quả này cho thấy mặc dù trong thiết kế đã tính đến hệ số an toàn $n = 1,1$ nhưng do tính chất của tải trọng thay đổi ngẫu nhiên nên độ tin cậy cũng chỉ đạt 91,64%. Vì vậy việc đánh giá độ tin cậy của kết cấu là rất cần thiết.



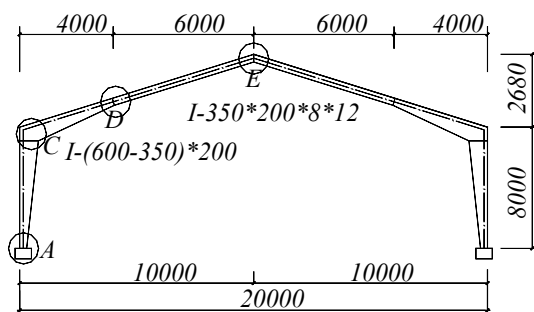
Hình 2. Sơ đồ kết cấu khung phẳng



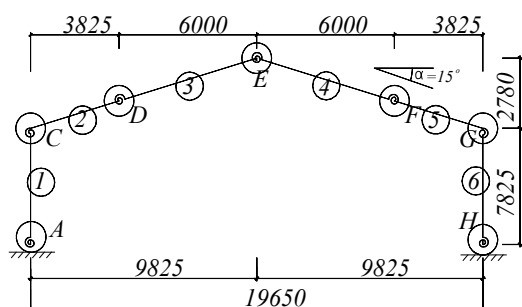
Hình 3. Sự hội tụ của xác suất ổn định P_s trong mô phỏng Monte Carlo

3.2. Đáp ứng động của khung thép vát có liên kết nửa cứng chịu tải trọng gió

Sử dụng mô hình khung có tiết diện mặt cắt hình chữ I, chiều dày thay đổi theo chiều dài dầm như hình 4, thuộc tính vật liệu của các cấu kiện là mô đun đàn hồi $E = 21.10^4$ MPa, trọng lượng riêng $\rho = 78,5$ kN/m³ và hệ số Poisson $\nu = 0,3$. Các kết quả phân tích đáp ứng động của điểm chính giữa khung chịu tải trọng gió đo được ở Lang Cang (một địa điểm được lấy từ nguồn internet) được trình bày dưới dạng các đồ thị như sau:



a) Mô hình hình học



b) Mô hình PTHH

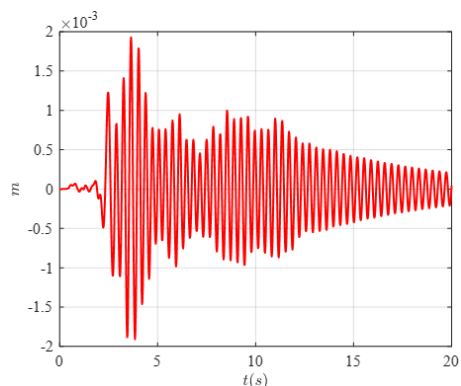
Hình 4. Mô hình khung thép vát có liên kết nửa cứng chịu tác dụng của tải trọng gió.

Dưới tác dụng của tải trọng gió, ta có được đáp ứng động lực học của hệ khung bao gồm chuyển vị và vận tốc chuyển vị tại điểm giữa khung theo thời gian của lực tác dụng được cho như hình 5 dưới đây. Có thể thấy rằng, đáp ứng độ lệch thẳng đứng phản ánh đúng quy luật tác dụng của tải trọng gió, điều này hoàn toàn dễ hiểu bởi vì trường biến dạng và chuyển vị khi tính toán được coi là tuyến tính.

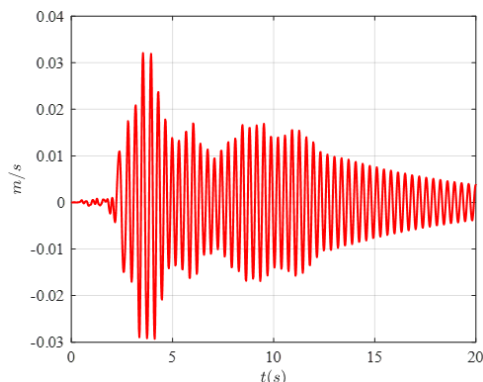
3.3. Độ tin cậy của khung thép vát liên kết nửa cứng chịu tải trọng gió

3.3.1. Ảnh hưởng của sai số tải trọng gió

Để khảo sát ảnh hưởng của sai số tải trọng gió đến độ tin cậy về chuyển vị của khung thép vát liên kết nửa cứng có độ cứng biên nửa cứng 10-5E. Giả định rằng, các thông số hình học và vật liệu là các đại lượng bất định trong khi tải trọng gió là đại lượng ngẫu nhiên có kỳ vọng là mô hình tải trọng gió tác dụng lên kết cấu được đo theo thời gian được



a) Đáp ứng chuyển vị



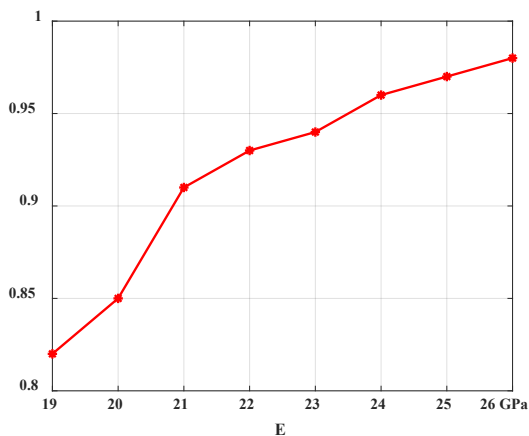
b) Đáp ứng vận tốc

Hình 5. Đáp ứng động tại điểm chính giữa khung vát chịu tải trọng gió tại Lang Cang

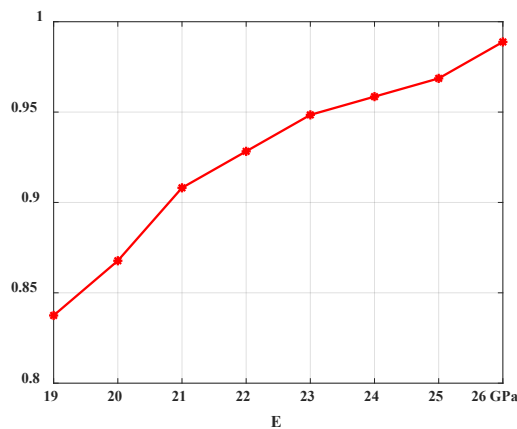
cho dưới dạng các đồ thị tại điểm đo ở Lang Cang (PLC) với hệ số biên động $\nu = 0,15$. Trong bài toán tiền định, như kết quả phân tích đáp ứng chuyển vị lớn nhất của nút số 4 của khung vát liên kết nửa cứng chịu tác dụng của tải trọng gió tại Lang Cang như Hình 5 là 1,8 mm. Kết quả tính toán xác suất an toàn (Ps) về chuyển vị của kết cấu khi mô đun đàn hồi E nhận các giá trị 190 GPa; 200 GPa; 210 GPa; 220 GPa; 230 GPa; 240 GPa; 250 GPa và 260 GPa được thể hiện trên các Hình 6a, Hình 6b tương ứng với hệ số an toàn lần lượt là $n = 1,5$, và $n = 2$. Có thể thấy rằng, dù mô đun đàn hồi có tăng so với bài toán tiền định ($E = 21 \times 10^4$ MPa = 210 GPa) và hệ số an toàn về chuyển vị lớn hơn 1 nhưng độ tin cậy của kết cấu vẫn không đạt được 100%. Điều này là do sai số cũng như tính chất ngẫu nhiên của tải trọng. Một điều nữa có thể thấy rằng, độ an toàn của kết cấu tăng lên khi giá trị mô đun đàn hồi tăng lên.

3.3.2. Ảnh hưởng của độ cứng liên kết nửa cứng

Trong mục này, ảnh hưởng của độ cứng liên kết nửa cứng đến độ tin cậy của khung thép vát liên kết nửa cứng được xem xét. Mô đun đàn hồi của vật liệu $E = 21 \times 10^4$ MPa. Giả định rằng, các thông số hình học và tải trọng là các đại lượng bất định trong khi độ cứng của liên kết nửa cứng là đại

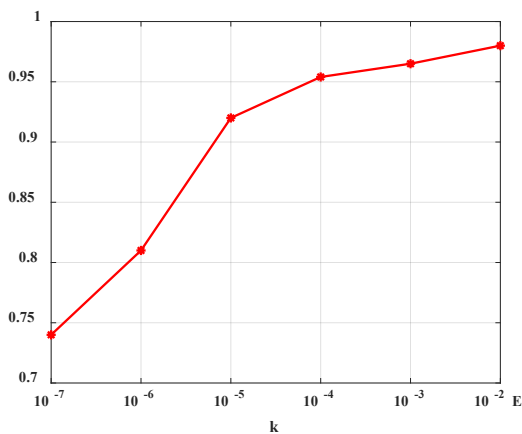


a) $n = 1.5$

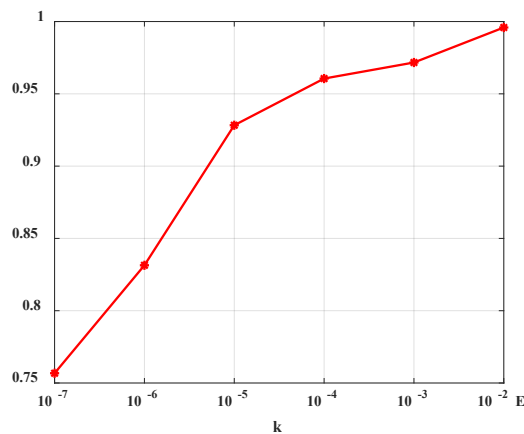


b) $n = 2$

Hình 6. Độ tin cậy của khung thép vát với tính chất ngẫu nhiên của tải trọng gió



a) $n = 1.5$



b) $n = 2$

Hình 7. Độ tin cậy của khung thép vát với tính chất ngẫu nhiên của liên kết

lượng ngẫu nhiên có kỳ vọng là $k = 10^{-5}E$ với hệ số biến động $v = 0.15$. Trong bài toán tiền định, như kết quả phân tích đáp ứng chuyển vị lớn nhất ở nút số 4 của khung thép vát liên kết nửa cứng chịu tác dụng của tải trọng gió tại Lang Cang (P_{LC}) như được lấy là 1,6820 mm. Kết quả tính toán xác suất an toàn (P_s) về chuyển vị của kết cấu khi độ cứng của liên kết nửa cứng nhận các giá trị $10^{-7}E$; $10^{-6}E$; $10^{-5}E$; $10^{-4}E$; $10^{-3}E$ và $10^{-2}E$ được thể hiện như hình 7a và hình 7b. Có thể thấy rằng, dù độ cứng liên kết nửa cứng có tăng so với bài toán tiền định ($k = 10^{-5}E$) và hệ số an toàn về chuyển vị lớn nhất được chọn là $n = 1,5$ và $n = 2$ nhưng xác suất phá hủy kết cấu vẫn tồn tại. Điều này cho thấy tính chất ngẫu nhiên của liên kết ảnh hưởng lớn đến độ tin cậy của kết cấu.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã tiến hành phân tích độ tin cậy của khung vát liên kết nửa cứng các yếu tố ngẫu nhiên là tải trọng gió và liên kết nửa cứng. Có thể kết luận rằng mặc dù các khâu thiết kế, chế tạo và khai thác sử dụng đều tuân theo các tiêu chuẩn cho phép nhưng nếu xét đến yếu tố ngẫu nhiên của các tham

số này thì vẫn dẫn đến tỷ lệ rủi ro cho kết cấu. Vì vậy việc đánh giá độ tin cậy của kết cấu ngay từ khâu thiết kế khi cố gắng kể đến các yếu tố ngẫu nhiên có thể xảy ra từ khi hình thành dự án đến khi đưa công trình vào khai thác sử dụng là rất quan trọng. Bài báo đã thiết lập mối quan hệ giữa độ tin cậy và sai số tải trọng gió, liên kết nửa cứng chỉ đối với kết cấu này. Các kết quả thu được cũng chỉ ra rằng mặc dù kết cấu có độ cứng cao hơn thiết kế nhưng độ tin cậy vẫn không đạt 100% do yếu tố ngẫu nhiên của các thông số đầu vào. Do đó, việc phân tích độ tin cậy trong bài toán thiết kế là việc làm rất có ý nghĩa trong việc lựa chọn phương án thiết kế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Tang. X, "Shape functions of tapered beam-column elements", *Computers & structures*, vol. 46, pp. 943-953, 1993.
- [2] Moayedian. M. & M. Rezaiee Pajand, "Explicit stiffness of tapered and monosymmetric I beam-columns", *International Journal of Engineering*, vol.13, pp. 1-18, 2000.

- [3] Takele. S, “Computerized Analysis of Frames with Non Prismatic Members”, *MSc. Thesis*, University of Addis Ababa, 2002.
- [4] Vensko. M. J, “Lateral-torsional buckling of structures with monosymmetric cross-sections”, *University of Pittsburgh*, 2009.
- [5] Al-Fatlawi. M. S, “Free Vibration Analysis Tapered Box Grider using Grillage Analogy and Finite Element Methods”, *Journal of Engineering*, vol. 11, 2005.
- [6] Zhang, L. & G. S. Tong, “Lateral buckling of web-tapered I-beams: A new theory”. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 64, pp. 1379-1393, 2008.
- [7] Louie L. Yaw, “Stiffness matrix for 2D tapered beams”, *Walla University*, 2009.
- [8] Zeinali, Y. H., S. M. Jamali & S. Musician, “General form of the stiffness matrix of a tapered beam-column”, *International Journal of Mining, Metallurgy & Mechanical Engineering (IJMMME)*, vol. 1, pp. 149-153, 2013.
- [9] Issa, H. K. & F. A. Mohammad, “Practical non-prismatic stiffness matrix for haunched-rafter pitched-roof steel portal frames”, *In Challenges, Opportunities and Solutions in Structural Engineering and Construction*, pp.189-194, 2009.
- [10] Vũ Quốc Anh, Nguyễn Thanh Hoa (2011), “Ứng xử của khung thép nhà công nghiệp khi xét đến sự làm việc đàn hồi của liên kết”, *Đề tài nghiên cứu khoa học cấp trường, Đại học Kiến trúc Hà Nội*, 2011.
- [11] Vũ Quốc Anh (2013), “Tính toán và thiết kế khung thép liên kết đàn hồi”, *Nhà xuất bản Xây dựng*, 2013.
- [12] Nguyễn Hồng Sơn (2006), “Phân tích khung thép phẳng liên kết nửa cứng phi tuyến kể đến biến dạng dẻo của vật liệu”, *Luận án Tiến sỹ kỹ thuật, Đại học Kiến trúc Hà Nội*, 2006.