

# TỐI ƯU TRỌNG LƯỢNG KHUNG THÉP NHÀ TIỀN CHẾ SỬ DỤNG THUẬT TOÁN TIẾN HÓA VI PHÂN

**TS. Vũ Anh Tuấn**

Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp  
Trường Đại học Xây dựng

**Tóm tắt:** Có nhiều phương pháp thiết kế đã được ứng dụng trong thực tiễn nhằm thỏa mãn yêu cầu thiết kế khung thép nhà công nghiệp. Trong bài báo này tác giả đã ứng dụng thuật toán tiến hóa vi phân vào quá trình tự động hóa và hợp lý hóa quá trình thiết kế. Mục tiêu của nghiên cứu này là đề xuất giải pháp thiết kế tối ưu kết cấu khung thép sử dụng tiết diện tổ hợp chữ I. Giải pháp thiết kế tối ưu đề cập trong bài báo này cho kết quả tốt hơn so với giải pháp ban đầu của nhà sản xuất. Xét đến các tiêu chí về chất lượng và tính hiệu quả, thì phương pháp thiết kế tối ưu bằng thuật toán tiến hóa vi phân hoàn toàn có thể áp dụng vào bài toán thiết kế thực tế do tính hiệu quả cao của nó.

**Summary:** Various methods of design have been applied in practice to satisfy the design requirements of pre-engineering steel frame. This paper attempts to acquire the Differential Evolution Algorithm in automatization of specific synthesis and rationalization of design process. The goal of this study is to propose an optimal design of steel frame structures using I-built-up sections. An optimized steel frame structure in this paper generated optimization solution better than the original solution designed by the manufacturer. Taking the criteria regarding the quality and efficiency into consideration, the produced optimal design with the Differential Evolution Algorithm can completely apply in practical design because of its excellent performance.

## 1. Đặt vấn đề

Sử dụng kết cấu khung thép trong nhà công nghiệp một hay nhiều nhịp như nhà kho, trung tâm vận chuyển-phân phối hàng hóa, nhà thi đấu thể thao hoặc kết cấu khung của các nhà xưởng giúp tạo ra các khu nhà có diện tích và không gian sử dụng lớn. Hình dạng phổ biến của các nhà một tầng thường là nhà có nhịp lớn hoặc trung bình. Theo một khảo sát gần đây tại CHLB Đức [1], khoảng 87% kết cấu khung thép của các nhà trên thường là khung một tầng, một nhịp và chân cột liên kết khớp với móng.

Để đạt được trọng lượng kết cấu tối ưu cũng như chi phí sản xuất thấp, việc ứng dụng khung thép tiết diện chữ I tổ hợp trong thiết kế kết cấu khung thép đã được ứng dụng phổ biến trong thiết kế. Do sự gia tăng của giá thành nguyên vật liệu, các kỹ sư xây dựng cũng như nhà sản xuất buộc phải giảm giá thành và rút ngắn thời gian thi công để duy trì sự cạnh tranh của mình. Do vậy, một xu hướng thiết kế hiện đại đã xuất hiện: đó là sử dụng phần mềm phân tích kết cấu kết hợp với thiết kế tối ưu để đánh giá các phương án khả thi tìm ra phương án kinh tế nhất so với các phương án thiết kế truyền thống.

Do sự đa dạng trong các bài toán tối ưu kết cấu nên phần lớn bài toán tối ưu kết cấu có thể được phân loại theo tối ưu tiết diện, tối ưu hình dáng và tối ưu cấu trúc]. Tuy nhiên, ứng dụng chính của tối ưu kết cấu thép là tối ưu tiết diện bởi vì phương pháp tối ưu này có thể làm giảm thiểu trọng lượng của kết cấu.

Đối với thiết kế tối ưu khung thép tiền chế, tiết diện chữ I tổ hợp của cột-xà ngang được tổ hợp từ các bản thép nằm trong danh mục các thép tấm. Với các biến đã xác định của kết cấu, hàm mục tiêu được xác định dựa trên việc tối thiểu hóa trọng lượng của kết cấu. Các điều kiện biên phải thỏa mãn điều kiện về đảm bảo về cường độ, ổn định và điều kiện đảm bảo sử dụng. Các hằng số của tối ưu kết cấu là hình dạng, vật liệu, tổ hợp tải trọng và vị trí xây dựng công trình.

Bài báo trình bày ứng dụng thuật toán tiến hóa vi phân (DE-A) vào bài toán tối ưu và cũng đề xuất phương pháp thiết kế tối ưu kết cấu khung thép sử dụng thép tiết diện chữ I tổ hợp. Trong quá trình tối ưu, kết cấu khung thép được phân tích có kể đến ảnh hưởng của oằn vẹo bên dựa trên mô hình phần tử hữu hạn với 7 bậc tự do tại mỗi nút của phần tử. Các hệ giằng, xà gồ, mái và tường của công trình cũng được tính đến bằng cách coi là những gối tựa cố định và gối tựa đàn hồi nằm trong mặt bằng vuông góc với mặt phẳng khung.

## 2. Phương pháp

### 2.1 Tối ưu trọng lượng

Hàm chi phí là tối thiểu trọng lượng của khung thép trong khi đồng thời thỏa mãn được mọi yêu cầu về độ bền và độ cứng dưới các tác động của tải trọng. Hàm chi phí được biểu diễn như sau:

$$W = \sum_{i=1}^{nm} A_i \rho_i L_i \quad (1)$$

Ký hiệu  $i$  biểu thị tên phần tử,  $nm$  tổng số phần tử,  $W$  là trọng lượng của kết cấu khung,  $A_i$  là diện tích của mỗi phần tử,  $\rho_i$  và  $L_i$  là trọng lượng riêng và chiều dài của phần tử.

Cuối mỗi bước lặp, kết cấu khung thép được phân tích để đánh giá các điều kiện ràng buộc như các giá trị ứng suất, ổn định cục bộ - tổng thể, chuyển vị ngang, độ võng.

Các giá trị ứng suất phải thỏa mãn:

$$\sigma_{il} \leq \sigma_i^P, \quad i = 1, 2, \dots, nm; \quad l = 1, 2, 3, \dots, nlc \quad (2)$$

Trong đó  $\sigma_{il}$  là ứng suất lớn nhất của phần tử thứ  $i$  ứng với tổ hợp tải trọng  $l$ ,  $\sigma_i^P$  là giá trị cường độ tính toán của phần tử thứ  $i$  và  $nlc$  là số tổ hợp tải trọng.

Các điều kiện chuyển vị phải thỏa mãn:

$$|\Delta_{jl}| \leq |\Delta_j^P|, \quad j = 1, 2, \dots, p; \quad l = 1, 2, 3, \dots, nlc \quad (3)$$

Ở đây,  $\Delta_{jl}$  là chuyển vị của khung ứng với tổ hợp tải trọng  $l$ ,  $\Delta_j^P$  là chuyển vị cho phép của khung,  $p$  là số điều kiện chuyển vị.

Biên trên và biên dưới của ràng buộc biến thiết kế được trình bày như sau

$$\begin{aligned} D_k^L &\leq D_k \leq D_k^U, \quad k = 1, 2, \dots, ng \\ D_k &\in S = (S_d | d = 1, 2, \dots, ns) \end{aligned} \quad (4)$$

trong đó:  $D_k^L$  và  $D_k^U$  là biên trên và biên dưới của  $S$ ,  $ng$  là số các biến thiết kế,  $S$  và  $ns$  là danh sách và số các tiết diện có sẵn trong "danh mục các thép tấm".

## 2.2 Thuật toán tiến hóa vi phân

Năm 1997, thuật toán tiến hóa vi phân được giới thiệu bởi K. Price and R. Storn ]. Ý tưởng chính của thuật toán DE-A là sử dụng các véc-tơ vi phân trong việc tạo nên các cá thể mới để tìm ra các giải pháp tối ưu hơn. Đối với mỗi tập hợp, DE-A tiến hành lặp thông qua tập hợp các cá thể (quần thể) để tạo ra các cá thể mới bởi véc-tơ đột biến và một biến thể của trao đổi chéo. Sự chọn lọc 5.] giữa véc-tơ gốc  $X_j$  và mỗi cá thể mới  $U$  (Hình 1) theo nguyên tắc: (a) nếu cả hai giải pháp so sánh là khả thi, giải pháp có giá trị hàm mục tiêu tốt hơn được chọn (b) nếu cả hai giải pháp so sánh, một khả thi và một không khả thi thì giải pháp khả thi được lựa chọn, (c) nếu cả hai giải pháp so sánh là không khả thi thì giải pháp nào có ít vi phạm hơn thì tốt hơn.

Trong các bước tiếp theo sẽ trình bày quá trình tối ưu dựa trên DE-A:

B1: Tạo quần thể ban đầu  $P$ , mỗi cá thể của  $P$  được xác định bằng phương pháp ngẫu nhiên hoặc

$$D_{k,i} = D_k^L + rnd(0,1) \times (D_k^U - D_k^L) \quad (5)$$

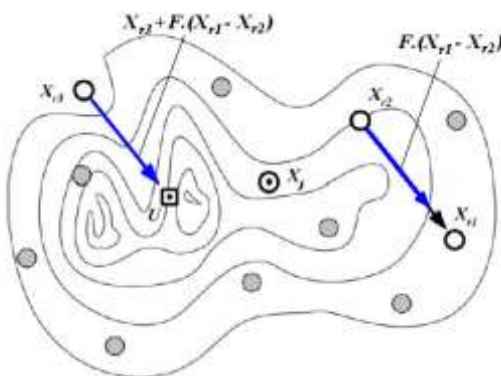
Trong đó:  $rnd(0,1)$  là hàm lấy giá trị ngẫu nhiên trong khoảng từ 0 đến 1.

B2: Phân tích và đánh giá kết cấu khung với quần thể ban đầu  $P$ . Lưu lại kết quả phân tích như các chuyển vị, các giá trị ứng suất và giá trị hàm chi phí  $C_P$ .

B3: Tạo các cá thể mới bằng cách lựa chọn  $P[X_{r1}]$ ,  $P[X_{r2}]$  và  $P[X_{r3}]$  với  $i \neq r1 \neq r2 \neq r3$ .

$$U[i] = P[X_{r3}] + F \times (P[X_{r1}] - P[X_{r2}]); F < 1.0 \quad (6)$$

$F$  là hằng số xác định véc-tơ vi phân [3] được xác định trong khoảng  $0.4 \leq F \leq 1.2$



**Hình 1:** Véc-tơ vi phân và cá thể mới  $U$  ]

B4: Phân tích và đánh giá kết cấu khung với cá thể mới  $U[i]$ . Lưu lại kết quả phân tích như các chuyển vị, các giá trị ứng suất và giá trị hàm chi phí  $C_T$ .

B5: So sánh giá trị hàm chi phí  $C_P$  với giá trị hàm chi phí của cá thể mới  $C_T$ .

Nếu  $C_T$  tốt hơn  $C_P$  thì

$$P'[i] = U[i]$$

Nếu  $C_T$  không tốt hơn  $C_P$  thì

$$P'[i] = P[i]$$

Kết thúc so sánh

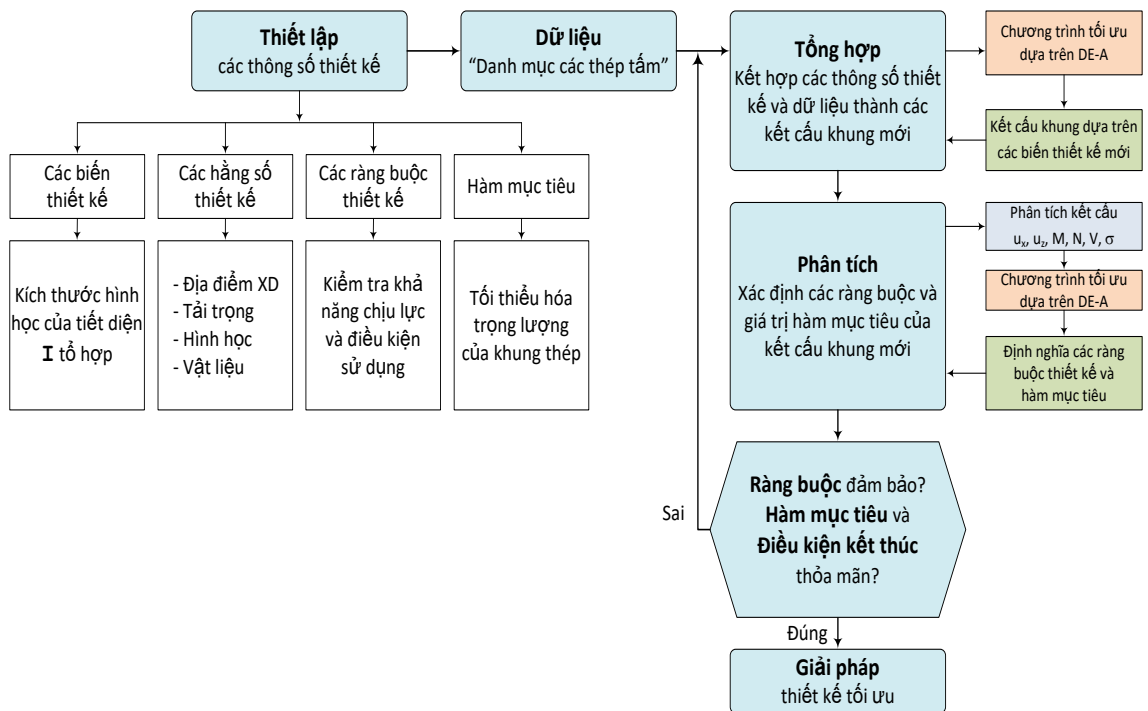
$$P[i] = P'[i] \text{ (Thay thế quần thể ban đầu } P \text{ bằng } P')$$

B6: Lập quá trình tối ưu từ bước B3 đến bước B5 cho đến khi đạt đến yêu cầu kết thúc qua trình tối ưu. Tìm cá thể tốt nhất của quần thể cuối cùng với giá trị hàm chi phí tốt nhất.

Cũng như các thuật toán tối ưu dựa trên thuyết tiến hóa, quá trình kết thúc của DE-A xảy ra khi hàm mục tiêu đạt đến giá trị cực tiểu toàn cục với giá trị cực tiểu này đã biết, đạt đến giới hạn vòng lặp hay giới hạn thế hệ cho trước, giới hạn về thời gian tối ưu...

### 2.3 Thuật toán và chương trình

Quá trình thiết kế tối ưu kết cấu của khung thép dựa trên DE-A (Hình 2) gồm một số bước sau: hai bước đầu tiên là đưa ra yêu cầu thiết kế bao gồm xác định các biến thiết kế, các hằng số cũng như các ràng buộc, hàm mục tiêu và các dữ liệu kích thước tiết diện. Ở bước tiếp theo, quá trình tổng hợp liên kết với chương trình tối ưu để xác định các biến thiết kế. Với chương trình phân tích kết cấu, các chuyển vị, nội lực và ứng suất được tính toán và sau đó các dữ liệu cần thiết này sẽ được chương trình tối ưu dùng để xác định các ràng buộc và hàm mục tiêu.



Hình 2: Quy trình thiết kế tối ưu của kết cấu khung thép

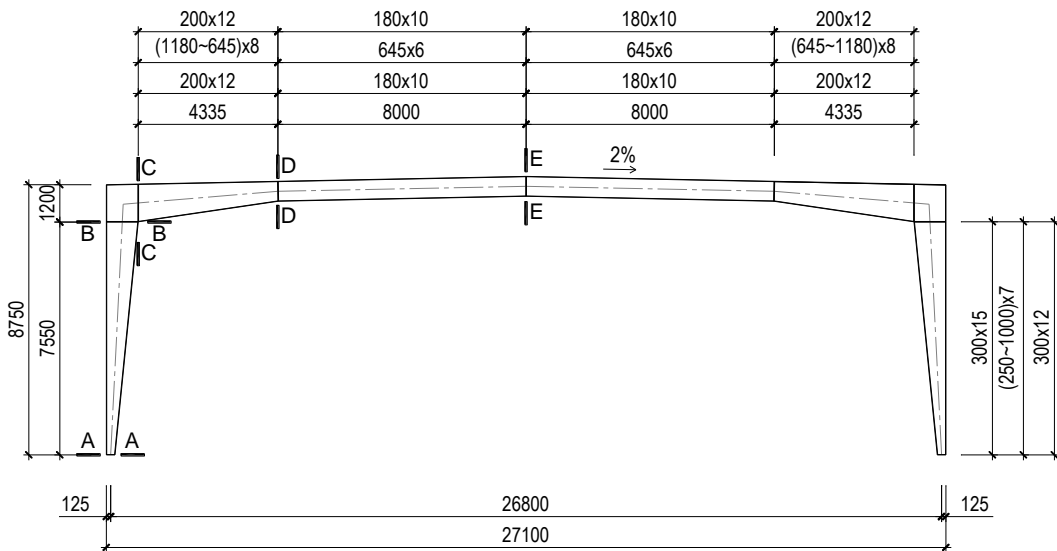
Bản thân DE-A không thể giải quyết bài toán tối ưu. Do đó, cần phải xây dựng một hệ thống chương trình để tối ưu hóa kết cấu khung thép. Kết hợp với chương trình phân tích kết cấu SOFISTiK, chương trình tối ưu OptimizationDE 7.] đã được xây dựng dựa trên thuật toán DE-A với các mô đun: Xử lý dữ liệu, Xác định ứng suất và Tối ưu hóa. Các dữ liệu cần thiết của kết cấu liên quan đến các bước tiếp theo của quá trình tối ưu được mô đun Xử lý dữ liệu thực hiện. Mô đun này thực hiện trao đổi dữ liệu như đọc kết quả phân tích kết cấu và kết xuất dữ liệu đầu vào cho chương trình phân tích kết cấu. Ứng suất của các phần tử khung được mô đun Xác định ứng suất kiểm tra theo các tiêu chuẩn thiết kế mà ở đây sử dụng tiêu chuẩn EC-3. Mô đun Tối ưu hóa xác định trọng lượng nhỏ nhất của kết cấu.

### 3. Ứng dụng và kết quả

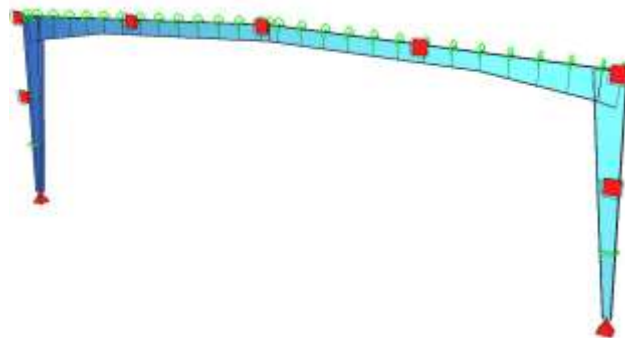
Khung thép với kích thước hình học và kích thước tiết diện cột - xà ngang được thể hiện ở Hình 3 với  $L = 27.10m$ ,  $H = 8.75m$ ].

Các biến tối ưu của khung thép bao gồm kích thước 5 mặt cắt của khung từ mặt cắt A-A đến mặt cắt E-E (Hình 3 và Bảng 1). Số biến tối ưu của cột vát là 6, xà ngang vát là 6, và của xà ngang có tiết diện không đổi là 2, như vậy tổng số biến tối ưu của kết cấu khung thép là 14 biến. Các giá trị ban đầu của biến thiết kế dựa tham khảo ở [6] và được trình bày trong Bảng 1.

Hàm mục tiêu của bài toán tối ưu là tối thiểu hóa trọng lượng của khung thép. Các ràng buộc thiết kế là chuyển vị theo phương đứng và ngang của các nút, cường độ tính toán cho phép của các phần tử kết cấu, đồng thời có kể đến ổn định tổng thể và ổn định cục bộ của kết cấu. Các giá trị không thay đổi trong quá trình tối ưu như: kích thước hình học của khung, tọa độ nút, thứ tự liên kết các phần tử, điều kiện biên, vật liệu, tải trọng cũng như các trường hợp tổ hợp tải trọng. Các gối tựa cố định và gối tựa đàn hồi nằm trong mặt phẳng vuông góc với mặt phẳng của khung được thể hiện ở Hình 4. Sau 30 thế hệ, kết quả tối ưu được trình bày ở Hình 5 và giá trị tối ưu kích thước của các mặt cắt khung ở Bảng 2.



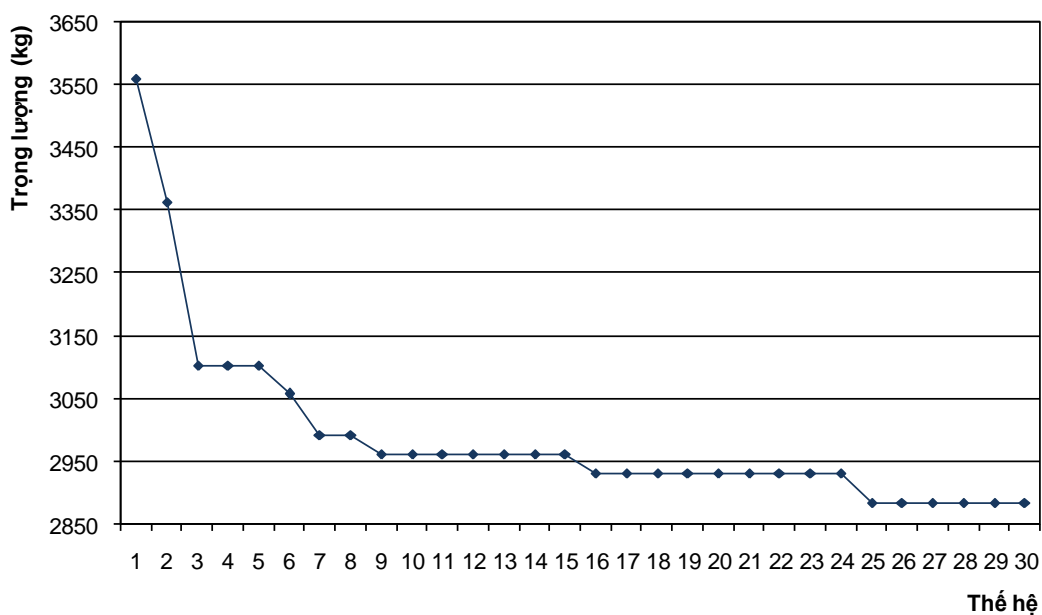
Hình 3: Sơ đồ hình học khung thép



Hình 4: Mô hình phân tích kết cấu của khung thép

**Bảng 1: Các kích thước mặt cắt ngang**

| A-A |     |     | B-B |     |      | C-C  |     |     | D-D |     |     | E-E |     |  |
|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
|     |     |     |     |     |      |      |     |     |     |     |     |     |     |  |
| 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6    | 7    | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  |  |
| Hw1 | tw1 | Bf1 | tf1 | tf2 | Hw2  | Hw3  | tw3 | Bf3 | tf3 | tf4 | Hw4 | tw5 | tf5 |  |
| 250 | 7   | 300 | 12  | 15  | 1000 | 1180 | 8   | 200 | 12  | 12  | 645 | 6   | 10  |  |



**Hình 5: Kết quả tối ưu của kết cấu khung sau 30 thế hệ**

**Bảng 2: Kết quả tối ưu**

| Thuật toán | Trọng lượng (kg) |     |     | J (kg) |      |     | Phần trăm (%) |     |     |     |     |     |     |
|------------|------------------|-----|-----|--------|------|-----|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| DE-A       | <b>2883.8</b>    |     |     | 3531.1 |      |     | 81.7          |     |     |     |     |     |     |
| Hw1        | tw1              | Bf1 | tf1 | tf2    | Hw2  | Hw3 | tw3           | Bf3 | tf3 | tf4 | Hw4 | tw5 | tf5 |
| 200        | 8                | 180 | 11  | 11     | 1040 | 940 | 8             | 250 | 9   | 10  | 610 | 4   | 9   |

Kết quả cho thấy rằng trọng lượng tối ưu đạt được bởi thuật toán DE-A cho kết quả tốt hơn nhà sản xuất (bằng 81.7%), như vậy trọng lượng thép tiết kiệm được là 647.3 kg/khung và xấp xỉ 7.12 tấn cho toàn bộ công trình.

#### 4. Kết luận

Các bài toán tối ưu thực tế ở trên đã cho thấy so với các phương pháp thiết kế truyền thống, phương pháp thiết kế tối ưu sử dụng DE-A có hiệu quả trong thực tế. Các bài toán thiết kế áp dụng DE-A cho kết quả tốt hơn từ 10% đến 25% [7] so với giải pháp ban đầu của các nhà sản xuất khung thép tiền chế.

Xét đến các tiêu chí về chất lượng và hiệu quả, dựa vào kết quả của bài toán tối ưu trên có thể thấy phương pháp thiết kế tối ưu dựa vào DE-A có khả năng áp dụng vào bài toán thiết kế. Với chương trình tối ưu hóa kết cấu khung thép OptimizationDE trình bày trong bài báo này cùng với các tiêu chuẩn thiết kế khác nhau như EC3, DIN 18800, TCVN 338-2005... các kỹ sư xây dựng có thể ứng dụng vào công tác thiết kế kết cấu khung thép tiền chế nhà công nghiệp trong thực tế.

#### Tài liệu tham khảo

1. S. Schilling (2004), *Beitrag zur Lösung von ingenieurtechnischen Entwurfsaufgaben unter Verwendung Evolutionärer Algorithmen*, Dissertation, Bauhaus University Weimar.
2. E. Hinton, J. Sienz, O. Mustafa (2003), *Analysis and optimization of prismatic and axisymmetric shell structures*, Springer.
3. K. V. Preis, R. M Storn, J. A. Lampinen (2005), *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*, Springer.
4. V. Feoktistov (2007), *Differential Evolution - In Search of Solutions*, Springer.
5. J. A. Lampinen (2002), "A constraint Handling approach for the Differential Evolution Algorithm", *Evolutionary Computation*, 2, 1468-1473.
6. Goldbeck GmbH (2006), *Structural Design: Halle mit Büro*, Goldbeck.
7. Vu Anh Tuan (2009), *Beitrag zur den Optimierung von Tragwerken aus Stahl mittels Evolutionärer Algorithmen*, Dissertation, Bauhaus University Weimar.