

# MÔ HÌNH HÓA PHÂN TÍCH MẤT ỔN ĐỊNH ĐÀN HỒI TRONG PHƯƠNG PHÁP DSM

MODELING OF ELASTIC BUCKLING ANALYSIS IN THE DIRECT STRENGTH METHOD (DSM)

➔ **Nguyễn Thị Thanh Hương** - Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội.  
ĐT: 0983695880 - Email: huongntt@hau.edu.vn

**Tóm tắt:** Lực tới hạn mất ổn định đàn hồi là thông số đầu vào quan trọng của Phương pháp Cường độ Trực tiếp trong tiêu chuẩn AISI S100 nhằm xác định độ bền của các cấu kiện thép tạo hình nguội. Giá trị tới hạn này phụ thuộc vào dạng tải trọng và điều kiện biên của cấu kiện; tuy nhiên, các điều kiện này vẫn chưa được quy định đầy đủ trong tiêu chuẩn. Bài báo này nghiên cứu ứng xử mất ổn định của các cấu kiện chịu uốn có tiết diện hình chữ Z và xem xét ảnh hưởng của các dạng tải trọng khác nhau đến mô-men tới hạn tương đương. Sơ đồ dầm đơn giản đã được mô hình hóa bằng phần mềm ABAQUS với nhiều kịch bản gia tải, bao gồm: mô-men tập trung tại đầu dầm, tải trọng phân bố đều và lực tập trung dọc theo chiều dài dầm. Kết quả mô phỏng chỉ ra rằng các loại hình gia tải khác nhau có tác động đáng kể đến mô-men tới hạn tương đương, do đó cần phải được xem xét một cách thỏa đáng. Từ kết quả nghiên cứu, bài báo kiến nghị tiêu chuẩn AISI S100 nên cung cấp hướng dẫn rõ ràng hơn cho việc mô hình hóa bài toán mất ổn định khi sử dụng các phương pháp số để xác định lực tới hạn của toàn bộ tiết diện.  
**Từ khóa:** Mất ổn định, DSM, mô hình hóa, ABAQUS, mô men tới hạn, tiết diện chữ Z.

## 1. Đặt vấn đề

Khả năng chịu lực của các cấu kiện thép tạo hình nguội theo Phương pháp Cường độ Trực tiếp (DSM) được quy định trong tiêu chuẩn AISI S100 [1, 2] và AS/NZS 4600:2018 [3], (CFS) phụ thuộc vào độ mảnh của tiết diện, là một hàm số của tải trọng mất ổn định tới hạn. Giá trị mất ổn định này được tính toán theo Phụ lục 2 của tiêu chuẩn AISI S100. Quy định hiện hành cho phép xác định ứng suất mất ổn định đàn hồi, hoặc các nội lực tương ứng, bằng cách sử dụng các phương pháp số như Phương pháp Dải hữu hạn (FSM), Phương pháp Phần tử hữu hạn (FEM), hoặc Lý thuyết Dầm tổng quát (GBT).

Mặc dù mô-men mất ổn định tới hạn có liên quan đến mô hình tính, nhưng AISI S100 không nêu quy định cụ thể đối với mô hình dùng để phân tích bài toán mất ổn định. Phần 2.2.5 của Hướng dẫn áp dụng tiêu chuẩn (2016) [4] chỉ gợi

**Abstract:** The critical elastic buckling load (or moment) is a key input parameter for the Direct Strength Method (DSM) as specified in the AISI S100 standard for determining the strength of cold-formed steel (CFS) members. This critical value depends on the loading types and boundary conditions of the member; however, these conditions are not yet fully addressed in the specification. This paper investigates the buckling behavior of Z-section flexural members and examines the influence of different loading scenarios on the equivalent critical moment. Simply supported beam models were developed using ABAQUS software under various loading conditions, including: concentrated end moments, uniformly distributed loads, and concentrated forces applied along the beam span. The simulation results indicate that different loading types have a significant impact on the equivalent critical moment and, therefore, must be properly accounted for. Based on these findings, it is recommended that the AISI S100 specification provide clearer guidance on modeling buckling problems when using numerical methods to determine the critical forces for the full cross-section.

**Keywords:** Buckling, DSM, modeling, ABAQUS, critical moment, Z-section.

ý rằng các điều kiện biên tại đầu dầm nên được lý tưởng hóa là gối tựa đơn giản và không cản trở hiện tượng vênh (warping-free); tuy nhiên, tài liệu này không đưa ra hướng dẫn đối với phương thức gia tải. Đối với cấu kiện chịu uốn, các nghiên cứu hiện có, chẳng hạn như nghiên cứu của Oey và Papangelis và của Vũ [5-11], thường sử dụng mô hình dầm đơn giản chịu uốn thuần túy, sau đây gọi là "mô hình lý tưởng hóa".

Trong thực tế, các kỹ sư kết cấu thực hành tính toán chủ yếu dựa trên các quy định trong tiêu chuẩn và ít có điều kiện tiếp cận với các nghiên cứu lý thuyết chuyên sâu. Sự khác biệt này đặt ra một câu hỏi quan trọng: liệu các mô hình gia tải thực tế có nên được dùng để thay thế cho các mô hình "uốn thuần túy" lý tưởng hóa thường dùng để tính toán mô-men mất ổn định tới hạn hay không? Việc thiếu các hướng dẫn rõ ràng trong AISI S100 về các kịch bản gia tải có thể dẫn đến việc tính toán tải trọng

mất ổn định không nhất quán hoặc thiếu chính xác, từ đó làm ảnh hưởng đến độ tin cậy của giá trị độ bền dự báo.

Do đó, bài báo này nghiên cứu ảnh hưởng của các loại tải trọng khác nhau đến mô men mất ổn định đàn hồi của cấu kiện chịu uốn tiết diện chữ Z200×80×20×2.

## 2. Công thức xác định độ bền uốn theo phương pháp DSM của tiêu chuẩn AISI S100

Độ bền uốn danh định được đánh giá dựa trên các dạng mất ổn định khác nhau, bao gồm:

Độ bền uốn danh định  $M_{nl}$ , xét đến tương tác giữa mất ổn định cục bộ và mất ổn định tổng thể, khi  $\lambda_1 \leq 5$  được tính toán theo công thức [2]:

$$M_{nl} = k_s \overline{M}_{ne} \frac{1 + 0.1\alpha_s \lambda_1^2}{1 + 0.55\beta_s \lambda_1^2} \leq M_{y3} \quad (1)$$

Trong đó:

Trong đó  $\lambda_1$  là độ mảnh của tiết diện:

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{\overline{M}_{ne}}{M_{crl}}} \quad (2)$$

$\overline{M}_{ne}$  – Giá trị nhỏ nhất giữa  $M_{ne}$  và  $M_y$ . Trong đó,  $M_{ne}$  là độ bền uốn danh định bị chi phối bởi mất ổn định tổng thể.  $M_y$  là mô men đàn hồi của cấu kiện.

$M_{crl}$  – Mô-men mất ổn định cục bộ đàn hồi tới hạn.

$$M_{nd} = M_p \frac{1 + 0.07\alpha_s \lambda_d^2}{1 + 0.60\beta_s \lambda_d^2} \leq M_{y3} \quad (3)$$

Độ bền uốn danh định,  $M_{nd}$ , đối với mất ổn định méo sẽ được tính toán theo công thức sau cho trường hợp  $\lambda_d < 5$ :

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crl}}} \quad (4)$$

Trong đó:  $\lambda_d$  Là độ mảnh của tiết diện khi tính toán theo mất ổn định méo.

$M_{crl}$  – Mô-men mất ổn định méo đàn hồi tới hạn.

Các mô-men mất ổn định đàn hồi tới hạn,  $M_{crl}$  và  $M_{crl}$ , được xác định theo Phụ lục 2 của tiêu chuẩn AISI S100.

Các công thức trên thể hiện rõ ảnh hưởng của các mô men tới hạn đến độ bền của cấu kiện. Do đó, việc lựa chọn mô hình tính có thể làm thay đổi độ bền cuối cùng của kết cấu.

## 3. Mô hình Phần tử hữu hạn

Mô phỏng số được thực hiện bằng phương pháp Phần tử hữu hạn (FEM) trong môi trường phần mềm ABAQUS [12]. Sơ đồ dầm đơn giản chịu sáu loại tải trọng khác nhau, bao gồm (xem Hình 1):

- TH1: Mô men tập trung đặt tại hai đầu dầm: Đây là "mô hình lý tưởng hóa" thường được sử dụng trong phần mềm CUFISM [13], THIN-WALL-2 [14] (Phương pháp dải hữu hạn) và GBTUL [15] (Lý thuyết dầm tổng quát). Trường hợp tải trọng này sinh ra trạng thái uốn thuần túy trên toàn bộ chiều dài cấu kiện.

- TH2: Tải trọng phân bố đều trên bản bụng: Được mô hình hóa dưới dạng lực tiếp tuyến bề mặt (area traction) trong ABAQUS.

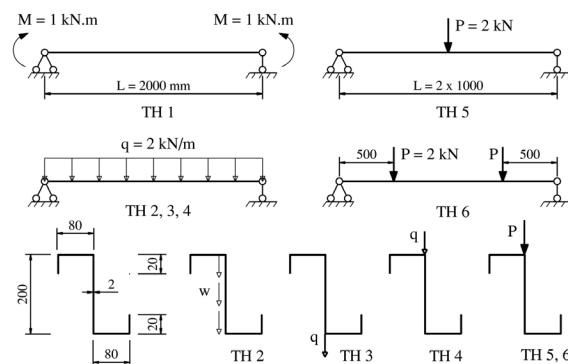
- TH3: Tải trọng phân bố đều tại cánh dưới.

- TH4: Tải trọng phân bố đều tại cánh trên: tải trọng này đại diện cho trọng lượng từ tấm lợp tác động trực tiếp lên cánh chịu nén.

- TH5: Lực tập trung tại giữa nhịp (L/2).

- Hai lực tập trung đối xứng: Được đặt tại các vị trí 1/4 nhịp (L/4 và 3L/4). Dạng tải trọng này đại diện cho thí nghiệm tiêu chuẩn uốn bốn điểm, ví dụ như trong nghiên cứu của Georgantzia [16].

Vật liệu được mô hình hóa là dầm hồi tuyến tính với mô đun đàn hồi  $E = 200000$  MPa và hệ số Poisson  $\nu = 0,3$ . Để phản ánh liên kết thực tế, mặt phẳng gán tải và gối tựa được lấy trùng với mặt phẳng của bản bụng, như minh họa trong Hình 1.

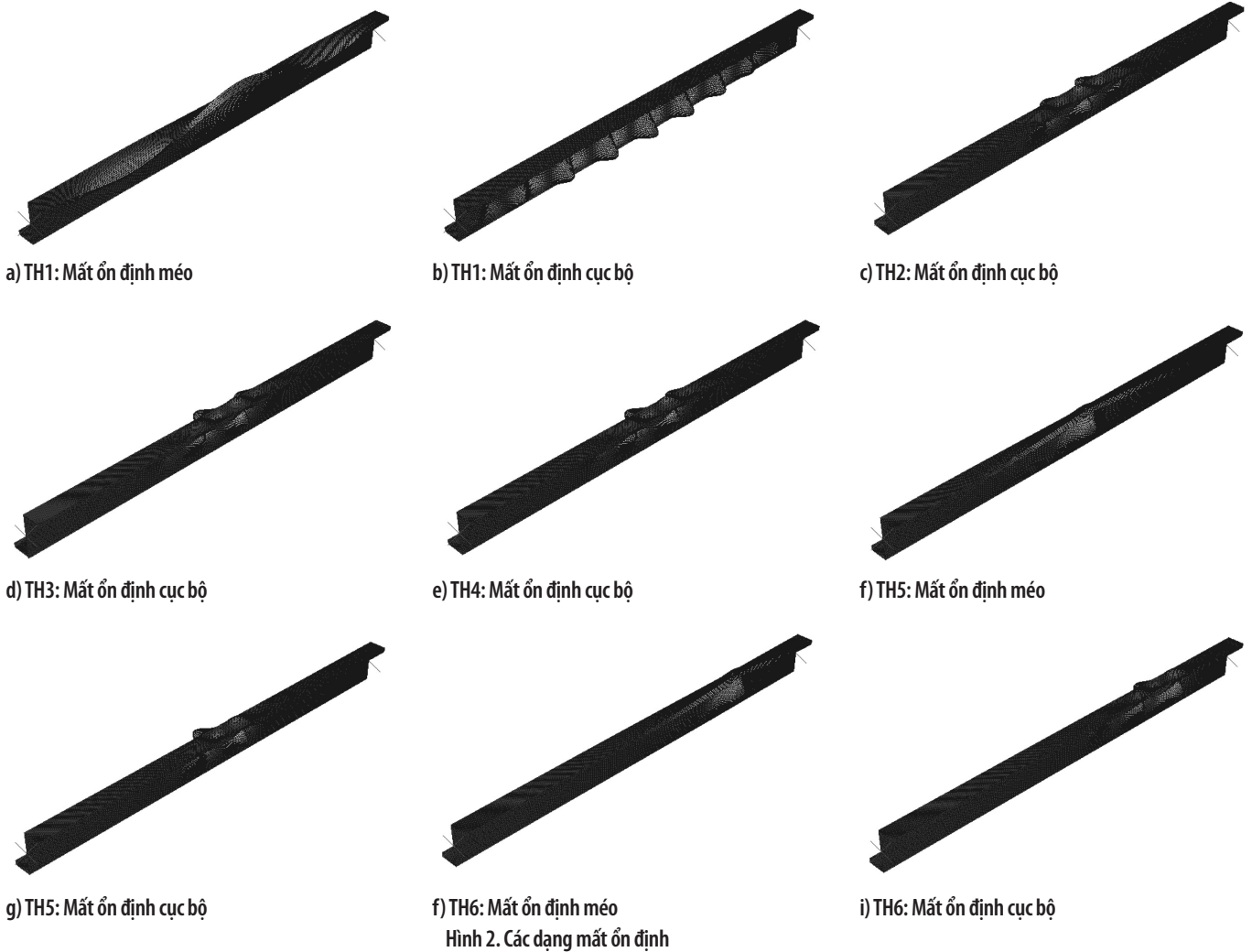


Hình 1. Mô hình tính và tiết diện

## 4. Kết quả mô phỏng

Hình 2 thể hiện các dạng mất ổn định của các trường hợp tải trọng từ TH1 đến TH6. Các mô-men mất ổn định đàn hồi tới hạn tương ứng được tóm tắt trong Bảng 1 để tiện so sánh. Trong Hình 2, hình (a) và (b) đại diện cho mô hình kết cấu lý tưởng chỉ xuất hiện uốn thuần túy, tương ứng với hai dạng mất ổn định riêng biệt: dạng mất ổn định méo (Hình 2a) và dạng mất ổn định cục bộ (Hình 2b). Các dạng này được phân biệt bởi các nửa bước sóng đặc trưng và quy luật biến dạng dọc theo cấu kiện.

Các giá trị mô men tới hạn ( $M_{crl}$  và  $M_{crl}$ ) trình bày trong Bảng 1 được xác định bằng cách nhân giá trị mô men uốn lớn nhất của cấu kiện với trị riêng (hệ số tải trọng) thu được từ phân tích mất ổn định



Bảng 1. So sánh mô men tới hạn tương đương của các trường hợp tải trọng khác nhau

Mô hình	Dạng tải trọng	Mất ổn định méo		Mất ổn định cục bộ	
		$M_{crd}$	$\Delta$	$M_{crl}$	$\Delta$
		kN.m	%	kN.m	%
TH 1	Mô men tập trung ở hai đầu dầm	7,283	0,0	12,052	0,0
TH 2	Tải diện tích trên bề mặt bản bụng	-	-	12,969	7,6
TH 3	Tải phân bố đều trên cạnh kéo	-	-	13,161	9,2
TH 4	Tải phân bố đều trên cạnh nén	-	-	13,161	9,2
TH 5	Lực tập trung đặt ở giữa nhịp	9,447	29,7	13,040	8,2
TH 6	Hai lực tập trung đặt ở 1/4 nhịp	10,507	44,3	13,334	10,6

đàn hồi. Giá trị mô men lớn nhất của các trường hợp tải trọng đang xét TH1 đến TH6 đều xuất hiện ở giữa dầm. Hệ số  $\Delta$  được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của sơ đồ chất tải. Hệ số này đại diện cho phần trăm độ lệch về giá trị mô men tới hạn của một trường hợp tải trọng cụ thể so với mô hình lý tưởng hóa (TH1).

## 5. Nhận xét

Trường hợp đặt tải lý tưởng (mô men tập trung ở hai đầu dầm, TH1) có đầy đủ hai dạng mất ổn định phân biệt: dạng mất ổn định méo (Hình 2a) ở bước sóng dài, khoảng 660 mm, xảy ra trước, với giá trị mô men tới hạn thu được  $M_{crd} = 7,283$  kN.m; dạng mất ổn định cục bộ (Hình 2b) ở bước sóng ngắn, khoảng 125 mm, xảy ra sau, với giá trị mô men tới hạn thu được  $M_{crl} = 12,052$  kN.m. Các sóng mất ổn định xảy ra trên toàn bộ chiều dài dầm là hệ quả của mô men nội lực phân bố đều. Trường hợp TH1 sẽ được sử dụng làm cơ sở để so sánh với các trường hợp khác.

Các trường hợp tải trọng phân bố đều (TH2, TH3, TH4) chỉ quan sát thấy hiện tượng mất ổn định cục bộ, xuất hiện ở giữa dầm, là vùng có mô men lớn (xem Hình 2c, d, e). Hai đầu dầm mô men nhỏ không xuất hiện hiện tượng mất ổn định. Giá trị mô men tới hạn tương đương không chênh nhau nhiều, từ 12,969 kN.m đến 13,161 kN.m và chỉ lớn hơn mô men tới hạn của trường hợp lý tưởng (TH1) từ 7,6 đến 9,2%. Tuy nhiên theo công thức

(2) và (4), mô men tới hạn tăng lên sẽ làm giảm độ mảnh của toàn tiết diện, từ đó làm tăng độ bền danh nghĩa của cấu kiện theo công thức (1) và (3), tức tính toán thiên về không an toàn.

Không quan sát thấy hiện tượng mất ổn định méo xảy ra đối với trường hợp tải trọng phân bố đều.

Hai trường hợp tải tập trung TH5 và TH6 gây ra cả hai hiện tượng mất ổn định méo (Hình 2f, h) và mất ổn định cục bộ (Hình 2g, i), tương tự như trường hợp TH1. Hiện tượng mất ổn định méo cũng xảy ra trước, hiện tượng mất ổn định cục bộ xảy ra sau và đều xuất hiện tại vị trí đặt lực tập trung. Tương tự như trường hợp TH2 đến TH4, mô men tới hạn của TH5 và TH6 đều tăng không nhiều so với trường hợp lý tưởng TH1, với độ chênh lệch lớn nhất là 10,6% và thiên về không an toàn.

So với hiện tượng mất ổn định cục bộ, hiện tượng mất ổn định méo xuất hiện trong trường hợp chất tải TH5 và TH6 gây ra mô men tới hạn lớn hơn nhiều so với giá trị mô men tới hạn của trường hợp chất hai mô men tập trung ở hai đầu dầm (TH1). Mức chênh lệch lớn nhất là 44,3%, tương ứng với TH6. Đây là mức chênh lệch đáng kể và không thể bỏ qua.

## 6. Kết luận

Các mô men mất ổn định đàn hồi tới hạn,  $M_{cr1}$  (mất ổn định cục bộ) và  $M_{crd}$  (mất ổn định méo), có liên quan mật thiết với phương thức đặt tải và vị trí điểm đặt lực cụ thể trên tiết diện. Việc áp dụng một mô hình tính toán không phù hợp có thể dẫn đến những sai số đáng kể trong việc dự báo độ bền danh nghĩa khi sử dụng Phương pháp Cường độ Trực tiếp (DSM).

Kết quả nghiên cứu trên tiết diện chữ Z chịu uốn cho thấy, giá trị mô men tới hạn mất ổn định cục bộ của các trường hợp tải trọng nghiên cứu chênh lệch không nhiều so với mô hình lý tưởng (từ 7.6% đến 10.6%), nhưng lại thiên về không an toàn. Đối với trường hợp mất ổn định méo, mô men tới hạn của các trường hợp tải trọng TH5 và TH6 chênh lệch lớn so với trường hợp lý tưởng (TH1). Độ chênh lệch có thể đạt đến 44.3%. Nhiều trường hợp tải trọng không xuất hiện mất ổn định méo.

Mặc dù Phụ lục 2 của tiêu chuẩn AISI S100 cho phép sử dụng các phương pháp số như Phương pháp Dải hữu hạn (FSM) và Phương pháp Phần tử hữu hạn (FEM) để xác định mô men tới hạn, nhưng tiêu chuẩn này lại thiếu các hướng dẫn chi tiết về việc lựa chọn mô hình tải trọng để áp dụng trong phân tích mất ổn định. Do đó, cần thiết phải có các quy định chặt chẽ hơn trong tiêu chuẩn AISI S100 liên quan đến việc xây dựng mô hình số. Sự chuẩn hóa này sẽ giúp đảm bảo tính nhất quán

và độ an toàn trong thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội (CFS). □

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. AISI, AISI S100-16 North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2016 Edition. 2016, American Iron and Steel Institute.
2. AISI, ANSI/SDI AISI S100-2024 North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2024 Edition. 2024, AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE/ STEEL DECK INSTITUTE.
3. Joint Standards Australia/Standards New Zealand Committee BD-082, C.-f.S.S., AS/NZS 4600:2018 Cold-formed steel structures. 2018, Standards Australia Limited and The Crown in right of New Zealand, administered by the New Zealand Standards Executive.
4. AISI, Commentary on North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. 2016, American Iron and Steel Institute.
5. Oey, O. and J. Papangelis, Behavior of cold-formed steel channels bent about the minor axis. *Thin-Walled Structures*, 2021. Vol. 164.
6. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham. Evaluation of the software's reliability in solving the buckling problem of the cold-formed plain c-section member bending about its asymmetrical axis. in *Structural Health Monitoring & Engineering Structures Conference*, Da Nang, Vietnam, Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Springer.
7. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham, Behavior of Cold-Formed Channels with a V-shape Web Stiffener Bending About the Asymmetrical Axis, in *Proceedings of the 7th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering and Structures*, CIGOS 2024. 2024, Lecture Notes in Civil Engineering. Springer, Singapore.: Ho Chi Minh, Vietnam p. 192–200.
8. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham, Convergence study on asymmetrically flexural problem of cold-formed channel sections. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2024. Vol. 20(4): p. 23-30.
9. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham, Local buckling coefficients for thin-walled lipped channels under bending about asymmetrical axis. *Results in Engineering*, 2025. Vol. 26.
10. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham, Approximate formula for local buckling in thin-walled channels bent about the asymmetrical axis. *Journal of Constructional Steel Research*, 2025. Vol. 232.
11. Hoàng, V.H., Nghiên cứu ứng xử của cấu kiện thép tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng, in *Khoa Xây dựng*. 2026, Trường đại học Kiến trúc Hà Nội (In English: Behavior of cold-formed steel members subjected to bending about asymmetrical axis, Faculty of Construction, Hanoi Architectural University, Phd. Thesis).
12. SIMULIA, Abaqus/CAE User's Manual. 2011, Providence, RI, USA: Dassault Systèmes Simulia Corp.
13. Schafer, B. <https://www.ce.jhu.edu/cufsm/>. [cited 2025 Mar. 8th].
14. THIN-WALL-2 specification. University of Sydney.
15. Bebiano, R., N. Silvestre, and D. Camotim, GBT User manual. 2010, Technical University of Lisbon.
16. Georgantzia, E., et al., Design of aluminum alloy channel sections under minor axis bending. *Thin-Walled Structures*, 2022. Vol. 174.