

Thiết kế tối ưu rời rạc dầm thép liên hợp trong cầu dầm nhịp giản đơn

Trương Việt Hùng*

Khoa Công trình, Trường Đại học Thủy lợi, 175 Tây Sơn, phường Trung Liệt, quận Đống Đa, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 28/7/2021; ngày chuyển phản biện 30/7/2021; ngày nhận phản biện 23/8/2021; ngày chấp nhận đăng 27/8/2021

Tóm tắt:

Trong nghiên cứu này, bài toán tối ưu dầm thép liên hợp được xây dựng. Các biến thiết kế, bao gồm chiều dày của bản mặt cầu bằng bê tông cốt thép (BTCT) và các kích thước của tiết diện dầm I tổ hợp, được xem là các biến rời rạc nhằm phản ánh thực tế thiết kế công trình. Tổng giá thành vật liệu của phần bê tông bản mặt cầu và dầm thép được chọn làm hàm mục tiêu và được tối thiểu hóa. Các yêu cầu thiết kế về mặt cấu tạo, biến dạng và chịu lực theo TCVN 11823:2017 được sử dụng làm điều kiện ràng buộc. Thuật toán tối ưu tìm kiếm hải hòa được sử dụng để giải quyết bài toán tối ưu đặt ra. Một dầm thép nhịp giản đơn dài 42 m đã được nghiên cứu. Kết quả cho thấy, thiết kế tối ưu giảm khoảng 15% giá thành so với thiết kế thủ công thông thường. Do vậy, áp dụng thiết kế tối ưu trong thiết kế dầm liên hợp đem lại hiệu quả kinh tế và có thể dễ dàng ứng dụng vào thiết kế.

Từ khóa: dầm thép liên hợp, TCVN 11823:2017, thiết kế tối ưu, tìm kiếm hải hòa.

Chỉ số phân loại: 2.1

1. Giới thiệu

Dầm liên hợp trong cầu dầm nhịp giản đơn được cấu tạo gồm bản mặt cầu bằng BTCT liên kết với dầm thép tổ hợp từ các thép bản thông qua các đỉnh liên kết. Nhờ sự cùng làm việc của bản mặt cầu BTCT, sự ổn định và khả năng chịu tải của dầm thép được tăng lên đáng kể. Cùng với đó, bản mặt cầu bằng BTCT lúc này phần lớn nằm trong khu vực chịu nén nên phát huy được tốt nhất hiệu quả làm việc của bê tông. Nhờ những ưu điểm này, dầm thép liên hợp được sử dụng ngày một phổ biến cho cầu có nhịp nhỏ và trung bình.

Tương tự như các loại hình kết cấu công trình khác, hiệu quả kinh tế khá quan trọng khi thiết kế dầm thép liên hợp nói riêng và công trình cầu nói chung. Các phương án thiết kế đưa ra phải đảm bảo tiết kiệm tối đa chi phí, bên cạnh các điều kiện về chịu lực, biến dạng hay tính khả thi trong thi công. Xét dưới khía cạnh này, các phương pháp thiết kế truyền thống dựa trên việc lựa chọn thủ công các kích thước của tiết diện dầm không thể đem lại hiệu quả cao nhất do một số nguyên nhân sau: (1) sự đa dạng và phức tạp của các yêu cầu thiết kế được đặt ra và (2) biến thiết kế là rời rạc. Chính vì đặc điểm đó, nhiều nghiên cứu về thiết kế tối ưu công trình cầu đã được tiến hành. R.L. Pedro và cs (2017) [1] đề xuất thuật toán 2 bước sử dụng thuật toán tìm kiếm nhóm và phân tử hữu hạn nhằm tối ưu dầm liên hợp theo AASHTO 2012. S. Hendawi và cs (1994) [2] tối ưu hệ dầm thép liên hợp có xét độ tin cậy của công trình như một điều kiện ràng buộc. T.V. Hung và cs (2021) [3] tối ưu dầm I trong cầu liên hợp sử dụng thuật toán tiến hóa vi phân. Tuy nhiên, hạn chế của nghiên cứu này là mới xem xét với các

biến thiết kế là liên tục. Điều này là chưa sát với thực tế thiết kế khi các giá trị kích thước thường được lấy chẵn số để phù hợp với công tác sản xuất và chế tạo. Một số nghiên cứu về ảnh hưởng của vị trí sườn tăng cường dọc đến khả năng chịu tải của dầm thép chữ I cũng được thực hiện nhằm tìm ra vị trí tốt nhất [4, 5]. Các bài toán tối ưu cầu dầm văng cũng thu hút sự quan tâm của các nhà khoa học nhằm đưa ra phương án thiết kế hiệu quả [6-8]. Các nghiên cứu này cho thấy rằng, thiết kế tối ưu có thể tiết kiệm được lên đến 20-40% so với thiết kế thông thường dựa theo kinh nghiệm. Đặc biệt, phương pháp tiếp cận theo tối ưu còn đảm bảo kết quả thu được luôn đạt hiệu quả cao và bài toán thiết kế được đặt ra. Một đặc điểm nữa là do tính phức tạp cao, hầu hết bài toán tối ưu trong các nghiên cứu trên được giải quyết qua việc áp dụng các thuật toán tối ưu metaheuristic. Ưu điểm lớn nhất của các thuật toán tối ưu này là khả năng mạnh mẽ và cân bằng của chúng giữa tìm kiếm toàn cục và địa phương trong quá trình tối ưu. Các thuật toán tối ưu metaheuristic thông dụng là: thuật toán di truyền [9], tiến hóa vi phân [10-12], tìm kiếm hải hòa (HS) [13]... Trong số đó, HS được xây dựng chuyên biệt cho bài toán tối ưu với biến rời rạc và cho hiệu suất rất cao, đáng tin cậy [13].

Trong nghiên cứu này, tác giả xây dựng bài toán tối ưu dầm thép liên hợp trong cầu dầm nhịp giản đơn sử dụng thuật toán HS. Điểm mới ở đây là hàm tối ưu được lựa chọn sẽ là tổng giá thành vật liệu bản mặt cầu bằng BTCT và dầm thép tổ hợp. Biến thiết kế gồm chiều dày của bản mặt cầu BTCT và kích thước của tiết diện dầm thép. Các điều kiện ràng buộc được lấy theo yêu cầu kỹ thuật của TCVN 11823:2017 [14].

*Email: truongviethung@thu.edu.vn

Discrete optimisation of steel-concrete composite sections in simple girder bridges

Viet Hung Truong*

Faculty of Civil Engineering, Thuyloi University,
175 Tay Son, Trung Liet Ward, Dong Da District, Hanoi, Vietnam

Received 28 July 2021; revised 23 August 2021; accepted 27 August 2021

Abstract:

In this study, the optimisation design problem of steel-concrete composite sections in simple girder bridges is developed. Design variables including the thickness of the deck and the dimensions of the girder section are discrete variables to reflect the realistic design works. The total cost of the deck and the steel girder is the objective function that is minimised. The design requirements of the geometry, load-carrying capacity, and deformation provided in the TCVN 11823:2017 standard are used as the optimisation constraints. The above discrete optimisation is solved by using the Harmony Search (HS) algorithm. A 42(m) simple girder is studied. The numerical results show that the optimal designs save about 15% compared to using the conventional design method. It can be concluded that applying the optimisation in the design of steel-concrete composite beams brings high efficiency and it is easily applied in practice.

Keywords: harmony search, optimisation design, steel-concrete composite girder, TCVN 11823:2017.

Classification number: 2.1

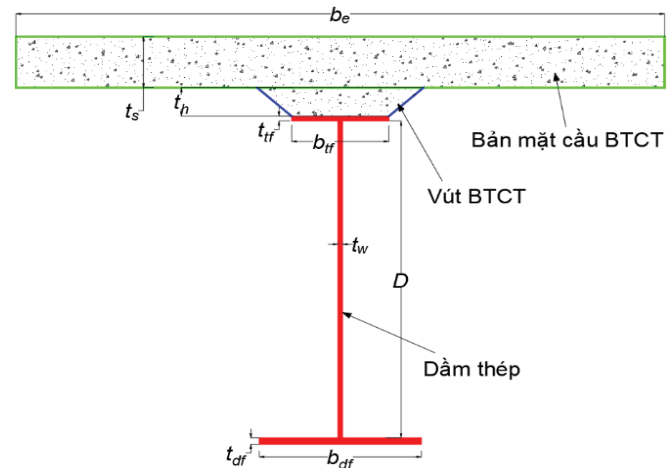
2. Xây dựng bài toán tối ưu

Trong phần này, các nội dung chính của bài toán tối ưu dầm liên hợp nhịp giản đơn được trình bày. Điểm đặc biệt của bài toán được xây dựng là (1) Hàm mục tiêu là hàm giá thành của bản mặt cầu BTCT và dầm thép, (2) Biến thiết kế là biến rời rạc và (3) Điều kiện ràng buộc được xác định dựa trên các quy định về cấu tạo, biến dạng và chịu lực theo TCVN 11823:2017.

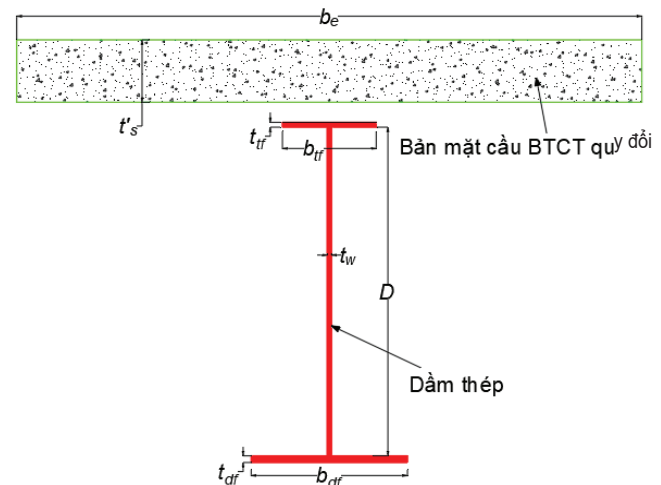
2.1. Biến thiết kế

Tiết diện liên hợp điển hình giữa bản mặt cầu bằng BTCT và dầm thép được thể hiện trong hình 1. Về cơ bản, tiết diện liên hợp sẽ gồm 2 phần là bản mặt cầu và vút bằng BTCT và dầm thép bằng vật liệu thép (hình 1A). Để đơn giản hóa, phần vút sẽ được quy đổi về phần bản mặt cầu theo nguyên tắc diện tích phần bản quy đổi bằng tổng diện tích của phần bản mặt cầu và vút (hình 1B). Lúc này, chiều dày của bản

mặt cầu quy đổi sẽ là t_s' . Trong nghiên cứu này, các biến thiết kế được lựa chọn gồm: chiều dày bản mặt cầu (t_s), bề rộng bản cánh trên của dầm thép (b_{tf}), chiều dày bản cánh trên (t_{tf}), chiều rộng và dày bản cánh dưới (b_{df} và t_{df}), chiều dày và chiều cao bản bụng (t_w và D). Các thông số khác được giả định là không thay đổi. Để thống nhất trong cách xây dựng công thức tính toán, tất cả các kích thước của biến được lấy theo đơn vị là mm.



(A) Tiết diện liên hợp thông thường



(B) Tiết diện liên hợp quy đổi

Hình 1. Tiết diện liên hợp bản mặt cầu BTCT và dầm thép.

2.2. Hàm mục tiêu

Hàm mục tiêu được lựa chọn là tổng giá thành vật liệu của tiết diện liên hợp, bao gồm phần bê tông bản mặt cầu quy đổi và dầm thép. Trong thực tế, giá thành này phụ thuộc vào đặc điểm và vị trí của công trình, đơn giá vật liệu tại thời điểm thi công... Trong bài báo này, dưới góc độ nghiên cứu cơ bản, đơn giá của vật liệu BTCT và thép được tạm lấy theo đơn giá tại thị trường Hà Nội tháng 7/2021: đơn giá vật liệu BTCT làm bản mặt cầu là 1600000 (đồng/m³) và đơn

giá vật liệu thép chế tạo dầm thép hình I tổ hợp là 23000 (đồng/kg). Giá thành vật liệu thép bố trí trong bản mặt cầu BTCT không được xét đến trong bài toán tối ưu. Ngoài ra, đối với kết cấu nhịp cầu giản đơn, ta giả thiết rằng không thiết kế các bản tập gia cường tại bản cánh dưới hay bản bụng dầm. Công thức của hàm mục tiêu như sau:

$$\begin{aligned} \text{Min } G(X) = & 1600000 \times (b_e \times t_s + A_{vut}) \times L \times 10^{-9} \\ & + 7850 \times 23000 \times (b_{df} \times t_{df} + D \times t_w + b_{df} \times t_{df}) \times L \times 10^{-9} \end{aligned} \quad (1)$$

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_7) = (b_{df}, t_{df}, b_{df}, t_{df}, t_w, D, t_s)$$

trong đó: A_{vut} là diện tích phần vút bê tông (mm^2), L là chiều dài của dầm (mm).

2.3. Điều kiện ràng buộc

Bài toán tối ưu phải thỏa mãn các quy định theo TCVN 11823:2017. Cụ thể như sau:

- Kích thước bản bụng không có sườn tăng cường dọc phải thỏa mãn điều kiện:

$$C_1 = \frac{D}{t_w} - 150 \leq 0 \quad (2)$$

- Kích thước bản cánh phải thỏa mãn:

$$C_2 = \frac{b_{df}}{2t_{df}} - 12 \leq 0 \quad (3)$$

$$C_3 = \frac{b_{df}}{2t_{df}} - 12 \leq 0 \quad (4)$$

$$C_4 = \frac{D}{6b_{df}} - 1 \leq 0 \quad (5)$$

$$C_5 = \frac{D}{6b_{df}} - 1 \leq 0 \quad (6)$$

$$C_6 = \frac{1,1t_w}{t_{df}} - 1 \leq 0 \quad (7)$$

$$C_7 = \frac{1,1t_w}{t_{df}} - 1 \leq 0 \quad (8)$$

$$C_8 = 0,1 - \frac{I_{yc}}{I_{yt}} \leq 0 \quad (9)$$

$$C_9 = \frac{I_{yc}}{I_{yt}} - 1,0 \leq 0 \quad (10)$$

trong đó: I_{yt} và I_{yc} là các mô men quán tính đối với trục thẳng đứng của bản cánh chịu kéo và nén.

Đối với các trạng thái giới hạn (TTGT) về cường độ, yêu cầu chịu uốn trong trường hợp cầu thẳng là:

- Đối với tiết diện chắc:

$$C_{10}^i = 1 - \frac{\Phi_f M_n^i}{M_u^i} \leq 0, \quad i = 1, \dots, N \quad (11)$$

- Đối với tiết diện không chắc và mảnh: cả 2 thứ chịu kéo và nén của dầm thép thỏa mãn:

$$C_{10}^i = 1 - \frac{\Phi_f F_n^i}{f_{bu}^i} \leq 0 \quad (12)$$

trong đó: M_n^i và M_u^i là sức kháng uốn danh định và mô men uốn của tiết diện dầm tương ứng với tổ hợp tải trọng (THTT) thứ i ; F_n^i và f_{bu}^i là sức kháng uốn danh định và ứng suất không tính đến uốn ngang của bản cánh; N là số THTT cường độ; Φ_f là hệ số sức kháng uốn tương ứng với TTGH về cường độ, Φ_f được lấy bằng 0,95.

- Tiết diện đặc chắc và không đặc chắc phải thỏa mãn tính dẻo theo công thức sau:

$$C_{11} = 1 - \frac{0,42D_t}{D_p} \leq 0 \quad (13)$$

trong đó: D_t là chiều cao mặt cắt liên hợp, D_p là khoảng cách từ mép trên của bản bê tông tới trọng tâm mặt cắt liên hợp dẻo.

- Yêu cầu về sức kháng cắt đối với các TTGH cường độ như sau:

$$C_{12}^i = 1 - \frac{\Phi_v V_n^i}{V_u^i} \leq 0, \quad i = 1, \dots, N \quad (14)$$

trong đó: V_n^i và V_u^i tương ứng là sức kháng cắt danh định và mô men cắt của tiết diện dầm tương ứng với THTT thứ i ; Φ_v là hệ số sức kháng cắt tương ứng với TTGH về cường độ; Φ_v được lấy bằng 0,95.

- Đối với các tổ hợp TTGH sử dụng, yêu cầu về độ võng do hoạt tải là:

$$C_{13}^j = \frac{\Delta_{hoat_tai}^j}{[\Delta_{hoat_tai}^j]} - 1 \leq 0, \quad j = 1, \dots, M \quad (15)$$

trong đó: $\Delta_{hoat_tai}^j$ và $[\Delta_{hoat_tai}^j]$ là độ võng do hoạt tải gây ra và giá trị giới hạn của nó; M là số tổ hợp TTGH sử dụng được xem xét. Độ võng do hoạt tải gây ra được xác định là độ võng lớn nhất do 1 trong 2 tổ hợp sau: (1) 1 xe tải thiết kế và (2) 25% xe tải thiết kế và tải trọng làn. Giới hạn độ võng bằng $L/800$ với L là chiều dài của nhịp tính toán.

- Đối với TTGH mỏi, yêu cầu đối với chi tiết được kiểm tra như sau:

$$C_{14}^l = 1 - \frac{(\Delta F)_n^l}{\gamma(\Delta F)^l} \leq 0, \quad l = 1, \dots, L \quad (16)$$

trong đó: γ là hệ số tải trọng, (ΔF) là biên độ ứng suất do hoạt tải gây ra, (ΔF) là sức kháng mỏi danh định và L là số TTGH mỏi được xét đến.

2.4. Xây dựng bài toán tối ưu không điều kiện ràng buộc

Qua nội dung trình bày ở trên, có thể thấy bài toán tối ưu dầm liên hợp có rất nhiều điều kiện ràng buộc. Để áp dụng thuật toán metaheuristic, ta cần chuyển thành bài toán tối ưu không ràng buộc. Trên cơ sở đó, phương pháp hàm phạt được sử dụng. Công thức (1) được viết lại thành:

$$G_{un}(X) = G(X) \times \left(1 + \sum_{i=1}^{14} [\alpha_i \times \max(C_i, 0)] \right) \quad (17)$$

trong đó: α_i là hệ số phạt của điều kiện ràng buộc thứ i . Công thức (17) cho thấy rằng: nếu điều kiện ràng buộc thứ i bị vi phạm (nghĩa là $C_i > 0$), hàm mục tiêu $G(X)$ sẽ bị cộng thêm một giá trị là $G_{un}(X) = G(X) \times \alpha_i \times C_i$. Nếu ta lựa chọn giá trị α_i thật lớn, việc vi phạm điều kiện ràng buộc sẽ khiến cho giá trị hàm mục tiêu bị tăng lên rất lớn và qua đó thiết kế này bị loại ra do quá trình tối ưu là tìm thiết kế có hàm mục tiêu nhỏ nhất. Trong bài báo này, các giá trị α_i được lấy bằng 10000.

3. Xây dựng thuật toán tối ưu sử dụng thuật toán tìm kiếm hài hòa

Thuật toán tìm kiếm hài hòa (HS) được Geem và cs [15] đề xuất năm 2001 ứng dụng trực tiếp giải quyết các bài toán tối ưu với biến rời rạc. Từ thời điểm đó, HS được ứng dụng giải quyết nhiều dạng bài toán tối ưu khác nhau và đặc biệt là trong thiết kế công trình (ví dụ [13], [16]). Trong phần tiếp theo, chi tiết các bước chính của quá trình tối ưu dầm thép I có biến rời rạc sử dụng thuật toán HS sẽ được trình bày.

Bước 1 - Xây dựng bài toán tối ưu:

Hàm mục tiêu không điều kiện ràng buộc trình bày trong công thức (17) được tối thiểu hóa với các biến thiết kế là:

$$\text{Min } G_{un}(X) = G(X) \times \left(1 + \sum_{i=1}^{14} [\alpha_i \times \max(C_i, 0)] \right) \quad (18)$$

Với vec-tơ biến thiết kế là $X = (x_1, x_2, \dots, x_7)$, $x_i \in [1, UB_{xi}]$. Trong đó, x_i là số tự nhiên thể hiện vị trí của giá trị mà biến thiết kế thứ i được chọn trong tập giá trị có trước của biến này. UB_{xi} là tổng số loại giá trị trong tập giá trị dùng thiết kế cho biến thứ i .

Bước 2 - Khởi tạo ma trận chứa quần thể ban đầu của thuật toán (HM):

Một quần thể ban đầu sẽ được tạo ra một cách ngẫu nhiên với HMS cá thể khác nhau $X^i, i=1, \dots, HMS$. Hàm mục tiêu của các cá thể này sẽ được tính toán và sắp xếp theo thứ tự tăng dần hình thành nên ma trận HM:

$$HM = \begin{Bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^{HMS} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^1 & \dots & x_6^1 & x_7^1 \\ x_1^2 & \dots & x_6^2 & x_7^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^{HMS} & \dots & x_6^{HMS} & x_7^{HMS} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$G_{un}(X^1) \leq G_{un}(X^2) \leq \dots \leq G_{un}(X^{HMS})$$

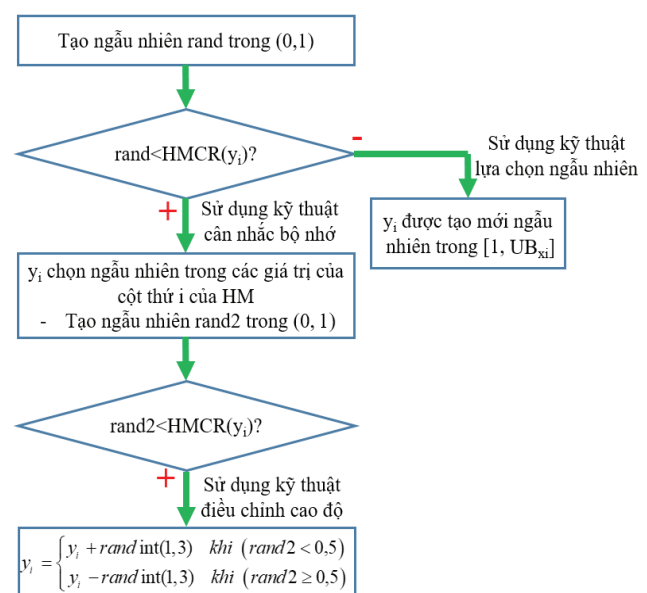
Trong ma trận HM, cá thể có giá trị hàm mục tiêu lớn nhất được gọi là cá thể kém nhất.

Bước 3 - Sáng tạo ra một cá thể mới:

Trong bước này, một cá thể mới (Y) sẽ được tạo ra bằng 3 kỹ thuật cơ bản của thuật toán HS là: cân nhắc bộ nhớ (memory consideration), điều chỉnh cao độ (pitch adjustment) và lựa chọn ngẫu nhiên (random selection). Hình 2 thể hiện các bước cụ thể. Lưu ý rằng, trong hình này, $\text{rand int}(1, 3)$ là chọn số tự nhiên ngẫu nhiên trong đoạn [1, 3] và HMCR và PAR được tính như sau [17]:

$$\begin{cases} HMCR(y_i) = \left(1 + \frac{1 - HMCR}{HMCR} \exp(-\gamma N(0,1)) \right)^{-1} \\ PAR(y_i) = \left(1 + \frac{1 - PAR}{PAR} \exp(-\gamma N(0,1)) \right)^{-1} \end{cases} \quad (20)$$

trong đó: $N(0, 1)$ là phân phối chuẩn (phân phối Gauss); $HMCR$, PAR và γ là các tham số chọn trước.



Hình 2. Trình tự sáng tạo cá thể mới.

Bước 4 - Cập nhật lại ma trận HM:

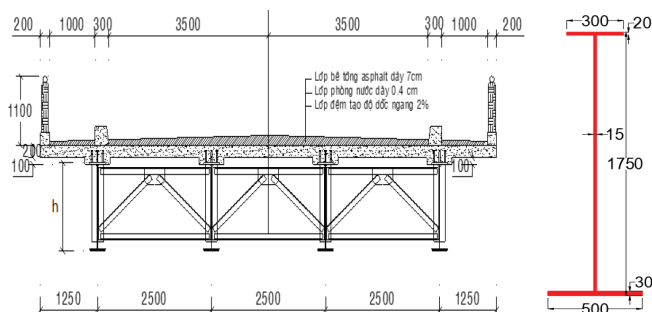
Trong bước này, hàm mục tiêu của Y được tính toán. Nếu giá trị này bé hơn giá trị hàm mục tiêu của cá thể kém nhất của quần thể, cá thể mới sẽ được lựa chọn thay thế cho cá thể kém nhất. Lúc này, ma trận HM sẽ được cập nhật lại theo đúng trình tự giá trị hàm mục tiêu tăng dần như đã thực hiện trong bước 1.

Bước 5 - Kết thúc quá trình tối ưu:

Bước 3 và 4 sẽ được lặp đi lặp lại đến khi số vòng lặp đạt đến giá trị lớn nhất đã được định nghĩa trước ($MaxIter$). Lúc này, cá thể có hàm mục tiêu nhỏ nhất của HM được chọn là kết quả tối ưu cuối cùng.

4. Các ví dụ nghiên cứu

Trong phần này, cầu dầm liên hợp nhịp giản đơn dài 42 m có mặt cắt ngang điển hình như trong hình 3A được xem xét [18]. Kích thước dầm thép được thiết kế dựa vào tính toán thủ công được thể hiện trong hình 3B (chiều dày bản mặt cầu trong trường hợp này được lấy bằng 200 mm). Chiều dài nhịp tính toán $L=41,4$ (m). Giới hạn chảy của thép là $F_y=345$ (Mpa), cường độ nén tiêu chuẩn của bê tông là $f'_c=30$ (Mpa). Hệ số phân bố ngang cho dầm biên bằng 0,636, 0,84 và 1,22 đối với mô men, lực cắt và bộ hành. Tải trọng của hệ liên kết ngang, sườn tăng cường và đỉnh liên kết: $DC_2=1,86$ (kN/m), của lan can và đá vỉa: $DC_3=2,87$ (kN/m), của các lớp mặt cầu: $DW=5,77$ (kN/m), của người đi bộ: $PL=3,0$ (kN/m²) và hoạt tải HL-93. Các TTGH sử dụng để thiết kế là: cường độ 1, sử dụng 2 và mỗi. Năm tiết diện tính toán là: tiết diện gối, 1/8 nhịp, 2/8 nhịp, 3/8 nhịp và giữa nhịp được ký hiệu là MC0, MC1/8, MC2/8, MC3/8, MC1/2. Tập giá trị của 7 biến thiết kế được lấy như sau: $[b_{df}]$ và $[b_{df}]=[50, 51, \dots; 499, 500]$ (mm), $[t_{df}]$ và $[t_{df}]=[5,0, 5,5, 6,0, \dots; 99,5, 100,0]$ (mm), $[t_w]$ và $[t_w]=[5,0, 5,1, 5,2, \dots; 29,9, 30,0]$ (mm), $[D]=[500, 505, 510, \dots; 2995, 3000]$ (mm) và $[t_s]=[175, 180, \dots; 245, 250]$ (mm). Các thông số của thuật toán HS lấy như sau: $HMS=30$, $HMCR=0,8$, $PAR=0,4$, $\gamma=0,3$ và số vòng lặp tối đa $MaxIter=100000$.



Hình 3. Mặt cắt cầu liên hợp nhịp 42 m.

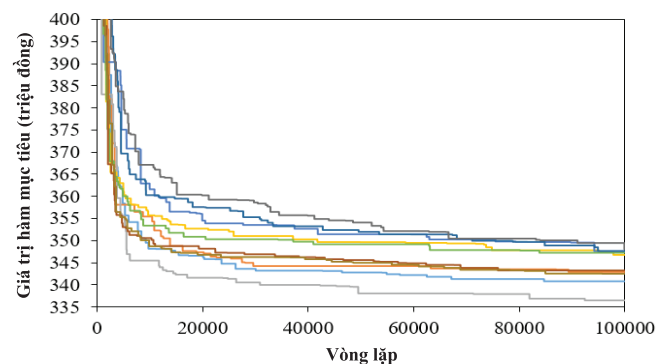
(A) Mặt cắt cầu [17]

(B) Kích thước dầm biên

Kết quả tối ưu được trình bày trong bảng 1 với số lần chạy tối ưu là 10 lần. Thiết kế tối ưu tốt nhất và kém nhất tìm được có giá thành là 336,49 và 348,04 (triệu đồng). Các giá trị này nhỏ hơn so với giá thành của dầm liên hợp khi thiết kế thông thường bằng thủ công khoảng 15%. Sự chênh lệch này là đáng kể và đủ để có thể khẳng định rằng áp dụng thiết kế tối ưu tìm ra phương án thiết kế đem lại hiệu quả kinh tế cao hơn phương pháp thông thường. Bên cạnh đó, chương trình tối ưu luôn tìm được thiết kế hiệu quả (không vi phạm bất cứ điều kiện ràng buộc nào) trong tất cả các lần chạy. Hình 4 trình bày quá trình tối ưu của các lần chạy khác nhau. Ta có thể thấy rằng, độ ổn định của chương trình tối ưu là rất tốt với tính hội tụ và kết quả cuối cùng tìm được có sự sai khác không nhiều.

Bảng 1. Kết quả tối ưu.

Nội dung	Thiết kế tối ưu	Thiết kế thủ công (hình 3B)	Tỷ lệ (%)
Giá thành dầm tối ưu tốt nhất (triệu đồng)	336,49	392,93	85,7
Giá thành dầm tối ưu kém nhất (triệu đồng)	348,04	392,93	88,6
Giá thành trung bình các kết quả tối ưu (triệu đồng)	344,14	392,93	87,6
Giá trị biến thiết kế (mm)	292, 13, 292, 52, 11,7, 1750, 180	300, 20, 500, 30, 15, 1700, 200	
Hệ số an toàn	1,002	1,13	



Hình 4. Đường hội tụ của quá trình tối ưu.

5. Kết luận

Bài báo đề xuất bài toán tối ưu dầm thép liên hợp của cầu dầm nhịp giản đơn. Hàm tối ưu được lựa chọn là tổng giá thành của bê tông bản mặt cầu và dầm thép. Điều kiện ràng buộc được xác định theo các quy định thiết kế của TCVN 11823:2017. Các biến thiết kế gồm chiều dày bản mặt cầu bằng BTCT và kích thước hình học của tiết diện dầm thép.

Các biến thiết kế này được xem là các biến rời rạc để phù hợp với thực tế thiết kế công trình. Thuật toán tìm kiếm ngẫu nhiên được áp dụng để giải bài toán tối ưu trên. Kết quả tính toán cho trường hợp dầm thép dài 42 m cho thấy thiết kế tối ưu đã tiết kiệm được khoảng 15% giá thành so với thiết kế thủ công thông thường. Chương trình tối ưu thể hiện có sự ổn định cao. Tuy nhiên, nghiên cứu này vẫn còn một số hạn chế cần được tiếp tục nghiên cứu trong tương lai như: (1) So sánh đánh giá tính hiệu quả của các thuật toán metaheuristic khác nhau, (2) xét đến tác động của các tải trọng khác như gió hay động đất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R.L. Pedro, J. Demarche, L.F.F. Miguel, et al. (2017), "An efficient approach for the optimization of simply supported steel-concrete composite I-girder bridges", *Advances in Engineering Software*, **112**, pp.31-45, DOI: 10.1016/j.advengsoft.2017.06.009.
- [2] S. Hendawi, D.M. Frangopol (1994), "Design of composite hybrid plate girder bridges based on reliability and optimization", *Structural Safety*, **15(1-2)**, pp.149-165, DOI: 10.1016/0167-4730(94)90057-4.
- [3] T.V. Hung, H.M. Hung, D.V. Thuat, et al. (2021), "Optimization of I-shaped steel plate girder in simple-span composite bridges according to TCVN 11823:2017", *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*, **15(3V)**, pp.55-68, DOI: 10.31814/stce.nuce2021-15(3V)-05 (in Vietnamese).
- [4] V.H. Truong, G. Papazafeiropoulos, V.T. Pham, et al. (2019), "Effect of multiple longitudinal stiffeners on ultimate strength of steel plate girders", *Structures*, **22**, pp.366-382, DOI: 10.1016/j.istruc.2019.09.002.
- [5] S.E. Kim, G. Papazafeiropoulos, C. Graciano, et al. (2021), "Optimal design of longitudinal stiffeners of unsymmetric plate girders subjected to pure bending", *Ocean Engineering*, **221**, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108374.
- [6] A.M.B. Martins, L.M.C. Simões, J.H.J.O. Negrao (2015), "Optimum design of concrete cable-stayed bridges", *Engineering Optimization*, **48(5)**, pp.772-791, DOI: 10.1080/0305215X.2015.1057057.
- [7] M.H. Ha, Q.A. Vu, V.H. Truong (2018), "Optimum design of stay cables of steel cable-stayed bridges using nonlinear inelastic analysis and genetic algorithm", *Structures*, **16**, pp.288-302, DOI: 10.1016/j.istruc.2018.10.007.
- [8] A.M.B. Martins, L.M.C. Simoes, J.H.J.O. Negrao (2016), "Optimum design of concrete cable-stayed bridges with prestressed decks", *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, **17(5-6)**, pp.339-349, DOI: 10.1080/15502287.2016.1231237.
- [9] V.H. Truong, P.C. Nguyen, S.E. Kim (2017), "An efficient method for optimizing space steel frames with semi-rigid joints using practical advanced analysis and the micro-genetic algorithm", *Journal of Constructional Steel Research*, **128**, pp.416-427, DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.09.013.
- [10] V.H. Truong, H.M. Hung, P.H. Anh, et al. (2020), "Optimization of steel moment frames with panel-zone design using an adaptive differential evolution", *Journal of Science and Technology in Civil Engineering - National University of Civil Engineering*, **14(2)**, pp.65-75, DOI: 10.31814/stce.nuce2020-14(2)-06.
- [11] V.H. Truong, S.E. Kim (2018a), "Reliability-based design optimization of nonlinear inelastic trusses using improved differential evolution algorithm", *Advances in Engineering Software*, **121**, pp.59-74, DOI: 10.1016/j.advengsoft.2018.03.006.
- [12] H.A. Pham, D.X. Nguyen, V.H. Truong (2021), "An efficient differential-evolution-based moving compensation optimization approach for controlling differential column shortening in tall buildings", *Expert Systems with Applications*, **169**, DOI: 10.1016/j.eswa.2020.114531.
- [13] V.H. Truong, S.E. Kim (2018b), "A robust method for optimization of semi-rigid steel frames subject to seismic loading", *Journal of Constructional Steel Research*, **145**, pp.184-195, DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.02.025.
- [14] Vietnam Ministry of Science and Technology (2017), *TCVN 11823:2017: Highway Bridge Design Specification* (in Vietnamese).
- [15] Z.W. Geem, J.H. Kim, G.V. Logonathan (2001), "A new heuristic optimization algorithm: Harmony search", *Simulation*, **76(2)**, pp.60-68, DOI: 10.1177/003754970107600201.
- [16] V.H. Truong, S.E. Kim (2017), "An efficient method for reliability-based design optimization of nonlinear inelastic steel space frames", *Struct. Multidisc. Optim.*, **56**, pp.331-351, DOI: 10.1007/s00158-017-1667-7.
- [17] D. Manjarres, I.L. Torres, S.G. Lopez, et al. (2013), "A survey on applications of the harmony search algorithm", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **26(8)**, pp.1818-1831, DOI: 10.1016/j.engappai.2013.05.008.
- [18] N.K. Vi (2017), *Analysis and Selection of Reasonable Cross-sections of Composite Steel Girder Bridges with Reinforced Concrete Slabs Controlled in Height*, Master Thesis in Engineering, Da Nang University of Science and Technology (in Vietnamese).