

# TỐI ƯU HÓA SƯỜN TĂNG CƯỜNG DỌC CỦA DÀM THÉP CHỊU UỐN

## OPTIMIZATION OF TRAPEZOIDAL LONGITUDINAL STIFFENER OF STEEL PLATE GIRDER BRIDGES UNDER BENDING

Vũ Quang Việt

Khoa Công trình, trường Đại học Hàng hải Việt Nam

**Tóm tắt:** Trong các dầm cầu thép có chiều cao lớn, sườn tăng cường dọc thường được sử dụng để tránh mất ổn định cục bộ của bản bụng. Các nghiên cứu trước đây đã cho thấy vị trí và độ cứng chống uốn của sườn tăng cường dọc ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chịu lực của dầm thép. Bài báo trình bày một phương pháp xác định vị trí tối ưu và độ cứng chống uốn yêu cầu của sườn tăng cường dọc có mặt cắt dạng hình thang bằng thuật toán tối ưu sử dụng phương pháp điểm trong (Interior Point Algorithm, IPA). Thuật toán này được sử dụng thông qua phần mềm Matlab để xác định vị trí tối ưu và độ cứng chống uốn yêu cầu của sườn tăng cường dọc bằng cách tối đa hóa giá trị hằng số mất ổn định thu được từ phân tích mất ổn định trong phần mềm Abaqus. Kết quả phân tích thu được từ nghiên cứu này được so sánh với kết quả đã được công bố trong các nghiên cứu trước đây để chứng minh tính hiệu quả của phương pháp đề xuất.

**Từ khóa:** Sườn tăng cường dọc, phân tích mất ổn định, dầm cầu thép.

**Mã phân loại:** 11.2

**Abstract:** In deep steel girders, longitudinal stiffeners are usually used to avoid its web-bend buckling. Previous research reported that the location and flexural rigidity of stiffener significantly affect the load-carrying capacity of the girder. This paper presents a method to find the optimum position and required flexural rigidity of trapezoidal longitudinal stiffener by using the Interior Point optimization algorithm (IPA). This algorithm is utilized in MATLAB to determine the optimum position and required flexural rigidity of the stiffener by maximizing the buckling coefficients obtained from buckling analysis in Abaqus. In order to demonstrate the efficiency of the proposed method, its analysis result is compared with that obtained from published research in the literature.

**Keywords:** Longitudinal stiffener, buckling analysis, steel girder.

**Classification code:** 11.2

### 1. Giới thiệu

Trong các dầm cầu thép có chiều cao lớn, dầm thép có bản bụng mảnh thường được sử dụng để tiết kiệm chi phí. Đối với loại dầm thép này thì các sườn tăng cường dọc (STCD) được dùng để tránh mất ổn định cục bộ của bản bụng dẫn đến giảm đáng kể khả năng chịu lực của dầm. Các nghiên cứu về vị trí tối ưu,  $d_{op}$  và độ cứng chống uốn yêu cầu,  $\gamma_{rq}$  của STCD đã được thực hiện khoảng sáu thập kỷ trước đây. Tuy nhiên do chưa có nhiều các công cụ tính toán số nên các nghiên cứu chủ yếu sử dụng các phương pháp gần đúng hoặc thực nghiệm trên một số lượng nhỏ kết cấu dầm thép dẫn đến kết quả thiết kế thực tế có hệ số an toàn khá lớn và không kinh tế. Các nghiên cứu về  $d_{op}$  và  $\gamma_{rq}$  của STCD có mặt cắt dạng tấm dẹt đã được thực hiện khá nhiều trên thế giới thông qua các phương pháp lý thuyết, thực nghiệm và phương pháp mô phỏng phần

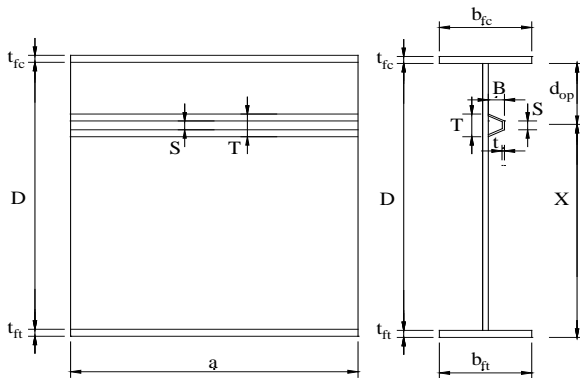
tử hữu hạn [1] – [6]. Cụ thể là, thông qua các kết quả thực nghiệm cho các dầm thép chữ I mặt cắt đối xứng chịu mô men uốn thuần túy, Cooper [1] đã đề xuất vị trí tối ưu của STCD ở tại vị trí  $0,2 D$  ( $D$  là chiều cao của bản bụng tính từ bản cánh chịu nén của dầm). Đối với dầm chữ I mặt cắt không đối xứng, bằng việc sử dụng phần tử hữu hạn, Frank và Helwig [2] đã đề xuất vị trí tối ưu của STCD mặt cắt dạng tấm dẹt ở tại vị trí  $0,4 D_c$  ( $D_c$  là chiều cao miền chịu nén của bản bụng tính từ đỉnh bản bụng của dầm thép). Kết quả này cũng được thừa nhận trong tiêu chuẩn AASHTO-LRFD hiện hành. Tuy nhiên ở châu Âu hiện nay, STCD có mặt cắt dạng hình thang thường được sử dụng phổ biến hơn do nó có độ cứng chống xoắn tốt hơn dạng mặt cắt tấm dẹt, đồng thời nó cũng tăng cường khả năng chống mất ổn định cho bản bụng dầm tốt hơn. Nghiên cứu về  $d_{op}$  của STCD dạng mặt cắt hình thang cũng đã được đề cập trong nghiên cứu của

Maiorana và cs. [7]. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này chỉ đề xuất  $d_{op}$  của STCD mà chưa quan tâm tới  $\gamma_{rq}$  của nó. Thêm vào đó, Maiorana và cs. [7] đã đề xuất  $d_{op}$  của STCD có mặt cắt hình thang dựa vào giả thiết các biên trên và biên dưới của bản bụng dầm thép được coi là các gối tựa. Giả thiết này chưa phản ánh đúng sự làm việc của dầm thép do ảnh hưởng của các bản cánh của dầm. Do đó, nghiên cứu này được thực hiện nhằm mục đích đề xuất  $d_{op}$  và  $\gamma_{rq}$  của STCD của dầm thép có bản bụng được tăng cường bằng STCD dạng mặt cắt hình thang bằng thuật toán tối ưu thông qua việc kết hợp sử dụng hai phần mềm thương mại ABAQUS và Matlab.

**2. Quy trình tối ưu hóa**

**2.1. Thiết lập bài toán tối ưu hóa**

Trong mục này thiết lập bài toán tối ưu hóa vị trí và độ cứng chống uốn của sườn tăng cường dọc có dạng mặt cắt hình thang được trình bày tại hình 1.



Hình 1. Kích thước của dầm thép có STCD.

Các thông số  $d_{op}$  và  $\gamma_{rq}$  của STCD dầm thép sẽ được xác định thông qua việc tối đa hóa hằng số mất ổn định,  $k_b$ . Vị trí tối ưu của STCD trên bản bụng của dầm thép là vị trí có giá trị  $k_b$  lớn nhất. Các công thức để xác định hằng số  $k_b$  và  $\gamma_{rq}$  được trình bày trong tài liệu [8]. Bài toán tối ưu hóa để xác định  $d_{op}$  và  $\gamma_{rq}$  được xử lý theo trình tự các bước sau:

**Bước 1:** Giá trị  $d_{op}$  được xác định thông qua việc tối đa hóa hằng số  $k_b$  theo biểu thức:

Tối đa hóa giá trị:

$$k_b(X) = \frac{12(1-\nu^2)D}{\pi^2 E t^3} (F(X))_{cr} \quad (1)$$

Chịu ràng buộc:  $0 \leq X \leq D$  (2)

Trong đó biến số  $X$  là vị trí của STCD.

**Bước 2:** Sau khi xác định  $d_{op}$ , hàm mục tiêu được sử dụng để xác định  $\gamma_{rq}$  biểu diễn theo biểu thức sau:

Tối thiểu hóa giá trị:

$$\gamma = \frac{EI_s(B, T, S, t)}{DD_{plate}} \quad (3)$$

Chịu ràng buộc:  $100 \leq T \leq 300$  (mm) (4)

$$6 \leq \frac{B}{t} \leq 14 \quad (5)$$

$$0 \leq t \leq 30$$
 (mm) (6)

$$0.5 \leq \frac{T}{B} \leq 3 \quad (7)$$

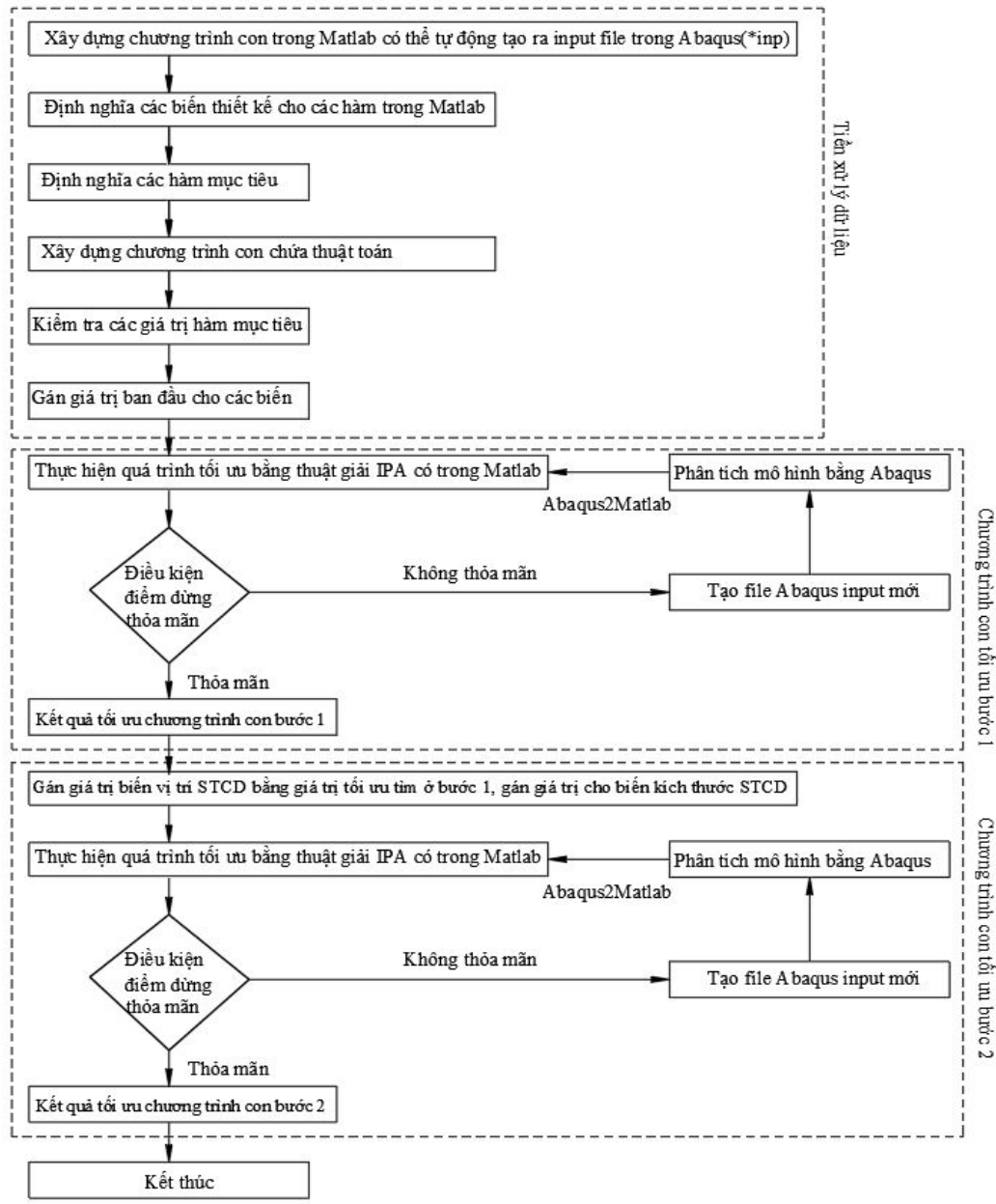
$$0.5 \leq \frac{S}{B} \leq 2 \quad (8)$$

$$d_{stif} - 0,05 \leq 0 \quad (9)$$

Trong đó các biến số  $B, T, S, t$  là các kích thước của STCD. Điều kiện (5) được ràng buộc nhằm mục đích tránh mất ổn định cục bộ của STCD. Điều kiện ràng buộc (9) nhằm đảm bảo tại vị trí tiếp xúc giữa STCD và sườn dầm không có chuyển vị ngang.

**2.2. Phương pháp tối ưu hóa bằng IPA**

Quy trình tối ưu hóa được thực hiện thông qua việc sử dụng kết hợp hai phần mềm Abaqus và Matlab. Trong quy trình tối ưu hóa này, Abaqus đóng vai trò là phần mềm phân tích kết cấu còn Matlab đóng vai trò là phần mềm tối ưu hóa kết cấu. Sự làm việc tương tác qua lại giữa hai phần mềm được kết nối bằng công cụ Abaqus2Matlab [9]. Thuật toán IPA được sử dụng thông qua việc sử dụng hàm *fmincon* có trong thư viện của Matlab. Bản chất của phương pháp này là dựa trên phương pháp đạo hàm để tìm ra điểm cực trị. Việc ứng dụng thuật toán và hiệu quả của nó trong tối ưu hóa STCD của dầm thép đã được trình bày chi tiết trong các tài liệu [1], [2], [12]. Lý do mà phương pháp này được lựa chọn vì đối với bài toán tối ưu hóa STCD, mức độ phi tuyến không phức tạp, thời gian phân tích nhanh hơn rất nhiều so với các thuật toán tối ưu khác mà vẫn tìm được kết quả tối ưu chính xác.



Hình 2 . Sơ đồ quy trình tối ưu hóa [8].

**2.3. Thiết lập quy trình tối ưu hóa**

Quy trình tối ưu hóa để xác định  $d_{op}$  và  $\gamma_{rq}$  của STCD có dạng mặt cắt hình thang được sử dụng tương tự như quy trình tối ưu hóa cho STCD có dạng mặt cắt hình tam giác [8]. Quy trình này sử dụng công cụ Abaqus2Matlab [9] để tích hợp trao đổi dữ liệu qua lại giữa hai phần mềm Matlab và Abaqus phục vụ cho quá trình tối ưu hóa. Một cách tóm tắt, quy trình tối ưu hóa để xác định  $d_{op}$  và  $\gamma_{rq}$  của STCD có dạng mặt cắt hình thang được trình bày trên hình 2.

**3. Mô hình phần tử hữu hạn của dầm thép có SCTD dạng hình thang**

Mô hình phần tử hữu hạn (PTHH) của dầm thép có STCD dạng mặt cắt hình thang được xây dựng tương tự như mô hình PTHH của dầm thép có STCD dạng mặt cắt tam giác đã đề cập trong nghiên cứu trước đây [8]. Mô hình này được xây dựng dựa trên phần mềm Abaqus nhằm xác định giá trị riêng nhỏ nhất thu được từ phân tích mất ổn định của dầm thép, từ đó xác định được hằng số mất ổn định  $k_b$ . Kích thước chung của dầm thép có STCD dạng mặt cắt hình thang được trình bày trên hình 1. Các kích thước cố định bao gồm chiều

cao, chiều dày bản bụng, chiều rộng và chiều dày bản cánh được chọn như trong nghiên cứu trước đây [8]. Các kích thước còn lại của STCD được chọn đã bao gồm tất cả các giá trị có thể được dùng trong thiết kế thực tế như trong các phương trình từ (4) - (8). Các thuộc tính vật liệu của thép bao gồm mô đun đàn hồi  $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ , hệ số poát-xông là 0.3.

Phần tử tấm S4R được sử dụng để mô phỏng tất cả các bộ phận của dầm thép cho độ chính xác cao như trong các nghiên cứu đã được công bố trước đây [3] – [8], [10], [11]. Kích thước lưới phần tử được lựa chọn là 40 mm như trong các nghiên cứu đã công bố. Tải trọng và điều kiện biên được mô phỏng tương tự như trong nghiên cứu [8].

#### 4. Tối ưu hóa vị trí và độ cứng chống uốn yêu cầu của SCTD dạng hình thang

Để xác định  $d_o$  và  $\gamma_{rq}$  của STCD có dạng mặt cắt hình thang, quy trình tối ưu hóa đề cập trong mục 2 được sử dụng. Ảnh hưởng của tỷ số chiều rộng trên chiều cao của bản bụng,  $\varphi$  cũng được xem xét trong mục này. Kết quả tối ưu hóa được trình bày trong bảng 1.

**Bảng 1.** Kết quả tối ưu  $d_{op}$  và  $\gamma_{rq}$ .

| $\varphi$ | $d_{op}/D$ | $k_b$  | $\gamma_{rq}$ |
|-----------|------------|--------|---------------|
| 1         | 0,195      | 446,32 | 12,69         |
| 2         | 0,195      | 447,12 | 13,38         |

Có thể nhận thấy từ bảng 1, vị trí tối ưu của STCD có dạng mặt cắt hình thang nằm tại vị trí cách mép dưới của bản cánh dưới một khoảng là  $0,195 D$  đối với các tỷ số  $\varphi$  khác nhau. Hằng số  $k_b$  cũng thay đổi không đáng kể khi thay đổi các tỷ số  $\varphi$ . Bên cạnh đó, khi giá trị  $\varphi$  thay đổi từ 1 đến 2, độ cứng chống uốn yêu cầu của STCD tăng không đáng kể.

Mặt khác, bảng 2 so sánh các giá trị tối ưu và hằng số  $k_b$  thu được từ nghiên cứu này với kết quả nghiên cứu của Maiorana và cs. [7] ứng với các tỷ số  $\varphi$  khác nhau. Có thể nhận thấy rõ ràng vị trí tối ưu của STCD dạng mặt cắt hình thang thu được từ nghiên cứu này tương tự như trong nghiên cứu của Maiorana và cs. [7]. Điều này cho thấy rằng sự xuất hiện của bản cánh dầm thép ảnh hưởng không đáng kể đến vị trí tối ưu của STCD dạng này. Tuy

nhiên, khi có sự xuất hiện của bản cánh dầm thép, hằng số  $k_b$  gia tăng đáng kể (tăng 67.16% trong trường hợp  $\varphi = 1$ ). Như vậy giả thiết nghiên cứu của Maiorana và cs. [7] khi bỏ qua ảnh hưởng của bản cánh dầm thép đã dự báo giá trị  $k_b$  thấp hơn nhiều so với trường hợp xem xét đến ảnh hưởng của sự có mặt bản cánh dầm thép, do đó dẫn tới thiết kế quá an toàn và không kinh tế.

**Bảng 2.** So sánh kết quả với nghiên cứu [7].

| So sánh                | $\varphi$ | $d_{op}/D$ | $k_b$  |
|------------------------|-----------|------------|--------|
| Nghiên cứu [7]         | 1         | 0,2        | 267    |
| Nghiên cứu của tác giả | 1         | 0,195      | 446,32 |
| Nghiên cứu [7]         | 2         | 0,2        | 268    |
| Nghiên cứu của tác giả | 2         | 0,195      | 447,12 |

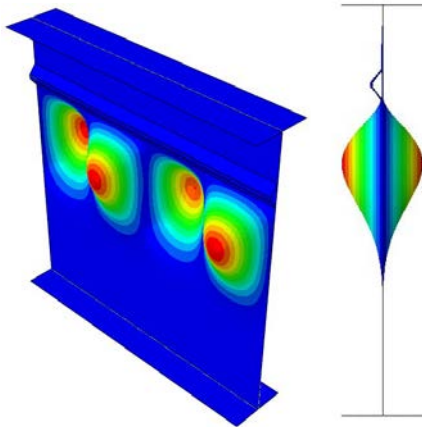
Bảng 3 so sánh vị trí tối ưu và hằng số  $k_b$  của STCD dạng mặt cắt hình thang thu được từ nghiên cứu này và vị trí tối ưu cùng hằng số  $k_b$  của STCD có mặt cắt dạng tấm dẹt trong nghiên cứu [12]. Có thể nhận thấy rằng, vị trí tối ưu của STCD dạng mặt cắt hình thang gần giống với SCTD dạng mặt cắt tấm dẹt. Tuy nhiên, hằng số  $k_b$  thu được trong trường hợp sử dụng STCD dạng mặt cắt hình thang lớn hơn rất nhiều (144.88%) so với trường hợp sử dụng SCTD dạng mặt cắt tấm dẹt. Do vậy, việc sử dụng STCD dạng mặt cắt hình thang tăng đáng kể khả năng chống mất ổn định so với việc SCTD dạng mặt cắt tấm dẹt.

**Bảng 3.** So sánh kết quả với nghiên cứu cho trường hợp  $\varphi = 1$  [12].

| So sánh                | $d_{op}/D$ | $k_b$  |
|------------------------|------------|--------|
| STCD dạng tấm dẹt [12] | 0,21       | 182.26 |
| STCD dạng hình thang   | 0,195      | 446,32 |

Dạng mất ổn định của dầm khi STCD có dạng mặt cắt hình thang được đặt tại vị trí tối ưu của nó được thể hiện trên hình 3.

Dạng mất ổn định cục bộ của phần bản bụng phía dưới STCD được thể hiện các nửa bước sóng hình sin.



Hình 3. Dạng mắt ổn định của dầm thép có STCD.

### 5. Kết luận

Trong bài báo này, tác giả đã trình bày một phương pháp để xác định vị trí tối ưu và độ cứng chống uốn yêu cầu của STCD có dạng mặt cắt hình thang của dầm thép chịu uốn. Kết quả cho thấy rằng, vị trí tối ưu của STCD tại  $0,195 D$  tính từ mép dưới của bản cánh trên của dầm thép. Bên cạnh đó, bản cánh dầm thép có ảnh hưởng không đáng kể đến vị trí tối ưu của STCD nhưng có ảnh hưởng rất lớn đến hằng số mắt ổn định của dầm thép. Vì vậy, việc bỏ qua ảnh hưởng của bản cánh trong các mô hình mô phỏng dầm thép sẽ dẫn tới kết quả quá an toàn và không kinh tế □

### Tài liệu tham khảo

- [1] P.B. Cooper (1967), *Strength of longitudinally stiffened plate girders*, J. Struct. Div. 93;
- [2] K.H.Frank, T.A.Helwig (1995), Buckling of webs in unsymmetric plate girders, Eng. Journal, Second Quart, pg. 43–53;
- [3] M.M. Alinia, S.H. Moosavi (2008), *A parametric study on the longitudinal stiffeners of web panels*, Thin-Walled Struct. 46: 1213–1223;
- [4] Q.V. Vu, G. Papazafeiropoulos, C. Graciano, S.E. Kim (2019), *Optimum linear buckling analysis of*

*longitudinally multi-stiffened steel plates subjected to combined bending and shear*, Thin Walled Struct. 136: 235–245;

- [5] Q.V. Vu, V.H. Truong, G. Papazafeiropoulos, C. Graciano, S.E. Kim (2019), *Bending-buckling strength of steel plates with multiple longitudinal stiffeners*, J. Constr. Steel Res. 158: 41–52;
- [6] E.Y. Cho, D.K. Shin (2011), *Elastic web bend-buckling analysis of longitudinally stiffened I-section girders*, Int. J. Steel Struct. 11: 297–313;
- [7] E. Maiorana, C. Pellegrino, C. Modena (2011). *Influence of longitudinal stiffeners on elastic stability of girder webs*, J. Constr. Steel Res. 67: 51–64;
- [8] Hoàn, P.T. và cs. (2020). *Nghiên cứu xác định vị trí tối ưu của sườn tăng cường dọc của dầm cầu thép chịu uốn*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, NUCE 2020. 14(V):29-38;
- [9] G. Papazafeiropoulos, M. Muñoz-Calvente, E. Martínez-Pañeda (2017), *Abaqus2Matlab: A suitable tool for finite element post-processing*, Adv. Eng. Softw. 105: 9–16;
- [10] V.H. Truong, G. Papazafeiropoulos, V.T. Pham, Q.V. Vu (2019), *Effect of multiple longitudinal stiffeners on ultimate strength of steel plate girders*, Structures 22: 366–382;
- [11] H.S. Kim, Y.M. Park, B.J. Kim, K. Kim (2018). *Numerical investigation of buckling strength of longitudinally stiffened web of plate girders subjected to bending*, Struct. Eng. Mech. 65:141–154;
- [12] S.E. Kim, G. Papazafeiropoulos, C. Graciano, V.H. Truong, Q.T. Do, Z. Kong, Q.V. Vu (2021), *Optimal design of longitudinal stiffeners of unsymmetric plate girders subjected to pure bending*, Ocean Engineering 221.108374.

**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 107.01-2019.322.

**Ngày nhận bài:** 06/04/2021

**Ngày chuyển phản biện:** 09/04/2021

**Ngày hoàn thành sửa bài:** 01/05/2021

**Ngày chấp nhận đăng:** 07/05/2021

Ngoài hình ảnh, bảng biểu đã chú thích nguồn từ tài liệu tham khảo, những hình ảnh, bảng biểu còn lại đều thuộc bản quyền của tác giả/nhóm tác giả.