

THIẾT KẾ TỐI ƯU DẦM LIÊN HỢP THÉP - BÊ TÔNG CỐT THÉP

TS. Vũ Anh Tuấn¹; ThS. Hàn Ngọc Đức¹

Tóm tắt: Bài báo trình bày quá trình tự động hóa thiết kế tối ưu dầm liên hợp thép bê tông sử dụng tiết diện chữ I tổ hợp theo tiêu chuẩn thiết kế Eurocode 4. Hàm mục tiêu là tối thiểu hóa trọng lượng dầm thép. Một ví dụ minh họa được lấy từ tài liệu tham khảo đã được sử dụng để kiểm chứng và chứng minh khả năng của phương pháp trong việc tối ưu hóa thiết kế dầm liên hợp. Giải pháp thiết kế tối ưu đề cập trong bài báo này cho trọng lượng thép kết cấu nhỏ hơn so với ví dụ tham khảo. Xét đến các tiêu chí về thời gian, chất lượng và tính hiệu quả, thì phương pháp thiết kế tối ưu sử dụng thuật toán tiến hóa vi phân hoàn toàn có thể thay thế phương pháp thiết kế truyền thống vào bài toán thiết kế thực tế.

Summary: This paper presents an automatization of optimal design process of steel-reinforced concrete composite beams under the Eurocode 4 norm. The target function is the weight of built-up I sections. A design example taken from the literature was used in order to validate the design results and to demonstrate its capabilities in optimizing composite beams. An optimized composite beam in this paper generated optimization solution better than the reference example. Taking the criteria regarding the design time, quality and efficiency into consideration, the automatization of optimal design with the Differential Evolution Algorithms can completely replace conventional method in practical design.

Nhận ngày 08/8/2011; chỉnh sửa 19/8/2011; chấp nhận đăng 30/9/2011

1. Giới thiệu

Trong những năm gần đây kết cấu liên hợp thép-bê tông cốt thép (Steel Reinforced-Concrete- SRC) đã được sử dụng nhiều ở các nước trên thế giới như Mỹ, Anh, Pháp, Đức, Trung Quốc, Nhật, Hàn Quốc... Ở Việt Nam, cho đến nay kết cấu này vẫn chưa được sử dụng nhiều vì các lý do như chế tạo, cung cấp cấu kiện, nhà thầu thi công, biện pháp chống cháy... Tuy nhiên với tốc độ phát triển xây dựng như hiện nay, với các ưu điểm như giảm được trọng lượng bản thân kết cấu, thời gian thi công nhanh, thì trong tương lai gần loại kết cấu này chắc chắn sẽ được áp dụng rộng rãi trong các công trình xây dựng.

Chi phí của kết cấu dầm, sàn chiếm khối lượng lớn hơn nhiều so với chi phí cột trong công trình xây dựng, do vậy trong bài báo này đề cập giải quyết kết cấu dầm sàn SRC. Kết cấu dầm, sàn SRC thường được cấu tạo bởi tấm sàn bê tông cốt thép liên kết với dầm thép có tiết diện chữ I cán nóng hoặc tổ hợp qua các chốt hoặc các liên kết chịu cắt và cùng làm việc đồng thời trong giai đoạn sử dụng.

¹ Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng.
E-mail: vuanhtuan.uce@gmail.com

Khi thiết kế dầm, sàn SRC thường sử dụng phương pháp truyền thống “thử-sai” hay phương pháp đúng dần với các thông số như đặc trưng vật liệu, tải trọng, chiều dày sàn, kích thước hình học của dầm thép, các chốt liên kết chịu cắt... Các thông số này thường được chọn theo kinh nghiệm của kỹ sư thiết kế và nó ảnh hưởng rất nhiều đến chi phí giá thành của cấu kiện. Để duy trì sự cạnh tranh do sự gia tăng của giá thành vật liệu, các nhà sản xuất, thi công buộc phải giảm chi phí và rút ngắn thời gian thi công. Do vậy, xu hướng thiết kế hiện đại là sử dụng phương pháp thiết kế tối ưu để xác định các thông số thiết kế có chi phí nhỏ nhất được áp dụng thay thế cho phương pháp thiết kế truyền thống để góp phần giảm chi phí.

Bài báo ứng dụng thuật toán tiến hóa vi phân (Differential Evolution Algorithm - DE-A) để tìm trọng lượng nhỏ nhất của dầm thép tiết diện chữ I tổ hợp trong hệ dầm thép liên hợp thép-bê tông và đề xuất phương pháp thiết kế tối ưu dầm SRC đơn giản, chịu tải trọng phân bố đều.

2. Phương pháp

Phương pháp thiết kế tối ưu dựa trên mô đun tự động thiết kế dầm SRC kết hợp với thuật toán tối ưu để xác định trọng lượng dầm thép nhỏ nhất. Để xác định được trọng lượng dầm thép cần định nghĩa các biến số thiết kế, hằng số thiết kế, hàm mục tiêu cũng như các điều kiện ràng buộc khi thiết kế dầm SRC.

2.1 Biến số thiết kế

Với mô hình dầm SRC có rất nhiều biến số cần quan tâm trong quá trình thiết kế: (1) kích thước hình học của cấu kiện như nhịp, khoảng cách giữa các dầm (2) cường độ chịu nén của bê tông, (3) chiều dày của sàn bê tông, (4) cường độ của thép, (5) kích thước hình học của tiết diện dầm thép tiết diện chữ I tổ hợp như chiều cao bản bụng (h_w), chiều dày bản bụng (t_w), bề rộng bản cánh (b_f), chiều dày bản cánh (t_f), (6) đường kính, số lượng và cường độ của cốt.

Để giảm mức độ phức tạp của bài toán thiết kế tối ưu, một số các biến số (1), (2), (3), (4) và (6) có ảnh hưởng không nhiều đến chi phí sẽ được coi như là hằng số. Bảng 1 trình bày các biến số của bài toán thiết kế tối ưu. Các biến số này sẽ được lấy ngẫu nhiên trong một khoảng giới hạn được định nghĩa bởi người thiết kế và kích thước chọn phụ thuộc vào “danh mục các thép tấm” cho trước.

Bảng 1. Các biến số của bài toán thiết kế tối ưu dầm SRC (5)

Biến số	$x_1 (h_w)$	$x_2 (t_w)$	$x_3 (b_f)$	$x_4 (t_f)$
Giới hạn cho trước	$h_w^{max} \div h_w^{min}$	$t_w^{max} \div t_w^{min}$	$b_f^{max} \div b_f^{min}$	$t_f^{max} \div t_f^{min}$

2.2 Hàm mục tiêu

Với các biến đã chọn, hàm mục tiêu được lập dựa trên việc tối thiểu hóa trọng lượng của kết cấu. Hàm chi phí là tối thiểu trọng lượng của dầm thép trong khi đồng thời thỏa mãn được các điều kiện ràng buộc về đảm bảo khả năng chịu lực trong giai đoạn thi công cũng như trong giai đoạn sử dụng và điều kiện đảm bảo yêu cầu về sử dụng.

Hàm chi phí được biểu diễn như sau:

$$W = \sum (x_1 \cdot x_2 + 2 \cdot x_3 \cdot x_4) \cdot \rho \cdot L \quad (1)$$

trong đó W là trọng lượng của dầm thép, ρ và L là trọng lượng riêng của thép và chiều dài của dầm.

2.3 Điều kiện ràng buộc

Cuối mỗi bước lặp, dầm SRC được phân tích để đánh giá các điều kiện ràng buộc như mômen tính toán nhỏ hơn khả năng chịu mômen của dầm trong giai đoạn thi công cũng như trong giai đoạn sử dụng, lực cắt nhỏ hơn khả năng chịu cắt của dầm và độ võng phải nhỏ hơn độ võng cho phép. Do tiêu chuẩn Việt Nam chưa ban hành tiêu chuẩn thiết kế kết cấu liên hợp nên mô đun thiết kế dầm SRC được tuân theo trên tiêu chuẩn Eurocode 4.

(a) Giá trị mômen trong giai đoạn thi công phải thỏa mãn

$$M_{Sd} \leq M_{pl,a,Rd} \quad (2)$$

trong đó M_{Sd} là mômen lớn nhất của dầm trong giai đoạn thi công, $M_{pl,a,Rd}$ là khả năng chịu uốn dẻo tính toán của dầm thép.

(b) Giá trị mômen trong giai đoạn sử dụng phải thỏa mãn

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

trong đó M_{Sd} là mômen lớn nhất của dầm trong giai đoạn sử dụng, $M_{pl,Rd}$ là khả năng chịu uốn dẻo tính toán của dầm SRC có liên kết chịu cắt hoàn toàn.

$M_{pl,Rd}$ được xác định phụ thuộc vào phân loại tiết diện, vị trí của trục trung hòa dẻo (Plastic neutral axis - P.N.A) nằm ở phần cánh bê tông (Hình 1); phần bản cánh của dầm thép (Hình 2); hay bản bụng của dầm thép (Hình 3), tương ứng với các công thức (4); (5) và (6).

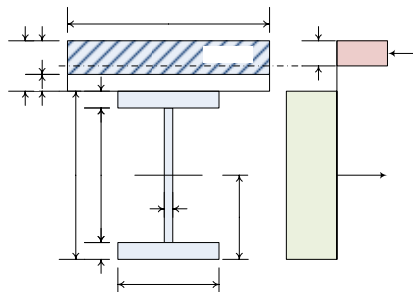
$$M_{pl,Rd} = F_a \left(\frac{H}{2} + h_s - \frac{z}{2} \right) \quad (4)$$

$$M_{pl,Rd} = F_a \left(\frac{H}{2} + h_p + \frac{h_c}{2} \right) - (F_a - F_c) \left(\frac{z + h_p}{2} \right) \quad (5)$$

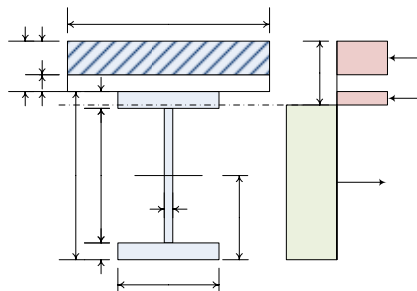
$$M_{pl,Rd} = M_{pl,a,Rd} + F_c \left(\frac{H}{2} + h_p + \frac{h_c}{2} \right) - \left(z_w - \frac{H}{2} \right)^2 t_w \frac{f_y}{\gamma_a} \quad (6)$$

trong đó

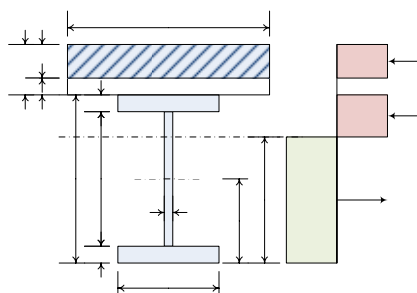
$$z_w = \frac{F_c}{2t_w \frac{f_y}{\gamma_a}} + \frac{H}{2} \quad (7)$$



Hình 1. Trục trung hòa dẻo nằm ở phần cánh bê tông khi $F_a < F_c$



Hình 2. Trục trung hòa dẻo nằm ở phần bản cánh của dầm thép khi $F_a - F_c \leq 2b_f t_f f_y / \gamma_a$



Hình 3. Trục trung hòa dẻo nằm ở phần bản bụng của dầm thép khi $2b_f t_f f_y / \gamma_a \leq F_a - F_c$

(c) Giá trị mômen trong giai đoạn sử dụng phải thỏa mãn

$$M_{Sd} \leq M_{Rd} \quad (8)$$

trong đó M_{Rd} là khả năng chịu uốn dẻo tính toán của dầm SRC có liên kết chịu cắt không hoàn toàn, phụ thuộc vào $M_{pl,Rd}$ và cường độ, đường kính và số lượng cốt chịu cắt trong dầm SRC.

(d) Giá trị lực cắt trong giai đoạn sử dụng phải thỏa mãn

$$V_{Sd} \leq V_{pl,Rd} \quad (9)$$

trong đó V_{Sd} là lực cắt lớn nhất của dầm khi sử dụng, $V_{pl,Rd}$ là sức bền chịu cắt của dầm SRC.

(e) Điều kiện chuyển vị trong quá trình thi công (cs) và trong quá trình liên hợp (ws)

$$\Delta_y^{cs} = \frac{5}{384} \frac{q_c^{cs} L^4}{E_a I_a} \leq |\Delta_y| \quad (10)$$

$$\Delta_y^{ws} = \frac{5}{384} \frac{q_c^{ws} L^4}{E_a I_c} \leq |\Delta_y| \quad (11)$$

trong đó q_c^{cs} , Δ_y^{cs} và q_c^{ws} , Δ_y^{ws} lần lượt là tải trọng tiêu chuẩn và chuyển vị của dầm SRC trong giai đoạn thi công và trong giai đoạn liên hợp; $|\Delta_y|$ là chuyển vị cho phép của dầm được xác định theo tiêu chuẩn thiết kế.

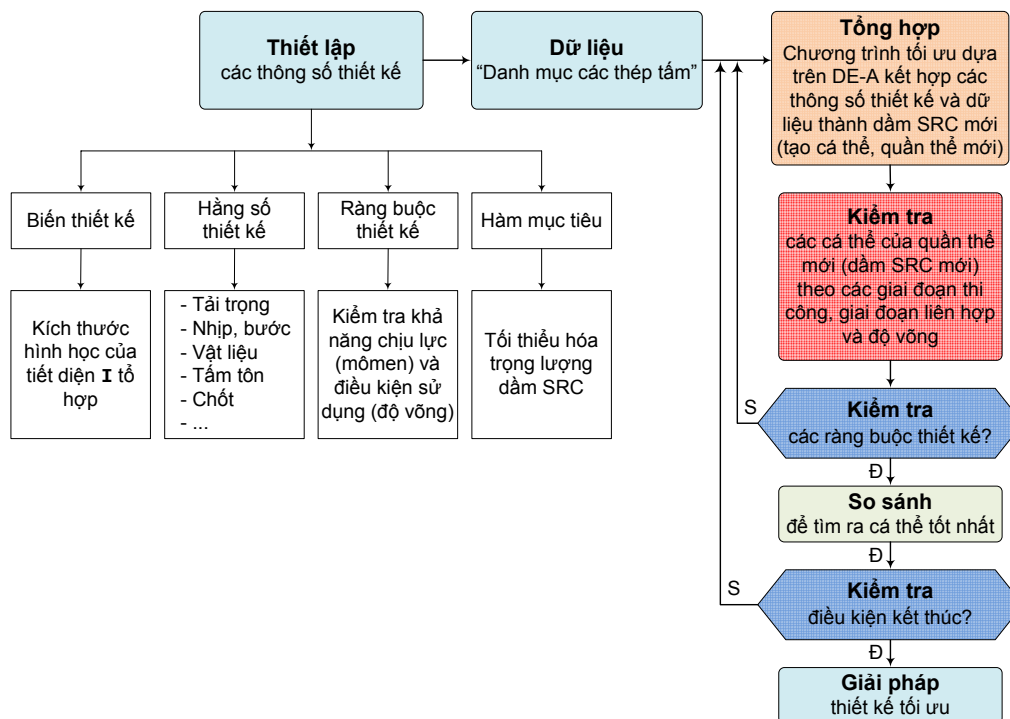
(f) Giới hạn trên và dưới của các ràng buộc biến thiết kế được trình bày như sau:

$$D_i^L \leq x_i \leq D_i^U, \quad i = 1 \div 4$$

$$D_i \in S = (S_d | d = 1, 2, \dots, ns)$$
(12)

trong đó D_k^L và D_k^U là biên trên và biên dưới của S , S và ns là danh sách và số lượng các kích thước thép tấm có sẵn trong “danh mục các thép tấm”.

3. Thuật toán tiến hóa và chương trình



Hình 4. Quá trình thiết kế tối ưu của đầm SRC

Phương pháp thiết kế tối ưu dựa trên cơ chế của thuyết tiến hóa là chọn lọc tự nhiên và di truyền. Trong tự nhiên, các cá thể vượt trội, có khả năng thích nghi tốt với môi trường sẽ tồn tại, được tái sinh và nhân bản ở các thế hệ sau, ngược lại cá thể yếu sẽ bị đào thải. Mỗi cá thể có cấu trúc gen đặc trưng cho phẩm chất của cá thể đó. Trong quá trình sinh sản, các cá thể con có thể thừa hưởng các phẩm chất của cha và mẹ. Ngoài ra trong quá trình tiến hóa, có xảy ra hiện tượng đột biến, cá thể con có thể chứa các gen mà cả cha và mẹ đều không có. Thuyết tiến hóa sẽ làm việc trên các quần thể gồm nhiều cá thể. Một quần thể ứng với một giai đoạn phát triển sẽ được gọi là một thế hệ. Từ thế hệ ban đầu được tạo ra, thuyết tiến hóa bắt chước chọn lọc tự nhiên lai tạo, đột biến gen để biến đổi các cá thể; thế hệ sau luôn luôn có các cá thể tốt hơn thế hệ trước.

Các hằng số thiết kế, biến thiết kế, các điều kiện ràng buộc về kích thước tiết diện cũng như các điều kiện ràng buộc về chịu lực và độ võng được thực hiện ở bước đầu tiên (Hình 4). Các cá thể có các gen của biến thiết kế x_1, x_2, x_3 và x_4 . Theo [3], độ lớn của quần thể bằng $5 \div 10$ lần số gen, số thế hệ được chọn là 70. Ở bước tiếp theo, DE-A ngẫu nhiên tạo ra các thế hệ tiếp theo. Với các biến thể của DE-A các cá thể của thế hệ sau sẽ được sinh ra dựa trên các phép lai tạo, đột biến gen... hoặc sẽ được sinh ra dựa trên gen của cá thể có hàm mục tiêu tốt

KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ ỨNG DỤNG

nhất. Tất cả các cá thể được tạo ra, đều được kiểm tra các điều kiện ràng buộc và sẽ được so sánh trực tiếp hàm mục tiêu với không những các cá thể khác mà còn cha mẹ của nó.

Trên sơ sở thuật toán đã trình bày, tác giả lập một chương trình tối ưu hóa kết cấu dầm SRC. Chương trình “Design SRC Beam” được lập trình trên ngôn ngữ Visual Basic 6.0, với các mô đun: “Nhập dữ liệu”, “Thiết kế dầm SRC” và “Tối ưu”. Các dữ liệu cần thiết của kết cấu như kích thước hình học, đặc trưng vật liệu, tải trọng được thực hiện bởi mô đun “Nhập dữ liệu”. Khả năng chịu lực của dầm SRC được kiểm tra bởi mô đun “Thiết kế dầm SRC” theo tiêu chuẩn thiết kế, trong bài báo này, tiêu chuẩn EC-4 đã được ứng dụng. Mô đun “Tối ưu” xác định hàm mục tiêu, kiểm tra các điều kiện ràng buộc, tìm và tạo ra các cá thể trong quá trình tối ưu.

Mô đun tối ưu sử dụng 4 biến thể khác nhau của DE-A để kiểm tra tốc độ cũng như khả năng hội tụ của kết quả tối ưu. Các biến thể của DE-A lần lượt là:

(a) Rand/1/Bin: cá thể thế hệ sau sinh ra dựa trên cha mẹ được chọn lọc ngẫu nhiên trong quần thể trước và có sử dụng kiểu đột biến theo kiểu nhị phân.

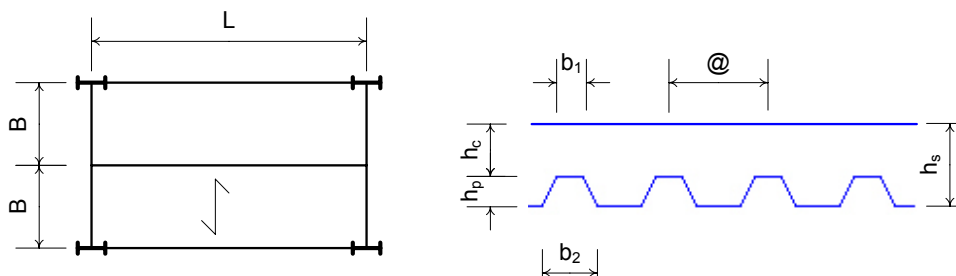
(b) Rand to best/1/Bin: cá thể thế hệ sau sinh ra dựa trên cá thể tốt nhất trong quần thể trước và được lai tạo với chính nó sử dụng kiểu đột biến theo kiểu nhị phân.

(c) Rand to best/1/Exp: cá thể thế hệ sau được sinh ra dựa trên cá thể tốt nhất trong quần thể trước và được lai tạo với chính nó sử dụng kiểu đột biến theo kiểu số mũ.

(d) Best/1/Bin: cá thể thế hệ sau được sinh ra dựa trên cá thể tốt nhất trong quần thể trước và có sử dụng kiểu đột biến theo kiểu nhị phân.

4. Ứng dụng và kết quả

Hệ dầm đơn giản, nhịp $L=10m$, khoảng cách giữa các dầm $B=3m$, sàn liên hợp có sử dụng tấm tôn, không sử dụng thanh chống tạm khi thi công (Hình 5). Dữ liệu thiết kế xem Bảng 2.



Hình 5. Sơ đồ hình học của hệ dầm sàn SRC

Bảng 2. Dữ liệu thiết kế dầm SRC

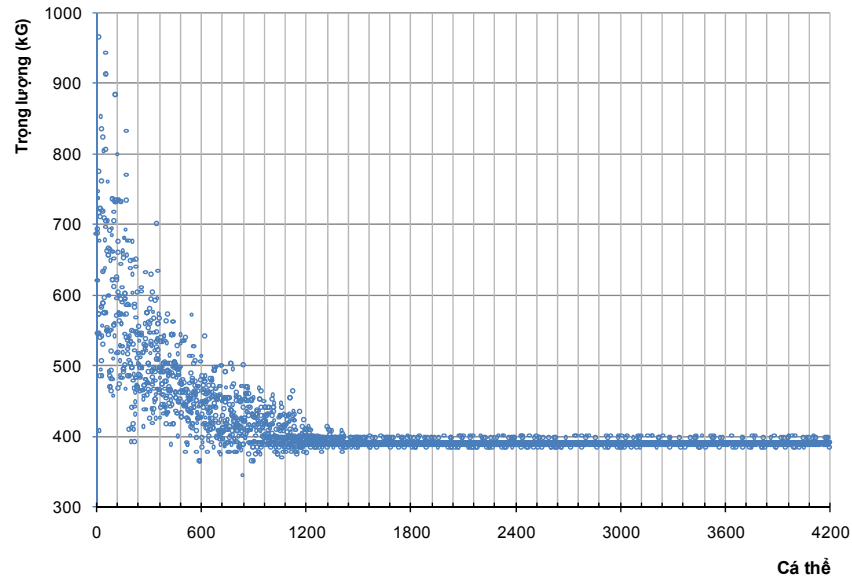
Cấu kiện	Sàn	Chốt	Dầm	Tấm tôn sàn
Kích thước (mm)	$h_s=130$ $h_p=50$ $h_c=80$	$d=19$ $h=95$	Tổ hợp	$b_1=120$ $b_2=180$ $@=300$
Vật liệu	C25/30	S 355	S 355	S 355

Các biến số để thiết kế tối ưu của dầm SRC gồm kích thước của bản bụng và bản cánh của dầm thép. Các giá trị ban đầu của biến thiết kế tham khảo dựa trên thép hình loại UB406×178×60 của ví dụ “Design of composite beam to EC4” - PUB8219 trang 166 [1], được trình bày trong Bảng 3.

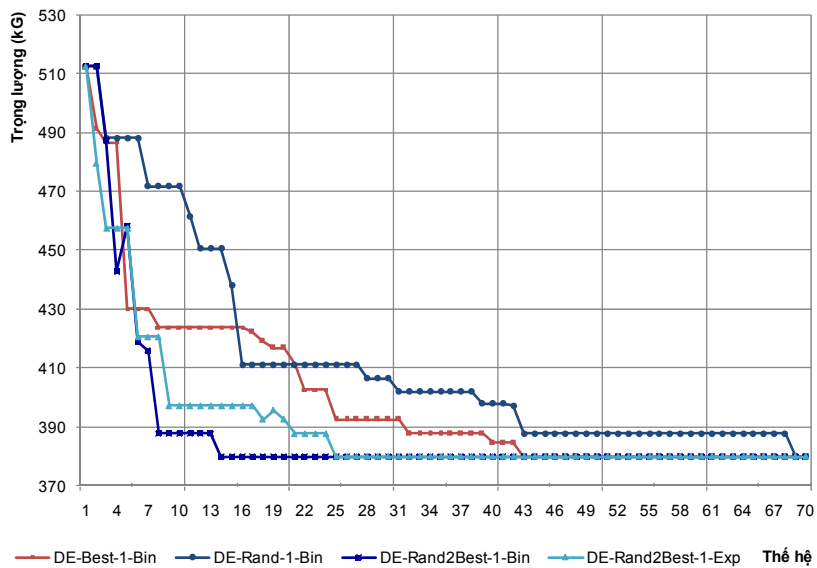
Sử dụng một số các biến thể của DE-A để thực hiện tối ưu, quá trình tối ưu sẽ kết thúc sau 70 thế hệ. Kết quả tối ưu được trình bày ở Hình 6, Hình 7 và giá trị tối ưu kích thước của các mặt cắt khung ở Bảng 3.

Bảng 3. Kết quả thiết kế tối ưu

Biến số (mm)	$x_1 (h_w)$	$x_2 (t_w)$	$x_3 (b_f)$	$x_4 (t_f)$	Trọng lượng (kG)
Ban đầu	360.4	7.8	177.8	12.8	589.0
Tối ưu	460.0	6.0	160.0	7.0	379.9



Hình 6. Giá trị trung gian của các cá thể sau 70 thế hệ



Hình 7. Kết quả tối ưu của dầm thép sau 70 thế hệ

KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ ỨNG DỤNG

Kết quả tối ưu cho thấy các biến thể của DE-A cho kết quả hội tụ, biến thể *DE/Rand2Best/1/Bin* tìm được kết quả tối ưu nhanh nhất từ thế hệ thứ 14, *DE/Rand/1/Bin* cho thấy tốc độ tìm được kết quả tối ưu chậm nhất. Kết quả tối ưu thỏa mãn các điều kiện ràng buộc có trọng lượng thép tiết kiệm được chiếm khoảng 35% tương đương với 209kG.

5. Kết luận

Bài toán tối ưu thực tế ở trên cho thấy so với các phương pháp thiết kế truyền thống, phương pháp thiết kế tối ưu sử dụng DE-A có hiệu quả cao và thời gian tính toán nhanh hơn. Trong một công trình xây dựng dân dụng với phương pháp thiết kế tối ưu trình bày trên khối lượng thép kết cấu tiết kiệm được cho kết cấu dầm sàn SRC là đáng kể.

Xét đến các tiêu chí về tiết kiệm thời gian, chất lượng và hiệu quả, có thể thấy phương pháp thiết kế tối ưu dựa vào DE-A có khả năng áp dụng cao. Với chương trình tối ưu hóa kết cấu khung thép "*Design SRC Beam*" dựa trên tiêu chuẩn Eurocode 4 trình bày trong bài báo này các kỹ sư xây dựng có thể ứng dụng vào công tác thiết kế kết cấu dầm sàn liên hợp trong thực tế thay thế cho các phương pháp truyền thống.

Tài liệu tham khảo

1. R.M. Lawson; K.F. Chung (1994); *Composite Beam Design to Eurocode 4*; The Steel Construction Institute.
2. Phạm Văn Hội (2006); *Kết cấu liên hợp Thép - Bê tông*, Nxb Khoa học và Kỹ thuật; Hà Nội.
3. K.V. Preis, R.M. Storn, J.A. Lampinen (2005); *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*, Springer.
4. Vu Anh Tuan (2009); *Beitrag zur den Optimierung von Tragwerken aus Stahl mittels Evolutionärer Algorithmen*; Dissertation, Bauhaus University Weimar.