

SO SÁNH KHẢ NĂNG CHỊU UỐN CÓ XÉT ĐẾN SỰ MẤT ỔN ĐỊNH TỔNG THỂ CỦA DÀM THÉP CÓ MỘT ĐIỂM CỐ KẾT NGANG GIỮA NHỊP THEO EUROCODE 3 VÀ TCVN 5575
A COMPARATIVE STUDY OF THE BUCKLING RESISTANCES OF STEEL BEAMS WITH AN INTERMEDIATE LATERAL RESTRAINT BASED ON EUROCODE 3 AND TCVN 5575

NGUYỄN VĂN CƯỜNG^{a,*}, BÙI HÙNG CƯỜNG^a, TRỊNH DUY KHÁNH^a, ĐOÀN CƯỜNG QUỐC^b

^aKhoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

^bSở Xây dựng tỉnh Quảng Trị

*Tác giả đại diện: Email: cuongnv1@huce.edu.vn

Ngày nhận 03/10/2025, Ngày sửa 31/10/2025, Chấp nhận 02/11/2025

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2025.vi.vol4-2>

Tóm tắt: Mất ổn định tổng thể của dầm thép là một vấn đề nhận được sự quan tâm lớn của các kỹ sư thiết kế kết cấu thép. Trong công tác thiết kế thực tiễn, các tiêu chuẩn TCVN và Eurocode là hai trong số các hệ thống được áp dụng phổ biến nhất ở Việt Nam. Gần đây, các tiêu chuẩn liên quan đến thiết kế kết cấu thép trong hệ thống TCVN như TCVN 2737:2023, TCVN 5575:2024 có sự chuyển đổi lớn, trong đó TCVN 5575:2024 dựa theo tiêu chuẩn của Liên Bang Nga với sự dịch chuyển gần với Eurocode (ít nhất là các ký hiệu), dẫn đến câu hỏi liệu tính toán khả năng chịu uốn theo điều kiện ổn định tổng thể $M_{b,Rd}$ của một dầm thép trong thực tế theo hai tiêu chuẩn TCVN 5575:2024 và Eurocode 3 có dẫn đến những kết quả giống nhau hay không lại nổi lên thành một vấn đề đáng tranh luận. Trong bài báo này, nhóm tác giả mong muốn thực hiện các tính toán để so sánh $M_{b,Rd}$ được tính toán theo hai tiêu chuẩn nói trên. Bài báo tập trung vào trường hợp dầm đơn giản có một điểm cố kết giữa nhịp, là trường hợp không được đề cập chính thức trong các phụ lục quốc gia của Eurocode 3. Kết quả nghiên cứu sẽ giúp kỹ sư hiểu rõ hơn những ảnh hưởng thực tế khi áp dụng các tiêu chuẩn thiết kế của Việt Nam, đồng thời có thể góp phần vào việc rà soát, cập nhật tiêu chuẩn Việt Nam khi xem xét, hội nhập với tiêu chuẩn quốc tế.

Từ khóa: dầm thép, TCVN 5575, Eurocode 3, ổn định tổng thể, điểm cố kết, mô phỏng số.

Abstract: Lateral-torsional buckling of steel beams remains a key concern in structural steel design, attracting substantial attention from structural engineers. In engineering practice, both the Vietnamese Standards (TCVN) and the Eurocode are widely applied in design procedure. Recent updates to steel design standards in Vietnam (specifically TCVN 2737:2023 and TCVN

5575:2024) are significantly changed, where TCVN 5575:2024 that is based on the Russian standard reflects possibly a harmonization with Eurocode (at least in engineering symbols and parameters). This evolution raises an interesting question: Do buckling resistances $M_{b,Rd}$ of a steel beam, calculated according to TCVN 5575:2024 and Eurocode 3, lead to an equivalent result? This study aims to explore this question through a comparative analysis of buckling resistances, determined based on the two above-mentioned standards. The investigation focuses on a simply supported steel beam with a lateral restraint point at midspan - a configuration not explicitly covered in the national annexes of Eurocode 3. The findings are expected to provide engineers to understand more the practical implications when applying the Vietnamese design standards, as well as the possible contributions in revising, updating TCVN when considering to harmonise with international standards.

Keywords: steel beam, TCVN 5575, Eurocode 3, lateral-torsional buckling, lateral restraints, numerical modelling.

1. Giới thiệu

Xác định khả năng chịu uốn của dầm thép luôn là một vấn đề quan trọng khi thực hiện thiết kế công trình thép. Các tiêu chuẩn thiết kế đều có đề cập đến vấn đề này bằng cách đưa ra một hệ công thức có kể đến nhiều yếu tố có ảnh hưởng đến khả năng chịu uốn của kết cấu thép.

Khi tìm hiểu các tiêu chuẩn đang được sử dụng phổ biến ở Việt Nam như TCVN 5575:2024 (TCVN 5575) [1], Eurocode 3 (EC3) [2] và AISC 360-22 (AISC 360) [3], có thể nhận thấy các tiêu chuẩn này đều kể đến các yếu tố chung ảnh hưởng đến khả năng chịu uốn có xét đến sự mất ổn định tổng thể

$M_{b,Rd}$ của dầm thép như: độ mảnh của các thành phần trong tiết diện, sơ đồ tính, cường độ của vật liệu thép, kích thước của tiết diện (các đặc trưng hình học, độ mảnh của từng thành phần), số lượng điểm cố kết ngang trên dầm thép... Tuy nhiên, cách xây dựng hệ thống công thức tính toán của các tiêu chuẩn này thì khác nhau. Nếu trong các tiêu chuẩn như EC3, AISC 360 đều xuất phát từ việc xác định khả năng chịu uốn tới hạn do bị mất ổn định của dầm M_{cr} rồi mới xác định $M_{b,Rd}$; thì TCVN 5575 lại gộp tất cả các yếu tố ảnh hưởng vào việc xác định một hệ số trung gian φ_b , rồi từ đó xác định $M_{b,Rd}$. Ngay cả hai tiêu chuẩn EC3 và AISC 360, mặc dù đều xác định M_{cr} dựa trên những kết quả nghiên cứu của Trahair [4] và công thức ba hệ số của Djalaly [5]; nhưng AISC 360 dựa trên việc điều chỉnh biểu đồ momen (thông qua hệ số C_b) tương đương với hệ dầm đơn giản chịu tải trọng phân bố đều, EC3 thì dựa trực tiếp vào công thức ba hệ số Djalaly.

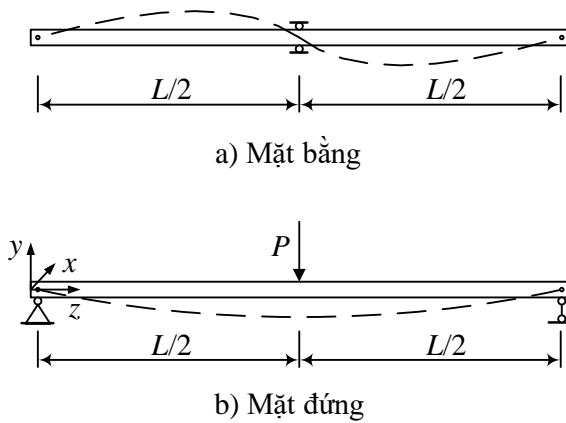
Một khác biệt khá rõ rệt nữa của EC3, AISC 360 so với TCVN 5575 là vấn đề số lượng điểm cố kết trong sơ đồ tính của dầm. Nếu như EC3 và AISC 360 chỉ xét đến việc không có điểm cố kết nào trong

nhịp dầm; nếu sơ đồ thiết kế thực tế có nhiều điểm cố kết thì tách từng đoạn giữa 2 điểm cố kết và xem xét $M_{b,Rd}$ của từng đoạn. Điều này trái ngược với TCVN 5575, khi từ các phiên bản trước đó rất lâu, TCVN 5575 đã cho phép xác định $M_{b,Rd}$ với sơ đồ tính có nhiều điểm cố kết.

Trung tâm kỹ thuật công nghiệp kết cấu thép (CTICM) ở Pháp đã nghiên cứu đưa ra tài liệu [6] cho phép xác định M_{cr} của dầm trong trường hợp có một điểm cố kết giữa nhịp. Vì vậy, nhóm tác giả quyết định tiến hành khảo sát sự sai khác giữa các tiêu chuẩn trong việc đánh giá $M_{b,Rd}$ của một dầm thép tổ hợp chữ I, tiết diện không đổi theo hai tiêu chuẩn khác nhau là TCVN 5575 và EC3 kết hợp với tài liệu của CTICM. Kết quả tính toán $M_{b,Rd}$ theo hai cách tiếp cận này sẽ được so sánh với kết quả mô phỏng được thực hiện bằng phần mềm ABAQUS.

2. Lý thuyết tính toán

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả thực hiện đánh giá khả năng chịu uốn có xét đến sự mất ổn định tổng thể của dầm thép tổ hợp hàn, tiết diện chữ I, sơ đồ dầm đơn giản, một điểm cố kết tại giữa nhịp, chịu tải trọng tập trung (Hình 1) và tải trọng phân bố đều (Hình 2) tác dụng vào cánh trên dầm.

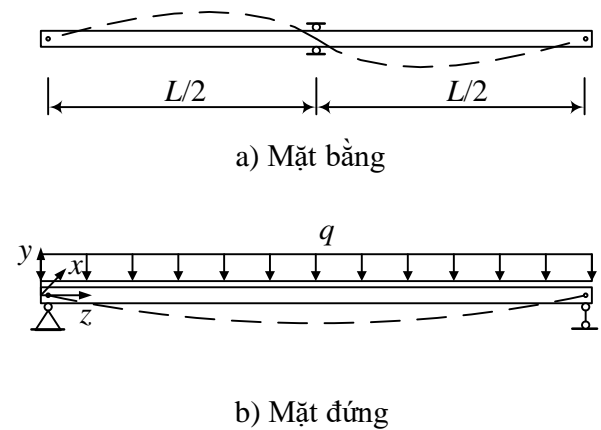


Hình 1. Sơ đồ dầm chịu tải tập trung

2.1 Khả năng chịu uốn của dầm thép theo TCVN 5575

Theo TCVN 5575, khả năng chịu uốn của dầm thép theo điều kiện ổn định tổng thể có một điểm cố kết ngang giữa nhịp được xác định theo công thức:

$$M_{b,Rd}^{TCVN} = \varphi_b W_x \frac{f_y}{\gamma_m} \gamma_c \quad (1)$$



Hình 2. Sơ đồ dầm chịu tải phân bố đều

trong đó: $M_{b,Rd}^{TCVN}$ là khả năng chịu uốn của dầm thép có xét đến sự mất ổn định tổng thể theo TCVN 5575; $\varphi_b, W_x, f_y, \gamma_m, \gamma_c$ lần lượt là hệ số ổn định khi uốn, mô men kháng uốn, hệ số độ tin cậy về vật liệu và hệ số điều kiện làm việc của dầm thép.

Đối với hệ số φ_b là kết quả của một quy trình tính toán nhiều tham số trung gian như: α, ψ và φ_1 . Quy trình này được tóm tắt trong Bảng 1.

Bảng 1. Quy trình xác định hệ số ổn định khi uốn, φ_b

Bước	Tham số tính toán	Tham chiếu [1]
1	$\alpha = k \left(\frac{L_{ef} t_f}{h_m b_f} \right)^2 \left(1 + \frac{0,5 h_m t_w^3}{b_f t_f^3} \right)$	Công thức (F.5)
2	$\psi_1 = 2,25 + 0,07\alpha$, nếu $0,1 \leq \alpha \leq 40$ $\psi_1 = 3,6 + 0,04\alpha - 3,5 \cdot 10^{-5} \alpha^2$, nếu $40 < \alpha \leq 400$	Bảng F.1 Bảng F.1
3	$\psi = 1,75\psi_1$, khi chịu tải trọng tập trung chính giữa nhịp	Bảng F.1
4	$\psi = 1,14\psi_1$, khi chịu tải trọng phân bố đều và chất tải cánh chịu nén $\psi = 1,30\psi_1$, khi chịu tải trọng phân bố đều và chất tải cánh chịu kéo	Bảng F.1 Bảng F.1
5	$\varphi_1 = \psi \frac{I_y}{I_x} \left(\frac{h}{L_{ef}} \right)^2 \frac{E}{f_{yd}}$	Công thức (F.3)
6	$\varphi_b = \varphi_1$, khi $\varphi_1 \leq 0,85$ $\varphi_b = 0,68 + 0,21 \varphi_1$, khi $\varphi_1 > 0,85$	Công thức (F.1) Công thức (F.2)

2.2 Khả năng chịu uốn của dầm thép theo tiêu chuẩn EC3 và tài liệu CTICM

EN 1993-1-1 [2] là tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép thuộc hệ thống Eurocode của châu Âu, được áp dụng rộng rãi tại nhiều quốc gia. Tiêu chuẩn này cung cấp hướng dẫn chi tiết cách xác định khả năng chịu lực của các cấu kiện, trong đó bao gồm cả cấu kiện chịu uốn khi có hoặc không xét đến điều kiện ổn định tổng thể. Trong trường hợp xét đến, khả năng chịu uốn của dầm được xác định theo công thức:

$$M_{b,Rd}^{EC3} = \chi_{LT} W_x \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (2)$$

trong đó: $M_{b,Rd}^{EC3}$ là khả năng chịu uốn của dầm thép có xét đến sự mất ổn định tổng thể theo EC3; $\chi_{LT}, W_x, f_y, \gamma_{M1}$ lần lượt là hệ số suy giảm khi uốn theo điều kiện ổn định tổng thể, mô men kháng uốn, hệ số độ tin cậy về vật liệu của dầm thép.

Trong các tham số ở trên, tham số χ_{LT} là tham số xác định phức tạp nhất, phụ thuộc vào các tham số trung gian như hệ số kể đến sai số hình học của cấu kiện, α_{LT} cũng như giá trị mô men tới hạn M_{cr} . Tuy nhiên, vấn đề cần thảo luận là tiêu chuẩn EC3 hiện hành chưa đề cập đến các công thức cũng như phương pháp xác định giá trị M_{cr} của dầm trong trường hợp có một điểm cố kết giữa nhịp. Việc xác định giá trị đó hiện vẫn cần tham khảo các tài liệu chuyên ngành cũng như thực hiện mô phỏng số, và một trong những tài liệu có thể được đánh giá là nguồn đáng tin cậy và được sử dụng trong nghiên cứu này là tài liệu của CTICM [6]. Trong tài liệu này trình bày rõ giá trị mô men tới hạn phụ thuộc vào hệ số C-hệ số được xác định dựa trên điều kiện liên kết, sơ đồ tải trọng và vị trí chất tải (cánh trên, cánh dưới hay trọng tâm). Qui trình xác định các tham số theo cả hai tài liệu được trình bày ngắn gọn trong Bảng 2.

Bảng 2. Quy trình xác định tham số χ_{LT}

Bước	Tham số tính toán																																	
1	$\kappa_{wt} = \frac{1}{L_0} \sqrt{\frac{EI_w}{GI_t}}$																																	
2	$M_{cr}^0 = \frac{\pi}{L_0} \sqrt{EI_y GI_t}$																																	
3	Tra bảng xác định hệ số C, phụ thuộc vào dạng tải trọng: + Tải trọng phân bố đều <table border="1" style="width:100%; text-align:center;"> <tr> <td>κ_{wt}</td> <td>0</td> <td>0,05</td> <td>0,1</td> <td>0,15</td> <td>0,2</td> <td>0,3</td> <td>0,4</td> <td>0,6</td> <td>0,8</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>2,623</td> <td>2,664</td> <td>2,931</td> <td>3,015</td> <td>2,636</td> <td>2,414</td> <td>2,488</td> <td>2,938</td> <td>3,547</td> <td>4,217</td> </tr> </table> + Tải trọng tập trung giữa nhịp <table border="1" style="width:100%; text-align:center;"> <tr> <td>κ_{wt}</td> <td>0</td> <td>0,05</td> <td>0,1</td> <td>0,15</td> <td>0,2</td> <td>0,3</td> <td>0,4</td> <td>0,6</td> <td>0,8</td> <td>1</td> </tr> </table>	κ_{wt}	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1	C	2,623	2,664	2,931	3,015	2,636	2,414	2,488	2,938	3,547	4,217	κ_{wt}	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1
κ_{wt}	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1																								
C	2,623	2,664	2,931	3,015	2,636	2,414	2,488	2,938	3,547	4,217																								
κ_{wt}	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1																								

Bước	Tham số tính toán										
	C	3,541	3,726	3,091	2,651	2,412	2,283	2,381	2,837	3,436	4,091
4	$M_{cr} = C \cdot M_{cr}^0$										
5	$\Phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + 0,75 \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$										
6	$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - 0,75 \bar{\lambda}_{LT}^2}}$ nhưng $\begin{cases} \chi_{LT} \leq 1 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases}$										

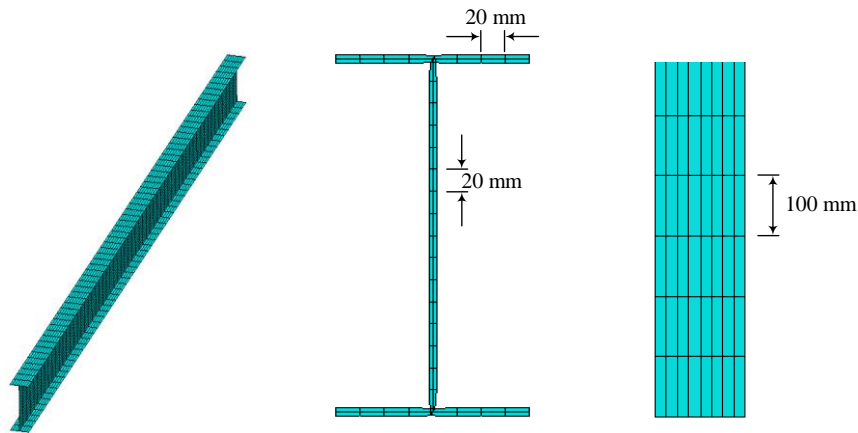
3. Mô phỏng số khả năng chịu uốn và mất ổn định của dầm thép

Trong nghiên cứu này, mô hình phần tử hữu hạn của dầm thép được xây dựng bằng phần mềm Abaqus/CAE [7] – là một trong những phần mềm FEM (mô phỏng bằng các phần tử hữu hạn) có khả năng phân tích đa dạng, bao gồm: phân tích tĩnh, phân tích mất ổn định tuyến tính, phân tích sau mất ổn định... Quy trình mô phỏng hiện tượng mất ổn định của dầm thép trong Abaqus được tiến hành như sau: Đầu tiên, cần thực hiện phân tích mất ổn định tuyến tính để xác định dạng mất ổn định ban đầu. Sau đó, dạng mất ổn định này được nhân với một biên độ, gán làm sai số hình học ban đầu cho mô hình. Cuối cùng, phân tích sau mất ổn định phi tuyến được thực hiện trên mô hình đã bao gồm cả

sai số hình học và ứng suất dư để xác định được tải trọng gây mất ổn định thực tế.

Để mô phỏng các bản cánh và bản bụng, trong bài báo sử dụng phần tử tám S4R với 4 nút và 6 bậc tự do tại mỗi nút. Phần tử này sử dụng tích phân suy giảm và công thức biến dạng lớn, giúp giảm đáng kể thời gian tính toán mà vẫn duy trì độ chính xác cần thiết cho kết quả mô phỏng, vượt trội hơn so với các phần tử khối như C3D4, C3D8 hay các phần tử tám có nhiều nút hơn (S8, S9).

Nhằm cân bằng giữa thời gian tính toán và độ hội tụ theo thông số nhịp dầm và kích thước tiết diện trong Bảng 5, kích thước lưới được thiết lập là 20 mm trên mặt cắt tiết diện và 100 mm dọc theo chiều dài dầm (Hình 3). Các đường hàn tại vị trí giao nhau giữa bản cánh và bản bụng được bỏ qua vì chúng ảnh hưởng không đáng kể đối với mô men kháng uốn của dầm.



Hình 3. Chia lưới phần tử 20 mm x 100 mm

3.1 Đặc trưng vật liệu

Trong nghiên cứu này nhóm tác giả sử dụng mô hình vật liệu đàn-dẻo tuyệt đối, tức

là mô hình quan hệ ứng suất σ -biến dạng ϵ được mô tả thông qua giá trị f_y , E như trong Bảng 3.

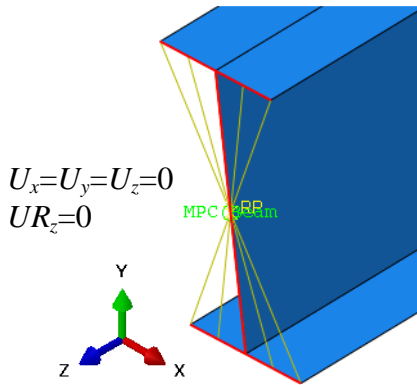
Bảng 3. Thông số vật liệu của các dầm thép khảo sát

Vị trí	Mác thép	E (MPa)	f_y (MPa)
Bản bụng	S235	210000	235
Bản cánh	S235	210000	235

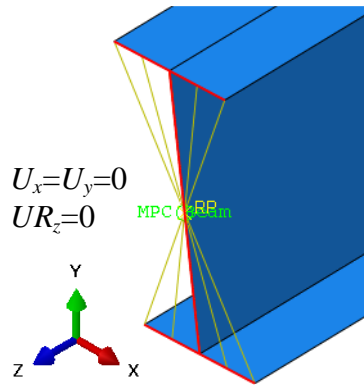
3.2 Điều kiện biên và chất tải

Trong mô hình phần tử hữu hạn, sơ đồ dầm đơn giản với một đầu là gối cố định, đầu còn lại là gối di động được thiết lập điều kiện biên như Hình 4 và Hình 5. Cụ thể, mỗi tiết diện đầu dầm được liên kết với một điểm tham chiếu đại diện (RP) nằm tại trọng tâm tiết diện bằng cách sử dụng ràng buộc MPC (Multi-Point Constraints – ràng buộc đa điểm). Với gối cố định, RP được thiết lập sao cho các chuyển vị tịnh tiến theo phương

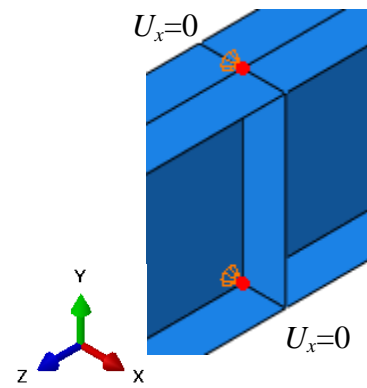
ngang, đứng và dọc trục (U_x, U_y, U_z) cùng với chuyển vị xoắn quanh trục z (UR_z) bị ngăn cản hoàn toàn. RP của gối di động được thiết lập tương tự như gối cố định, nhưng chuyển vị theo phương dọc trục (U_z) được cho phép, mô phỏng liên kết tựa trượt. Điểm cố kết ngang tại giữa nhịp được mô hình thành hai điểm nằm giao giữa bản bụng và bản cánh, chuyển vị ngang (U_x) của các điểm này được ngăn cản, đồng thời cũng loại bỏ khả năng xoắn của dầm tại các vị trí này.



Hình 4. Gối cố định



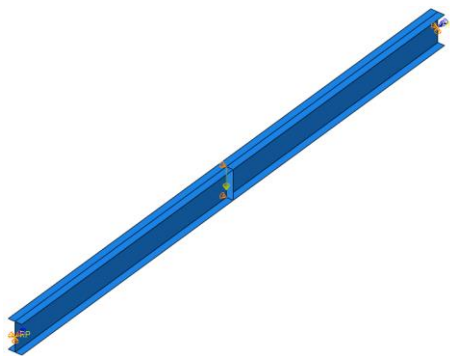
Hình 5. Gối di động



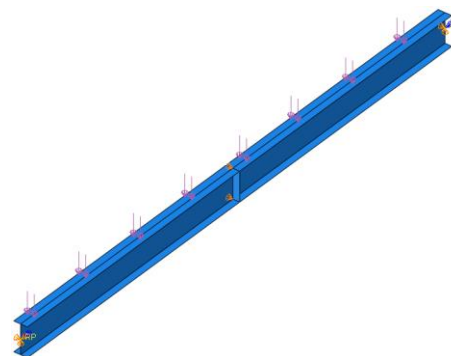
Hình 6. Điểm cố kết ngang

Cuối cùng tải trọng tập trung và tải trọng phân bố đều được khai báo lên bản cánh trên của dầm,

riêng tải trọng tập trung được khai báo tại vị trí cố kết như Hình 7 và Hình 8.



Hình 7. Khai báo tải trọng tập trung

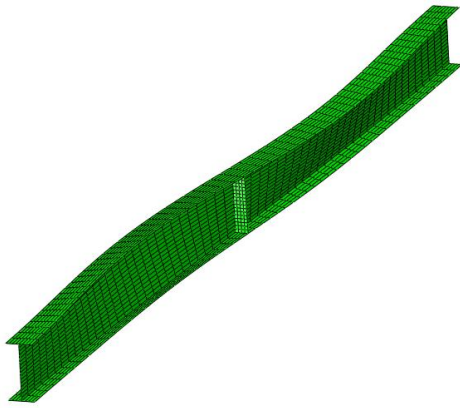


Hình 8. Khai báo tải trọng phân bố đều

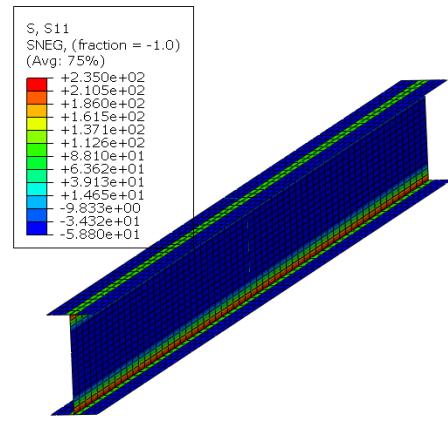
3.3 Sai số hình học và ứng suất dư

Dầm thép có thể tồn tại các biến dạng ban đầu bao gồm sai số hình học và ứng suất dư. Trong khi sai số hình học do quá trình chế tạo, vận chuyển và lắp đặt làm cho dầm thép có thể bị cong hoặc vênh, thì ứng suất dư phát sinh từ sự làm nguội không

đồng đều sau quá trình cán nóng hoặc từ tác động nhiệt của quá trình hàn đối với dầm tổ hợp. Cả sai số hình học (Hình 9) và ứng suất dư (Hình 10) đều có ảnh hưởng đáng kể đến khả năng chống mất ổn định tổng thể của dầm thép, do đó việc mô phỏng các yếu tố này trong mô hình phần tử hữu hạn là cần thiết.



Hình 9. Mô phỏng sai số hình học

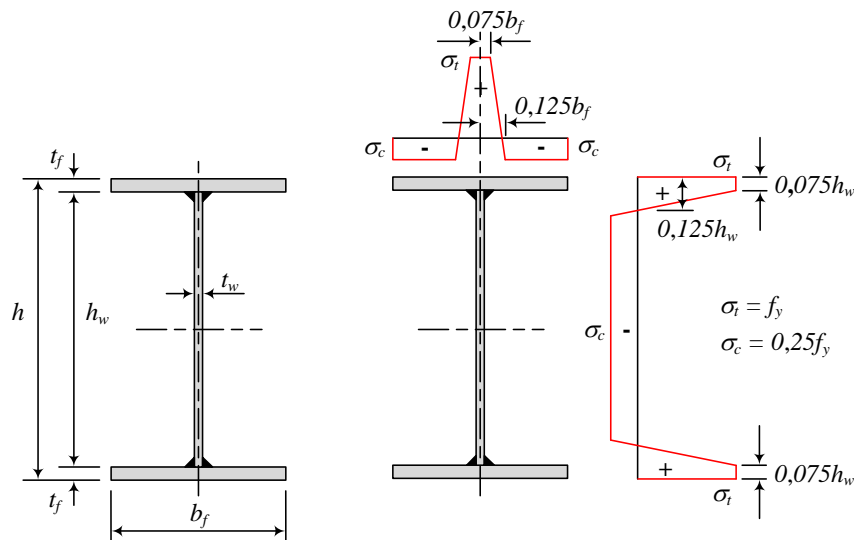


Hình 10. Mô phỏng ứng suất dư

Để khai báo sai số hình học, ban đầu cần phân tích ổn định tuyến tính để xác định dạng mất ổn định tổng thể. Dạng mất ổn định tổng thể đầu tiên, ứng với trị riêng (Eigenvalue) dương, được sử dụng để khai báo sai số hình học ban đầu cho mô hình như Hình 9. Độ lớn của sai số được lấy bằng $L/1000$ [8] (L là chiều dài dầm).

Trên mặt cắt tiết diện sự phân bố của ứng suất dư có dạng phức tạp và không đồng đều,

phụ thuộc chủ yếu vào phương pháp chế tạo. Đối với dầm thép tổ hợp hàn, ứng suất dư tập trung rất cao tại các vùng lân cận mối hàn như Hình 11 [9]. Vùng vật liệu gần mối hàn chịu ứng suất kéo dư lớn, có thể đạt đến giới hạn chảy của vật liệu. Để cân bằng với lực kéo này, các phần còn lại của cánh và bụng dầm sẽ chịu ứng suất nén dư. Dọc theo chiều dài dầm, sự phân bố này được xem là không đổi.



Hình 11. Sự phân bố của ứng suất dư trên mặt cắt tiết diện

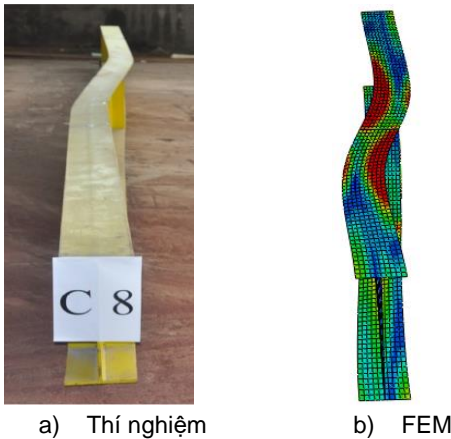
Ứng suất dư trong mô hình được khai báo bằng cách gán giá trị trực tiếp vào các phần tử lưới của mô hình thông qua chức năng “predefined field – trường xác định trước” trong Abaqus. Giá trị ứng suất dư tại mỗi phần tử lưới được gán bằng giá trị trung bình tại mỗi cặp điểm tương ứng trên dải tiết diện. Hình 10 thể hiện một cấu kiện dầm sau khi khai báo ứng suất dư.

3.4 Phương pháp phân tích

Để giải quyết các bài toán phi tuyến hình học có hiện tượng mất ổn định, nhóm nghiên cứu sử dụng

phương pháp phân tích “Static, Riks (Tĩnh, Riks)” [7]. Đây là một dạng phân tích tĩnh nâng cao, thay vì chỉ tăng tải trọng, phương pháp Riks xem cả tải trọng và chuyển vị là các ẩn số. Nó sẽ di chuyển dọc theo đường cong cân bằng trong không gian tải trọng - chuyển vị, thuật toán cho phép vượt qua các điểm tới hạn và tiếp tục tìm ra các trạng thái cân bằng sau mất ổn định. Điều này đặc biệt hữu ích khi cần nghiên cứu ứng xử sau mất ổn định (post-buckling) của cấu kiện.

Trong nghiên cứu này, các tham số của bước giải được thiết lập để đảm bảo mô hình có thể hội tụ một cách ổn định với nhiều trường hợp dầm khác nhau. Cụ thể, số bước tối đa được đặt là 1000 để giải quyết các hiện tượng phi tuyến phức tạp. Đồng thời, kích thước bước gia tăng được điều chỉnh linh hoạt với giá trị ban đầu là 0,01, tối thiểu là 10^{-5} , và tối đa là 0,1. Những thiết lập này giúp quá trình mô phỏng diễn ra một cách tin cậy, ngăn chặn việc dừng đột ngột của bài toán và cho phép thu được toàn bộ ứng xử của dầm dưới tác dụng của tải trọng.

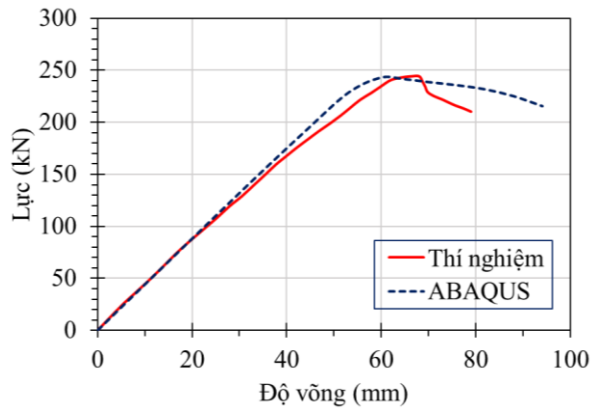


Hình 12. Biến dạng của dầm C8 trong thí nghiệm và FEM

Có thể nhận thấy kiểu biến dạng của mô hình phần tử hữu hạn khá giống với kết quả thí nghiệm. Hơn nữa, đường cong mối quan hệ giữa lực và độ võng của thí nghiệm gần như trùng khớp với mô hình Abaqus. Tại thời điểm dầm mất khả năng chịu uốn, giá trị lực phá hoại của thí nghiệm và mô hình FEM rất sát nhau, với thí nghiệm là 243,61 kN và mô hình FEM là 243,06 kN. Điều này cho thấy mô hình FEM có độ tin cậy cao, có thể sử dụng để nghiên cứu mà không cần thí nghiệm.

3.5 Kiểm chứng mô hình phân tích số

Để kiểm chứng tính đúng đắn của mô hình phần tử hữu hạn, bài báo đã mô phỏng số lại thí nghiệm của Xiong và cs. [10], thí nghiệm thực hiện với dầm thép C8 được tổ hợp hàn từ mác thép Q460GJ, tiết diện chữ I có kích thước $h \times b_f \times t_w \times t_f$ là $450 \times 180 \times 8 \times 10$ mm, chiều dài nhịp L là 8 m. Hình 12 và Hình 13 thể hiện biến dạng sau thí nghiệm và biểu đồ mối quan hệ giữa lực – độ võng giữa nhịp của dầm C8.



Hình 13. Biểu đồ lực – độ võng giữa nhịp của dầm C8 trong thí nghiệm và FEM

4. Ví dụ tính toán và kết quả khảo sát

4.1 Ví dụ tính toán

Thực hiện xác định khả năng chịu uốn của dầm theo điều kiện ổn định tổng thể theo TCVN 5575 ($M_{b,Rd}^{TCVN}$), EC3 ($M_{b,Rd}^{EC3}$) và Abaqus (M_{FEM}) thông qua ví dụ cụ thể như sau: Sơ đồ dầm đơn giản, chịu tải trọng phân bố đều và có một điểm cố kết ngang tại giữa nhịp. Chiều dài nhịp dầm L là 6 m, dầm tiết diện chữ I tổ hợp hàn có kích thước $h \times b_f \times t_w \times t_f$ là $330 \times 150 \times 6 \times 8$ mm, vật liệu sử dụng như trong Bảng 3. Kết quả tính toán được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 4. Kết quả ví dụ tính toán

Tiêu chuẩn	Kết quả tính toán
TCVN 5575	- Hệ số $\alpha = 2,75$; $\psi_1 = 2,44$; $\psi = 2,78$; $\varphi_1 = 1,745$; $\varphi_b = 1,0$ $\Rightarrow M_{b,Rd}^{TCVN} = 94,9$ kNm.
EC3	- Hệ số $\kappa_{wt} = 0,673$ - Hệ số $C = 3,16$ - Mô men tới hạn $M_{cr}^0 = 79$ kNm; $M_{cr} = 249,5$ kNm - Hệ số $\Phi_{LT} = 0,806$; $\chi_{LT} = 0,753$ $\Rightarrow M_{b,Rd}^{EC3} = 94,5$ kNm.
Abaqus	- Tải trọng tham chiếu 1 N/mm ² - Mode 1: Eigenvalue = $0,53018$ - Độ lớn sai số hình học: $L/1000 = 6$ - Phân bố ứng suất dư như Hình 10. $\Rightarrow M_{FEM} = 111,4$ kNm.

KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

Để dàng nhận thấy từ kết quả tính toán rằng khả năng chịu uốn có xét đến sự mất ổn định tổng thể $M_{b,Rd}$ theo TCVN 5575 và EC3 là như nhau, xấp xỉ 95 kNm. Tuy nhiên, khi so sánh với kết quả từ mô phỏng số thì giá trị theo cả hai tiêu chuẩn đều nhỏ hơn, chỉ bằng 85,3%.

4.2 Kết quả khảo sát

Nhằm so sánh khả năng chịu uốn của dầm theo điều kiện ổn định tổng thể theo TCVN 5575,

EC3 và Abaqus, nhóm tác giả tiến hành khảo sát một loạt các ví dụ trên sơ đồ dầm đơn giản, chịu tải trọng tập trung cũng như tải trọng phân bố đều cùng với đó là chiều dài nhịp, chiều cao tiết diện thay đổi theo các tỷ số $L/h = 6; 12; 18$. Thông số hình học của các dầm thép khảo sát và kết quả tính toán được trình bày lần lượt trong Bảng 5 và Bảng 6.

Bảng 5. Thông số hình học của các dầm thép khảo sát

Kí hiệu dầm	L (m)	$L_0=L/2$ (m)	h (mm)	b_f (mm)	t_w (mm)	t_f (mm)
B1	6,0	3,0	1000	300	10	12
B2	6,0	3,0	500	200	8	10
B3	6,0	3,0	330	150	6	8
B4	7,5	3,75	1250	300	12	14
B5	7,5	3,75	625	200	8	10
B6	7,5	3,75	420	200	6	8
B7	9,0	4,5	1500	350	14	16
B8	9,0	4,5	750	250	8	12
B9	9,0	4,5	500	200	8	10
B10	12,0	6,0	2000	400	18	22
B11	12,0	6,0	1000	300	10	12
B12	12,0	6,0	670	200	8	10
B13	15,0	7,5	2500	500	22	25
B14	15,0	7,5	1250	300	12	14
B15	15,0	7,5	830	300	8	12

Bảng 6. Khả năng chịu uốn của dầm thép chữ I có một điểm cố kết

Kí hiệu dầm	Dạng tải trọng	$M_{b,Rd}^{TCVN}$ (kNm)	$M_{b,Rd}^{EC3}$ (kNm)	M_{FEM} (kNm)	$\frac{M_{b,Rd}^{EC3}}{M_{b,Rd}^{TCVN}}$	$\frac{M_{FEM}}{M_{b,Rd}^{TCVN}}$	$\frac{M_{FEM}}{M_{b,Rd}^{EC3}}$
B1	Tập trung	1020,0	1000,2	1369,5	0,98	1,34	1,37
B2	Tập trung	252,9	283,8	346,4	1,12	1,37	1,22
B3	Tập trung	94,9	93,4	127,2	0,98	1,34	1,36
B4	Tập trung	1622,1	1452,8	2156,3	0,90	1,33	1,48
B5	Tập trung	339,0	328,7	452,4	0,97	1,33	1,38
B6	Tập trung	161,9	148,6	215,9	0,92	1,33	1,45
B7	Tập trung	2647,4	2314,4	3471,0	0,87	1,31	1,50
B8	Tập trung	575,9	506,2	760,2	0,88	1,32	1,50

KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

Kí hiệu dầm	Dạng tải trọng	$M_{b,Rd}^{TCVN}$ (kNm)	$M_{b,Rd}^{EC3}$ (kNm)	M_{FEM} (kNm)	$M_{b,Rd}^{EC3} / M_{b,Rd}^{TCVN}$	$M_{FEM} / M_{b,Rd}^{TCVN}$	$M_{FEM} / M_{b,Rd}^{EC3}$
B9	Tập trung	252,9	223,6	321,9	0,88	1,27	1,44
B10	Tập trung	5728,8	4705,0	7296,9	0,82	1,27	1,55
B11	Tập trung	1020,0	785,7	1225,2	0,77	1,20	1,56
B12	Tập trung	335,4	238,4	349,1	0,71	1,04	1,46
B13	Tập trung	10514,2	8424,1	13230,5	0,80	1,26	1,57
B14	Tập trung	1551,4	1060,3	1561,8	0,68	1,01	1,47
B15	Tập trung	754,1	544,1	815,8	0,72	1,08	1,50
B1	Pb. Đều	1020,0	1008,5	1214,3	0,99	1,19	1,20
B2	Pb. Đều	252,9	286,2	321,1	1,13	1,27	1,12
B3	Pb. Đều	94,9	94,5	111,4	1,00	1,17	1,18
B4	Pb. Đều	1622,1	1467,5	1839,8	0,90	1,13	1,25
B5	Pb. Đều	339,0	332,5	381,6	0,98	1,13	1,15
B6	Pb. Đều	161,9	150,1	190,4	0,93	1,18	1,27
B7	Pb. Đều	2647,4	2338,9	2908,8	0,88	1,10	1,24
B8	Pb. Đều	575,9	511,5	643,8	0,89	1,12	1,26
B9	Pb. Đều	241,8	226,8	273,2	0,94	1,13	1,20
B10	Pb. Đều	5728,8	4760,4	5627,5	0,83	0,98	1,18
B11	Pb. Đều	1000,6	795,9	1008,5	0,80	1,01	1,27
B12	Pb. Đều	255,7	243,2	290,2	0,95	1,14	1,19
B13	Pb. Đều	10514,2	8527,3	10131,5	0,81	0,96	1,19
B14	Pb. Đều	1395,1	1077,2	1268,6	0,77	0,91	1,18
B15	Pb. Đều	677,7	551,9	676,1	0,81	1,00	1,22

Căn cứ vào kết quả được trình bày trong Bảng 7, khả năng chịu uốn của dầm theo điều kiện ổn định tổng thể tính toán theo EC3 luôn nhỏ hơn theo TCVN 5575 trong hầu hết các trường hợp. Trong khi tỷ số giữa $M_{b,Rd}^{EC3}$ với $M_{b,Rd}^{TCVN}$ có giá trị trung bình (\bar{x}) lớn nhất là 0,908 với hệ số biến thiên (CoV) là 0,106 đối với trường hợp dầm chịu tải trọng phân bố đều, giá trị \bar{x} và CoV nhỏ nhất lần lượt là 0,879 và 0,075 khi dầm có tỷ lệ

giữa nhịp và chiều cao không lớn ($L/h = 6$). Ngoài ra, khi tính toán bằng phương pháp mô phỏng số, khả năng chịu uốn của dầm luôn cao hơn khi tính theo cả hai tiêu chuẩn. So sánh với tính toán theo mô phỏng số, khả năng chịu uốn theo TCVN 5575 thấp hơn khoảng 9,4% trong khi giá trị này là 20,8% nếu tính theo EC3 với hệ số CoV lần lượt là 0,091 và 0,037 trong trường hợp dầm chịu tải trọng phân bố đều. Điều đó nói lên rằng, khi tính toán theo EC3 là quá an toàn so với tính toán theo TCVN 5575.

Bảng 7. So sánh kết quả theo các phương pháp tính toán

Giá trị so sánh	M_{EC3} / M_{TCVN}	M_{FEM} / M_{TCVN}	M_{FEM} / M_{EC3}
Trường hợp: Toàn bộ dầm khảo sát			
\bar{x}	0,888	1,174	1,331
CoV	0,122	0,115	0,108

KẾT CẤU - CÔNG NGHỆ XÂY DỰNG

Giá trị so sánh	M_{EC3}/M_{TCVN}	M_{FEM}/M_{TCVN}	M_{FEM}/M_{EC3}
Trường hợp: Chịu tải tập trung			
\bar{x}	0,868	1,255	1,455
CoV	0,138	0,094	0,063
Trường hợp: Chịu tải phân bố đều			
\bar{x}	0,908	1,094	1,208
CoV	0,106	0,091	0,037
Trường hợp: $L/h = 6$			
\bar{x}	0,879	1,188	1,355
CoV	0,075	0,117	0,117
Trường hợp: $L/h = 12$			
\bar{x}	0,899	1,166	1,310
CoV	0,168	0,136	0,120
Trường hợp: $L/h = 18$			
\bar{x}	0,885	1,168	1,329
CoV	0,116	0,100	0,096

5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, khả năng chịu uốn của dầm thép có một điểm cố kết ngang giữa nhịp theo điều kiện ổn định tổng thể đã được xác định dựa trên tiêu chuẩn TCVN 5575:2024 và Eurocode 3, sau đó so sánh với kết quả tính toán mô phỏng số. Kết quả thu được chỉ ra rằng đối với dầm đơn giản chịu tải trọng tập trung và tải trọng phân bố đều, khả năng chịu uốn của dầm tính toán theo EC3 thấp hơn so với TCVN 5575. Khi đối chiếu với kết quả mô phỏng số, việc tính toán theo EC3 được đánh giá là thiên về an toàn so với thực tế. Trong tương lai, nhóm tác giả sẽ mở rộng phạm vi nghiên cứu cho dầm trên các sơ đồ tính, sơ đồ tải trọng khác nhau theo cả hai tiêu chuẩn nhằm đánh giá được sự khác biệt toàn diện về khả năng chịu uốn và mức độ an toàn tương đối giữa hai tiêu chuẩn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] TCVN 5575:2024 (2024). *Kết cấu thép - Tiêu chuẩn thiết kế*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [2] BS EN 1993-1-1:2005 (2005). *Eurocode 3 - Design of steel structures; Part 1-1: General rules and rules for buildings*. UK.
- [3] ANSI/AISC 360-22 (2022). *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, IL 60601, US.
- [4] Trahair, N. S., Bradford, M. A., Nethercot, D., & Gardner, L. (2017). *The behaviour and design of steel structures to EC3*. Taylor & Francis, UK.
- [5] H. Djalaly (1974), "Calcul de la résistance ultime au déversement", *Constr. Met.*, vol. 11, no. 1.
- [6] CTICM (2012). *Déversement des poutres en acier*. CTICM, Saint-Aubin, France.
- [7] ABAQUS (2014), "*Abaqus/CAE user's guide*". Dassault Systèmes, US.
- [8] Somja, H., & Boissonnade, N. (2012). *Influence of Imperfections in FEM Modeling of Lateral Torsional Buckling*. In Annual Stability Conference, Structural Stability Research Council (pp. 741-752).
- [9] ECCS, T. (1984). *Ultimate limit state calculation of sway frames with rigid joints*. Technical Committee 8-Structural Stability Technical Working Group 8.2-System, 20.
- [10] Xiong, G., Kang, S. B., Yang, B., Wang, S., Bai, J., Nie, S.,... & Dai, G. (2016). *Experimental and numerical studies on lateral torsional buckling of welded Q460GJ structural steel beams*. *Engineering Structures*, 126, 1-14.