

Tối ưu hoá kết cấu khung thép dựa trên độ tin cậy sử dụng giải thuật một vòng lặp đơn xác định với biến thiết kế rời rạc

Reliability-based design optimization of steel frames using a single loop deterministic method with discrete design variables

Ngày nhận bài: 20/8/2015

Ngày sửa bài: 23/10/2015

Ngày chấp nhận đăng: 25/12/2015

**Bùi Trần Vĩnh Thái, Đinh Văn Hoai,
Lâm Thị Phúc Hạnh, Hồ Hữu Vịnh,
Nguyễn Thời Trung**

TÓM TẮT

Bài báo trình bày cách thành lập và giải bài toán tối ưu hoá kết cấu khung thép dựa trên độ tin cậy sử dụng giải thuật một vòng lặp đơn xác định với biến thiết kế rời rạc. Hàm mục tiêu là kết quả tối ưu trọng lượng của khung, biến thiết kế là tiết diện mặt cắt ngang của cấu kiện, biến ngẫu nhiên được xem xét là mô-đun đàn hồi vật liệu và tải trọng tác dụng. Các ràng buộc về độ bền yêu cầu của cấu kiện và chuyển vị được xác định theo tiêu chuẩn thiết kế của Viện thép hoa Kỳ LRFD - AISC (2010) [1]. Giải thuật tìm kiếm nghiệm tối ưu dựa trên độ tin cậy được sử dụng là phương pháp kết hợp giữa giải thuật một vòng lặp đơn xác định SLDM (Single-Loop Deterministic Method) và giải thuật DE cải tiến (Improved Differential Evolution - IDE). Hai ví dụ số được thực hiện nhằm kiểm tra độ tin cậy và đánh hiệu quả của phương pháp đã đề xuất so với các phương pháp khác đã được công bố trước đó.

Keywords: *Steel Frames, Reliability-Based Design Optimization, Single-Loop Deterministic Method, Differential Evolution, Improved Differential Evolution.*

ABSTRACT

The paper presents how to establish and solve Reliability-based design optimization problems of steel frames using a single loop deterministic method with discrete design variables. The objective of the

design algorithm is to obtain minimum weight frames with design variables are cross-section of the structures and random variables are considered as Young's modulus and loads. The subjects to the strength and displacement constraints follow the American Institute of Steel Construction LRFD - AISC (2010) [1] requirements. The algorithm is a combination between the Single-Loop Deterministic Method (SLDM) and the Improved Differential Evolution (IDE). Two numerical examples are solved in order to analyze reliability and efficiency of the proposed method and to compare with other methods that have been published previously.

Từ khóa: *Khung thép, tối ưu hoá dựa trên độ tin cậy, giải thuật một vòng lặp đơn, DE, DE cải tiến.*

Bùi Trần Vĩnh Thái: *Trường Đại học Mở Tp. HCM, Trường Đại học Khoa học Xã hội & Nhân văn Tp. HCM*

Đinh Văn Hoai: *Trường Đại học Mở Tp. HCM*

Lâm Thị Phúc Hạnh: *Trường Đại học công nghệ Tp. HCM*

Hồ Hữu Vịnh: *Viện khoa học tính toán, Trường Đại học Tôn Đức Thắng Tp. HCM*

Nguyễn Thời Trung: *Viện khoa học tính toán, Trường Đại học Tôn Đức Thắng Tp. HCM*

Email: *vinhthai83vl@yahoo.com*

1. Giới thiệu

Ngày nay, trong lĩnh vực thiết kế kết cấu nói chung và kết cấu khung thép nói riêng thì nhu cầu thiết lập và tính toán các bài toán tối ưu hóa là rất cần thiết. Các thiết kế tối ưu sẽ làm giảm đáng kể chi phí xây dựng nhưng vẫn đảm bảo yêu cầu về độ bền của kết cấu.

Tuy nhiên một vấn đề cần phải đặt ra khi thực hiện công tác thiết kế là sự không chắc chắn của các nguồn dữ liệu đầu vào. Các thành phần này thường không cố định mà dao động ngẫu nhiên quanh giá trị thiết kế ban đầu và thường tuân theo một qui luật phân phối xác suất nhất định [2]. Điều này sẽ dẫn đến các ứng xử đầu ra của kết cấu cũng dao động theo một qui luật phân phối xác suất và cũng có thể vượt quá giới hạn cho phép đã được xác định trước. Xác suất các trường hợp ứng xử đầu ra vượt quá giới hạn cho phép được gọi là độ không an toàn hay xác suất phá hủy của kết cấu [2]. Chính vì thế, công tác thiết kế tối ưu kết cấu cần phải được thiết kế thỏa mãn hàm trạng thái giới hạn của chúng với một chỉ số độ an toàn nhất định hay còn được gọi là thiết kế tối ưu dựa trên độ tin cậy (RBDO - Reliability based design optimization).

Một số cách tiếp cận phổ biến để giải quyết bài toán RBDO bao gồm: Giải thuật vòng lặp đôi; Giải thuật vòng lặp tuần tự; Giải thuật một vòng lặp đơn xác định. Các giải thuật sử dụng vòng lặp đôi và vòng lặp tuần tự vẫn còn nhiều hạn chế như chi phí tính toán cao do việc đánh giá độ tin cậy được thực hiện nhiều lần trong quá trình tối ưu hóa. Ngược lại giải thuật một vòng lặp đơn giải quyết bài toán RBDO chỉ trong hai bước: 1/ Chuyển đổi các ràng buộc xác suất thành ràng buộc xác định; 2/ Giải bài toán tối ưu hóa xác định. Vì thế vòng lặp tối ưu hóa và đánh giá độ tin cậy chỉ thực hiện một lần và chi phí tính toán được giảm đáng kể. Nhận thấy được điều này, năm 2012 Li et al. [3] đã đề xuất phương pháp một vòng lặp đơn xác định SLDM (Single loop deterministic method) dựa trên cách tiếp cận đo lường hiệu suất (performance measure approach - PMA) để giải các bài toán RBDO.

Trong những năm vừa qua đã có nhiều nghiên cứu về tối ưu hoá kết cấu khung thép, có thể điểm qua một số nghiên cứu tiêu biểu như sau: Pezeshk et al. (2000) [4]; Camp et al. (2005) [5]; Degertekin (2008) [6]; Saka (2009) [7]; Kaveh và Abbasgholiha (2011) [8] v.v. Các giải thuật tìm kiếm nghiệm tối ưu phát triển ở các giải thuật như: giải thuật di truyền GA; giải thuật đàn kiến ACO; giải thuật về vụ nổ lớn BB-BC v.v. Ngoài ra một số nghiên cứu về thiết kế tối ưu dựa trên độ tin cậy cho kết cấu khung thép có thể được liệt kê như sau: Ghasemi và Yousefi (2011) [9]: sử dụng phương pháp GA sửa đổi kết hợp với phương pháp phân tích độ tin cậy bậc hai SORM; Mohsenali Shayanfar et al. (2014) [10]: sử dụng phương pháp GA kết hợp với phương pháp phân tích độ tin cậy bậc nhất FORM. Nhìn chung, các nghiên cứu ở bên trên phần nào đã giải quyết được bài toán RBDO, tuy nhiên chi phí tính toán khi thực hiện lại quá cao do sự hạn chế của phương pháp GA và phương pháp vòng lặp đôi.

Trong số những giải thuật tìm kiếm nghiệm tối ưu phổ biến hiện nay thì phương pháp DE (Differential Evolution) được đề xuất bởi Storm và Price (1997) [11] và các phiên bản cải tiến của nó gần đây nổi lên như là một trong những thuật toán hiệu quả nhất để giải quyết các bài toán tối ưu hóa. Một số nghiên cứu tiêu biểu có thể kể đến như sau: Hồ Hữu Vĩnh et al. (2015) [12]: thiết kế tối ưu vị trí và kích thước kết cấu dàn sử dụng phương pháp DE cải tiến ràng buộc (D-ICDE); Hồ Hữu Vĩnh et al. (2016) [13]: thiết kế tối ưu kết cấu dàn sử dụng phương pháp DE thích nghi tự nhiên.

Bài báo này nhằm đưa ra một phương pháp hiệu quả để giải quyết bài toán thiết kế tối ưu dựa trên độ tin cậy cho kết cấu khung thép với biến thiết kế rời rạc, phương pháp đề xuất là sự kết hợp giữa giải thuật một vòng lặp đơn xác định (SLDM) và giải thuật DE cải tiến (IDE), với IDE là một phiên bản mới được cải tiến từ DE nhằm tăng tốc độ hội tụ của quá trình tìm kiếm nghiệm tối ưu mà vẫn đảm bảo lời giải là nghiệm tối ưu toàn cục.

2. Thành lập bài toán thiết kế tối ưu khung thép dựa trên độ tin cậy

2.1. Bài toán tối ưu

Bài toán thiết kế tối ưu khung thép được phát biểu như sau:

$$\text{Minimize } W(x) = \sum_{i=1}^m A_i \sum_{j=1}^{m_i} \rho_j L_j$$

$$\text{Chịu các ràng buộc } \begin{cases} C_k^a \leq 0 & k = 1, \dots, n_c \\ C_r^b \leq 0 & r = 1, \dots, n_s \\ 0 \leq A_i \leq m_s & i = 1, \dots, n_g \end{cases}$$

trong đó: m_k là tổng số cấu kiện trong nhóm k , ρ_i và L_i là trọng lượng riêng và chiều dài của mỗi cấu kiện, A_k là diện tích mặt cắt ngang của cấu kiện trong nhóm k , n_g là tổng số cấu kiện trong khung. $C_k^a \leq 0$ và $C_r^b \leq 0$ là ràng buộc về độ bền và chuyển vị; n_s và n_c là số tầng và số cấu kiện dầm cột; A_k được chọn từ bộ dữ liệu tiết diện thép cánh mở (W) theo AISC, m_s là tổng số tiết diện (W) xét trong nhóm k .

Các ràng buộc về độ bền yêu cầu cấu kiện, $C_k^a \leq 0$ theo LRFD AISC (2010) [1] được thể hiện trong phương trình (2):

$$C_k^a = \begin{cases} \frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) - 1 & \text{if } \frac{P_r}{P_c} \geq 0.2 \\ \frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) - 1 & \text{if } \frac{P_r}{P_c} < 0.2 \end{cases} \quad (2)$$

trong đó:

- P_r là độ bền yêu cầu về nén.
- $P_c = \phi P_n$ là khả năng chịu nén (kéo) dọc trục; $\phi = \phi_c = 0.9$ hệ số nén; $\phi = \phi_t = 0.9$ hệ số kéo; P_n cường độ chịu nén danh nghĩa.
- $M_c = \phi_b M_n$ là cường độ chịu uốn; với $\phi_b = 0.9$ hệ số khả năng chịu uốn; M_n là cường độ chịu uốn danh nghĩa.
- M_r là momen uốn của cấu kiện xoay quanh trục x và y .

Các ràng buộc về chuyển vị, $C_r^b \leq 0$, được xác định tại phương trình (3):

$$C_r^b = \frac{|\delta_i|}{|\delta_i^*|} - 1 \quad (3)$$

trong đó: δ_i là chuyển vị lệch tầng trong tầng thứ i , δ_i^* là dịch chuyển lệch tầng cho phép ($H_{tầng}/300$).

2.2. Phương pháp một vòng lặp đơn xác định cho bài toán RBDO

Bài toán RBDO được phát biểu như sau:

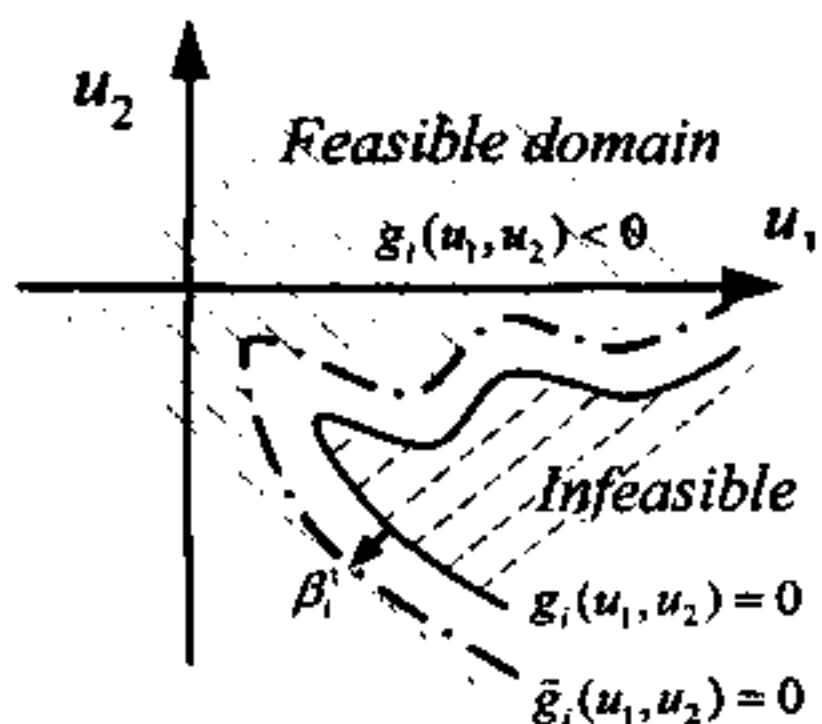
$$\begin{aligned} &\text{Minimize: } f(\mathbf{d}, \mathbf{x}, \mathbf{p}) \\ &\text{Design Variables: } DV = \{\mathbf{d}, \mu_x\} \\ &\text{Subject to: } \text{Prob}\{g_i(\mathbf{d}, \mathbf{x}, \mathbf{p}) \leq 0\} \geq r_i^*, \quad i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (4)$$

Trong đó: $f(\mathbf{d}, \mathbf{x}, \mathbf{p})$ là hàm mục tiêu; \mathbf{d} là biến thiết kế xác định; \mathbf{x} là biến thiết kế ngẫu nhiên; \mathbf{p} là hệ số ngẫu nhiên, $\mu_{\mathbf{x}}$ là giá trị trung bình của \mathbf{x} ; $g_i(\mathbf{d}, \mathbf{x}, \mathbf{p})$ được gọi là hàm trạng thái giới hạn; m là số lượng ràng buộc xác suất; $r_i^l = \Phi(\beta_i^l)$ là xác suất yêu cầu của ràng buộc thứ i ; β_i^l là chỉ mục độ tin cậy của ràng buộc xác suất thứ i ; $\Phi(\cdot)$ là tích lũy của hàm phân phối chuẩn.

Để giải quyết bài toán RBDO, Li et al. [3] đã giới thiệu giải thuật SLDM vào năm 2012. Giải thuật này gồm có hai bước. 1/ Chuyển đổi các ràng buộc xác suất thành các ràng buộc xác định. 2/ Giải bài toán tối ưu hóa xác định với các ràng buộc đã được chuyển đổi.

2.2.1. Chuyển đổi khu vực khả thi xác suất sang khu vực khả thi xác định

Trong SLDM, việc chuyển đổi từ khu vực khả thi xác suất sang khu vực khả thi xác định được tiến hành bằng cách di chuyển hàm trạng thái giới hạn một khoảng cách β_i^l như thể hiện trong Hình 1. Khoảng cách β_i^l được tạo ra từ công thức $\beta_i^l = \Phi^{-1}(r_i^l)$.



Hình 1. Minh họa khu vực khả thi

2.2.2. Thiết lập các ràng buộc xác định

Đặt $\bar{g}_i(\mathbf{d}, \mu_{\mathbf{u}})$ là hàm ràng buộc xác định và $g_i(\mathbf{d}, \mathbf{u})$ là hàm trạng thái giới hạn. Giả sử $\mu_{\mathbf{u}}$ là điểm bất kỳ trên hàm $\bar{g}_i(\mathbf{d}, \mu_{\mathbf{u}})$, điểm chắc chắn nhất MPP (most probable point) \mathbf{u}_{MPP} tương ứng của $\mu_{\mathbf{u}}$ có thể thu được bằng cách chuyển các điểm $\mu_{\mathbf{u}}$ trên $\bar{g}_i(\mathbf{d}, \mu_{\mathbf{u}})$ trở về $g_i(\mathbf{d}, \mathbf{u})$ một khoảng β_i^l . Mối quan hệ giữa $\mu_{\mathbf{u}}$ và điểm MPP tương ứng \mathbf{u}_{MPP} của nó được mô tả như sau:

$$\mathbf{u}_{MPP} = \mu_{\mathbf{u}} + \beta_i^l \cdot \mathbf{n} \quad (5)$$

Trong đó \mathbf{n} là véc-tơ gradient tại \mathbf{u}_{MPP} trên $g_i(\mathbf{d}, \mathbf{u})$ và được xác định như sau:

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla_{\mathbf{u}_{MPP}} g_i(\mathbf{u}_{MPP})}{\|\nabla_{\mathbf{u}_{MPP}} g_i(\mathbf{u}_{MPP})\|} \quad (6)$$

Véc-tơ gradient $\tilde{\mathbf{n}}$ của $g_i(\mathbf{d}, \mathbf{u})$ tại $\mu_{\mathbf{u}}$ được sử dụng để xấp xỉ véc-tơ gradient \mathbf{n} . Sau khi xấp xỉ, đường giới hạn được xác định:

$$\bar{g}_i(\mathbf{d}, \mu_{\mathbf{u}}) = g_i\left(\mathbf{d}, \mu_{\mathbf{u}} + \beta_i^l \times \frac{\nabla_{\mathbf{u}_{MPP}} g_i(\mathbf{u}_{MPP})}{\|\nabla_{\mathbf{u}_{MPP}} g_i(\mathbf{u}_{MPP})\|}\right) = 0 \quad (7)$$

Khi đó, vùng an toàn được xấp xỉ theo ràng buộc xác định là

$$\bar{g}_i(\mathbf{d}, \mu_{\mathbf{u}}) = g_i\left(\mathbf{d}, \mu_{\mathbf{u}} + \beta_i^l \times \frac{\nabla_{\mathbf{u}_{MPP}} g_i(\mathbf{u}_{MPP})}{\|\nabla_{\mathbf{u}_{MPP}} g_i(\mathbf{u}_{MPP})\|}\right) \leq 0 \quad (8)$$

3. Phương pháp DE cải tiến

3.1. Phương pháp DE cơ bản

Giải thuật DE được đề xuất đầu tiên bởi Storn và Price vào năm 1995 [11]. Giống như giải thuật di truyền, giải thuật DE cũng mô phỏng bốn quá trình cơ bản như: Tạo dân số, lựa chọn, lai tạo và đột biến. Chi tiết có thể tham khảo tại các tài liệu [11]–[14].

3.2. Cải tiến phương pháp DE

3.2.1. Cải tiến giai đoạn đột biến

Trong giai đoạn đột biến, các véc-tơ cha mẹ được lựa chọn ngẫu nhiên từ dân số hiện hữu. Tuy nhiên, khi tất cả cha mẹ được lựa chọn ngẫu nhiên, nó có thể làm chậm tại lời giải đang khai thác [15]. Do đó, các cá thể tham gia trong giai đoạn đột biến nên được lựa chọn ưu tiên dựa trên các giá trị thích nghi của chúng. Điều này nhằm để truyền thông tin của cha mẹ tốt cho con cái để tốc độ hội tụ có thể được tăng tốc.

Để chuyển tiếp các thông tin tốt cho quần thể con, kỹ thuật lựa chọn dựa trên lựa chọn bánh xe Roulette ngẫu nhiên để xuất bởi Lipowski và Lipowska [16]. Trong kỹ thuật này, mỗi cá thể sẽ được chỉ định một xác suất lựa chọn dựa trên các giá trị thích nghi của chúng được tính như sau:

$$p_i = \frac{f_i}{f_{best}}, \quad i = 1, 2, \dots, NP \quad (9)$$

trong đó p_i và f_i lần lượt là xác suất lựa chọn và giá trị thích nghi của cá thể thứ i , f_{best} là giá trị thích nghi của các cá thể tệ nhất trong bộ dân số tại thế hệ hiện tại, NP là kích thước dân số. Từ phương trình, các cá thể tệ nhất với các giá trị thích nghi lớn nhất sẽ có xác suất lựa chọn lớn nhất. Do đó, các giá trị thích nghi của tất cả các cá thể được trừ của một số dương rất lớn để đảo ngược các xác suất lựa chọn. Con số này là một số dương lớn hơn $f(\mathbf{x})$ lớn nhất trong bộ dân số hiện hữu. Biểu thức chuyển đổi được thực hiện như sau:

$$f_i = LargeNum - f(\mathbf{x}) \quad (10)$$

Giải thuật lựa chọn dựa trên lựa chọn bánh xe Roulette cho toán tử đột biến rand/1 thể hiện trong Giải thuật 1.

Giải thuật 1: Lựa chọn bánh xe Roulette cho quá trình đột biến "DE/rand/1"

Input: Nhập vectơ chỉ mục i
 Lựa chọn ngẫu nhiên $r_1 \in \{1, 2, \dots, NP\}$
while $r_1 = i$ and $rand[0, 1] \leq p_{r_1}$
 Lựa chọn ngẫu nhiên $r_1 \in \{1, 2, \dots, NP\}$
end while
 Lựa chọn ngẫu nhiên $r_2 \in \{1, 2, \dots, NP\}$
while $r_1 = r_2 = i$ and $rand[0, 1] \leq p_{r_1}$
 Lựa chọn ngẫu nhiên $r_2 \in \{1, 2, \dots, NP\}$
end while
 Lựa chọn ngẫu nhiên $r_3 \in \{1, 2, \dots, NP\}$
while $r_1 = r_2 = r_3 = i$ and $rand[0, 1] \leq p_{r_1}$
 Lựa chọn ngẫu nhiên $r_3 \in \{1, 2, \dots, NP\}$
end while
Output: Xuất các vectơ chỉ mục được chọn r_1, r_2, r_3

3.2.2. Cải tiến trong giai đoạn lựa chọn

Các toán tử chọn lọc tự nhiên giới thiệu bởi Padhye et al. [17] được sử dụng cho các quá trình lựa chọn. Quá trình được mô tả trong Giải thuật 2.

Giải thuật 2: Toán tử lựa chọn tự nhiên

Input: Bộ dân số con cái **C** và bộ dân số cha mẹ **P**

Gán $Q = C \cup P$

Lựa chọn **NP** cá thể tốt nhất từ **Q** và gán cho **P**

Output: **P**

Bằng cách kết hợp hai phương pháp cải tiến nêu trên vào DE, giải thuật DE được cải thiện (IDE) với toán tử đột biến "rand/1" thể hiện trong **Giải thuật 3**.

Giải thuật 3: Giải thuật IDE với toán tử "rand/1"

- 1: Tạo bộ dân số ban đầu **NP**
- 2: Đánh giá hàm mục tiêu với mỗi cá thể trong bộ dân số
- 3: **while** <điều kiện dừng> **do**
- 4: Tính toán lựa chọn xác suất cho mỗi cá thể bằng phương trình **Error! Reference source not found.**
- 5: **for** $i=1$ to **NP** **do**
- 6: Lựa chọn r_1, r_2, r_3 sử dụng **Giải thuật 1**
- 7: $j_{rand} = randi(1, D)$
- 8: **for** $j=1$ to **D** **do**
- 9: **if** $rand[0,1] < CR$ or $j=j_{rand}$ **then**
- 10: $u_{i,j} = x_{r_1,j} + F \times (x_{r_2,j} - x_{r_3,j})$
- 11: **else**
- 12: $u_{i,j} = x_{i,j}$
- 13: **end if**
- 14: **end for**
- 15: Đánh giá vecto thử nghiệm **u**
- 16: **end for**
- 17: Thực hiện giai đoạn lựa chọn sử dụng **Giải thuật 2**
- 18: **end while**

4. Giải thuật kết hợp SLDM-IDE

Sơ đồ giải thuật cho sự kết hợp giữa SLDM và IDE được thể hiện như trong Hình 2.



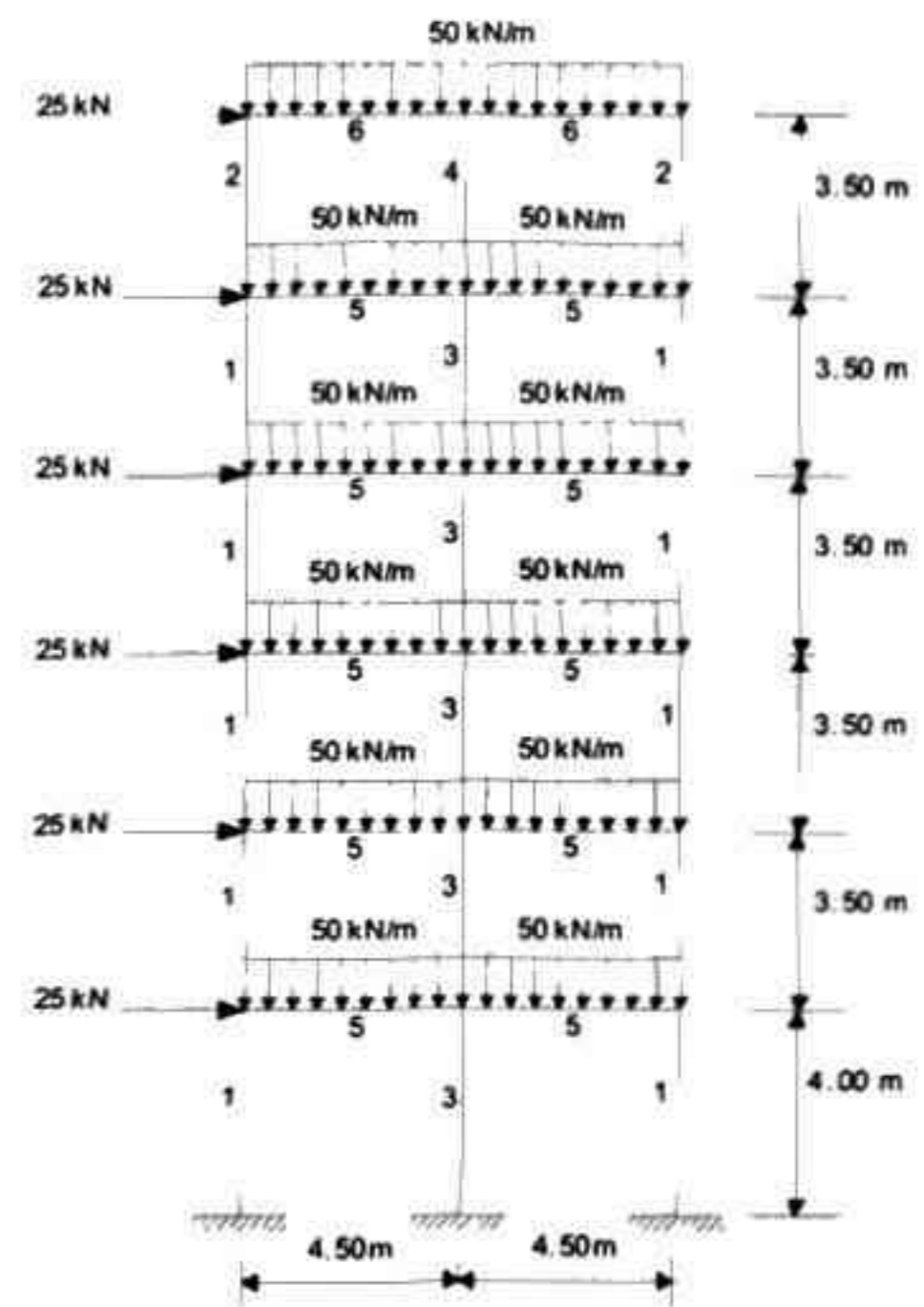
Hình 2. Sơ đồ giải thuật SLDM-IDE

5. Ví dụ số

Trong mục này, hai ví dụ số được khảo sát nhằm đánh giá hiệu quả của giải thuật kết hợp SLDM-IDE. Để chứng minh hiệu quả của phương pháp IDE, phương pháp DE sẽ được so sánh khi thực hiện bài toán tối ưu hoá khi không xét đến độ tin cậy. Ngoài ra, một sự kết hợp giữa phương pháp vòng lặp đôi DLM với IDE cũng được thực hiện để so sánh với SLDM-IDE khi thực hiện bài toán RBDO.

5.1. Khung 02 nhịp 06 tầng

Khung 02 nhịp 06 tầng chịu tải trọng và phân nhóm tiết diện như Hình 3.



Hình 3. Khung 02 nhịp 06 tầng

5.1.1. Tối ưu hoá trọng lượng khung – không xét đến độ tin cậy

Bài toán được phát biểu như sau:

Bảng 1. Thông số đầu vào của bài toán

Hàm mục tiêu	$f_1 = \sum_{k=1}^{ng} A_k \sum_{i=1}^{mk} \rho_i L_i$
Ràng buộc về độ bền	Mục 2
Ràng buộc về độ lệch chuyển vị giữa các tầng	$\delta_i \leq 1.17cm$
Ràng buộc về chuyển vị đỉnh	$\delta \leq 7.17cm$
Nhóm biến cột	W12 và W14
Nhóm biến dầm	W4x13 – W44x335
Hệ số chiều dài tính toán trong mặt phẳng uốn	$K_x \geq 1$
Hệ số chiều dài tính toán ngoài mặt phẳng uốn	$K_y = 1$
Cường độ tính toán	$f_y = 24.822kN / cm^2$
Mô đun đàn hồi	$E = 20000kN / cm^2$

Trọng lượng riêng

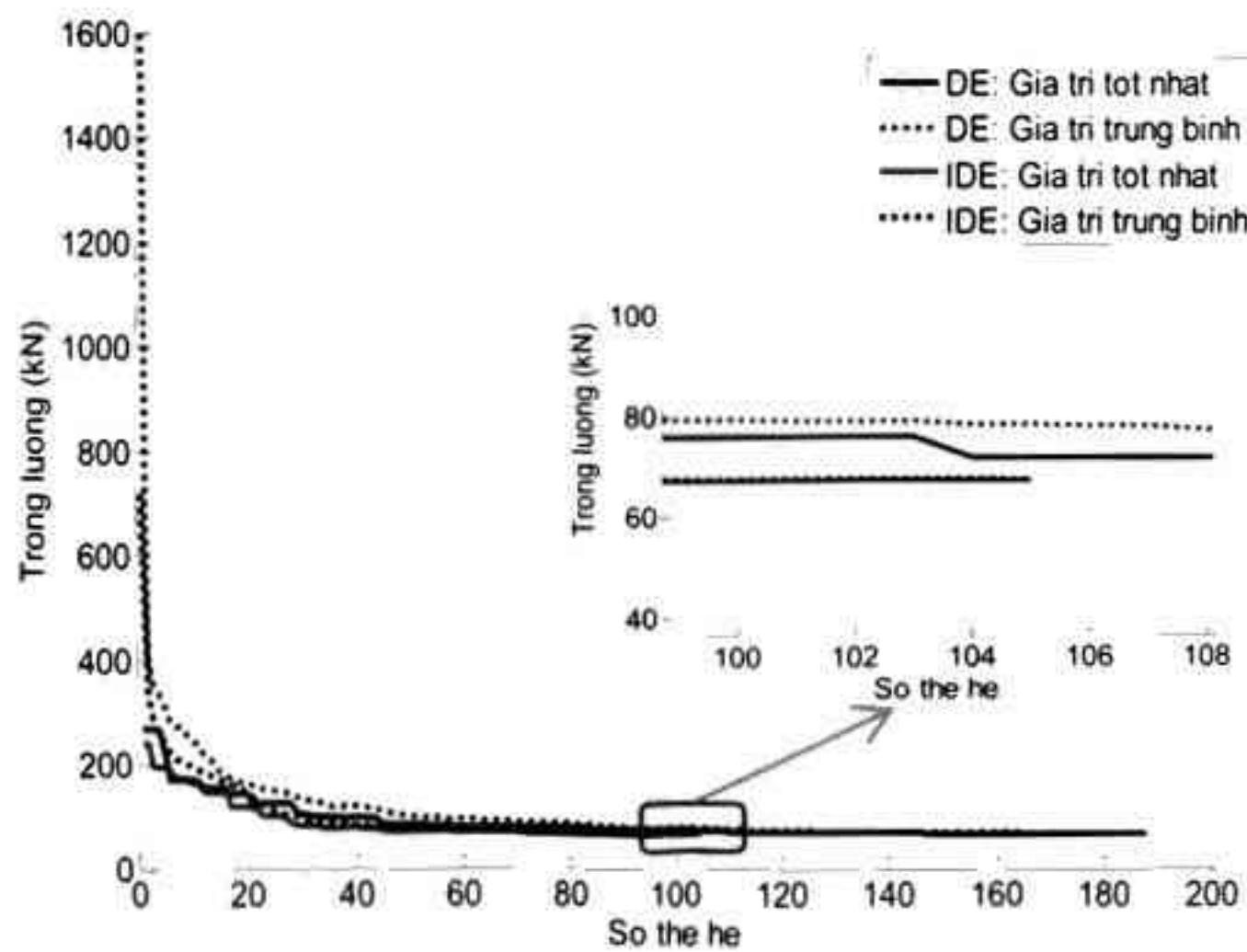
$$\rho = 7.68 \times 10^{-5} \text{ kN} / \text{cm}^3$$

Kết quả của bài toán khi giải bằng DE và IDE sau 20 lần chạy chương trình được trình bày ở Bảng 2. Trọng lượng tốt nhất từ DE và IDE là 67.17 kN, cao hơn 3.48% so với BB-BC.

Bảng 2. Bảng so sánh kết quả của bài toán

Nhóm cấu kiện	Loại cấu kiện	BB-BC	DE	IDE
		Kaveh và Abbasgholi ha (2011)	Bài báo	
1	Cột tầng 1-5, cột biên	W14x3 4	W14x 43	W14x 43
2	Cột tầng 6, cột biên	W14x2 2	W12x 16	W12x 16
3	Cột 1-5, cột giữa	W14x6 8	W14x 61	W14x 61
4	Cột 6, cột giữa	W14x2 2	W12x 14	W12x 14
5	Dầm tầng 1-5	W18x3 5	W18x 35	W18x 35
6	Dầm tầng 6	W14x2 2	W12x 26	W12x 26
Best Weigth (kN)		64.91	67.17	67.17
Worst Weigth (kN)			67.86	69.73
Average Weigth (kN)			67.32	67.69
Standard deviation (kN)			0.26	0.90
Average number of evaluations			3775	2054

Hình 4 so sánh quá trình hội tụ hàm mục tiêu tốt nhất của bài toán. Từ hình vẽ cho thấy IDE có tốc độ hội tụ nghiệm tốt hơn so với DE.



Hình 4. So sánh quá trình hội tụ của DE và IDE

5.1.2. Tối ưu hoá trọng lượng khung – xét đến độ tin cậy

Để giải bài toán RBDO, đầu tiên cần phải xác định các biến thiết kế, biến ngẫu nhiên cùng các thông số của nó. Trong bài toán này biến thiết kế là tiết diện mặt cắt ngang của cấu kiện, biến ngẫu nhiên để xuất các loại như sau:

- $E = 20000 \text{ kN/cm}^2$, độ lệch chuẩn 10%;
- $F_y = 24.822 \text{ kN/cm}^2$, độ lệch chuẩn 10%;

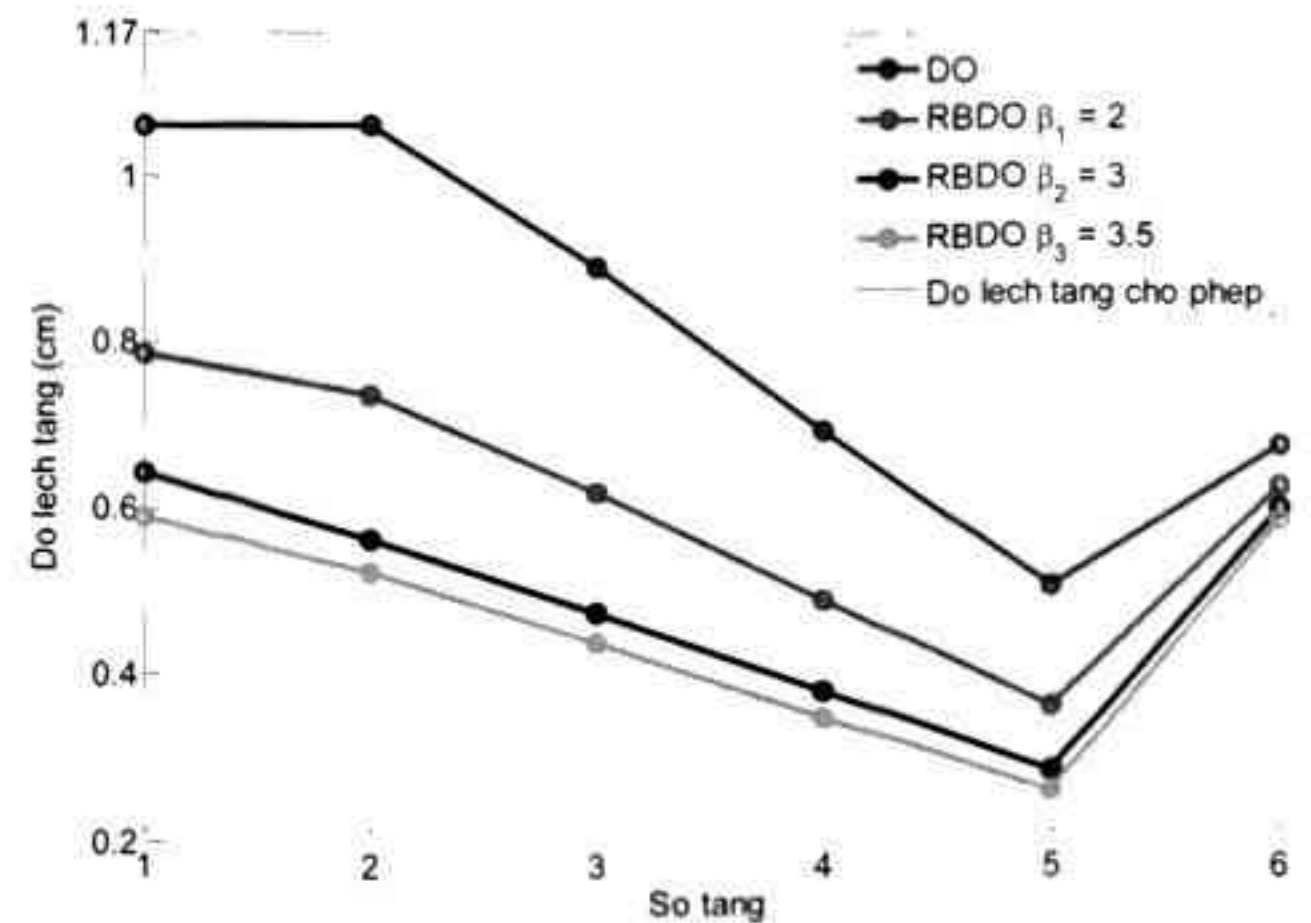
- $P = 25 \text{ kN}$, độ lệch chuẩn 20%;
- $f_q = 50 \text{ kN/m}$, độ lệch chuẩn 20%;

Bảng 3 trình bày kết quả tối ưu của bài toán với ba trường hợp chỉ số độ tin cậy $\beta=2, \beta=3, \beta=3.5$. Trong đó, trường hợp $\beta=2$ được so sánh với phương pháp DLM-IDE, kết quả cho thấy thời gian tìm kiếm nghiệm của SLDM-IDE nhanh hơn nhiều so với DLM-IDE. Hàm mục tiêu tăng lên tương ứng từng trường hợp chỉ số độ tin cậy. Kết quả được đánh giá lại độ tin cậy bởi phương pháp FORM cho thấy SLDM-IDE có độ tin cậy tốt.

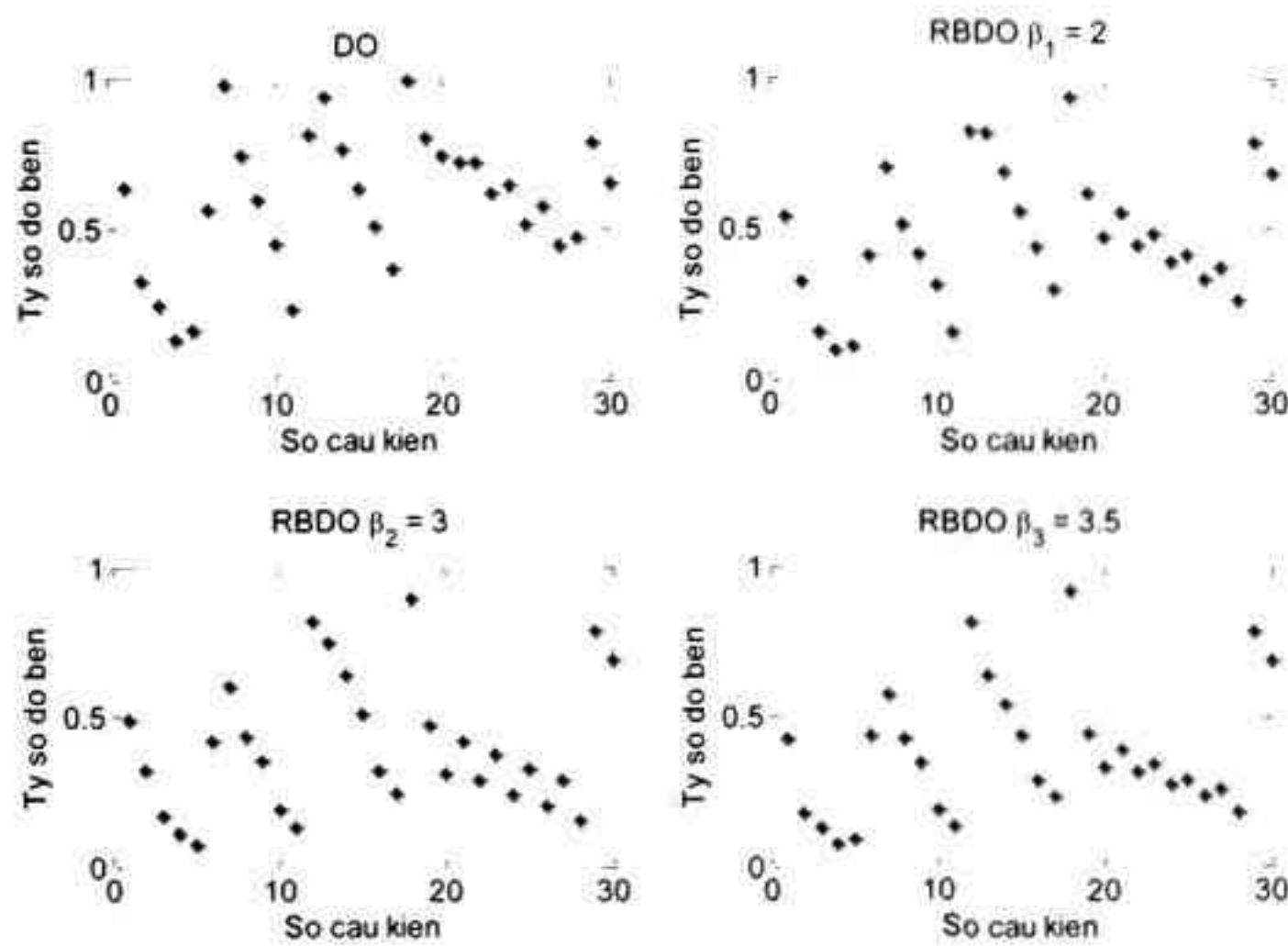
Bảng 3. Kết quả tối ưu bài toán khi xét đến độ tin cậy

N hóm cấu kiện	Loại cấu kiện	DL M-IDE		SLDM-IDE	
		$\beta=2$	$\beta=2$	$\beta=3$	$\beta=3.5$
1	Cột tầng 1-5, cột biên	W1 4x38	W1 4x43	W14 x43	W14 x53
2	Cột tầng 6, cột biên	W1 2x14	W1 2x14	W12 x14	W12 x14
3	Cột 1-5, cột giữa	W1 4x99	W1 4x90	W14 x109	W14 x109
4	Cột 6, cột giữa	W1 2x14	W1 2x14	W12 x14	W12 x14
5	Dầm tầng 1-5	W2 1x48	W2 1x44	W24 x55	W24 x55
6	Dầm tầng 6	W1 4x26	W1 6x26	W16 x26	W16 x26
Weigth (kN)		82. 96	80. 68	92.7 2	98.0 8
Total time (s)		335 .68	136 .59	143. 18	138. 71
Number of evaluations		246 0	264 0	278 0	264 0
β_{FORM}		2.0 2	1.9 7	3.05	3.52

Hình 5 và Hình 6 lần lượt thể hiện tỷ số ràng buộc về độ lệch chuyển vị giữa các tầng và độ bền các cấu kiện dầm – cột với từng trường hợp độ tin cậy khác nhau, các tỷ số đều thỏa mãn yêu cầu về ràng buộc



Hình 5. So sánh tỷ số về độ lệch tầng của bài toán có xét độ tin cậy



Hình 6. So sánh tỷ số độ bền của bài toán có xét độ tin cậy

5.2. Khung 03 nhịp 15 tầng

Khung 03 nhịp 15 tầng chịu tải trọng và phân nhóm tiết diện như Hình 7.



Hình 7. Khung 03 nhịp 15 tầng

5.2.1. Tối ưu hoá trọng lượng khung – không xét đến độ tin cậy

Bài toán được phát biểu như sau:

Bảng 4. Thông số đầu vào của bài toán

Hàm mục tiêu	$f_1 = \sum_{k=1}^{ng} A_k \sum_{i=1}^{mk} \rho_i L_i$
Ràng buộc về độ bền	Mục 2

Ràng buộc về độ lệch chuyển vị giữa các tầng	$\delta_i \leq H_i / 300$
Ràng buộc về chuyển vị đỉnh	$\delta \leq 17.67 \text{ cm}$
Nhóm biến cột	W12 – W14
Nhóm biến dầm	W4x13 – W44x335
Hệ số chiều dài tính toán trong mặt phẳng uốn	$K_x \geq 1$
Hệ số chiều dài tính toán ngoài mặt phẳng uốn	$K_y = 1$
Cường độ tính toán	$f_y = 24.822 \text{ kN} / \text{cm}^2$
Mô đun đàn hồi	$E = 20000 \text{ kN} / \text{cm}^2$
Trọng lượng riêng	$\rho = 7.68 \times 10^{-5} \text{ kN} / \text{cm}^3$

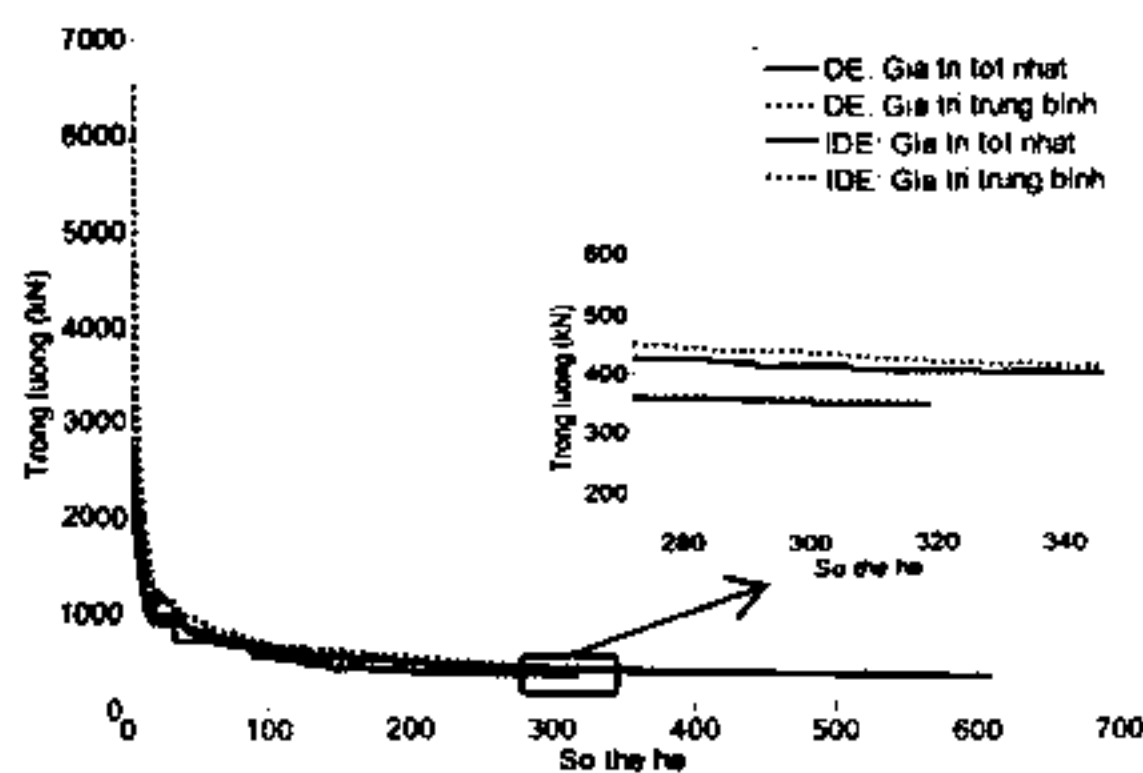
Kết quả của bài toán khi giải bằng DE và IDE sau 20 lần chạy chương trình được trình bày ở Bảng 5. Trọng lượng tốt nhất từ DE và IDE là 346.16 kN, thấp hơn 5.56% so với BB-BC.

Bảng 5. Bảng so sánh kết quả của bài toán

Nhóm cấu kiện	Loại cấu kiện	BB-BC	DE	IDE
		Kaveh và Abbasgholih a (2011)	Bài báo	
1	Dầm tầng 15	W18x35	W8x18	W8x18
2	Dầm tầng 1-14	W21x44	W24x5	W24x5
3	Cột tầng 13-15, cột biên	W14x30	W14x2	W14x2
4	Cột tầng 10-12, cột biên	W14x34	W14x3	W14x3
5	Cột tầng 7-9, cột biên	W14x34	W14x5	W14x5
6	Cột tầng 4-6, cột biên	W14x68	W14x6	W14x6
7	Cột tầng 1-3, cột biên	W14x10	W14x9	W14x9
8	Cột tầng 13-15, cột giữa	W14x30	W14x2	W14x2
9	Cột tầng 10-12, cột giữa	W14x34	W14x3	W14x3
10	Cột tầng 7-9, cột giữa	W14x90	W14x5	W14x5
11	Cột tầng 4-6, cột giữa	W14x14	W14x7	W14x7

12	Cột tầng 1-3, cột giữa	W14x14 5	W14x9 9	W14x9 9
Best Weigth (kN)		366.55	346.16	346.16
Worst Weigth (kN)			551.98	366.32
Average Weigth (kN)			362.15	353.12
Standard deviation (kN)			44.80	4.76
Average number of evaluations			15286	7067

Hình 8 so sánh quá trình hội tụ hàm mục tiêu tốt nhất của bài toán. Từ hình vẽ cho thấy IDE có tốc độ hội tụ nghiệm tốt hơn so với DE.



Hình 8. So sánh quá trình hội tụ của DE và IDE

5.2.2. Tối ưu hoá trọng lượng khung – xét đến độ tin cậy

Tương tự như ví dụ 1, biến thiết kế là tiết diện mặt cắt ngang của cấu kiện, biến ngẫu nhiên để xuất các loại như sau:

- $E = 20000 \text{ kN/cm}^2$, độ lệch chuẩn 10%;
- $F_y = 24.822 \text{ kN/cm}^2$, độ lệch chuẩn 10%;
- $f_{q1} = 12.4 \text{ kN/m}$, độ lệch chuẩn 20%;
- $f_{q2} = 27 \text{ kN/m}$, độ lệch chuẩn 20%;

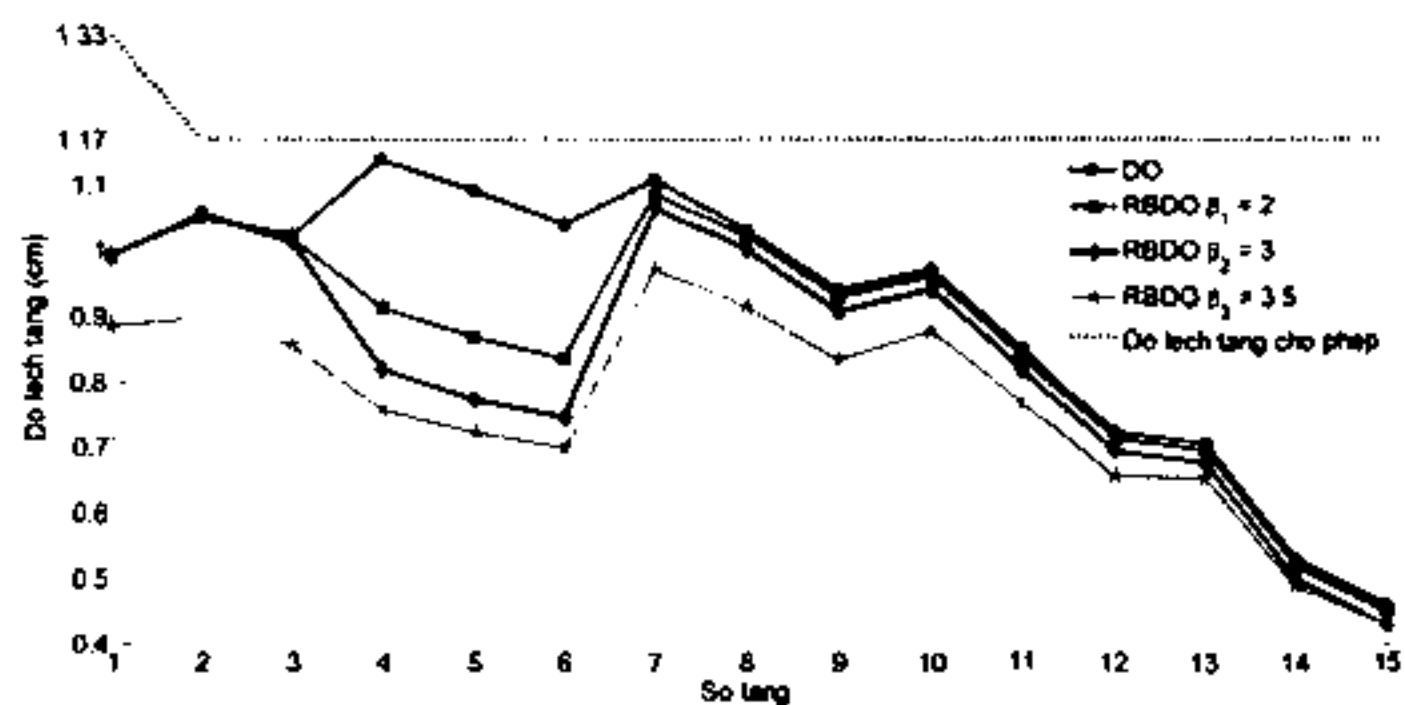
Bảng 6 trình bày kết quả tối ưu của bài toán với ba trường hợp chỉ số độ tin cậy $\beta=2, \beta=3, \beta=3.5$. Kết quả tối ưu được đánh giá lại độ tin cậy bởi phương pháp đánh giá độ tin cậy bậc nhất FORM một lần nữa cho thấy phương pháp SLDM-IDE có độ tin cậy tốt.

Bảng 6. Kết quả tối ưu bài toán khi xét đến độ tin cậy

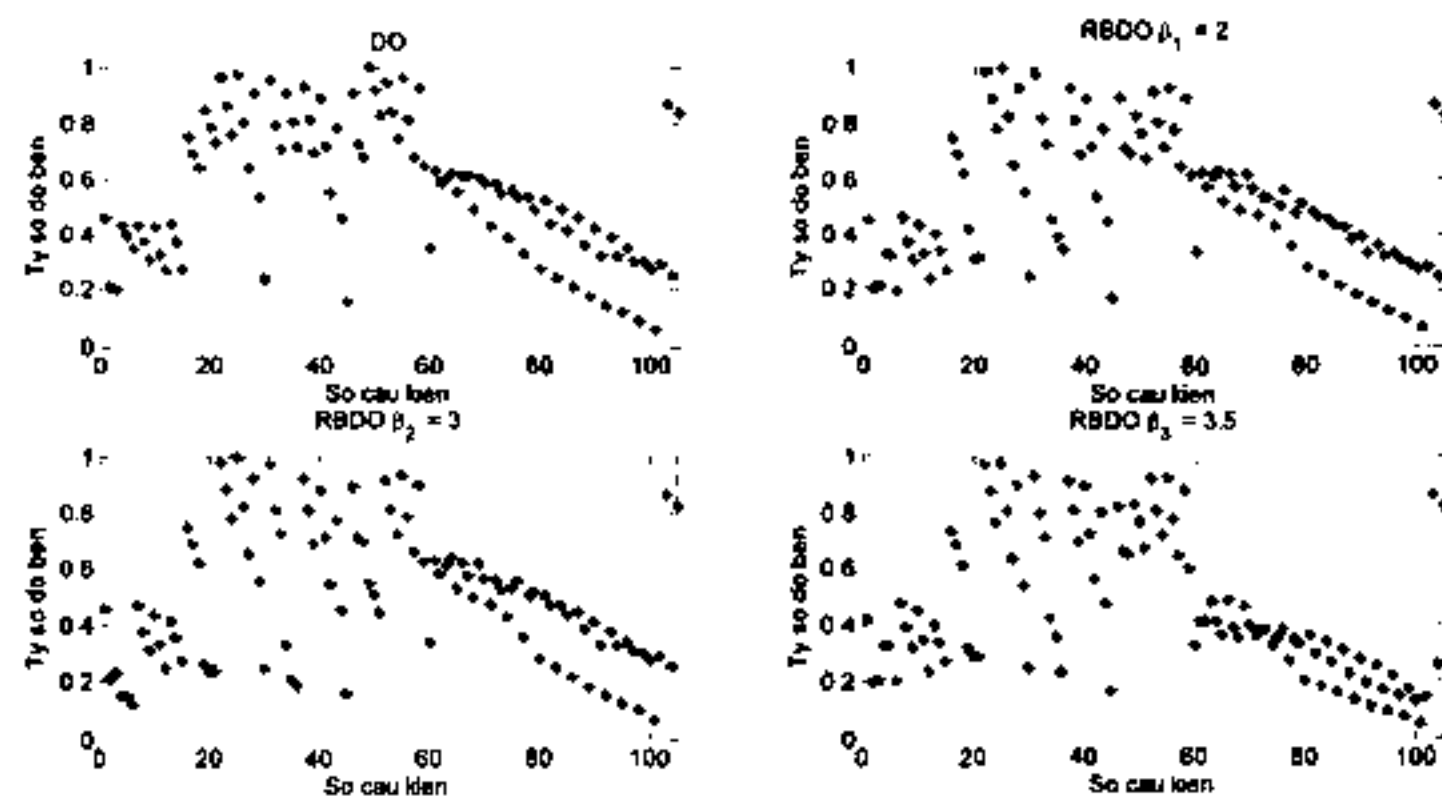
Nhóm cấu kiện	Loại cấu kiện	$\beta=2$	$\beta=3$	$\beta=3.5$
1	Dầm tầng 15	W8x18	W8x18	W8x18
2	Dầm tầng 1- 14	W24x5 5	W24x55	W24x68
3	Cột tầng 13- 15, cột biên	W14x2 6	W14x26	W14x26
4	Cột tầng 10- 12, cột biên	W14x3 8	W14x38	W14x38
5	Cột tầng 7-9, cột biên	W14x5 3	W14x53	W14x53

6	Cột tầng 4-6, cột biên	W14x6 8	W14x99	W14x68
7	Cột tầng 1-3, cột biên	W14x9 0	W14x90	W14x99
8	Cột tầng 13- 15, cột giữa	W14x2 6	W14x26	W14x26
9	Cột tầng 10- 12, cột giữa	W14x3 8	W14x38	W14x38
10	Cột tầng 7-9, cột giữa	W14x5 3	W14x53	W14x53
11	Cột tầng 4-6, cột giữa	W14x1 45	W14x19 3	W14x15 9
12	Cột tầng 1-3, cột giữa	W14x9 9	W14x99	W14x99
Weigth (kN)		370.09	394.24	417.67
β_{FORM}		2.18	3.00	3.51

Hình 9 và Hình 10 lần lượt thể hiện tỷ số ràng buộc về độ lệch chuyển vị giữa các tầng và độ bền các cấu kiện dầm – cột tương ứng với từng trường hợp độ tin cậy khác nhau, các tỷ số đều thoả mãn yêu cầu về ràng buộc.



Hình 9. So sánh tỷ số về độ lệch tầng của bài toán có xét độ tin cậy



Hình 10. So sánh tỷ số độ bền của bài toán có xét độ tin cậy

6. Kết luận

Bài báo đã trình bày cách thành lập và giải quyết bài toán tối ưu hoá kết cấu khung thép dựa trên độ tin cậy sử dụng giải thuật một vòng lặp đơn xác định với biến thiết kế rời rạc theo tiêu chuẩn thiết kế của Viện

thép Hoa Kỳ LRFD – AISC (2010). Phương pháp tìm kiếm nghiệm tối ưu dựa trên độ tin cậy được sử dụng là phương pháp kết hợp giữa giải thuật một vòng lặp đơn xác định SLDM và giải thuật DE cải tiến IDE. Trong phương pháp SLDM, các ràng buộc xác suất được chuyển đổi xấp xỉ thành các ràng buộc xác định chỉ trong một bước, do đó chi phí tính toán được giảm đi đáng kể.

Kết quả số chỉ ra rằng phương pháp kết hợp SLDM-IDE có một số ưu điểm: 1/ Chi phí tính toán để giải quyết bài toán RBDO được giảm đáng kể; 2/ Các thuật toán có thể đảm bảo rằng các lời giải tối ưu toàn cục và 3/ Các thuật toán sẽ dễ dàng áp dụng cho các bài toán RBDO với các biến thiết kế rời rạc.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.99-2014.11.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] ANSI/AISC 360-10, "Specification for Structural Steel Buildings," *Am. Inst. Steel Constr.*, pp. 1–612, 2010.
- [2] N. T. Trung, H. H. Vinh, N. M. Nhân, N. T. Chân, "Tối ưu hóa tính toán trong Cơ học tổng quan, thách thức và triển vọng," *Hội nghị Khoa học toàn quốc Cơ học Vật rắn biến dạng lần thứ XI*, pp. 1–10, 2013.
- [3] F. Li, T. Wu, A. Badiru, M. Hu, and S. Soni, "A single-loop deterministic method for reliability-based design optimization," *Eng. Optim.*, vol. 45, no. 4, pp. 435–458, 2013.
- [4] S. Pezeshk, C. V. Camp, and D. Chen, "Design of Nonlinear Framed Structures Using Genetic Optimization," *J. Struct. Eng.*, vol. 126, no. 3, pp. 382–388, 2000.
- [5] C. V. Camp, B. J. Bichon, and S. P. Stovall, "Design of Steel Frames Using Ant Colony Optimization," vol. 131, no. 3, pp. 369–379, 2005.
- [6] S. O. Degertekin, "Optimum design of steel frames using harmony search algorithm," *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 36, no. 4, pp. 393–401, 2008.
- [7] M. P. Saka, "Optimum design of steel sway frames to BS5950 using harmony search algorithm," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 65, no. 1, pp. 36–43, 2009.
- [8] A. Kaveh and H. Abbasgholizadeh, "Optimum design of steel sway frames using big bang big crunch algorithm," *Asian J. Civ. Eng. (building housing)*, vol. 12, no. 3, pp. 293–317, 2011.
- [9] M. R. Ghasemi and M. Yousefi, "Reliability-Based Optimization of Steel Frame Structures Using Modified Genetic Algorithm," *ASIAN J. Civ. Eng. (BUILDING HOUSING)*, vol. 12, no. 4, pp. 449–475, 2011.
- [10] M. Shayanfar, R. Abbasnia, and A. Khodam, "Development of a GA-based method for reliability-based optimization of structures with discrete and continuous design variables using OpenSees and Tcl," *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 90, pp. 61–73, 2014.
- [11] R. Storn and K. Price, "Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces," *J. Glob. Optim.*, pp. 341–359, 1997.
- [12] V. Ho-Huu, T. Nguyen-Thoi, M. H. Nguyen-Thoi, and L. Le-Anh, "An improved constrained differential evolution using discrete variables (D-ICDE) for layout optimization of truss structures," *Expert Syst. Appl.*, vol. 42, no. 20, pp. 7057–7069, 2015.
- [13] V. Ho-Huu, T. Nguyen-Thoi, T. Vo-Duy, and T. Nguyen-Trang, "An adaptive elitist differential evolution for optimization of truss structures with discrete design variables," *Comput. Struct.*, vol. 165, pp. 59–75, 2016.
- [14] V. Ho-Huu, T. Nguyen-Thoi, L. Le-Anh, and T. Nguyen-Trang, "An effective reliability-based improved constrained differential evolution for reliability-based design optimization of truss structures," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 92, pp. 48–56, 2016.
- [15] N. Noman and H. Iba, "Accelerating differential evolution using an adaptive local search," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 12, no. 1, pp. 107–125, 2008.
- [16] A. Lipowski and D. Lipowska, "Roulette-wheel selection via stochastic acceptance," *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, vol. 391, no. 6, pp. 2193–2196, 2012.
- [17] N. Padhye, "Evolutionary approaches for real world applications in 21st century," *Proc. fourteenth Int. Conf. Genet. Evol. Comput. Conf. companion – GECCO Companion '12*, p. 43, 2012.