THIẾT LẬP CÔNG THỨC TÍNH ỨNG SUẤT TỚI HẠN CỤC BỘ CHO TIẾT DIỆN CHỮ C GHÉP CHỊU UỐN ĐỀU

Chiêm Đặng Tứ Quốc[1], Bùi Hùng Cường[2]

[1, 2]Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

Email: [1]tuquoc4171@gmail.com, 0327.464.171; [2]cuongbh@huce.edu.vn, 0948.766.297

DOI: https://doi.org/10.59382/hnkh17-ibst.2025.ses2-26

TÓM TẮT: Trong nghiên cứu này, công thức xác định ứng suất tới hạn cục bộ cho tiết diện chữ C ghép chịu uốn đều được đề xuất, kể đến sự tương tác giữa bản bụng, bản cánh và mép gấp của tiết diện. Chương trình CUFSM được sử dụng để phân tích ổn định cho tiết diện chữ C chịu uốn đều. Từ kết quả phân tích, phương pháp nghiên cứu tham số được áp dụng để đưa ra công thức xấp xỉ tính toán ứng suất tới hạn cục bộ cho tiết diện chữ C ghép chịu uốn đều.

TỪ KHÓA: Ổn định cục bộ; tương tác cánh-bụng-mép gấp; tiết diện chữ C ghép; uốn đều; phương pháp dải hữu hạn.

ABSTRACT: In this study, formula for determining the local critical buckling stress of built-up back-to-back C-sections subjected to pure bending is proposed, considering the interaction among the web, flange, and lip components of the section. The CUFSM program is utilized to analyze buckling behavior of the C-sections. Based on the obtained results, a parametric study is used to established an approximate formula for predicting the local buckling stress of built-up back-to-back lip sections under pure bending.

KEYWORDS: Local buckling, flange-web-lip interaction, back-to-back C-section, pure bending, finite strip method.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việc tính toán ứng suất tới hạn cục bộ cho tiết diện tạo hình nguội được đơn giản hóa bằng việc xem liên kết giữa các tấm trong tiết diện là liên kết khớp [1]. Nhưng điều này không phản ánh hoàn toàn chính xác ứng xử của những loại tiết diện này. Khi cấu kiện chịu nén, uốn hoặc nén-uốn thì có thể mất ổn định (cục bộ, méo tiết diện, tổng thể) và các tấm trong tiết diện có sự tương tác lẫn nhau. Gần đây, một số nghiên cứu đã đề cấp đến sự tương tác giữa cánh và bụng trong tính toán ứng suất tới hạn cục bộ cho tiết diện tạo hình nguội. Seif và Schafer [2] đề xuất công thức xác định hệ số ổn định cho nhiều loại tiết diện tạo hình nguội (kích thước hình học được lấy từ dữ liệu trong tiêu chuẩn AISC) chịu nén, uốn quanh trục khỏe và trục yếu, xem xét sự tương tác giữa các tấm trong tiết diện. Vieira và cs. [3] nghiên cứu hiện tượng mất ổn định cục bộ cho tiết diện chữ nhật rỗng tạo hình nguội chịu nén và chịu uốn hai trục kể đến sự tương tác giữa cánh và bụng, sử dụng lý thuyết dầm tổng quát (Generalized Beam Theory). Ragheb [4] phát triển một mô hình mất ổn định ngoài miền đàn hồi để nghiên cứu ảnh hưởng của sự tương tác cánh-bụng đối với hiện tượng mất ổn định cục bộ của tiết diện chữ I chịu uốn. Gardner và cs. [5] phát triển một số công thức xác định ứng suất tới hạn cục bộ cho một số loại kết cấu thép dựa vào hệ số tương tác. Hệ số này được tính toán thông qua tỷ số ứng suất và điều kiện biên của cấu kiện. Bui [6] đề xuất công thức xác định ứng suất tới hạn cục bộ và chiều dài tới hạn cho tiết diện tròn rỗng chịu uốn thuần túy. Bedair [7] nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ số bản cánh trên bản bụng đối với ổn định bản bụng của cột tiết diện chữ H (W-shaped) chịu nén đúng tâm. Chiêm và Bùi [8–11] đề xuất công thức xác định ứng suất tới hạn cục bộ cho tiết diện chữ nhật rỗng và chữ I chịu uốn đều và chịu nén đúng tâm với tỷ số chiều dày bản bụng và bản cánh thay đổi, kể đến sự tương tác của các tấm trong tiết diện. Zhou và cs. [12] trình bày công thức xác định khả năng chịu lực theo điều kiện ổn định cho cột tiết diện chữ C ghép chịu nén lệch tâm.

Có thể thấy rằng, các nghiên cứu về sự tương tác cánh và bụng khi cấu kiện bị mất ổn định vẫn còn chưa đầy đủ cho một số tiết diện. Nghiên cứu này trình bày công thức xác định ứng suất tới hạn cục bộ cho tiết diện chữ C ghép chịu uốn đều với tỷ số chiều cao trên bề rộng và chiều dày trên chiều dài mép gấp thay đổi, kể đến sự tương tác giữa cánh, bụng và mép

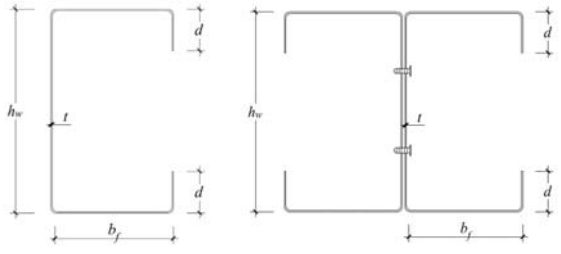
gấp. Chương trình CUFSM được sử dụng để phân tích ổn định cho tiết diện chữ C chịu uốn đều. Từ kết quả đạt được, áp dụng phương pháp nghiên cứu tham số để đề xuất công thức tính toán ứng suất tới hạn cục bộ cho loại tiết diện này.

2. ỨNG SUẤT TỚI HẠN CỤC BỘ CHO TIẾT DIỆN CHỮ C ĐƠN VÀ GHÉP CHỊU UỐN ĐỀU

Tiến hành phân tích ổn định cục bộ cho ba loại tiết diện chữ C đơn và ghép với hai đầu liên kết khớp có cùng kích thước chịu uốn đều. Thông số vật liệu cho những loại tiết diện này được lấy như sau: mô đun đàn hồi E = 210 GPa, tỷ số Poission $\nu = 0.3$. Đối với tiết diện chữ C ghép, do có liên kết đinh vít nên không thể mô phỏng được trong chương trình CUFSM (phương pháp Dải hữu hạn bán giải tích) mà thay vào đó được mô phỏng bằng chương trình Abaqus (phương pháp Phần tử hữu hạn). Tiết diện chữ C ghép chịu uốn đều được mô phỏng trong chương trình Abaqus bởi các phần tử vỏ S4R. Kích thước lưới chia được lấy 5 × 5 mm cho toàn bộ các cấu kiện. Các đinh vít được mô phỏng bằng phần tử chốt (Fastener), khoảng cách các chốt này được lấy lớn hơn chiều dài nửa bước sóng mất ổn định cục bộ, sao cho không ảnh hưởng đến ứng suất tới hạn cục bộ của tiết diện chữ C ghép. Lưu ý rằng, nên lấy kích thước chiều dài cấu kiện đủ lớn để điều kiện biên không ảnh hưởng đến kết quả (điều này cũng phù hợp thực tế khi chiều dài dầm thường lớn hơn nhiều lần khi so với bề rộng tiết diện). Đối với tiết diện chữ C đơn thì hoàn toàn có thể sử dụng chương trình CUFSM để mô phỏng. Kích thước hình học của tiết diện chữ C đơn và ghép được trình bày trong Bảng 1 và Hình 1. Kết quả mô phỏng được trình bày trong Hình 2, Hình 3 và Bảng 2.

Bảng 1. Kích thước hình học tiết diện chữ C

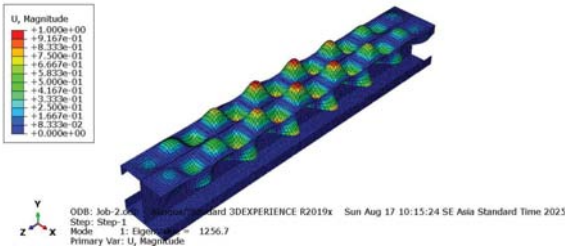
Mẫu	b_f	h_w	d	t
CI	54 mm	90 mm	19 mm	2,0 mm
CII	50 mm	150 mm	25 mm	2,0 mm
CIII	60 mm	110 mm	20 mm	2,0 mm



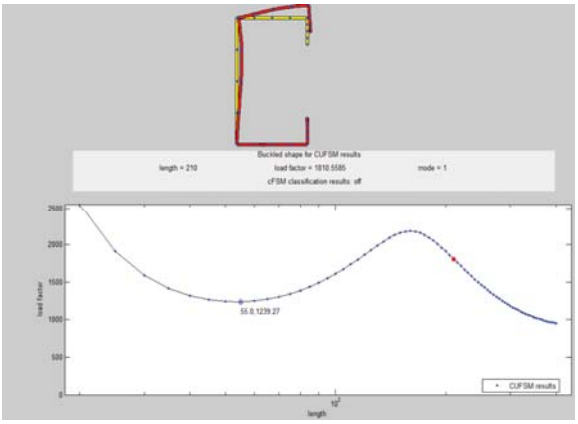
a) Chữ C đơn b) Chữ C ghép

Hình 1: Tiết diện hình học chữ C đơn và ghép

Kết quả phân tích ổn định cục bộ cho cho mẫu CI chịu uốn đều, với tiết diện chữ C ghép (Hình 2) từ chương trình Abaqus và chữ C đơn (Hình 3) từ chương trình CUFSM có kết quả gần như tương đồng nhau. Giá trị ứng suất tới hạn cục bộ cho tiết diện chữ C ghép và đơn lần lượt là 1256,7 MPa và 1239,3 MPa.



Hình 2: Kết quả mô phỏng mẫu CI trong Abaqus



Hình 3: Kết quả mô phỏng mẫu CI trong CUFSM

Bảng 2. Giá trị ứng suất tới hạn cục bộ từ Abaqus và CUFSM

Mẫu	σ_{Abaqus}	σ_{CUFSM}	Sai số
CI	1256,7 MPa	1239,3 MPa	1,41%
CII	992,3 MPa	976,3 MPa	1,64%
CIII	1010,5 MPa	995,7 MPa	1,49%

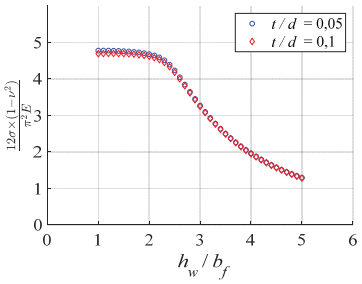
Căn cứ vào kết quả được trình bày trong Bảng 2, kết quả giữa tiết diện chữ C đơn và chữ C ghép chịu uốn đều gần như tương đồng nhau. Ngoài ra, có thể thấy sự chêch lệch giữa hai kết quả khoảng 1,5%, đây là do sai khác giữa hai chương trình tính toán dựa trên hai phương pháp số là Phần tử hữu hạn và Dải hữu hạn. Do quy trình mô phỏng tiết diện chữ C ghép trong chương trình Abaqus mất nhiều thời gian và tài nguyên tính toán, để đơn giản hóa thì có thể dựa vào kết quả mô phỏng tiết diện chữ C đơn chịu uốn đều trong chương trình CUFSM để làm kết quả tham chiếu trong tính toán ứng suất tới hạn cục bộ cho tiết diện chữ C ghép.

3. CÔNG THỨC XÁC ĐỊNH ỨNG SUẤT TỚI HẠN CỤC BỘ CHO TIẾT DIỆN CHỮ C GHÉP CHỊU UỐN ĐỀU

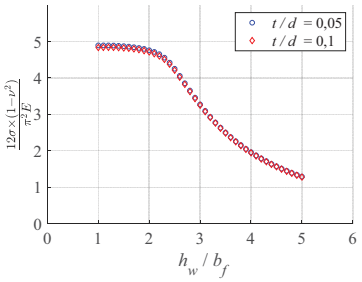
Trong mục này, chương trình CUFSM được sử dụng để phân tích ổn định cho tiết diện chữ C đơn chịu uốn đều. Mỗi tấm phẳng trong tiết diện bản cánh và mép gấp được chia đều thành 4 dải hữu hạn, mỗi tấm của bản bụng thì được chia làm 8 dải nhằm mục đích đạt đến điều kiện hội tụ [13].

3.1. Khảo sát ảnh hưởng của chiều dài mép gấp đến ứng suất tới hạn cục bộ của tiết diện

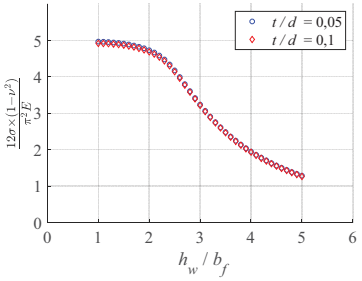
Tiến hành mô phỏng 246 mẫu tiết diện thép chữ C đơn chịu uốn đều trong chương trình CUFSM. Các tiết diện này có tỷ số chiều cao trên bề rộng từ 1,0 đến 5,0 với bước nhảy là 0,1, tỷ số chiều dày trên chiều dài mép gấp là 0,05 và 0,1, tỷ số chiều dài mép gấp trên chiều cao: 0,1 ÷ 0,2 với bước nhảy là 0,05. Kết quả mô phỏng được trình bày trong Hình 4.



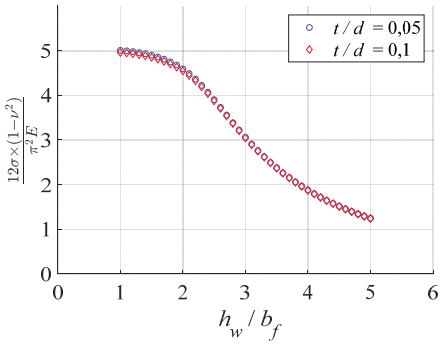
(a) $d/h_w = 0,05$



(b) $d/h_w = 0,1$



(c) $d/h_w = 0,15$



(d) $d / h_w = 0,2$

Hình 4: Ảnh hưởng của tỷ số h_w/b_f đến ứng suất tới hạn cục bộ của tiết diện chữ C với chiều dài mép gấp thay đổi

Hình 4 trình bày ảnh hưởng của tỷ số h_w/b_f đến ứng suất tới hạn cục bộ của tiết diện chữ C với $t/d = 0,05$ và $t/d = 0,1$ chịu uốn đều. Có thể thấy rằng tỷ số h_w/b_f tăng thì giá trị ứng suất tới hạn cục bộ giảm. Trong Hình 4, có sự chênh lệch giữa hai tỷ số $d/t = 0,05$ và $d/t = 0,1$ trong khoảng h_w/b_f từ 1,0 đến 2,5. Do trong khoảng này tiết diện bị mất ổn định cục bộ ở bản cánh và chiều dài mép gấp có ảnh hưởng không đáng kể đến ứng suất tới hạn cục bộ của tiết diện với sai lệch lớn nhất khoảng 1,8%. Do đó, có thể bỏ qua ảnh hưởng của chiều dài mép gấp khi tính toán ứng suất tới hạn cục bộ cho tiết diện chữ C chịu uốn đều. Ngược lại, khi tỷ số h_w/b_f từ 2,5 đến 5,0 thì tiết diện bị mất ổn định cục bộ ở bản bụng và chiều dài mép gấp không ảnh hưởng đến kết quả ứng suất tới hạn cục bộ.

3.2. Công thức xác định ứng suất tới hạn cục bộ cho tiết diện chữ C ghép chịu uốn đều

Công thức xác định ứng suất tới hạn cục bộ cho tấm ghép (1) được Traihair [14] sử dụng có dạng cổ điển như sau:

$$\sigma_{cr} = \frac{k_\sigma \pi^2 E}{12\left(1-\nu^2\right)}\left(\frac{t}{b_f}\right)^2 \qquad (1)$$

trong đó: k_σ là hệ số ổn định của tiết diện, E là mô đun đàn hồi, ν là tỷ số Poisson, t là chiều dày, b_f là bề rộng bản cánh của tiết diện chữ C đơn.

Trong công thức (1), ứng suất tới hạn cục bộ phụ thuộc vào hệ số k_σ và tỷ số t/b_f. Như đã được đề cập ở mục trước, hệ số ổn định phụ thuộc chủ yếu vào tỷ số h_w/b_f. Ngoài ra, các đường cong hệ số ổn định – tỷ số chiều cao trên bề rộng

được trình bày trong Hình 4 có dạng gần tương đồng nhau và có một điểm uốn. Chính vì thế, công thức xác định ứng suất tới hạn cục bộ cho tiết diện chữ C ghép chịu uốn đều có thể được đề xuất với công thức có dạng đa thức bậc ba như sau:

$$k_\sigma = a\left(h_w / b_f\right)^3 + b\left(h_w / b_f\right)^2 + c\left(h_w / b_f\right) + d \quad (2)$$

với các hệ số a, b, c và d là các hệ số cần tìm.

Các hệ số a, b, c và d trong công thức (2) được xác định dựa vào phương pháp nghiên cứu tham số đối với kết quả đạt được từ mục trước, các hệ số $a = 0,168$, $b = -1,544$, $c = 3,196$ và $d = 3,048$ tương ứng với giá trị hệ số biến thiên (CoV) là thấp nhất (0,039) và giá trị hệ số xác định $\left(R^2\right)$ là cao nhất (0,994). Do đó, công thức (2) có thể được viết lại như sau:

$$k_\sigma = 0,168\left(h_w / b_f\right)^3 - 1,544\left(h_w / b_f\right)^2 + 3,196\left(h_w / b_f\right) + 3,048 \quad (3)$$

Lưu ý rằng, công thức (3) chỉ được áp dụng cho các tiết diện chữ C ghép chịu uốn đều khi thõa mãn phương trình (4):

$$\begin{cases} 1,0 \le h_w / b_f \le 5,0 \\ 0,05 \le t / d \le 0,1 \\ 0,1 \le d / h_w \le 0,2 \end{cases} \quad (4)$$

4. VÍ DỤ ÁP DỤNG

Một số ví dụ tính toán được trình bày trong mục này nhằm kiểm chứng độ tin cậy của công thức đề xuất. Ứng suất tới hạn cục bộ cho tiết diện chữ C ghép chịu uốn đều được xác định bằng công thức (3) và chương trình CUFSM. Các thông số hình học được trình bày trong Bảng 3. Lưu ý, do tiết diện thép chữ C ghép được chế tạo từ thép tạo hình nguội, nên các góc cong được lấy sao cho thõa mãn điều kiện $r/t \le 5,0$ [15]. Điều này giúp bỏ qua ảnh hưởng của góc cong đến ứng suất tới hạn cục bộ của tiết diện tạo hình nguội.

Bảng 3. Kích thước hình học

Mẫu	b_f	h_w	d	t
C1	80 mm	200 mm	20 mm	2,0 mm
C2	100 mm	200 mm	25 mm	2,0 mm
C3	140 mm	200 mm	30 mm	2,0 mm
C4	160 mm	200 mm	35 mm	2,0 mm
C5	200 mm	200 mm	40 mm	2,0 mm

Thực hiện tính toán ứng suất tới hạn cục bộ cho mẫu C1, Các bước tính toán được trình bày như sau:

Bước 1: Kiểm tra điều kiện của phương trình (4)

Mẫu C1 có các tỷ số: $h_w/b_f = 2,5$, $t/d = 0,1$ và $d/h_w = 0,1$

→ Thõa mãn

Bước 2: Xác định hệ số ổn định cho tiết diện theo công thức (3)

$$k_\sigma = 0,168\left(h_w / b_f\right)^3 - 1,544\left(h_w / b_f\right)^2 + 3,196\left(h_w / b_f\right) + 3,048 = 4,013$$

Bước 3: Xác định ứng suất tới hạn cục bộ của tiết diện thông qua công thức (1)

$$\sigma_{cr} = \frac{k_\sigma \pi^2 E}{12\left(1-\nu^2\right)}\left(\frac{t}{b_f}\right)^2 = 476,0\left(\text{MPa}\right)$$

Các mẫu còn lại thực hiện tương tự như mẫu C1, kết quả tính toán được so sánh với chương trình CUFSM và được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 4. So sánh kết quả tính toán và chương trình CUFSM

Mẫu	$\sigma_{cr,\,tt}$	$\sigma_{cr,\,CUFSM}$	Sai số
C1	476,0MPa	499,7MPa	4,74%
C2	349,8MPa	359,6MPa	2,71%
C3	191,8MPa	190,3MPa	0,79%
C4	147,1MPa	147,1MPa	0,00%
C5	92,4MPa	95,0MPa	2,76%

Căn cứ vào Bảng 4, kết quả giữa công thức xấp xỉ và chương trình CUFSM gần như tương đồng nhau với chênh lệch lớn nhất là 4,74% (mẫu C1). Điều này cho thấy rằng công thức đề xuất xác định ứng suất tới hạn cục bộ cho tiết diện chữ C ghép chịu uốn đều là đáng tin cậy.

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này trình bày công thức xác định ứng suất tới hạn cục bộ cho tiết diện chữ C ghép chịu uốn đều. Từ kết quả trong chương trình Abaqus (tiết diện chữ C ghép) và CUFSM (tiết diện chữ C đơn), ứng suất tới hạn cục bộ của hai loại tiết diện này khi chịu uốn đều thì gần như tương đồng nhau. Chính vì thế, có thể sử dụng kết quả mô phỏng của tiết diện chữ C đơn chịu uốn đều để tham chiếu cho tiết diện chữ C ghép. Chương trình CUFSM được sử dụng để phân tích ổn định cho tiết diện chữ C đơn chịu uốn đều với

các tỷ số thay đổi như sau: $1,0 \le h_w/b_f \le 5,0$, $0,05 \le t/d \le 0,1$ và $0,1 \le d/h_w \le 0,2$. Công thức xấp xỉ được đề xuất bởi phương pháp nghiên cứu tham số. Độ tin cậy của công thức được đảm bảo khi giá trị hệ số biến thiên CoV thấp với 0,039 và hệ số xác định cao với 0,994.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Eurocode 3 (2006). Design of steel structures - Part 1-5: *Plated structural elements.*

[2] Seif, M. and Schafer, B.W. (2010) *Local buckling of structural steel shapes*. Journal of Constructional Steel Research. 66 (10), 1232–1247.

[3] Vieira, L., Gonçalves, R., and Camotim, D. (2018) *On the local buckling of RHS members under axial force and biaxial bending*. Thin-Walled Structures. 129 (March), 10-19.

[4] Ragheb, W.F. (2015) *Local buckling of welded steel I-beams considering flange-web interaction.* Thin-Walled Structures. 97 241–249.

[5] Gardner, L., Fieber, A., and Macorini, L. (2019) *Formulae for Calculating Elastic Local Buckling Stresses of Full Structural Cross-sections*. Structures. 17 (February), 2–20.

[6] Bui, H.C. (2021) *Local buckling of thin-walled circular hollow section under uniform bending.* Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - HUCE. 15 (4), 88–98.

[7] Bedair, O. (2009) *Stability of web plates in W-shape columns accounting for flange/web interaction.* Thin-Walled Structures. 47 (6–7), 768–775.

[8] Chiem, D.T.Q., Bui, H.C., and Han, N.D. (2024) *Formulas for determining the critical buckling stress of I-shaped members under pure bending*. Journal of Science and Technology in Civil Engineering (JSTCE) - HUCE. 18 (4), 41–53.

[9] Chiêm, Đ.T.Q. và Bùi, H.C. (2024) *Công thức xác định ứng suất ổn định cục bộ của thép tiết diện chữ I chịu nén đều*. Kết Cấu - Công Nghệ Xây Dựng. 2 (4), 32–39.

[10] Chiêm, Đ.T.Q. và Bùi, H.C. (2024) *Công thức xác định ứng suất tới hạn cục bộ của thép hộp chữ nhật chịu uốn đều.* Tạp Chí Khoa Học Kiến Trúc và Xây Dựng. 56 26–31.

[11] Chiêm, Đ.T.Q. và Bùi, H.C. (2024) *Công thức xác định ứng suất tới hạn cục bộ của thép hộp chữ nhật chịu nén đúng tâm.* Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng, ĐHXDHN. 18 (4V), 73–83.

[12] Zhou, T., Li, Y., Wu, H., Lu, Y., and Ren, L. (2020) *Analysis to determine flexural buckling of cold-formed steel built-up back-to-back section columns.* Journal of Constructional Steel Research. 166 105898.

[13] Bùi, H.C. (2012) *Phân tích ổn định đàn hồi tấm và thanh thành mỏng bằng phương pháp dải hữu hạn.* Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng. 6(1) 12–23.

[14] Trahair, N.., Bradford, M.., Nethercot, D.., and Gardner, L. (2008) *The behaviour and design of steel structures to EC3*. 4th ed. 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon.

[15] Eurocode 3 (2006). Design of steel structures - Part 1-3: Generral rules - *Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*.