

Tối ưu đa mục tiêu giàn thép với biến thiết kế rời rạc sử dụng phân tích trực tiếp

Mai Sỹ Hùng^{1*}

¹ Khoa Công trình thủy, trường đại học Xây Dựng Hà Nội, số 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội

TỪ KHÓA

Giàn thép
Tối ưu
PSO
Đa mục tiêu
Phân tích trực ti

TÓM TẮT

Sự phát triển nhanh chóng của khoa học máy tính đang mở ra nhiều hướng phát triển mới trong khoa học kỹ thuật bao gồm cả thiết kế kết cấu công trình xây dựng như hệ giàn, hệ khung, công trình cầu, v.v. Trong bài báo này, hai vấn đề tiềm năng nhất hiện nay trong thiết kế công trình giàn là phân tích trực tiếp và tối ưu kết cấu được trình bày. Ưu điểm chính của phân tích trực tiếp là các ứng xử phi tuyến của công trình được tính toán và qua đó sức kháng của toàn bộ công trình sẽ được xác định. Tối ưu kết cấu được xét đến là bài toán tối ưu có 2 hàm mục tiêu là khối lượng và chuyển vị của nút chịu điều kiện ràng buộc theo các trạng thái giới hạn khác nhau. Các biến thiết kế được xem xét là diện tích tiết diện các thanh giàn thuộc trong một tập giá trị rời rạc cho trước. Thuật toán tối ưu đa mục tiêu bầy đàn OMOPSO được sử dụng để giải quyết bài toán tối ưu. Bài toán thiết kế tối ưu cầu giàn phẳng gồm 113 thanh được xem xét để minh họa.

KEYWORDS

Truss
Optimization
PSO
Multi-Objective
Advanced analysis

ABSTRACT

The rapid development of computer science has been opening up many new directions of development in science and technology, including the design of construction structures such as truss systems, frame systems, bridges, etc. In this paper, the two most current potential problems in truss design, including direct analysis and structural optimization, are presented. The main advantage of direct analysis is that the nonlinear behavior of the structure is calculated and through which the resistance of the whole structure is determined. Structural optimization considered is a multi-objective optimization problem with two objective functions, namely the total weight and nodal displacement, subject to the constraints of different limit states. The design variables to be considered are the cross-sectional areas of the structural members belonging to a given set of discrete values. The Multi-Objective Particle Swarm Optimizer (OMOPSO) is used to solve the optimization problem. A planar truss bridge consisting of 113 bars is considered for illustration.

1. Đặt vấn đề

Sự phát triển nhanh chóng của khoa học máy tính đã cung cấp nhiều giải pháp công nghệ hiệu quả trong nhiều lĩnh vực khoa học kỹ thuật bao gồm cả thiết kế công trình. Hai điểm nổi bật nhất của cuộc cách mạng khoa học máy tính đem lại đó là (1) tăng hiệu suất hoạt động của máy tính giúp cho việc tính toán được thực hiện nhanh hơn rất nhiều và (2) nhiều thuật toán mạnh mẽ ra đời thành công cụ hiệu quả giải quyết các bài toán phức tạp, đặc biệt là các thuật toán trí tuệ nhân tạo như tối ưu hóa (optimization), học máy (machine learning) hay học sâu (deep learning). Trong lĩnh vực kỹ thuật công trình, kết cấu giàn thép đã được sử dụng rộng rãi từ rất lâu nhờ tính ưu việt về tiết kiệm vật liệu, khả năng chịu tải trọng cũng như hình dáng đẹp mắt. Vật liệu thép có cường độ rất tốt nên kích thước kết cấu thép thường mảnh hơn rất nhiều so với kết cấu bê tông cốt thép khi chịu cùng tải trọng tác dụng. Chính vì vậy, kết cấu thép nhạy cảm với mất ổn định đặc biệt là khi chịu nén. Để xét đến vấn đề này, phân tích trực tiếp được nghiên cứu ứng dụng vào tính toán kết cấu giàn trong hơn ba thập kỷ qua (ví dụ [1-4]). Ưu điểm của các phương pháp trực tiếp là tính toán được ứng xử phi tuyến của công trình khi chịu tải trọng

tác dụng, từ đó xác định được khả năng chịu tải của toàn bộ công trình. Tuy nhiên nhược điểm của phương pháp này là thời gian tính toán lâu hơn khá nhiều so với các phương pháp tính toán kết cấu truyền thống dựa vào phân tích tuyến tính.

Khoa học máy tính phát triển cũng cho phép ứng dụng ngày càng nhiều hơn các kỹ thuật tối ưu hiện đại vào thiết kế công trình, đặc biệt là các thuật toán mê-ta-ơ-rít-tíc [5-7]. Khác với các thuật toán tối ưu truyền thống dựa trên kỹ thuật tối ưu trực tiếp như quy hoạch tuyến tính hay quy hoạch động, các kỹ thuật tối ưu mê-ta-ơ-rít-tíc dựa trên các kỹ thuật tiến hóa dựa trên kinh nghiệm kết hợp với xác suất để tìm kiếm các nghiệm tối ưu tốt hơn. Ưu điểm của các thuật toán này là có thể cân bằng giữa tìm kiếm địa phương và toàn cục cho nên có thể vượt qua được các nghiệm tối ưu cục bộ tốt hơn so với các phương pháp truyền thống. Tuy nhiên, nhược điểm của chúng lại là sử dụng rất nhiều lần phân tích kết cấu dẫn đến thời gian tính toán rất lâu đặc biệt là trong trường hợp có xét đến phân tích trực tiếp. Trong bài toán thiết kế tối ưu công trình, tổng giá thành hay khối lượng kết cấu thường được chọn làm hàm mục tiêu để tối thiểu hóa [8]. Tuy nhiên, để phù hợp với thực tế, các bài toán tối ưu đa mục tiêu được quan tâm nghiên cứu gần đây. Lúc này hàm mục tiêu không

*Liên hệ tác giả: hungm@huce.edu.vn

Nhận ngày 05/09/2022, sửa xong ngày 04/12/2022, chấp nhận đăng 10/01/2023

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.01.2023.437>

chỉ là một mà có thể là hai hoặc nhiều hơn thế nữa. Nghiệm tối ưu tìm được cũng không chỉ là một phương án thiết kế mà là một tập nghiệm thường được gọi là tập nghiệm Pareto bao gồm các phương án thiết kế có chất lượng ngang nhau (không so sánh hơn kém được với nhau). Dựa trên quan điểm tối ưu này, nhiều nghiên cứu về tối ưu đa mục tiêu kết cấu giàn đã được thực hiện như [9-11]. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chưa xét đến tính phi tuyến của hệ giàn.

Bài báo này sẽ trình bày bài toán tối ưu đa mục tiêu hệ giàn thép sử dụng phân tích trực tiếp. Hai hàm mục tiêu được xem xét bao gồm khối lượng của công trình và chuyển vị của nút. Điều kiện ràng buộc bao gồm các điều kiện về khả năng chịu tải và không chế chuyển vị của công trình theo các trạng thái giới hạn khác nhau. Biểu thiết kế là diện tích tiết diện các thanh giàn và được lựa chọn trong một tập giá trị rời rạc cho trước. Để giải quyết bài toán tối ưu đặt ra, thuật toán tối ưu đa mục tiêu bầy đàn OMOPSO được sử dụng [12]. Bài toán thiết kế tối ưu cầu giàn phẳng gồm 113 thanh được xem xét để minh họa.

2. Xây dựng bài toán tối ưu

2.1. Hàm mục tiêu

Hai hàm mục tiêu được xem xét trong nghiên cứu này là tổng khối lượng kết cấu và chuyển vị tại nút giàn được thiết lập như sau:

$$\text{Min}f_1(X) = \rho \sum_{i=1}^d (A(x_i) \sum_{j=1}^{d_i} L_{ij}), X = (x_1, x_2, \dots, x_d), x_i \in [1, UB_i] \quad (1)$$

$$\text{Min}f_2(X) = |\Delta_j| \quad (2)$$

trong đó: d là số lượng biến thiết kế; $X = (x_1, x_2, \dots, x_d)$ là vector biến thiết kế với x_i là số tự nhiên trong khoảng $[1, UB_i]$ thể hiện vị trí $A(x_i)$ trong bộ tiết diện sử dụng để thiết kế cho phần tử thứ i ; $A(x_i)$ là tiết diện biến thứ i ; ρ khối lượng riêng của thép; d_i là số lượng thanh trong nhóm thanh giàn thứ i ; L_{ij} là chiều dài của thanh dàn thứ j trong nhóm thanh giàn thứ i ; Δ_j là chuyển vị của nút được tối thiểu hóa chuyển vị thứ j . Như vậy, ta có thể thấy rằng, bài toán tối ưu giàn với biến rời rạc có cách xử lý biến thiết kế so với bài toán với biến liên tục. Biến thiết kế trong bài toán này là các số tự nhiên biểu thị cho vị trí của loại tiết diện được sử dụng cho thanh giàn trong bộ dữ liệu cho trước chứ không phải là chính diện tích của tiết diện giàn. Nói một cách khác, từ thông số biến thiết kế x_i , ta cần tiến hành xác định giá trị $A(x_i)$ và sau đó dùng công thức (1) để tính được $f_1(X)$.

2.2. Các điều kiện ràng buộc

Các điều kiện ràng buộc bao gồm các điều kiện tương ứng với các tổ hợp tải trọng cường độ và sử dụng. Các điều kiện về cường độ có thể mô tả một cách khá đơn giản khi chúng ta sử dụng các phương pháp phân tích trực tiếp như sau:

$$C_j^{cd}(X) = 1 - \frac{R_j}{S_j} \leq 0 \quad j = 1, \dots, n_{cd}, \quad (3)$$

trong đó R_j và S_j là sức kháng của công trình và tác động của tải trọng; n_{cd} là số tổ hợp tải trọng cường độ được xem xét. Giá trị sức kháng của kết cấu R_j được xác định dựa vào phân tích trực tiếp

nhằm xét đến ứng xử phi tuyến của công trình. Tải trọng sẽ được chia thành các bước tải nhỏ nhằm xác định ứng xử của kết cấu theo từng bước tải đó. Qua đó, đường quan hệ ứng suất-biến dạng của toàn bộ công trình được xác định. Từ đó, khả năng chịu tải lớn nhất của cả công trình được tính toán. Tỷ lệ $lf = \frac{R}{S}$ còn gọi là hệ số chịu tải của công trình. Nếu hệ số này lớn hơn 1, công trình sẽ an toàn và ngược lại. Như vậy, sử dụng phương pháp phân tích trực tiếp thì việc kiểm tra an toàn cho công trình trở nên khá đơn giản thông qua việc đánh giá lf . Chi tiết phương pháp phân tích trực tiếp cho hệ giàn thép tham khảo trong tài liệu [13].

Đối với tổ hợp trạng thái giới hạn sử dụng, giới hạn về chuyển vị sẽ được đánh giá như sau:

$$C_{k,l}^{cv} = \frac{|\Delta_{k,l}|}{|\Delta_{k,l}^u|} - 1 \leq 0 \quad k = 1, \dots, N, \quad (4)$$

trong đó l chỉ số thứ tự tổ hợp giới hạn sử dụng thứ l được xem xét, N là số nút giàn được xét điều kiện chuyển vị, $\Delta_{k,l}$ và $\Delta_{k,l}^u$ là chuyển vị và giới hạn chuyển vị của nút thứ k .

2.3. Phương pháp hàm phạt

Phương pháp hàm phạt được sử dụng để chuyển đổi bài toán tối ưu đa mục tiêu có điều kiện ràng buộc ở trên sang bài toán tối ưu đa mục tiêu không có điều kiện ràng buộc như sau:

$$f_1^{un}(X) = f_1^{un}(X) \times (1 + \alpha_{cd}\beta_1 + \alpha_{sd}\beta_2), \quad (5)$$

$$f_2^{un}(X) = f_2^{un}(X) \times (1 + \alpha_{cd}\beta_1 + \alpha_{sd}\beta_2), \quad (6)$$

$$\text{trong đó: } \beta_1 = \sum(\max(C_j^{cd}, 0)); \beta_2 = \sum(\sum_{j=1}^{nm} \max(C_{k,l}^{sd}, 0)) \quad (7)$$

α_{cd} và α_{sd} là các hệ số phạt được lấy với giá trị rất lớn nhằm làm cho giá trị hàm tối ưu bị tăng lên và qua đó sẽ bị loại bỏ trong quá trình tối ưu.

Để giải quyết bài toán tối ưu ở trên, trong nghiên cứu này chúng ta sẽ sử dụng thuật toán tối ưu đa mục tiêu OMOPSO. Chi tiết nội dung của thuật toán này được trình bày ở phần tiếp theo.

3. Thuật toán tối ưu OMOPSO

OMOPSO được Reyes và Coello [12] đề xuất dựa trên kỹ thuật Pareto và sử dụng hệ số đông đúc (crowding factor) để lựa chọn các cá thể lãnh đạo (cá thể tốt hơn) (leaders). Đối với mỗi vòng tiến hóa và mỗi cá thể sẽ lựa chọn một cá thể lãnh đạo cho quá trình tiến hóa. Việc lựa chọn này được thực hiện bởi kỹ thuật chọn lọc cạnh tranh nhị phân (binary tournament) dựa trên giá trị đông đúc (crowding value) của cá thể lãnh đạo.

Trong OMOPSO, hai tập lưu trữ được sử dụng: tập thứ nhất để lưu trữ các cá thể lãnh đạo hiện đang được sử dụng để thực hiện quá trình tiến hóa và tập còn lại lưu trữ các giải pháp cuối cùng (final solutions). Hệ số đông đúc được sử dụng để lọc ra danh sách các cá thể lãnh đạo sẽ được áp dụng khi số lượng cá thể trong các tập đó vượt quá giá trị giới hạn tối đa được định nghĩa trước. Chỉ những nhà lãnh đạo có hệ số đông đúc tốt nhất mới được giữ lại. Ngoài ra, trong OMOPSO, quần thể được chia thành 3 tập quần thể nhỏ hơn và mỗi

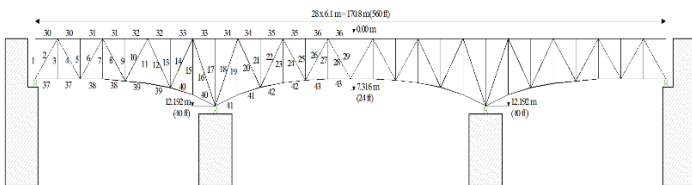
quần thể đó được áp dụng kỹ thuật đột biến khác nhau. Trình tự của thuật toán OMOPSO được tóm tắt như sau:

Bảng 1. Thuật toán OMOPSO.

STT	Nội dung
01	Tạo quần thể ban đầu một cách ngẫu nhiên
02	Xác định vị trí ban đầu của các cá thể và xác định các cá thể lãnh đạo
03	Lưu giữ các cá thể lãnh đạo vào tập 1
04	Xác định hệ số đồng đức cho các cá thể lãnh đạo
05	Thực hiện vòng lặp cho đến khi đạt điều kiện dừng
06	Thực hiện quá trình đột biến và tiến hóa tương ứng với từng cá thể trong quần thể
07	Cập nhật các cá thể lãnh đạo
08	Lưu giữ cá thể lãnh đạo tốt vào tập 1
09	Kết quả cuối cùng là tập cá thể tốt trong tập 1

4. Trường hợp nghiên cứu

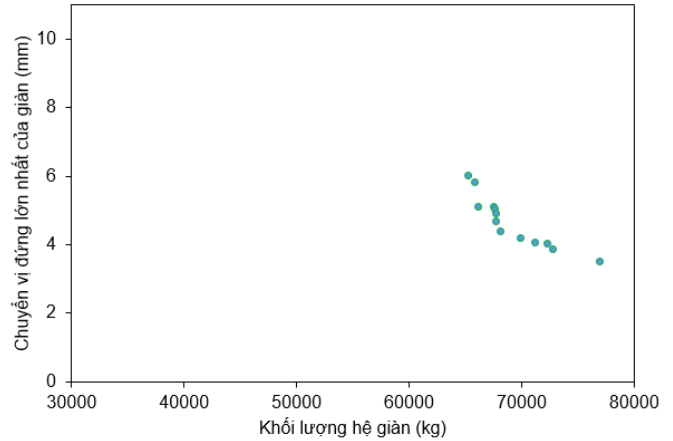
Trong phần này, một cầu giàn thép phẳng 113 thanh được nghiên cứu. Kích thước và sơ đồ của cầu được trình bày trong Hình 1. Các thanh giàn được chia thành 43 nhóm tiết diện khác nhau. Tương ứng với đó bài toán tối ưu sẽ có 43 biến thiết kế. Tập giá trị diện tích tiết diện của các thanh giàn là $A = [163,68; 199,46; 228,47; 271,58; 369,65; 415,27; 572,27; 606,68; 633,15; 754,39; 803,84; 896,82; 1109,80; 1243,47; 1519,76; 1646,65; 1884,79; 2205,07; 2461,76; 2826,00; 3523,87]$ (mm²). Tập này gồm 21 giá trị khác nhau, dẫn đến biến thiết kế của quá trình tối ưu x_i sẽ nhận các giá trị tự nhiên trong khoảng [1, 21] tương ứng với vị trí loại tiết diện được sử dụng trong tập D cho nhóm thanh giàn thứ i. Tổ hợp cường độ được xem xét là (1,25DL + 1,75LL) và tổ hợp sử dụng là (1,00DL + 1,00LL) với giới hạn chuyển vị theo phương đứng là 10,5 (mm) tại các nút. DL và LL là tĩnh và hoạt tải tác dụng được lấy giá trị bằng 250 và 100 (kN) tại các nút giàn ở đường xe chạy phía trên. Vật liệu thép được sử dụng là thép A992 có $F_y = 344,7 MPa$ và $E = 200 GPa$. Các thông số của thuật toán OMOPSO gồm có: số biến thiết kế (D) là 43, số lượng cá thể (NP) là 100, số thế hệ tối đa (MaxIteration) là 100.



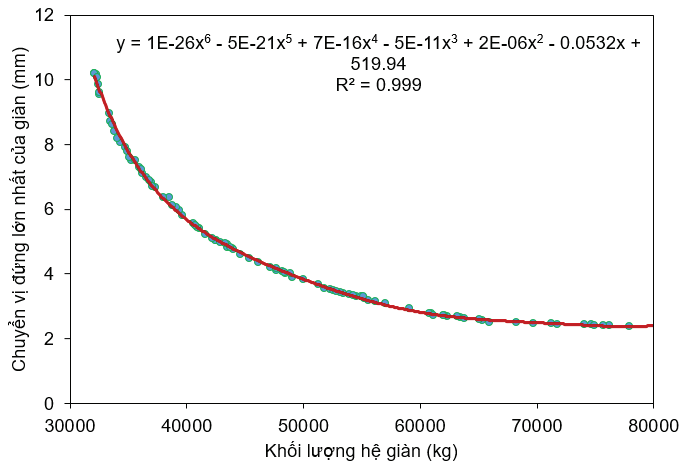
Hình 1. Sơ đồ cầu giàn phẳng 113 thanh.

Hình 2 thể hiện tập giá trị chứa các cá thể lãnh đạo trong quần thể đầu tiên. Có thể thấy rằng số lượng cá thể ở tập ban đầu này còn

ít (14 cá thể) và được tìm ra từ 100 cá thể tạo ngẫu nhiên ban đầu. Hình 3 thể hiện kết quả của tập nghiệm Pareto cuối cùng của quá trình tối ưu. Kết quả của tập nghiệm này tốt hơn rất nhiều so với tập ban đầu được thể hiện trong Hình 2. Cùng với đó là số lượng cá thể tối ưu tìm được cũng nhiều hơn (154 cá thể). Các nghiệm tối ưu này được tập hợp thành đường cong Pareto với phương trình gần đúng được thể hiện trong Hình 3 có giá trị $R^2 = 0,999$.



Hình 2. Đường cong Pareto ở quần thể ban đầu.



Hình 3. Tập nghiệm Pareto cuối cùng.

Bảng 2 trình bày 3 nghiệm tối ưu điển hình tương ứng với 3 trường hợp là: (1) giá trị hàm mục tiêu F_1 nhỏ nhất, (2) giá trị hàm mục tiêu F_2 nhỏ nhất và cân bằng các giá trị của 2 hàm mục tiêu. Giá trị nhỏ nhất của F_1 tìm được là 32079,72 (kg) tương ứng với chuyển vị lớn nhất của hàm F_2 trong tập nghiệm Pareto là 10,21 (mm). Còn giá trị nhỏ nhất của F_2 tìm được là 2,35 (mm) tương ứng với F_1 lớn nhất và bằng 92937,83 (kg). Điều này cho thấy 2 hàm mục tiêu F_1 và F_2 có mối quan hệ ngược nhau. Trong trường hợp này việc xử lý bài toán dựa trên việc thiết lập bài toán tối ưu đa mục tiêu là cần thiết. Tập nghiệm Pareto cuối cùng tìm được sẽ có dạng đường cong như trình bày trong Hình 2. Tập nghiệm này cung cấp cho nhà thiết kế dữ liệu cần thiết để lựa chọn giải pháp thích hợp.

Bảng 2. Một số phương án tối ưu.

	F ₁ nhỏ nhất	F ₂ nhỏ nhất	Cân bằng F ₁ và F ₂
Khối lượng giàn (kg)	32079,72	92937,83	37313,83
Chuyển vị đứng lớn nhất (mm)	10,21	2,34689	6,68
A1 (mm ²)	163,68	3523,87	199,46
A2	163,68	163,68	199,46
A3	163,68	3523,87	163,68
A4	163,68	3523,87	199,46
A5	163,68	3523,87	199,46
A6	163,68	3523,87	163,68
A7	163,68	3523,87	1109,80
A8	163,68	163,68	228,47
A9	163,68	3523,87	163,68
A10	163,68	3523,87	633,15
A11	163,68	3523,87	228,47
A12	163,68	572,27	163,68
A13	163,68	3523,87	199,46
A14	163,68	3523,87	271,58
A15	163,68	3523,87	369,65
A16	163,68	3523,87	163,68
A17	163,68	3523,87	369,65
A18	163,68	163,68	163,68
A19	163,68	3523,87	228,47
A20	163,68	3523,87	803,84
A21	228,47	163,68	228,47
A22	228,47	606,68	163,68
A23	163,68	3523,87	369,65
A24	163,68	3523,87	163,68
A25	163,68	3523,87	163,68
A26	163,68	3523,87	415,27
A27	163,68	163,68	163,68
A28	163,68	606,68	199,46
A29	163,68	163,68	199,46
A30	163,68	3523,87	163,68
A31	163,68	199,46	163,68
A32	163,68	1109,80	163,68
A33	163,68	163,68	199,46
A34	163,68	3523,87	199,46
A35	163,68	3523,87	163,68
A36	163,68	163,68	163,68
A37	163,68	163,68	199,46
A38	163,68	163,68	163,68
A39	199,46	163,68	199,46
A40	163,68	163,68	199,46
A41	163,68	163,68	199,46
A42	163,68	163,68	163,68
A43	163,68	3523,87	163,68

5. Kết luận

Bài báo trình bày bài toán tối ưu giàn thép với biến rời rạc sử dụng phân tích trực tiếp. Hai hàm mục tiêu được xét đến là khối lượng

và chuyển vị của nút chịu điều kiện ràng buộc theo các trạng thái giới hạn khác nhau. Các biến thiết kế được xem xét là diện tích tiết diện các thanh giàn thuộc trong một tập giá trị rời rạc cho trước. Phân tích trực tiếp cho phép xét đến ứng xử phi tuyến của công trình được sử dụng để đánh giá điều kiện ràng buộc của bài toán. Thuật toán tối ưu đa mục tiêu bầy đàn OMOPSO được sử dụng để giải quyết bài toán tối ưu. Kết quả thiết kế tối ưu cầu giàn phẳng gồm 113 thanh cho thấy bài toán tối ưu đa mục tiêu được xây dựng là cần thiết và thuật toán OMOPSO khá hiệu quả trong việc tìm kiếm nghiệm tối ưu cho dạng bài toán này. Trong nghiên cứu tiếp theo, tác giả sẽ tập trung đánh giá hiệu quả của nhiều thuật toán tối ưu đa mục tiêu khác trong việc giải quyết dạng bài toán này. Bên cạnh đó, các dạng hàm mục tiêu khác cũng sẽ được xem xét cũng như số lượng hàm mục tiêu nhiều hơn nữa.

Tài liệu tham khảo

- [1]. V. H. Truong, S.E. Kim. An efficient method for reliability-based design optimization of nonlinear inelastic steel space frames. *Struct Multidisc Optim* 2017; 56: 331-351.
- [2]. H.A. Pham, V.H. Truong, T.C. Vu. Fuzzy finite element analysis for free vibration response of functionally graded semi-rigid frame structures. *Applied Mathematical Modelling* 2020; 88: 852-869.
- [3]. H.A. Pham, V.H. Truong, M.T. Tran. Fuzzy static finite element analysis for functionally graded structures with semi-rigid connections. *Structures* 2020; 26: 639-650.
- [4]. V.H. Truong, H.M. Hung, P.H. Anh, T.D. Hoc. Optimization of steel moment frames with panel-zone design using an adaptive differential evolution. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE)-HUCE* 2020; 14(2): 65-75.
- [5]. H.A. Pham, D.X. Nguyen, V.H. Truong. An efficient differential-evolution-based moving compensation optimization approach for controlling differential column shortening in tall buildings. *Expert Systems with Applications* 2021; 169, 114531.
- [6]. M.H. Ha, Q.V. Vu, V.H. Truong. Optimization of nonlinear inelastic steel frames considering panel zones. *Advances in Engineering Software* 2020; 142: 102771.
- [7]. V.H. Truong, S.E. Kim. A robust method for optimization of semi-rigid steel frames subject to seismic loading. *Journal of Constructional Steel Research* 2018; 145: 184-195.
- [8]. V.H. Truong, S.E. Kim. Reliability-based design optimization of nonlinear inelastic trusses using improved differential evolution algorithm. *Advances in Engineering Software* 2018; 121: 59-74.
- [9]. T. Vo-Duy, D. Duong-Gia, V. Ho-Huu and T. Nguyen-Thoi. An Effective Couple Method for Reliability-Based Multi-Objective Optimization of Truss Structures with Static and Dynamic Constraints. *International Journal of Computational Methods* 2020; 17(06): 1950016.
- [10]. H. F. Eid, L. Garcia-Hernandez, A.h Abraham. Spiral water cycle algorithm for solving multi-objective optimization and truss optimization problems. *Engineering with Computers* 2022; 38: 963–973.
- [11]. B. Nan, Y. Bai, Y. Wu. Multi-Objective Optimization of Spatially Truss Structures Based on Node Movement. *Applied Sciences* 2020; 10(6): 1964.
- [12]. M. Reyes and C. Coello. Improving pso-based multiobjective optimization using crowding, mutation and edominance. In *Evolutionary Multi-Criterion Optimization (EMO 2005)*, pages 505–519, 2005.