

Sử dụng thuật toán tối ưu bầy đàn thiết kế tối ưu trọng lượng dầm liên hợp thép - bê tông theo tiêu chuẩn Eurocode 4

Trần Anh Bảo^{1*}, Bùi Đức Năng²

¹ Ban Doanh trại, Học viện KTQS

² Viện Kỹ thuật CTĐB, Học viện KTQS

TỪ KHÓA

Dầm liên hợp
Thiết kế tối ưu
Tối ưu bầy đàn
Tối ưu kết cấu
Eurocode 4

TÓM TẮT

Trong bài báo này, một phương pháp thiết kế tối ưu dầm liên hợp thép - bê tông dựa vào kết quả tìm kiếm của thuật toán tối ưu bầy đàn (PSO) được đề xuất. Thuật toán PSO được triển khai thông qua ngôn ngữ lập trình Matlab để thiết kế dầm bê tông liên hợp thép - bê tông với hàm mục tiêu là tối thiểu trọng lượng dầm, đáp ứng tất cả các điều kiện an toàn và khả năng sử dụng theo tiêu chuẩn Eurocode 4. Kết quả từ ví dụ số đã cho thấy thuật toán PSO là đơn giản và hiệu quả cao, có thể ứng dụng tốt trong phát triển các phần mềm thiết kế tối ưu kết cấu.

KEYWORD

Composite beam
Optimal design
Particle swarm optimization
Structural optimization
Eurocode 4

ABSTRACT

In this paper, an optimal design method for steel-concrete composite beam based on the search result of the particle swarm optimization (PSO) algorithm is proposed. PSO algorithm is carried out through Matlab programming language to design steel-concrete composite beam with the objective function of minimizing beam weight, in order to satisfy all safety conditions and usability according to Eurocode 4 standard. The result of the numerical example showed that the PSO algorithm is simple and highly efficient, which can be applied well in developing design softwares of structural optimization.

1. Giới thiệu

Kết cấu liên hợp thép - bê tông là loại kết cấu sử dụng kết hợp bê tông và các loại thép hình, thép tấm làm việc đồng thời. Loại kết cấu này ngày càng được sử dụng rộng rãi trong xây dựng các công trình cầu, nhà cao tầng... do tận dụng ưu điểm của hai loại vật liệu và giảm thời gian thi công, cho phép áp dụng công nghệ thi công tiên tiến. Trong thực tế, dầm liên hợp được thiết kế theo quy trình thử và sai để chọn các tham số sau [1]: (1) loại bê tông được biểu thị bằng cường độ nén và trọng lượng đơn vị của nó; (2) độ dày của bản; (3) thép kích thước tiết diện được biểu thị bằng diện tích mặt cắt ngang và cấp thép được biểu thị bằng cường độ chảy và (4) cường độ của các đầu nối cắt được biểu thị bằng khả năng chống cắt và số lượng đầu nối cắt được cung cấp. Việc thiết kế dầm liên hợp thép - bê tông khá phức tạp và phải lặp đi lặp lại nhiều lần.

Tối ưu hóa kết cấu là một phương pháp nhằm giảm chi phí xây dựng của một thiết kế kết cấu nhất định càng nhiều càng tốt mà không gây tổn hại đến an toàn kết cấu. Một quy trình tối ưu hóa tốt là quy trình trong đó cấu trúc được mô hình hóa và các cân nhắc liên quan đến các biến thiết kế đã chọn gần giống với các điều kiện làm việc thực tế [2]. Tối ưu hóa toán học cung cấp các phương pháp để tự động hóa quy trình thiết kế phức tạp. Từ đó, người ta có thể đạt được một giải pháp tối ưu trong số nhiều giải pháp trên cơ sở một tiêu chí chọn trước như trọng lượng tối thiểu hoặc chi phí tối thiểu. Vì không có thuật toán

nào là hoàn hảo để giải quyết mọi bài toán tối ưu hóa, do đó, thành công trong việc giải quyết bất kỳ loại bài toán tối ưu hóa nào phụ thuộc vào việc lựa chọn một thuật toán thích hợp để có được lời giải tối ưu với khối lượng tính toán ít hơn và tốc độ hội tụ nhanh hơn.

Tối ưu hóa kết cấu liên hợp thép - bê tông đã được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm, nhiều thuật toán tối ưu được phát triển và áp dụng để giải quyết các bài toán tối ưu các cấu kiện của hệ kết cấu này. Trong số đó, sự đóng góp của nhóm các thuật toán tiến hóa là đáng kể. Thuật giải di truyền (Genetic Algorithm - GA) được sử dụng trong các bài báo [1-5] để thiết kế tối ưu các cấu kiện dầm - sàn của kết cấu liên hợp thép - bê tông theo các tiêu chí và các tiêu chuẩn thiết kế khác nhau. Tối ưu đàn kiến (Ant Colony Optimization - ACO) và phiên bản nâng cấp của nó IACO dùng trong thiết kế tối ưu chi phí dầm liên hợp được tìm thấy trong [6-7]. Ở trong nước, đáng chú ý có các nghiên cứu sử dụng thuật toán tiến hóa vi phân (Differential Evolution - DE) để tối ưu dầm liên hợp thép - bê tông sử dụng tiết diện chữ I tổ hợp [8] và sử dụng tiết diện chữ I tổ hợp không đối xứng theo tiêu chuẩn thiết kế Eurocode 4 [9], với hàm mục tiêu là tối thiểu hóa trọng lượng dầm thép. Trong bài báo [10], các tác giả cũng sử dụng thuật toán DE để tối ưu hóa trọng lượng dầm thép, nhưng theo hướng sử dụng mô hình ngẫu nhiên, có kể đến các ràng buộc là độ tin cậy. Gần đây, một nghiên cứu sử dụng thuật toán DE để thiết kế tối ưu cho dầm thép tổ hợp dạng chữ I trong kết cấu cầu liên hợp nhịp đơn giản dựa theo các quy định trong TCVN 11823:2017 đã được công bố [11].

*Liên hệ tác giả: trananhbao@lqdtu.edu.vn

Nhận ngày 12/03/2023, sửa xong ngày 28/03/2023, chấp nhận đăng 19/05/2023

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2023.538>

Thuật toán tối ưu bầy đàn/tối ưu đám hạt (Particle Swarm Optimization - PSO) được đề xuất bởi Kennedy và Eberhart vào năm 1995, lấy cảm hứng từ hành vi của một số loài động vật sống theo đàn, chẳng hạn như chim và cá [12]. Ý tưởng và cấu trúc chính của thuật toán được xây dựng từ tính toán tiến hóa quần thể. Hiện tại, nó được coi là một trong những thuật toán thông minh bầy đàn hàng đầu được sử dụng rộng rãi trong các kỹ thuật lai, do có tính đơn giản, khả năng tìm kiếm tối ưu toàn cục và tốc độ hội tụ nhanh hơn [13]. Nhờ sự thành công và phổ biến của PSO, nó đã được áp dụng trong nhiều lĩnh vực như năng lượng, hóa học, logistics và vận tải, khai thác dữ liệu... Với trường hợp kết cấu liên hợp thép - bê tông, ở nước ngoài đã có các nghiên cứu về: phương pháp phân tử hữu hạn dựa trên PSO được dùng để phân tích và thiết kế phân phối các liên kết chống cắt cho dầm liên hợp thép - bê tông tương tác một phần [14]; PSO được sử dụng để thiết kế hệ thống sàn thép liên hợp và không liên hợp theo tiêu chuẩn thiết kế S16 của Canada [15]. Tuy nhiên cho đến nay, trên các tạp chí trong nước chưa có công bố nào về việc ứng dụng PSO để tối ưu kết cấu liên hợp thép - bê tông.

Bài báo này đề xuất sử dụng thuật toán PSO để tối ưu hóa trọng lượng dầm liên hợp thép - bê tông theo tiêu chuẩn thiết kế Eurocode 4, với các chỉ dẫn kỹ thuật từ các tài liệu tham khảo [16, 17]. Dạng dầm được thiết kế là dầm đơn giản, sử dụng tiết diện chữ I tổ hợp, chịu tải trọng phân bố đều.

2. Mô hình bài toán thiết kế tối ưu trọng lượng dầm liên hợp thép - bê tông theo tiêu chuẩn Eurocode 4

2.1. Các biến thiết kế

Như đã nêu trong [10], có nhiều tham số cần được xem xét khi thiết kế tối ưu dầm liên hợp thép - bê tông. Để giảm mức độ phức tạp của bài toán mà vẫn đạt hiệu quả mong muốn, tương tự như một số nghiên cứu cùng đối tượng [6, 8-10], chỉ chọn các kích thước tiết diện ngang của dầm chữ I làm biến thiết kế, bao gồm: chiều cao dầm h , chiều dày bản bụng t_w , chiều rộng bản cánh b_f , chiều dày bản cánh t_f (Hình 1).

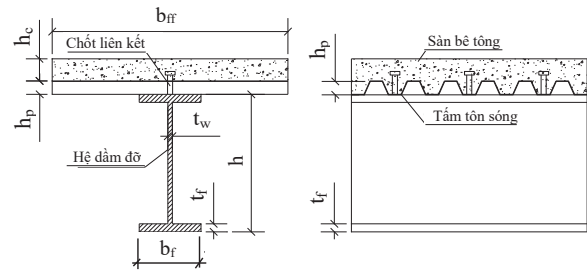
Các biến đặc trưng hình học của tiết diện dầm thép chữ I dẫn xuất từ các biến cơ bản nói trên bao gồm diện tích tiết diện A_s , mô men

quán tính I_{ay} và mô men chống uốn dẻo W_{pl} được tính theo công thức sau:

$$\left. \begin{aligned} A_s &= 2b_f t_f + t_w(h - 2t_f) \\ I_{ay} &= \frac{t_w(h-2t_f)^3}{12} + 2\left(\frac{b_f t_f^3}{12} + (b_f t_f)\left(\frac{h-t_f}{2}\right)^2\right) \\ W_{pl} &= (b_f t_f)(h - t_f) + t_w\left(\frac{h}{2} - t_f\right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Trong quá trình xây dựng bài toán còn chấp nhận các giả thiết sau:

- Chỉ xét các dầm loại 1 và 2 phụ thuộc vào tính ổn định của bản cánh và bản bụng dầm chữ I;
- Sàn bê tông và dầm thép cùng làm việc - lực cắt truyền hoàn toàn (không tính toán thiết kế chốt liên kết).



Hình 1. Kết cấu dầm sàn liên hợp - thép bê tông.

2.2. Hàm mục tiêu

Khi lấy trọng lượng của dầm thép làm hàm mục tiêu, nó được biểu diễn như sau:

$$G = A_s l_0 \rho \rightarrow \min \quad (2)$$

trong đó A_s là diện tích tiết diện dầm thép; l_0 là chiều dài nhịp dầm; ρ là trọng lượng riêng của thép làm dầm.

2.3. Các ràng buộc

a) Điều kiện ràng buộc về loại tiết diện

Để đảm bảo dầm liên hợp thép - bê tông thuộc loại 1 hoặc 2 theo Eurocode 4, quan hệ giữa các kích thước tiết diện ngang của dầm phải thỏa mãn như quy định trong Bảng 1 đối với dầm hàn tổ hợp.

Bảng 1. Giới hạn về kích thước cho bản cánh và bản bụng bảo đảm điều kiện ổn định

Dầm tổ hợp hàn	Điều kiện cho	Loại 1	Loại 2
	Cánh	$c/t_f \leq 9\epsilon$	$c/t_f \leq 14\epsilon$
	Bụng	* Nếu $\alpha \geq 0,5$ $\frac{d}{t_w} \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ * Nếu $\alpha \leq 0,5$ $\frac{d}{t_w} \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$	* Nếu $\alpha \geq 0,5$ $\frac{d}{t_w} \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ * Nếu $\alpha \leq 0,5$ $\frac{d}{t_w} \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$

b) Điều kiện ràng buộc về khả năng chịu tải khi thi công:

Khi thi công, do bê tông chưa đông cứng nên chỉ có dầm thép chịu tải. Trong trường hợp này giá trị mô men tải cực đại phải thỏa mãn:

$$M_{Sd} \leq M_{apl,Rd} \quad (3)$$

trong đó M_{Sd} là mô men lớn nhất của dầm trong giai đoạn thi công; $M_{apl,Rd}$ là sức kháng uốn dẻo tính toán của dầm thép.

c) Điều kiện ràng buộc về khả năng chịu tải khi sử dụng:

Giá trị mô men tải cực đại trong giai đoạn sử dụng (composite) phải thỏa mãn:

$$M_{Sd} \leq M_{pl,Rd} \quad (4)$$

trong đó M_{Sd} là mô men lớn nhất của dầm trong giai đoạn sử dụng; $M_{pl,Rd}$ là khả năng chịu uốn dẻo tính toán của dầm liên hợp thép - bê tông có liên kết chịu cắt hoàn toàn.

Trong trường hợp này do có sự làm việc đồng thời của dầm thép và bản bê tông nên $M_{pl,Rd}$ của kết cấu được tính khác nhau tùy thuộc vị trí trục trung hòa dẻo trên mặt cắt ngang [16, 17]. Vị trí trục trung hòa có thể xác định thông qua mối quan hệ độ bền dẻo của dầm thép hình chịu kéo R_s và độ bền của phần bản bê tông chịu nén R_c và các đại lượng này được tính theo các công thức (5) và (6).

$$R_s = A_s \frac{f_y}{\gamma_a} \quad (5)$$

trong đó A_s là diện tích tiết diện dầm thép; f_y là giới hạn chảy của vật liệu thép; γ_a là hệ số điều kiện làm việc với vật liệu thép.

$$R_c = h_c b_{ff} \frac{0,85 f_{ck}}{\gamma_c} \quad (6)$$

trong đó h_c và b_{ff} là các kích thước chiều dày và bề rộng của bản bê tông tham gia làm việc cùng dầm thép (Hình 1); f_{ck} là cường độ chịu nén của bê tông; γ_c là hệ số điều kiện làm việc với vật liệu bê tông.

- Trường hợp 1: Khi $R_s < R_c$, trục trung hòa nằm trong bản bê tông

$$M_{pl,Rd} = R_s \left(0,5h + h_c + h_p - R_c \frac{0,5h_c}{R_s} \right) \quad (7)$$

- Trường hợp 2: Khi $R_c < R_s$ và $(R_s - R_c) < 2b_f t_f \frac{f_y}{\gamma_a}$, trục trung hòa dẻo nằm ở cánh của dầm thép

$$M_{pl,Rd} = 0,5R_s h + R_c (0,5h_c + h_p) \quad (8)$$

- Trường hợp 3: Trục trung hòa dẻo nằm ở bản bụng của dầm thép

$$M_{pl,Rd} = M_{apl,Rd} + 0,5R_c (h_c + 2h_p + h) - \frac{R_c^2 h}{4R_w} \quad (9)$$

trong đó $M_{apl,Rd}$ là sức kháng uốn dẻo tính toán của dầm thép; $R_w = 0,95 f_y t_w (h - 2t_f)$.

d) Điều kiện ràng buộc về sức kháng cắt

Giá trị lực cắt trong giai đoạn sử dụng phải thỏa mãn:

$$V_{Sd} \leq V_{pl,Rd} \quad (10)$$

trong đó V_{Sd} là lực cắt lớn nhất của dầm trong giai đoạn sử dụng; $V_{pl,Rd}$ là sức kháng cắt của dầm thép.

e) Điều kiện ràng buộc về chuyển vị

- Khi thi công không có giáo chống:

$$\delta_f = \frac{5 q_y^{CS} l_0^4}{384 E_a I_s} \leq [\Delta_y^{CS}] \quad (10)$$

trong đó q_y^{CS} là tải trọng tiêu chuẩn trong giai đoạn thi công; E_a là mô đun đàn hồi của vật liệu thép; I_s là mô men quán tính của tiết diện dầm thép; $[\Delta_y^{CS}]$ là chuyển vị cho phép của dầm trong giai đoạn thi công (xác định theo tiêu chuẩn thiết kế).

- Khi sử dụng:

$$\delta_f = \frac{5 q_y^{WS} l_0^4}{384 E_a I_c} \leq [\Delta_y^{WS}] \quad (11)$$

trong đó q_y^{WS} là tải trọng tiêu chuẩn trong giai đoạn sử dụng; I_c là mô men quán tính của tiết diện dầm liên hợp; $[\Delta_y^{WS}]$ là chuyển vị cho phép của dầm trong giai đoạn thi công (xác định theo tiêu chuẩn thiết kế).

3. Thuật toán PSO cho bài toán thiết kế tối ưu trọng lượng dầm liên hợp thép - bê tông

3.1. Tóm tắt thuật toán PSO

PSO bắt đầu với một quần thể (nhóm hạt) các cá thể (hạt) được định vị ngẫu nhiên trong không gian tìm kiếm d -chiều. Mỗi cá thể trong quần thể có hai vector: vector vận tốc và vector vị trí. Để tìm kiếm giải pháp tối ưu, mỗi cá thể thay đổi hướng tìm kiếm của nó theo vị trí tốt nhất của cá nhân nó ($pbest$) và vị trí tốt nhất toàn cục ($gbest$) mà bây giờ thu được cho đến thời điểm xét. Vận tốc và vị trí của mỗi hạt được cập nhật theo (12) và (13).

$$V_i^{d(k+1)} = \omega \cdot V_i^{d(k)} + c_1 \cdot r1_i^{d(k)} \cdot (pbest_i^{d(k)} - X_i^{d(k)}) + c_2 \cdot r2_i^{d(k)} \cdot (gbest^{d(k)} - X_i^{d(k)}) \quad (12)$$

$$X_i^{d(k+1)} = X_i^{d(k)} + V_i^{d(k+1)} \quad (13)$$

trong đó i là chỉ số của cá thể được sử dụng làm định danh cá thể; V_i^d và X_i^d lần lượt là vận tốc và vị trí của hạt i trong chiều thứ d ; c_1 là hệ số gia tốc cho thành phần nhận thức và c_2 là hệ số gia tốc cho thành phần xã hội; $r1$ và $r2$ là các thành phần ngẫu nhiên của thuật toán, được chọn ngẫu nhiên trong khoảng từ 0 đến 1.

Hệ số ω được gọi là trọng số quán tính và là một tham số quan trọng trong PSO. Nó đóng vai trò cân bằng giữa khả năng tìm kiếm toàn cục và khả năng tìm kiếm cục bộ. Trọng số quán tính ω được cập nhật theo (14) trong quá trình tối ưu hóa.

$$\omega(k) = \omega_{max} - \frac{k \cdot (\omega_{max} - \omega_{min})}{K} \quad (14)$$

trong đó ω_{max} và ω_{min} là trọng số quán tính lớn nhất và nhỏ nhất và thường được lấy tương ứng là 0,9 và 0,2; k là số lần lặp thực tế và K là số lần lặp lớn nhất.

Lưu đồ của PSO được thể hiện trên Hình 2 và quy trình từng bước của thuật toán PSO được đưa ra như sau:

1- Khởi tạo: Các tham số của PSO được khởi tạo và quần thể được tạo ngẫu nhiên.

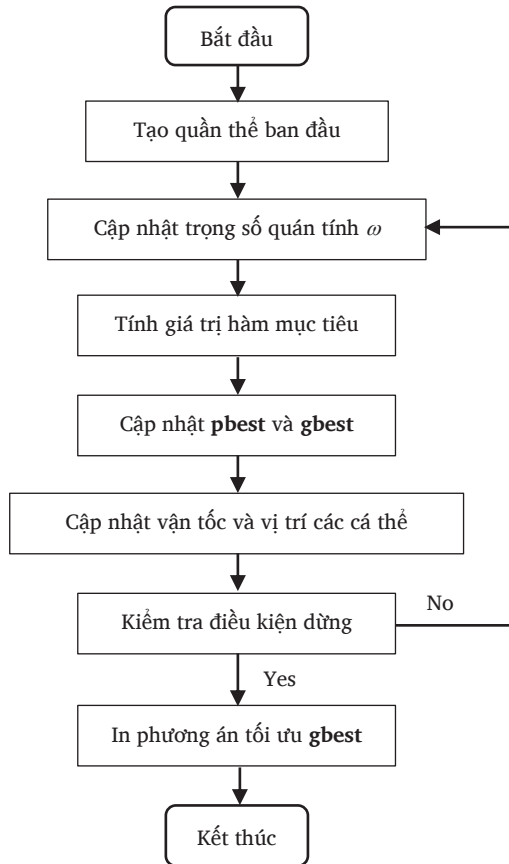
2- Cập nhật trọng số quán tính: Trọng số quán tính ω được cập nhật theo (14).

3- Đánh giá: Giá trị hàm mục tiêu của từng cá thể được đánh giá.

4- Tìm $pbest$: Nếu giá trị phù hợp của cá thể i tốt hơn $pbest$ của cá thể i , thì giá trị phù hợp hiện tại được đặt là giá trị tốt nhất mới của hạt i .

5- Tìm $gbest$: Nếu bất kỳ $pbest$ nào tốt hơn $gbest$, thì $gbest$ được đặt theo giá trị này.

- 6- Cập nhật vận tốc và vị trí: Vận tốc của từng cá thể được cập nhật theo (12) và cá thể di chuyển đến vị trí mới theo (13).
- 7- Kết thúc: Thuật toán sẽ dừng nếu đạt tới điều kiện dừng; ngược lại sẽ quay lại bước 2.



Hình 2. Lưu đồ thuật toán PSO.

3.2. Tối ưu trọng lượng dầm liên hợp thép - bê tông sử dụng thuật toán PSO

Tương tự các thuật toán tiến hóa khác, thuật toán PSO tiến hành tìm nghiệm trên một tập các phương án kết cấu được phép. Phương án kết cấu được phép là phương án mà các biến thiết kế nằm trong vùng cho phép và thỏa mãn tất cả các điều kiện ràng buộc về loại tiết diện theo Bảng 1, về độ bền và độ cứng theo các công thức từ (2) đến (11). Quá trình biến đổi sẽ đưa các phương án này đến trạng thái tối ưu. Do vậy, một trong những yêu cầu quan trọng là luôn đảm bảo tính được phép của các cá thể (phương án) trong quần thể.

Trên quy trình từng bước của thuật toán PSO áp dụng cho bài toán thiết kế tối ưu kết cấu nói chung, việc kiểm tra tính được phép của các cá thể được tiến hành tại các bước sau:

- Bước 1: Khởi tạo. Với mỗi cá thể, giá trị từng biến thiết kế được chọn ngẫu nhiên trong miền cho phép. Từng cá thể (một phương án thiết kế) được kiểm tra có được phép hay không. Quá trình chỉ dừng lại khi quần thể nhận đủ số cá thể được phép cần có theo dự kiến.

- Bước 6: Cập nhật vận tốc và vị trí. Sau khi xác định được vị trí mới, do có sự thay đổi giá trị các biến nên cần kiểm tra lại xem các cá thể còn được phép hay không. Nếu không thỏa mãn phải tìm vị trí mới cho đến khi đạt yêu cầu. Quá trình này chỉ dừng lại khi có đủ số cá thể đã nhận giá trị khác (có thể tốt lên, cũng có thể xấu đi).

Đối với bài toán thiết kế tối ưu trọng lượng dầm liên hợp thép - bê tông, khi sử dụng các biến đầu vào là liên tục, kết quả thiết kế lựa chọn là các số thực, điều này chưa phù hợp với thực tế chế tạo nên cần được làm tròn với độ chính xác mm (có thể đo được trong thực tế). Do có sự thay đổi này nên kết quả cần được kiểm tra lại và xác nhận tính được phép theo các trạng thái quy định.

Trên cơ sở thuật toán đã trình bày, tác giả lập một chương trình tối ưu hóa kết cấu dầm liên hợp thép - bê tông dạng chữ I tổ hợp với tên gọi OptSRC_PSO trên ngôn ngữ Matlab. Chương trình có 4 mô đun chính:

- Mô đun **Main**: có chức năng nhận số liệu vào, điều khiển toàn bộ quá trình tính, xuất kết quả và kết thúc quá trình tìm nghiệm tối ưu. Quá trình lập của thuật toán PSO cũng nằm ở mô đun này.
- Mô đun **Check_Beam**: có chức năng duy nhất là kiểm tra khả năng làm việc của dầm liên hợp ở các trạng thái quy định của Eurocode 4.
- Mô đun **Check_Stop**: kiểm tra điều kiện dừng. Ngoài điều kiện dừng là số lần lặp cực đại, trong chương trình còn sử dụng điều kiện dừng bổ sung:

$$\left| G_{min} - \frac{\sum_{i=1}^{Np} G_i}{Np} \right| \leq \epsilon \tag{15}$$

trong đó ϵ là số vô cùng bé cho trước, thường từ 10^{-6} đến 10^{-8} tùy loại bài toán.

- Mô đun **Design_Beam**: thiết kế kiểm tra lại kết cấu sau khi dừng quá trình tìm nghiệm tối ưu.

4. Ví dụ số

4.1. Các thông số ban đầu

Thiết kế tối ưu trọng lượng dầm thép chữ I tổ hợp trong hệ kết cấu thép - bê tông liên hợp được lấy theo trường hợp ví dụ tính toán của tài liệu [16].

- Các thông số hình học: Nhịp của dầm $l_0 = 10$ m, khoảng cách giữa các dầm $b = 3$ m, chiều dày bản sàn $h_s = 130$ mm, chiều cao sóng tôn $h_p = 50$ mm, chiều cao bê tông trên tôn $h_c = 80$ mm, chốt liên kết có đường kính 19 mm và chiều dài 95 mm.

- Các thông số về vật liệu: Loại thép sử dụng mã hiệu S355 có $f_y = 355$ MPa, $E_a = 21000$ MPa, hệ số điều kiện làm việc $\gamma_a = 1,05$. Bê tông số hiệu C25/30 (tương đương B25-TCVN) có $f_{ck} = 25$ MPa, $E_{cm} = 30500$ MPa, hệ số điều kiện làm việc $\gamma_c = 1,5$.

- Tải trọng: Tính tải bao gồm trọng lượng sàn bê tông (2,47 kN/m²), tôn sóng (0,15 kN/m²), cốt thép sàn (0,04 kN/m²), trần và các phụ kiện (0,5 kN/m²) là các thành phần được xác định một lần và khai báo ở số liệu đầu vào, riêng trọng lượng dầm thép sẽ được tự động tính toán trong mỗi lần tính lặp. Hoạt tải gồm có tải trọng thi công để tính kiểm tra các điều kiện khi thi công (0,5 kN/m²) và tải trọng sử dụng để

tính kiểm tra các điều kiện khi làm việc (5 kN/m²). Hệ số tải: tĩnh tải $\gamma_G = 1,35$; hoạt tải $\gamma_Q = 1,5$.

- Giới hạn của các biến: Các biến có giới hạn được lấy như trong Bảng 2.

Bảng 2. Giới hạn của các biến thiết kế.

Chiều cao h		Rộng bản cánh		Dày bản cánh		Dày bản bụng	
		b_f		t_f		t_w	
b_l	b_u	b_l	b_u	b_l	b_u	b_l	b_u
250	650	100	200	8	20	6	20
Ghi chú: b_l là giá trị giới hạn dưới (mm); b_u là giá trị giới hạn trên (mm).							

4.2. Kết quả tính toán

Chạy chương trình OptSRC_PSO với số cá thể trong quần thể $N_p = 50$, số lần lặp cực đại 2000 và điều kiện dừng bổ sung theo công thức (15) với $\varepsilon = 10^{-6}$. Quá trình chạy cho thấy chương trình chạy ổn định, đạt điều kiện dừng sau 50 thế hệ (lần lặp).

Kết quả tối ưu nhận được từ chương trình (sau khi làm tròn và kiểm tra tính được phép) và các kết quả thiết kế theo các tài liệu [9, 16] cho ở Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả thiết kế tiết diện dầm và trọng lượng dầm.

	h (mm)	b_f (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	G (kg)
Thiết kế theo [16]	406,4	177,8	12,8	7,8	598
Tối ưu bằng DE [9]	*	*	*	*	514
Tối ưu bằng PSO	412,0	169,0	12,0	6,0	501
Ghi chú: * Các thông số của tiết diện không có thông tin cụ thể trong [9].					

Từ Bảng 3 cho thấy, khi thiết kế tối ưu bằng thuật toán DE [9], cho kết quả trọng lượng dầm giảm được 14 % so với trọng lượng dầm thiết kế thông thường theo [16]. Còn thiết kế tối ưu bằng thuật toán PSO cho kết quả trọng lượng dầm giảm được 16,2 % so với thiết kế thông thường.

5. Kết luận

Kết quả trên như một đóng góp minh chứng cho các đánh giá tích cực về ưu điểm và hiệu quả của thuật toán PSO trong lĩnh vực tối ưu kết cấu, đó là tính đơn giản, khả năng tìm kiếm tối ưu toàn cục và tốc độ hội tụ nhanh. Với những ưu điểm và sự vượt trội như vậy, cần tiếp tục có các nghiên cứu phát triển bài toán tối ưu kết cấu liên hợp thép - bê tông cốt thép nói riêng, các bài toán tối ưu kết cấu nói chung để xây dựng các phần mềm thiết kế chuyên dụng, thân thiện với các kỹ sư thực hành trong lĩnh vực thiết kế công trình.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Senouci, A. B., & Al-Ansari, M. S. (2009). Cost optimization of composite beams using genetic algorithms. *Advances in Engineering Software*, 40(11): 1112-1118.
- [2]. Breda, B. D., Pietralonga, T. C., & Alves, É. C. (2020). Optimization of the structural system with composite beam and composite slab using Genetic Algorithm. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 13(6).
- [3]. Govindaraj, V., & Ramasamy, J. V. (2005). Optimum detailed design of reinforced concrete continuous beams using genetic algorithms. *Computers & structures*, 84(1-2): 34-48.
- [4]. Panchal, D.R. (2014). Steel-Concrete Composite Beam Design Using Genetic Algorithm. *International journal of innovative research and development*, 3(6): 473-480.
- [5]. Whitworth, A. H., & Tsavdaridis, K. D. (2020). Embodied energy optimization of steel-concrete composite beams using a genetic algorithm. *Procedia Manufacturing*, 44: 417-424.
- [6]. Kaveh, A., & Masoudi, M. S. (2012). Cost optimization of a composite floor system using ant colony system. *IJST - Transactions of Civil Engineering*, 36(2): 139-148.
- [7]. Korouzhdeh, T., Eskandari-Naddaf, H., & Gharouni-Nik, M. (2017). An improved ant colony model for cost optimization of composite beams. *Applied Artificial Intelligence*, 31(1): 44-63.
- [8]. Vũ Anh Tuấn, Hàn Ngọc Đức (2011). Thiết kế tối ưu dầm liên hợp thép - bê tông cốt thép. *Tạp chí Khoa học công nghệ xây dựng*, ĐHXDHN, 5(2): 15-22.
- [9]. Vũ Anh Tuấn (2013). Thiết kế tối ưu trọng lượng dầm liên hợp thép-bê tông sử dụng dầm thép I không đối xứng. *Tạp chí Khoa học công nghệ xây dựng*, ĐHXDHN, 7(2): 19-24.
- [10]. Bùi Đức Năng, Nguyễn Quán Thắng (2014). Tính toán tối ưu dầm liên hợp thép - bê tông cốt thép với ràng buộc về độ tin cậy. *Tuyển tập công trình Hội nghị Khoa học toàn quốc Cơ học Vật rắn biến dạng lần thứ XI*, Nhà xuất bản Khoa học tự nhiên và công nghệ, (2): 783-791.
- [11]. Hùng, T. V., Hùng, H. M., Thuật, Đình V., & Phúc, H. V. (2021). Thiết kế tối ưu dầm thép tổ hợp chữ I trong kết cấu cầu liên hợp nhịp đơn giản theo TCVN 11823:2017. *Tạp chí Khoa học công nghệ xây dựng*, ĐHXDHN, 15(3V): 55-68.
- [12]. Kennedy, J., and Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*, IEEE, 4:1942-1948.
- [13]. Jain, M., Saihjal, V., Singh, N., & Singh, S. B. (2022). An Overview of Variants and Advancements of PSO Algorithm. *Applied Sciences*, 12(17), 8392.
- [14]. Lin, J. P., Wang, G., & Xu, R. (2019). Particle Swarm Optimization-Based Finite-Element Analyses and Designs of Shear Connector Distributions for Partial-Interaction Composite Beams. *Journal of Bridge Engineering*, 24(4), 04019017.
- [15]. Poitras, G. L. G. C. G., Lefrançois, G., & Cormier, G. (2011). Optimization of steel floor systems using particle swarm optimization. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(8): 1225-1231.
- [16]. Lawson, R.M., and K.W. Chung (1994). *Composite Beam Design to Eurocode 4*. The Steel Construction Institute.
- [17]. Nguyễn Xuân Huy, Nguyễn Hoàng Quân (2019). *Tính toán kết cấu liên hợp thép - bê tông cốt thép theo tiêu chuẩn Eurocode 4*. Nhà xuất bản Xây dựng, Hà Nội.