

CÔNG THỨC XÁC ĐỊNH ỨNG SUẤT ỔN ĐỊNH CỤC BỘ CỦA THÉP TIẾT DIỆN CHỮ I CHỊU NÉN ĐỀU

FORMULAS DETERMINING THE LOCAL CRITICAL STRESS OF I-SHAPE SECTIONS UNDER AXIAL COMPRESSION

CHIÊM ĐẶNG TỬ QUỐC^{a*}, BÙI HÙNG CƯỜNG^b

^bkhóa Xây dựng dân dụng và công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

*Tác giả đại diện: Email: tuquoc4171@gmail.com

Ngày nhận 02/6/2024, Ngày sửa 26/6/2024, Chấp nhận 29/6/2024

<https://doi.org/10.59382/j-ibst.2024.vi.vol2-4>

Tóm tắt: Thanh thép tiết diện chữ I cần kiểm tra về điều kiện ổn định cục bộ khi thiết kế. Khi xảy ra hiện tượng mất ổn định cục bộ, có sự tương tác giữa các bản thép tạo nên tiết diện. Các tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép hiện nay đã đưa ra công thức để xác định ứng suất tới hạn cục bộ cho cấu kiện thép chữ I nhưng không kể đến sự tương tác này. Bài báo đề xuất các công thức xác định ứng suất gây mất ổn định cục bộ tới hạn của thanh thép tiết diện chữ I chịu nén đúng tâm với các tỷ số chiều cao và bề rộng tiết diện, chiều dày bản cánh và bản bụng thay đổi. Dùng phương pháp dải hữu hạn bán giải tích trong chương trình CUFSM để xác định ứng suất tới hạn cục bộ, từ kết quả thu được đề xuất những công thức xác định hệ số ổn định kể đến sự tương tác giữa bản bụng và bản cánh khi bị mất ổn định cục bộ dựa trên nghiên cứu tham số. Độ tin cậy của các công thức đề xuất được đảm bảo khi so sánh với những kết quả đã được công bố và kết quả của phương pháp số.

Từ khóa: Mất ổn định cục bộ, ổn định cục bộ, ứng suất tới hạn cục bộ, tiết diện I, chịu nén đúng tâm.

Abstract: The I-shaped steel sections should be checked for local buckling conditions during design. When local buckling occurs, there is interaction between thin-walled components of the section. Design codes have provided formulas to determine local critical stress for I-shaped steel sections, but they do not account for this interaction. This paper proposes equations for determining the local ultimate stress of I-shaped sections under axial compression, considering web and flange interaction when ratios between the height and width of the section, the flange thickness and web thickness change. The local critical stress is determined by the semi-analytical finite strip method carried out in the CUFSM program. The equations are proposed based

on the parametric study. The reliability of formulas is confirmed when comparison to published and numerical results.

Keywords: Local buckling, local stability, local critical stress, I-shape sections, axial compression.

1. Đặt vấn đề

Thép chữ I được sử dụng phổ biến trong kết cấu thép nhà dân dụng, nhà công nghiệp, cầu và kết cấu nhịp lớn. Để thép chữ I đảm bảo được khả năng chịu lực thì điều kiện ổn định cục bộ phải được kiểm tra, khi bản cánh hoặc bản bụng của thép chữ I mất ổn định cục bộ thì có sự tương tác giữa các bản này. Trahair [1] đề xuất công thức xác định ứng suất tới hạn cục bộ cho thép chữ I và thép hộp chữ nhật rỗng chịu nén đúng tâm, công thức được trình bày như (1) có hệ số ổn định k_σ . Nhưng Trahair [1] không đưa ra công thức xác định hệ số ổn định mà dùng phương pháp tra biểu đồ.

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

trong đó: σ_{cr} là ứng suất tới hạn cục bộ, k_σ là hệ số ổn định, E là mô đun đàn hồi của thép, ν là hệ số Poisson, t là chiều dày bản cánh, b là bề rộng bản cánh.

Gần đây, một nhánh của phương pháp phần tử hữu hạn là phương pháp dải hữu hạn bán giải tích được sáng tạo bởi Cheung [2] khi dùng lý thuyết tấm của Kirchhoff. Phương pháp này sử dụng hàm dạng là các hàm đa thức và hàm điều hòa theo phương dọc trục và điều này rất hiệu quả trong việc tính toán cho các cấu kiện có tiết diện không đổi. Từ phương pháp dải hữu hạn bán giải tích nhiều tác giả đã phát triển một số phương pháp số để phân tích thanh thành mỏng. Chương trình CUFSM [3] đã ứng dụng lý thuyết phương pháp dải hữu hạn bán giải tích để phân tích ổn định đàn hồi tuyến tính của thanh thành

mỏng hai đầu liên kết khớp chịu nén đúng tâm hoặc chịu uốn thuần túy hoặc chịu nén uốn đồng thời. Phân tích ổn định đàn hồi tám và thanh thành mỏng bằng phương pháp dải hữu hạn bán giải tích, xây dựng ma trận độ cứng, ma trận hình học của dải hữu hạn cũng được thực hiện bởi [4,5]. Chương trình CUFISM cũng được tác giả [6] ứng dụng để xác định ứng suất mất ổn định của tiết diện chữ C. Bên cạnh đó, nhiều tác giả đã nghiên cứu về sự tương tác giữa bản bụng và bản cánh khi tiết diện mất ổn định cục bộ, Seif và Schafer [7] đề xuất công thức xác định hệ số ổn định cho các tiết diện chữ I, tiết diện chữ C, thép góc, tiết diện chữ T và tiết diện chữ nhật rỗng có kể đến sự tương tác giữa bản bụng và bản cánh. Ngoài ra, [8] cũng đề xuất hệ số tương tác để xác định ứng suất tới hạn cục bộ cho những thanh thép có tiết diện khác nhau, [9] cũng quan tâm ổn định cục bộ của tiết diện tổ hợp hàn chữ nhật và chữ I dùng thép cường độ cao chịu nén đúng tâm. Ổn định tổng thể của dầm thép với dạng tiết diện chữ I hai bụng tổ hợp hàn có hai trục đối xứng cũng được nghiên cứu bởi [10] và [11] đã tiến hành thí nghiệm kết hợp với phương pháp số để khảo sát ứng xử và đánh giá khả năng chịu lực của cột thép tiết diện chữ I hai bụng tổ hợp hàn.

Một số tiêu chuẩn [12,13] đưa ra công thức xác định ứng suất gây mất ổn định cục bộ tới hạn cho cấu kiện chịu nén đúng tâm thiên về an toàn khi bỏ qua sự tương tác giữa bản cánh và bản bụng (xem liên

kết giữa bản bụng và bản cánh là khớp). Ứng suất tới hạn cục bộ được xác định chính xác thì cần dùng đến phương pháp số mà phương pháp dải hữu hạn bán giải tích là một phương pháp phù hợp cho việc này. Trong nghiên cứu này, chương trình CUFISM 4.05 được dùng để xác định ứng suất tới hạn cục bộ của thanh thép tiết diện chữ I, sau đó dùng nghiên cứu tham số và xử lý xác suất thống kê để đưa ra công thức xác định hệ số ổn định, từ đó xác định được ứng suất tới hạn cục bộ thông qua biểu thức giải tích (1).

2. Công thức đề xuất xác định hệ số ổn định

Trong phần này, dùng chương trình CUFISM để phân tích ổn định cho các thanh thép tiết diện chữ I chịu nén đúng tâm, sau đó dùng phương pháp nghiên cứu tham số và xử lý xác suất thống kê cho các kết quả thu được từ việc phân tích, từ đó đưa ra phương trình đề xuất để xác định hệ số ổn định. Để đánh giá độ chính xác và tính ứng dụng của công thức đề xuất thì kết quả tính toán được so sánh với kết quả của phương pháp số và một số kết quả đã được công bố gần đây.

2.1 Chiều dày bản bụng và bản cánh bằng nhau

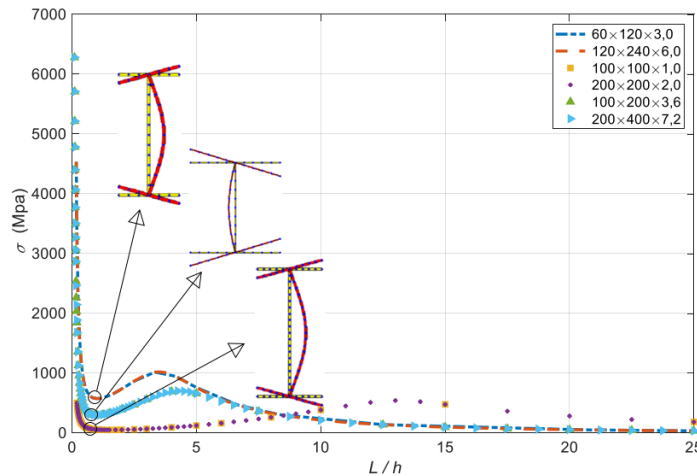
Dùng chương trình CUFISM phân tích ổn định cho các thanh thép tổ hợp hàn tiết diện chữ I với ba nhóm mẫu khảo sát khác nhau và kích thước tiết diện được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Kích thước hình học của các mẫu khảo sát

		b_f (mm)	h_w (mm)	t_f (t_w) (mm)	L (mm)
Nhóm 1	Mẫu 1	60	120	2,0	5000
	Mẫu 2	120	240	4,0	10000
Nhóm 2	Mẫu 1	100	100	2,0	5000
	Mẫu 2	200	200	4,0	10000
Nhóm 3	Mẫu 1	100	200	3,6	5000
	Mẫu 2	200	400	7,2	10000

Kết quả phân tích cho các mẫu khảo sát được trình bày trong Hình 1 cho thấy khi tỷ số chiều dài với chiều cao bằng nhau thì ứng suất ổn định là như nhau, qua đó có thể nhận định ứng suất tới hạn cục

bộ (điểm cực tiểu trên Hình 1) không phụ thuộc vào tỷ số L/h mà bị ảnh hưởng chủ yếu bởi bề rộng bản cánh, chiều cao bản bụng, chiều dày bản cánh và chiều dày bản bụng.



Hình 1. Kết quả phân tích ứng suất ổn định với tỷ số L/h trong chương trình CUFSM

Trong công thức (1) bị ảnh hưởng chủ yếu bởi hệ số ổn định và tỷ số t/b , tuy nhiên do ứng suất ổn định không phụ thuộc vào tỷ số L/h vì thế khi tính toán ứng suất tới hạn cục bộ phải xem xét tỷ số h_w/b_f . Công thức đề xuất xác định hệ số ổn định có dạng như sau:

$$\begin{cases} k_\sigma = a_1 e^{-b_1(h_w/b_f)} & \text{khi } 1,0 \leq h_w/b_f < 3,0 \\ k_\sigma = a_2 (h_w/b_f)^{-b_2} & \text{khi } 3,0 \leq h_w/b_f \leq 5,0 \end{cases} \quad (2)$$

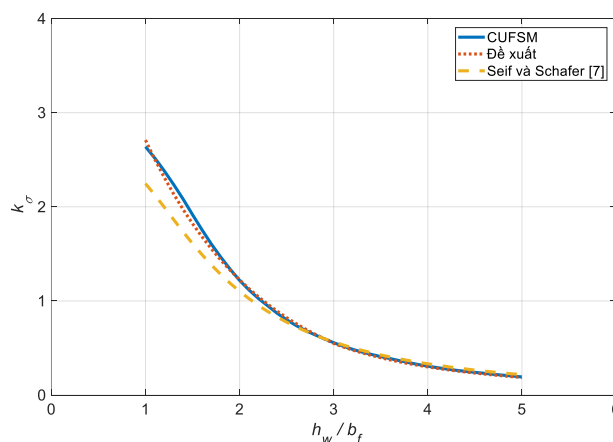
trong đó: e là hằng số và bằng 2,718; a_1 , a_2 , b_1 , b_2 là các biến cần xác định; h_w là chiều cao bản bụng; b_f là bề rộng bản cánh.

Bởi vì ứng suất tới hạn cục bộ không bị ảnh hưởng bởi tỷ số L/h , vì thế khi phân tích ổn định cục bộ đối với thanh thép tiết diện chữ I thì không cần phân tích sự thay đổi chiều dài của thanh mà chỉ phân tích đối với sự thay đổi của tiết diện như bề rộng, chiều cao, chiều dày bản cánh và chiều dày bản

bụng. Giới hạn trong nghiên cứu này đối với các tỷ số được thay đổi như sau: đối với tỷ số chiều cao với bề rộng là $1,0 \leq h_w/b_f \leq 5,0$ khi chiều cao thay đổi với bước nhảy là 0,1 và xét tỷ số chiều dày bản cánh và chiều dày bản bụng bằng nhau.

Ứng suất tới hạn cục bộ được xác định bằng chương trình CUFSM, từ các kết quả có được thay vào công thức (1) để xác định hệ số ổn định, với mỗi tỷ số h_w/b_f thì có hệ số ổn định tương ứng. Sau đó dùng phương pháp bình phương bé nhất để đưa ra đường cong phù hợp cho mỗi quan hệ k_σ và tỷ số h_w/b_f từ đó các hệ số trong công thức (2) sẽ được xác định dựa vào đường cong này và có giá trị lần lượt là $a_1 = 6,0$; $b_1 = 0,795$; $a_2 = 5,5$; $b_2 = 2,1$. Công thức đề xuất được trình bày cụ thể như sau:

$$\begin{cases} k_\sigma = 6e^{-0,795(h_w/b_f)} & \text{khi } 1,0 \leq h_w/b_f < 3,0 \\ k_\sigma = 5,5(h_w/b_f)^{-2,1} & \text{khi } 3,0 \leq h_w/b_f \leq 5,0 \end{cases} \quad (3)$$



Hình 2. Mối quan hệ k_σ và tỷ số h_w/b_f khi chiều dày bản bụng và bản cánh bằng nhau

Hình 2 trình bày kết quả tính toán hệ số ổn định cho thanh thép tiết diện chữ I với những phương pháp khác nhau. Từ Hình 2 có thể thấy đường cong

đề xuất rất gần với đường cong của phương pháp số (kết quả trong chương trình CUFSM) khi tỷ số h_w/b_f thay đổi từ 1,0 đến 5,0, trong khi đó đường cong dự

đoán của Seif và Schafer [7] có sự khác biệt rõ ràng khi tỷ số h_w / b_f thay đổi từ 1,0 đến 2,5. Để đánh giá độ tin cậy của công thức đề xuất thì kết quả tính toán

được so sánh với kết quả của chương trình CUFSM thông qua giá trị trung bình (μ), hệ số biến thiên (CoV) và hệ số xác định (R^2).

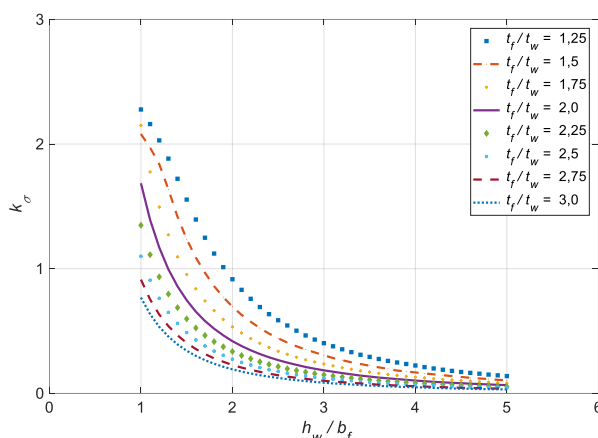
Bảng 2. Kết quả tính toán hệ số ổn định cho tỷ số $t_f / t_w = 1,0$

Phương pháp tính toán	Tỷ số	μ	CoV	R^2
Seif và Schafer [7]	$k_{\sigma, \text{Seif và Schafer}} / k_{\sigma, \text{CUFSM}}$	0,991	0,099	0,9514
Công thức đề xuất (3)	$k_{\sigma} / k_{\sigma, \text{CUFSM}}$	0,984	0,023	0,9974

Kết quả trong Bảng 2 cho thấy hệ số ổn định được tính toán bằng công thức đề xuất rất phù hợp với kết quả của chương trình CUFSM khi có giá trị trung bình là 0,984 và hệ số biến thiên là 0,023, trong khi đó công thức đề xuất bởi Seif và Schafer [7] có hệ số biến thiên là 0,099. Bên cạnh đó, hệ số xác định của công thức đề xuất là 0,9974 cũng cao hơn so với công thức đề xuất của Seif và Schafer [7] khi chỉ có 0,9514.

2.2 Chiều dày bản bụng và bản cánh không bằng nhau

Trong phần này, tỷ số chiều dày bản cánh và chiều dày bản bụng thay đổi sẽ được xem xét. Dùng chương trình CUFSM để phân tích ổn định cho các thanh thép tiết diện chữ I khi thay đổi chiều dày bản cánh, cụ thể tỷ số t_f / t_w sẽ thay đổi trong khoảng $1,25 \leq t_f / t_w \leq 3,0$ với bước nhảy là 0,25 và tương ứng với mỗi bước nhảy thì tỷ số h_w / b_f sẽ thay đổi từ 1,0 đến 5,0 và có bước nhảy tương ứng là 0,1. Kết quả phân tích sẽ được trình bày trong Hình 3.



Hình 3. Mối quan hệ giữa hệ số ổn định và tỷ số h_w / b_f khi chiều dày bản cánh và chiều dày bản bụng khác nhau

Hình 3 thể hiện kết quả phân tích ổn định trong chương trình CUFSM cho các thanh thép tiết diện chữ I khi tỷ số chiều dày t_f / t_w thay đổi từ 1,25 đến

3,0. Tương tự như cách xác định hệ số ổn định cho tỷ số $t_f / t_w = 1,0$, các công thức đề xuất cho từng tỷ số chiều dày được trình bày trong Bảng 3.

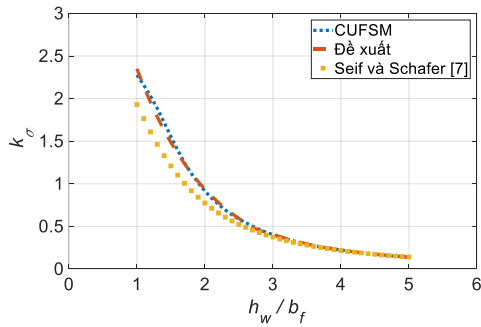
Bảng 3. Công thức đề xuất xác định hệ số ổn định cho các tỷ số t_f / t_w khác nhau

Tỷ số	Công thức đề xuất
$t_f / t_w = 1,25$	$\begin{cases} k_{\sigma} = 5,9e^{-0,92(h_w / b_f)} & \text{khi } 1,0 \leq h_w / b_f < 3,0 \\ k_{\sigma} = 4,1(h_w / b_f)^{-2,1} & \text{khi } 3,0 \leq h_w / b_f \leq 5,0 \end{cases}$
$t_f / t_w = 1,5$	$\begin{cases} k_{\sigma} = 5,8e^{-(h_w / b_f)} & \text{khi } 1,0 \leq h_w / b_f < 3,0 \\ k_{\sigma} = 3(h_w / b_f)^{-2,1} & \text{khi } 3,0 \leq h_w / b_f \leq 5,0 \end{cases}$
$t_f / t_w = 1,75$	$k_{\sigma} = 2,2(h_w / b_f)^{-2}$
$t_f / t_w = 2,0$	$k_{\sigma} = 1,7(h_w / b_f)^{-2}$
$t_f / t_w = 2,25$	$k_{\sigma} = 1,35(h_w / b_f)^{-2}$

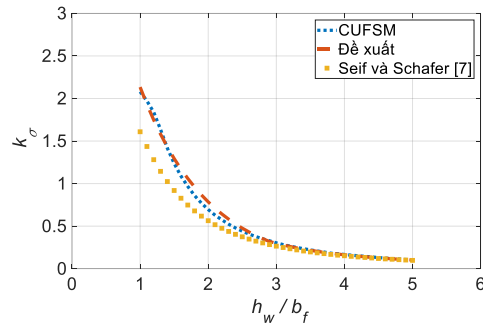
Tỷ số	Công thức đề xuất
$t_f / t_w = 2,5$	$k_\sigma = 1,1(h_w / b_f)^{-2}$
$t_f / t_w = 2,75$	$k_\sigma = 0,9(h_w / b_f)^{-2}$
$t_f / t_w = 3,0$	$k_\sigma = 0,77(h_w / b_f)^{-2}$

Hình 4 trình bày kết quả tính toán hệ số ổn định theo những công thức đề xuất trong Bảng 3, kết quả tính toán theo công thức đề xuất rất phù hợp với kết

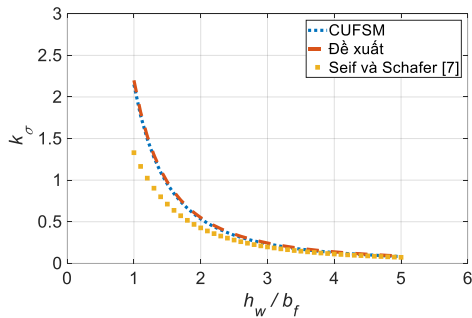
quả của chương trình CUFSM khi đường cong dự đoán rất sát với đường cong của phương pháp số (chương trình CUFSM).



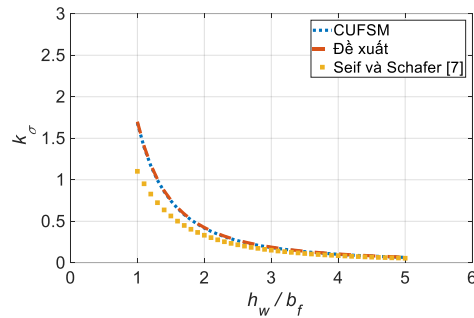
c) $t_f / t_w = 1,25$



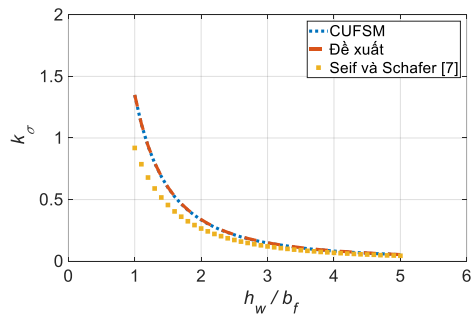
d) $t_f / t_w = 1,5$



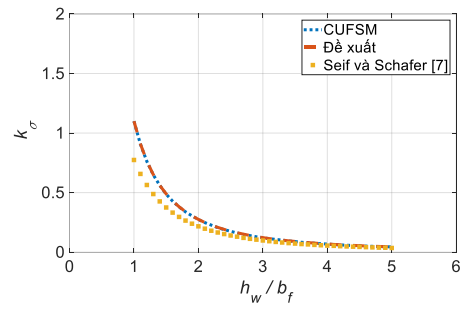
e) $t_f / t_w = 1,75$



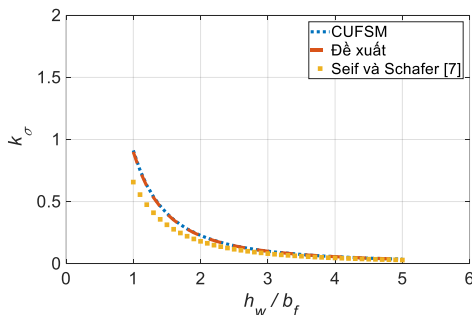
f) $t_f / t_w = 2,0$



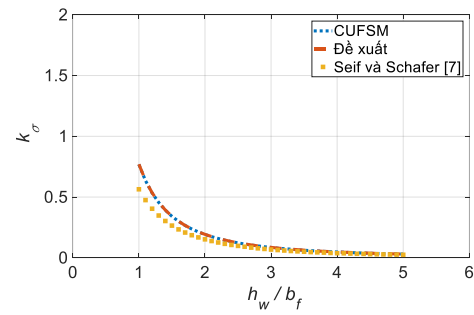
g) $t_f / t_w = 2,25$



h) $t_f / t_w = 2,5$



i) $t_f / t_w = 2,75$



j) $t_f / t_w = 3,0$

Hình 4. Kết quả tính toán hệ số ổn định theo công thức đề xuất và chương trình CUFSM cho các tỷ số t_f / t_w khác nhau

Hình 4 trình bày kết quả tính toán hệ số ổn định theo công thức đề xuất và phương pháp số, kết quả cho thấy đường cong dự đoán và đường cong CUFSM rất sát với nhau nhưng đường cong của Seif và Schafer [7] đều có kết quả thiên về an toàn khi đường dự đoán có giá trị thấp hơn so với đường cong của chương trình CUFSM. Trong Bảng 4 cũng

thể hiện giá trị trung bình đều xấp xỉ bằng 1,0 và có hệ số biến thiên rất thấp đều dưới 0,06 và hệ số xác định cũng rất cao khi tất cả các tỷ số đều lớn hơn 0,9930. Trong khi đó, công thức của Seif và Schafer cho hệ số biến thiên có giá trị lớn hơn ($CoV = 0,085$ khi $t_f / t_w = 1,25$) và hệ số xác định nhỏ hơn ($R^2 = 0,8217$ khi $t_f / t_w = 1,75$).

Bảng 4. So sánh kết quả tính toán hệ số ổn định

Tỷ số	Tính toán theo công thức đề xuất			Tính toán theo Seif và Schafer [7]		
	μ	CoV	R^2	μ	CoV	R^2
$t_f / t_w = 1,25$	1,004	0,022	0,9974	0,914	0,085	0,9234
$t_f / t_w = 1,5$	1,017	0,056	0,9933	0,853	0,082	0,8714
$t_f / t_w = 1,75$	1,047	0,017	0,9987	0,820	0,079	0,8217
$t_f / t_w = 2,0$	1,027	0,012	0,9997	0,808	0,059	0,8452
$t_f / t_w = 2,25$	1,015	0,009	0,9999	0,801	0,045	0,8629
$t_f / t_w = 2,5$	1,010	0,006	1,0000	0,798	0,035	0,8785
$t_f / t_w = 2,75$	0,993	0,005	0,9997	0,796	0,028	0,8853
$t_f / t_w = 3,0$	1,006	0,005	1,0000	0,795	0,022	0,8923

Để xác định hệ số ổn định cho thanh thép tiết diện chữ I khi tỷ số t_f / t_w không nằm trong Bảng 4 thì có thể dùng phương pháp nội suy tuyến tính.

Các ví dụ xác định ứng suất tới hạn cục bộ của thanh thép tổ hợp hàn tiết diện chữ I có tỷ số chiều dày bản cánh và chiều dày bản bụng thay đổi trong $1,0 \leq t_f / t_w \leq 3,0$, kết quả thu được sẽ so sánh với kết quả đã công bố và kết quả của chương trình CUFSM.

3. Ví dụ tính toán

Bảng 5. Kích thước hình học

Tên cấu kiện	b_f (mm)	h_w (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)
R1-1	200	200	6,0	6,0
R1-2	200	600	6,0	6,0
R2-1	200	200	7,5	6,0
R2-2	200	600	7,5	6,0
R3-1	200	200	9,0	6,0
R3-2	200	600	9,0	6,0
R4-1	200	200	14	8,0
R4-2	200	600	14	8,0
R5-1	200	200	16	8,0
R5-2	200	600	16	8,0
R6-1	200	200	18	8,0
R6-2	200	600	18	8,0
R7-1	200	200	25	10
R7-2	200	600	25	10
R8-1	200	200	27,5	10
R8-2	200	600	27,5	10
R9-1	200	200	30	10
R9-2	200	600	30	10

Kích thước hình học ban đầu của các thanh thép tổ hợp hàn tiết diện chữ I được thể hiện trong Bảng 5, mô đun đàn hồi $E = 210000(\text{Mpa})$ và hệ số Poisson $\nu = 0,3$. Xác định ứng suất tới hạn cục bộ cho những cấu kiện trong Bảng 5.

Hệ số ổn định:

$$k_{\sigma} = 6e^{-0,795(h_w/b_f)} = 6,2,718^{-0,795(200/200)} = 2,71$$

Ứng suất tới hạn cục bộ:

$$\sigma_{cr} = \frac{k_{\sigma}\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_f}{b_f} \right)^2 = \frac{2,713,14^2 \cdot 210000}{12(1-0,3)^2} \left(\frac{6,0}{200} \right)^2 = 462,8(\text{Mpa})$$

Kết quả từ chương trình CUFSM:

$$\sigma_{CUFSM} = 449,6(\text{Mpa})$$

Làm tương tự cho các thanh còn lại trong Bảng 5 và kết quả so sánh giữa công thức đề

Xét thanh thép R1-1 có các đặc trưng hình học ban đầu:

Bề rộng: $b_f = 200(\text{mm})$;

Chiều cao: $h_w = 200(\text{mm})$;

Bề dày bản cánh: $t_f = 6,0(\text{mm})$;

Bề dày bản bụng: $t_w = 6,0(\text{mm})$.

xuất và chương trình CUFSM được thống kê trong Bảng 6.

Bảng 6. Kết quả tính toán ứng suất tới hạn cục bộ

Tên cấu kiện	$\sigma_{cr,CUFSM}$ (Mpa)	σ_{cr} (Mpa)	$\sigma_{cr,Seif \text{ và } Schafer}$ (Mpa)
R1-1	449,6	462,8 (2,94%)	383,7 (-14,65%)
R1-2	94,7	93,5 (-1,24%)	96,3 (1,73%)
R2-1	612,4	627,6 (2,48%)	514,8 (-15,93%)
R2-2	107,2	108,9 (1,62%)	100,0 (-6,69%)
R3-1	798,9	820,1 (2,65%)	618,4 (-22,59%)
R3-2	116,7	114,8 (-1,64%)	102,0 (-12,64%)
R4-1	1993,7	2046,0 (2,63%)	1237,2 (-37,94%)
R4-2	218,5	227,3 (4,04%)	183,2 (-16,16%)
R5-1	2040,2	2065,0 (1,22%)	1338,5 (-34,39%)
R5-2	223,4	229,4 (2,71%)	184,4 (-17,47%)
R6-1	2066,0	2075,5 (0,46%)	1413,0 (-31,61%)
R6-2	226,6	230,6 (1,77%)	185,2 (-18,29%)
R7-1	3246,3	3262,2 (0,49%)	2294,1 (-29,33%)
R7-2	357,1	362,5 (1,50%)	290,1 (-18,75%)
R8-1	3263,2	3229,6 (-1,03%)	2359,0 (-27,71%)
R8-2	359,5	358,8 (-0,18%)	290,7 (-19,13%)
R9-1	3274,9	3288,3 (0,41%)	2408,5 (-26,46%)
R9-2	361,2	365,4 (1,15%)	291,1 (-19,40%)

Bảng 6 thể hiện kết quả tính toán ứng suất tới hạn cục bộ cho các thanh thép tiết diện chữ I theo công thức đề xuất và kết quả của chương trình CUFSM, kết quả giữa hai phương pháp rất gần nhau khi có sai số đều dưới 5%, nhưng theo công thức đề xuất của Seif và Schafer [7] khi tính toán ứng suất tới hạn cục bộ thì sai số khá lớn, cao nhất xấp xỉ gần 38% đối với tỷ số $t_f/t_w = 1,75$. Do đó, công thức đề xuất xác định hệ số ổn định để tính toán ứng suất tới

hạn cục bộ trong nghiên cứu này có độ tin cậy cao hơn.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, các công thức đề xuất để xác định hệ số ổn định cho thanh thép tiết diện chữ I chịu nén đều được thiết lập dựa trên phương pháp dải hữu hạn bán giải tích trong chương trình CUFSM. Kết quả tính toán cho thấy ứng suất gây mất ổn định

tới hạn cục bộ không phụ thuộc vào tỷ số chiều dài với chiều cao tiết diện mà phụ thuộc vào những tỷ số chiều dày bản cánh với bề rộng cấu kiện và tỷ số chiều cao với bề rộng tiết diện. Vì thế các công thức đề xuất được trình bày trong phần 2 để xác định hệ số ổn định đều kể đến sự tương tác giữa bản cánh và bản bụng. Các công thức được xây dựng cho những tỷ số chiều dày bản cánh và bản bụng thay đổi trong giới hạn từ 1,0 đến 3,0 với bước nhảy 0,25 và ứng với mỗi tỷ số t_f / t_w thì tỷ số chiều cao với bề rộng tiết diện sẽ thay đổi trong $1,0 \leq h_w / b_f \leq 5,0$ khi bước nhảy là 0,1.

Các công thức đề xuất đều đảm bảo độ tin cậy khi so sánh với một số kết quả được công bố trước đây và so sánh với kết quả của phương pháp số (chương trình CUFSM) khi có hệ số biến thiên rất thấp dưới 0,06% và có hệ số xác định rất cao trên 0,9930.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Trahair, N. S., Bradford, M. A., Nethercot, D. A., and Gardner, L., (2008), *The Behaviour and Design of Steel Structures to EC3*, 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon.
- [2] Cheung, Y. K., (1976), *Finite Strip Method in Structural Analysis*, Pergamon Press, England.
- [3] Li, Z., Schafer, B. W., (2010), "Buckling Analysis of Cold-Formed Steel Members with General Boundary Conditions Using CUFSM: Conventional and Constrained Finite Strip Methods, in: Proceeding 20th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures," pp. 17–31.
- [4] Bui, H. C., (2009), "Buckling Analysis of Thin-Walled Sections under General Loading Conditions," *Thin-Walled Struct.*, 47, pp. 730–739.
- [5] Bui, 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*, 11, pp. 12–23.
- [6] Toàn, H. A., Anh, V. Q., (2020), "Tính toán cấu kiện thép tạo hình nguội chịu nén bằng phương pháp cường độ trực tiếp theo tiêu chuẩn AISI S100-16", *Kết cấu - Công nghệ xây dựng*, 3, pp. 18–29.
- [7] Seif, M., Schafer, B. W., (2010), "Local Buckling of Structural Steel Shapes," *J. Constr. Steel Res.*, 66(10), pp. 1232–1247.
- [8] Gardner, L., Fieber, A., and Macorini, L., (2019), "Formulae for Calculating Elastic Local Buckling Stresses of Full Structural Cross-Sections," *Structures*, 17(February), pp. 2–20.
- [9] Shi, G., Xu, K., Ban, H., and Lin, C., (2016), "Local Buckling Behavior of Welded Stub Columns with Normal and High Strength Steels," *J. Constr. Steel Res.*, 119, pp. 144–153.
- [10] Tùng, V. S., Cường, B. H., (2018), "Ổn định tổng thể của dầm thép với dạng tiết diện chữ I hai bản bụng tổ hợp hàn có hai trục đối xứng", *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 12(4), pp. 51–57.
- [11] Deepak, M. S., Ananthi, G. B. G., (2021), "Local Buckling Behaviour and Capacities of Cold-Formed Steel Double-I-Box Stub and Short Column Sections," *Structures*, 34(December 2021), pp. 1761–1784.
- [12] AISI S100 - 16 (2016). *North American Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*, Chicago, IL, USA.
- [13] Eurocode 3 (2006). *Design of Steel Structures - Part 1-5: Plated Structural Elements*, Brussels, Belgium.