

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ XÂY DỰNG

TRƯỜNG ĐẠI HỌC KIẾN TRÚC HÀ NỘI

VŨ HUY HOÀNG

**NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ
CỦA CẦU KIẾN THÉP TẠO HÌNH NGUỘI
CHỊU UỐN QUANH TRỤC KHÔNG ĐỐI XỨNG**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT XÂY DỰNG

Hà Nội - Năm 2025

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ XÂY DỰNG

TRƯỜNG ĐẠI HỌC KIẾN TRÚC HÀ NỘI

VŨ HUY HOÀNG

**NGHIÊN CỨU ỨNG XỬ
CỦA CẤU KIỆN THÉP TẠO HÌNH NGUỘI
CHỊU UỐN QUANH TRỤC KHÔNG ĐỐI XỨNG**

NGÀNH: KỸ THUẬT XÂY DỰNG

MÃ NGÀNH: 9580201

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

PGS. TS VŨ QUỐC ANH

PGS. TS PHẠM CAO HÙNG



Hà Nội - Năm 2025

LỜI CẢM ƠN

Với tất cả tình cảm của mình, tôi xin bày tỏ lòng kính trọng và biết ơn sâu sắc tới **PGS.TS Vũ Quốc Anh, PGS.TS Phạm Cao Hùng** đã tận tình hướng dẫn, chỉ bảo cho tôi trong suốt quá trình nghiên cứu hoàn thành luận án của mình.

Tôi xin trân trọng cảm ơn các thầy cô Trường Đại học Kiến trúc Hà Nội đã tạo mọi điều kiện thuận lợi cho tôi học tập và hoàn thành luận án.

Sau cùng, xin cảm ơn đồng nghiệp và bạn bè đã chia sẻ, động viên, tạo điều kiện cho tôi hoàn thành luận án này. Tôi xin dành tặng luận án này cho bố mẹ tôi, vợ và các con của tôi.

Tác giả luận án

LỜI CAM ĐOAN

Tác giả xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi. Toàn bộ số liệu và kết quả trình bày trong luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ một công trình nào khác. Tôi xin chịu trách nhiệm về các kết quả nghiên cứu và công bố của mình.

Tác giả luận án

Vũ Huy Hoàng

MỤC LỤC

LỜI CẢM ƠN	i
LỜI CAM ĐOAN	ii
MỤC LỤC.....	iii
DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT, KÝ HIỆU VÀ THUẬT NGỮ	viii
DANH MỤC CÁC BẢNG, BIỂU	xviii
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ.....	xx
MỞ ĐẦU.....	1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ CẤU KIỆN THÉP TẠO HÌNH NGUỘI	
CHỊU UỐN QUANH TRỤC KHÔNG ĐỐI XỨNG	5
1.1. Giới thiệu về kết cấu thép tạo hình nguội	5
1.2. Tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội	9
1.3. Các phương pháp thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội.....	11
1.3.1. Phương pháp Bề rộng hữu hiệu.....	11
1.3.2. Phương pháp Cường độ trực tiếp	13
1.3.3. Các phương pháp số	13
1.3.4. Phương pháp được lựa chọn cho luận án	13
1.4. Tầm quan trọng và ứng dụng của trạng thái chịu uốn quanh trục	
không đối xứng	14
1.5. Phương pháp Cường độ trực tiếp: Vấn đề về độ bền uốn quanh trục	
không đối xứng	16
1.6. Ứng suất tới hạn do mất ổn định cục bộ của tiết diện chữ C chịu uốn	
quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén	23
1.6.1. Vai trò của ứng suất tới hạn do mất ổn định cục bộ và mất ổn định	
méo của toàn bộ tiết diện trong phương pháp DSM	23
1.6.2. Các phương pháp xác định ứng suất tới hạn do mất ổn định cục bộ	
của toàn bộ tiết diện theo AISI S100	24

1.6.3.	Một số đề xuất hiện có nhằm cải tiến công thức giải tích để xác định ứng suất tới hạn của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén.....	28
1.7.	Mục tiêu và nội dung của luận án.....	43
CHƯƠNG 2.	CƠ SỞ KHOA HỌC ĐỂ THIẾT LẬP CÔNG THỨC ĐỘ BỀN THEO PHƯƠNG PHÁP DSM.....	45
2.1.	Phương pháp xây dựng công thức xác định độ bền uốn theo DSM.	45
2.1.1.	Phương pháp xây dựng công thức DSM hiện hành	45
2.1.2.	Công thức DSM điều chỉnh đề xuất bởi Oey và Papangelis.....	48
2.2.	Mô men tới hạn đàn hồi của toàn bộ tiết diện	57
2.2.1.	Phương pháp Hệ số chống xoay.....	58
2.2.2.	Phương pháp xem xét tiết diện như một tổng thể	60
2.2.3.	Tấm chữ nhật chịu ứng suất nén tuyến tính có điều kiện biên tổng quát	60
2.3.	Nhận xét chương.....	63
CHƯƠNG 3.	XÂY DỰNG CÔNG THỨC GIẢI TÍCH ĐỂ XÁC ĐỊNH HỆ SỐ MẤT ỔN ĐỊNH CỤC BỘ CỦA CẤU KIỆN CHỮ C CHỊU UỐN QUANH TRỤC KHÔNG ĐỐI XỨNG VỚI BẢN BỤNG CHỊU NÉN	64
3.1.	Phương pháp Độ cứng biên giải quyết bài toán mất ổn định cục bộ đàn hồi của toàn bộ tiết diện	66
3.1.1.	Mở rộng bài toán tấm chữ nhật chịu ứng suất phân bố tuyến tính có điều kiện biên tổng quát trên hai cạnh dọc.....	68
3.1.2.	Độ cứng chống xoay trên cạnh dọc của tấm chịu ứng suất nén tuyến tính.....	77
3.1.3.	Độ cứng lò xo	79
3.1.4.	Xác định ứng suất tới hạn của tấm mất ổn định.....	82
3.1.5.	Kiểm chứng phương pháp.....	84
3.1.6.	Độ cứng âm	89

3.2. Sử dụng phương pháp RSM để xây dựng công thức xác định hệ số mất ổn định của cầu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén.....	90
3.2.1. Phạm vi biến thiên của tham số nghiên cứu.....	91
3.2.2. Mô hình và phương pháp tính.....	92
3.2.3. Kết quả tính toán và nhận xét.....	95
3.2.4. Xây dựng công thức xác định hệ số mất ổn định.....	103
3.2.5. Độ tin cậy của công thức đề xuất.....	109
3.3. Nhận xét chương.....	112
CHƯƠNG 4. ĐỀ XUẤT CẢI TIẾN CÔNG THỨC XÁC ĐỊNH ĐỘ BỀN CỦA CẦU KIẾN THÉP CHỮ C TẠO HÌNH NGUỘI CHỊU UỐN QUANH TRỤC KHÔNG ĐỐI XỨNG VỚI BẢN BỤNG CHỊU NÉN	115
4.1. Ứng dụng phương pháp phân tích phi tuyến để xác định độ bền ..	116
4.1.1. Mô hình vật liệu	116
4.1.2. Khiếm khuyết hình học ban đầu	120
4.1.3. Xây dựng sơ đồ tính	120
4.1.4. Lựa chọn kiểu phần tử tính toán và chia lưới phần tử	121
4.1.5. Lựa chọn bộ mẫu số liệu dùng cho mô phỏng số.....	121
4.1.6. Dùng phương pháp EWM để đánh giá công thức DSM hiện hành	124
4.2. Kiểm chứng mô hình số	124
4.2.1. So sánh với kết quả của Oey và Papangelis.....	125
4.2.2. So sánh với kết quả thực nghiệm	126
4.3. Kết quả mô phỏng	127
4.4. Đề xuất cải tiến công thức tính toán cầu kiện thép tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén theo phương pháp DSM	128
4.4.1. Đánh giá kết quả mô phỏng	128

4.4.2. Đề xuất công thức dự đoán độ bền uốn.....	130
4.5. Kiểm chứng công thức đề xuất.....	134
4.6. Đánh giá độ tin cậy của công thức đề xuất	137
4.7. Ví dụ áp dụng.....	139
4.8. Nhận xét chương.....	141
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	143
Kết luận	143
Kiến nghị.....	144
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN.....	KH1
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	TK1
PHỤ LỤC.....	PL1
Phụ lục A. Các vấn đề lý thuyết.....	PL1
A.1. Các dạng mất ổn định gốc	PL1
A.1.1. Mất ổn định cục bộ.....	PL1
A.1.2. Mất ổn định méo	PL1
A.1.3. Mất ổn định tổng thể	PL1
A.2. Các phương pháp xác định mô men tới hạn.....	PL2
A.2.1. Các phương pháp số.....	PL2
A.2.2. Công thức giải tích của tiêu chuẩn AISI S100-16	PL6
A.3. Nhận diện dạng mất ổn định.....	PL7
A.3.1. Nhận diện trong mô hình dải hữu hạn.....	PL7
A.3.2. Nhận diện trong mô hình phần tử tấm hữu hạn	PL9
A.3.3. Nhận diện trong mô hình lý thuyết Dầm tổng quát	PL9
A.4. Cách xác định hệ số chống xoay và hệ số mất ổn định trong phương pháp Hệ số chống xoay của Bleich.....	PL10
A.4.1. Xác định hệ số chống xoay	PL10
A.4.2. Xác định hệ số mất ổn định.....	PL12

A.5. Phương pháp giải bài toán mất ổn định khi xem xét tiết diện như một tổng thể	PL17
A.5.1. Ổn định của tấm chữ nhật không có gờ chịu nén đều với các cạnh chịu tải tựa khớp.....	PL19
A.5.2. Sự mất ổn định của các tấm chữ nhật có gờ.....	PL21
A.5.3. Ổn định của tiết diện nối tiếp	PL22
Phụ lục B. Các bảng biểu và đồ thị	PL24
B.1. Đồ thị tra hệ số mất ổn định của cấu kiện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén	PL24
B.2. Các bảng thống kê	PL27
Phụ lục C. Kết quả tính toán và mô phỏng.....	PL37
C.1. Hệ số mất ổn định xác định bằng phương pháp RSM dùng để xây dựng công thức thực hành.....	PL37
C.2. Kết quả mô phỏng độ bền bằng ABAQUS	PL64
Phụ lục D. Ví dụ tính toán	PL88
D.1. Ví dụ 1. Tiết diện C thương mại sử dụng thép các bon thấp	PL88
D.2. Ví dụ 2. Tiết diện mũ của Yu và Laboube sử dụng thép các bon thấp	PL90
D.3. Ví dụ 3. Tiết diện mũ sử dụng thép cán nguội cường độ cao	PL93

DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT, KÝ HIỆU VÀ THUẬT NGỮ

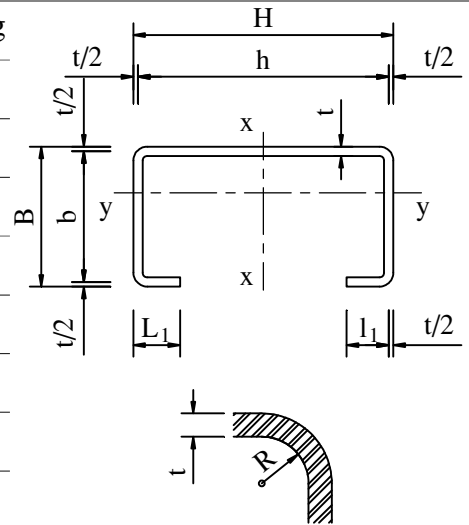
Danh mục chữ viết tắt

Chữ viết tắt	Tên đầy đủ	
	Tiếng Anh	Tiếng Việt
ASD	Allowable Stress Design	Phương pháp Ứng suất cho phép
CFS	Cold-formed Steel (Members)	(Cấu kiện) thép tạo hình nguội
COV	Coefficient Of Variation	Hệ số biến thiên
CRM	Coefficient of Restraint Method	Phương pháp Hệ số chống xoay
DSM	Direct Strength Method	Phương pháp Cường độ trực tiếp
EWM	Effective Width Method	Phương pháp Bề rộng hữu hiệu
FEM	Finite Element Method	Phương pháp Phần tử hữu hạn
FSM	Finite strip method	Phương pháp Dải hữu hạn
GBT	Generalized Beam Theory	Lý thuyết Dầm tổng quát
LRFD	Load and Resistance Factor Design	Phương pháp Lực và sức kháng
LSD	Limited State Design	Phương pháp Trạng thái tới hạn
NLFEA	Nonlinear Finite Element Analysis	Phân tích phần tử hữu hạn phi tuyến
RSM	Restraining Stiffness Method	Phương pháp Độ cứng biên
ID	Index	Số thứ tự
TB	Mean value	Giá trị trung bình

Danh mục ký hiệu

Ký hiệu La tinh

a	Chiều dài của tấm bị mất ổn định (cũng là chiều dài dầm biên trên cạnh tấm). Đây là kích thước dọc, được đo dọc theo các cạnh không chịu tải
A	Diện tích tiết diện
b	Bề rộng của tấm bị mất ổn định. Đây là kích thước ngang, được đo dọc theo các cạnh chịu tải
	Hoặc là kích thước đường tim của tiết diện (xem ký hiệu h và d)
b_{eff}	Bề rộng hữu hiệu
B	Bề rộng bản cánh của tiết diện chữ C (kích thước bao ngoài)
B_0	Bề rộng bản cánh (kích thước thông thủy). $B_0 = B - 2t$
$C_{m,i}$	Hệ số của hàm độ võng khi được biểu thị bằng chuỗi lũy thừa
C_m^*	Ma trận cơ sở chứa bốn hệ số cơ bản $C_{m,0}$ $C_{m,1}$ $C_{m,2}$ $C_{m,3}$
C_R	Hệ số điều chỉnh xét đến bán kính góc uốn
C_v	Hệ số điều chỉnh xét đến hệ số Poát xng
d	Kích thước đường tim của tiết diện
D	Độ cứng của tấm mỏng
E	Mô đun đàn hồi
$E_{0,2}$	Mô đun tiếp tuyến của đường cong
	ứng suất-biến dạng tại giới hạn chảy
	quy ước F_y
EI	Độ cứng của cấu kiện dầm
E_{sh}	Mô đun cứng hóa
F_y	Giới hạn chảy hoặc giới hạn chảy quy ước
	tương ứng với biến dạng tương đối 0,2%
F_u	Giới hạn bền
G	Mô đun cắt



h	Kích thước đường tim của tiết diện
H	Chiều cao của tiết diện chữ C (kích thước bao ngoài)
H_0	Chiều cao bản bụng. $H_0 = H - 2t$
i	Chỉ số (số nguyên)
I	Mô men quán tính
I_y	Mô men quán tính đối với trục y
J	Hằng số xoắn
k	Hệ số mất ổn định tương ứng với ứng suất nhỏ nhất khiến tấm mỏng bị mất ổn định, cũng là k_{min}
k^*	Hệ số mất ổn định cuối cùng
k_0	Giá trị khởi đầu của hệ số mất ổn định
k_1, k_2, k_3	
Các hệ số mất ổn định của hàm gián đoạn	
k_b	Hệ số mất ổn định tương ứng với tấm có bề rộng b
k_h	Hệ số mất ổn định tương ứng với tấm có bề rộng h
k_M	Độ cứng chống xoay
k_{M0}	Độ cứng chống xoay trên cạnh $y = 0$
k_{Mb}	Độ cứng chống xoay trên cạnh $y = b$
k_V	Độ cứng lò xo
k_{V0}	Độ cứng lò xo trên cạnh $y = 0$
k_{Vb}	Độ cứng lò xo trên cạnh $y = b$
$K_{m,w}, K_{m,\theta}, K_{m,M}, K_{m,VT}$	
Ma trận độ cứng dùng để tính toán chuyển vị, góc xoay, mô men và lực cắt của tấm mất ổn định tương ứng với dạng mất ổn định m nửa sóng	
K_{m0}, K_{m1}	
Hai ma trận độ cứng trên biên $y = 0$ của tấm, có thể là một trong các ma trận $K_{m,w}, K_{m,\theta}, K_{m,M}, K_{m,VT}$	

K_{m2}, K_{m3}	
Hai ma trận độ cứng trên biên $y = b$ của tấm, có thể là một trong các ma trận $K_{m,w}, K_{m,\theta}, K_{m,M}, K_{m,VT}$	
K_m^*	Ma trận độ cứng tổng thể 4x4, hình thành do ghép các ma trận $K_{m0}, K_{m1}, K_{m2}, K_{m3}$
L_1	Chiều dài móc của tiết diện chữ C (kích thước bao ngoài)
m	Số lượng nửa sóng theo phương dọc tấm khi mất ổn định (cạnh a). Cũng đóng vai trò là chỉ số tham chiếu cho dạng mất ổn định có m nửa sóng
n_1, m_1	Hệ số cứng nguội
M	Mô men
M_0	Biên độ của mô men phân bố trên biên của tấm
M_{be}	Độ bền mất ổn định xoắn ngang
M_{cr}	Mô men tới hạn (đàn hồi)
M_{crl}	Mô men tới hạn (đàn hồi) của trường hợp mất ổn định cục bộ
M_n	Độ bền (sức kháng) uốn tiêu chuẩn
M_{nd}	Độ bền (sức kháng) uốn tiêu chuẩn khi xét đến tương tác với ổn định méo
M_{nl}	Độ bền (sức kháng) uốn tiêu chuẩn khi xét đến tương tác với ổn định cục bộ
M_p	Mô men bền dẻo
M_y	Bài toán mất ổn định (CHƯƠNG 3): Mô men xoay quanh trục y
	Bài toán độ bền (CHƯƠNG 4): Mô men chảy
M_{yx}	Mô men xoắn
M_t	Mô men xác định từ thí nghiệm
M_u	Độ bền uốn
n	Số lượng nửa sóng theo phương ngang tấm khi mất ổn định (cạnh b)
N	Lực dọc
N_0	Giá trị cơ sở của lực nén ở hai đầu tấm (là giá trị lực nén tại $y = 0$)
N_x	Phân bố của lực nén ở hai đầu tấm
N_0^*	Lực nén cơ sở không thứ nguyên ở hai đầu tấm, là biến thể của N_0

$N_{cr,m}$	Lực dọc tới hạn tương ứng với dạng mất ổn định m nửa sóng
p	Chỉ số (số nguyên)
P	Biên độ của điều kiện biên
P_1, P_2, P_3, P_4	
Biên độ của các điều kiện biên tương ứng với $K_{m0}, K_{m1}, K_{m2}, K_{m3}$	
q	Tải trọng phân bố trên bề mặt tấm hoặc trên dầm
q_0	Biên độ (giá trị lớn nhất) của tải trọng phân bố hình sin trên dầm
r_s	Độ tương đồng
R	Bán kính góc uốn (bán kính trong)
R_n	Độ bền danh nghĩa
R_t	Độ bền thí nghiệm
t	Chiều dày của tấm hoặc tiết diện
t_f	Chiều dày của bản cánh
t_w	Chiều dày của bản bụng
V	Lực cắt
V_y	Lực cắt tương ứng với M_y
V_{yT}	Lực cắt (tương ứng với V_y) kết hợp mô men xoắn M_{yx}
x, y	Ký hiệu trục và giá trị của biến trên trục tương ứng. Đối với tấm chữ nhật, x và y đại diện cho trục dọc tấm và trục ngang tấm
Y_m	hàm độ võng thành phần của w theo phương ngang tấm
w	Hàm độ võng của tấm mỏng hoặc các tấm thành phần của tiết diện
w_0	Biên độ của hàm độ võng (cũng là độ võng lớn nhất)

Ký hiệu Hi lap

α	Hệ số phân bố ứng suất
β	Chỉ số độ tin cậy
β_0	Chỉ số độ tin cậy mục tiêu
β_m	Hệ số, xem Công thức (2.33)
φ	Góc giữa hai tấm thành phần
$\Phi_{m,i}$	ma trận 1x4 mô tả mối quan hệ giữa các hệ số $C_{m,i}$ với ma trận cơ sở C_m^*
ε	Strain - Biến dạng
$\varepsilon_{0,2}$	Biến dạng tại giới hạn chảy quy ước F_y
ε_y	Biến dạng chảy
ε_{sh}	Biến dạng đầu giai đoạn tăng cường
ε_{tr}	Biến dạng thực
ε_u	Biến dạng tương ứng với giới hạn bền F_u
η	Tọa độ không thứ nguyên tương ứng với trục y
θ	Góc xoay quanh trục y
κ	Tỷ lệ hai cạnh tấm
λ	Độ mảnh. $\sqrt{M_y/M_{cr}}$
λ_0	Độ mảnh chuyển tiếp
λ_l	Độ mảnh mất ổn định cục bộ của dầm. $\lambda_l = \sqrt{M_y/M_{crl}}$
μ	Giá trị trung bình
μ_b	$\mu_b = \mu_B - 0,5$
$\mu_B, \mu_L, \mu_t, \mu_R$	
Tỷ số giữa bề rộng bản cánh, chiều dài móc, chiều dày tiết diện, và bán kính góc uốn với chiều cao tiết diện chữ C	
μ_{B0}	giá trị của μ_B tại điểm chuyển tiếp giữa đoạn I và đoạn II của biểu thức xác định hệ số mất ổn định
ν	Hệ số Poát xông

$\nu_{0,3}$	Tỷ số. $\nu_{0,3} = \nu / 0,3$
ζ	Tọa độ không thứ nguyên tương ứng với trục x
ρ	Hệ số chiết giảm (trong phương pháp Bề rộng hữu hiệu)
σ, σ'	Ứng suất pháp
$\sigma_{0,2}$	Giới hạn chảy quy ước tương ứng với biến dạng 0,2%
σ_x	Ứng suất pháp theo phương x
σ_{cr}	Ứng suất tới hạn (đàn hồi)
σ_{tr}	Ứng suất thực
ζ	Hệ số chống xoay

Danh mục thuật ngữ

Thuật ngữ	Ý nghĩa
<i>bộ phận tăng cứng</i>	bộ phận (được tạo thành bởi một hay nhiều tấm) liên kết với một cạnh của tấm mất ổn định và cung cấp độ cứng lò xo và độ cứng chống xoay cho cạnh đó. Bộ phận tăng cứng là khái niệm mở rộng của tấm tăng cứng
<i>cạnh chịu nén</i>	cạnh dọc chịu ứng suất nén lớn nhất N_0 ($y = 0$). Cạnh dọc còn lại ($y = b$) gọi là cạnh chịu kéo
<i>cạnh gia tải</i>	cạnh ngang của tấm mất ổn định, chịu ứng suất nén dọc
<i>cạnh không gia tải</i>	cạnh dọc của tấm mất ổn định, không chịu ứng suất nén dọc
<i>cấu kiện chữ C</i>	cấu kiện sử dụng tiết diện chữ C
<i>cấu kiện nghiên cứu</i>	cấu kiện tiết diện chữ C bị uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén
<i>công thức DSM hiện hành</i>	công thức tính toán theo phương pháp Cường độ trực tiếp nêu trong tiêu chuẩn AISI S100-16
<i>cụm tấm</i>	tổ hợp tấm tạo nên tiết diện
<i>giao tuyến hoặc cạnh chung</i>	cạnh chung giữa các tấm thành phần liền kề trong tiết diện. Các góc uốn bị bỏ qua
<i>gối đàn hồi</i>	gối tựa đàn hồi và ngàm đàn hồi đồng thời
<i>mất ổn định</i>	dùng để chỉ mất ổn định đàn hồi. Luận án chỉ thảo luận về bài toán mất ổn định của vật liệu trong phạm vi đàn hồi. Mất ổn định ngoài miền đàn hồi không nằm trong phạm vi của luận án
<i>mất ổn định của tiết diện</i>	bao gồm mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo

<i>mắt ổn định tổng thể</i>	bao gồm mắt ổn định uốn, mắt ổn định xoắn, mắt ổn định uốn-xoắn của cấu kiện nén và mắt ổn định ngang-xoắn của cấu kiện chịu uốn
<i>ngàm đàn hồi</i>	gối tựa đàn hồi ngăn cản chuyển vị xoay của tấm
<i>phần tử có sườn</i>	tấm thành phần có hai biên dọc tựa khớp
<i>cạnh chịu kéo</i>	xem định nghĩa “cạnh chịu nén”
<i>phần tử có sườn đàn hồi</i>	tấm thành phần có một biên dọc tựa khớp, biên dọc còn lại tựa trên gối tựa đàn hồi
<i>phần tử không sườn</i>	tấm thành phần có một biên dọc tựa khớp, biên dọc còn lại tự do
<i>phương dọc hoặc phương x hoặc trục x (của một tấm)</i>	hướng song song với cạnh không gia tải của tấm chữ nhật
<i>phương ngang hoặc phương y hoặc trục y (của một tấm)</i>	hướng song song với cạnh gia tải của tấm chữ nhật
<i>tấm mắt ổn định</i>	tấm đang được xem xét trong bài toán mắt ổn định
<i>tấm tăng cứng</i>	tấm ngăn cản chuyển vị tịnh tiến và chuyển vị xoay của tấm mắt ổn định tại giao tuyến giữa chúng
<i>thành phần hoặc tấm thành phần hoặc phần tử</i>	các tấm tạo thành tiết diện. Các góc uốn bị bỏ qua. Một tấm thành phần có thể chứa hoặc không chứa các góc uốn tùy thuộc vào các trường hợp cụ thể
<i>tiết diện nghiên cứu</i>	tiết diện chữ C bị uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén
<i>trạng thái nghiên cứu</i>	trạng thái chịu tải trong đó cấu kiện tiết diện chữ C bị uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén
<i>trục khỏe</i>	trục khỏe hơn trong hai trục quán tính chính

<i>trục yếu</i>	trục yếu hơn trong hai trục quán tính chính
<i>tựa đàn hồi</i>	gối tựa đàn hồi ngăn cản chuyển vị tịnh tiến theo phương vuông góc với mặt phẳng tấm
<i>ứng suất tới hạn của tấm thành phần</i>	ứng suất gây mất ổn định của tấm thành phần trong tiết diện. Cũng áp dụng cho hệ số mất ổn định và mô men tới hạn
<i>ứng suất tới hạn của tiết diện</i>	ứng suất làm tiết diện bị mất ổn định. Cũng áp dụng cho hệ số mất ổn định và mô men tới hạn

DANH MỤC CÁC BẢNG, BIỂU

Số hiệu	Tên bảng, biểu
Bảng 1.1	Phương pháp và tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội 10
Bảng 1.2	Tiết diện được sử dụng trong nghiên cứu của Glauz và Schafer 19
Bảng 1.3	Các nghiên cứu về ổn định của tấm mỏng 33
Bảng 2.1	Dữ liệu thống kê để xác định hệ số sức kháng..... 55
Bảng 3.1	Sai số của phương pháp RSM..... 86
Bảng 3.2	Phạm vi thay đổi của các tham số mô phỏng..... 91
Bảng 3.3	Hệ số chủ đạo (k) để xác định hệ số mất ổn định 109
Bảng 3.4	Độ chính xác của các biểu thức được đề xuất trên bộ dữ liệu mở rộng 111
Bảng 4.1	Phạm vi tham số cho mô hình sử dụng vật liệu thép cán nguội 122
Bảng 4.2	Phạm vi tham số cho mô hình sử dụng vật liệu thép cán nóng..... 123
Bảng 4.3	Giới hạn khả năng áp dụng của phương pháp Cường độ trực tiếp 123
Bảng 4.4	Sự khác biệt giữa hai mô hình vật liệu..... 127
Bảng 4.5	Tổng hợp kết quả kiểm chứng 136
Bảng 4.6	Khả năng dự đoán độ bền với tỷ lệ B/H khác nhau 137
Bảng 4.7	Kết quả tính toán độ bền khi dùng giá trị mô men tới hạn khác nhau 137

Bảng, biểu phần phụ lục

Số hiệu	Tên bảng, biểu
Bảng A.1	Hàm đặc trưng của các điều kiện biên khác..... PL21
Bảng B.1	Tỷ lệ khối lượng xà gồ PL27
Bảng B.2	Các hàm độ võng..... PL29
Bảng B.3	Công thức đề xuất tính toán độ bền của các cấu kiện chịu uốn quanh trục yếu và trục không đối xứng..... PL31
Bảng B.4	Các biểu thức xác định hệ số mất ổn định của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục yếu PL34
Bảng C.1	Hệ số mất ổn định theo RSM dùng để xây dựng công thức thực hành PL37
Bảng C.2	Kết quả mô phỏng độ bền của cấu kiện sử dụng thép cán nguội..... PL64
Bảng C.3	Kết quả mô phỏng độ bền của cấu kiện sử dụng thép cán nóng..... PL83

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

Số hiệu	Tên hình
Hình 1.1	Các phương pháp tạo hình nguội 5
Hình 1.2	Ứng dụng của kết cấu thép tạo hình nguội 6
Hình 1.3	Các loại cấu kiện thép tạo hình nguội..... 7
Hình 1.4	Tiết diện thép tạo hình nguội [184]..... 8
Hình 1.5	Mô hình độ bền và phân bố ứng suất sau mất ổn định 12
Hình 1.6	Một số ứng dụng của cấu kiện thép tạo hình nguội tiết diện chữ C hoặc tiết diện mũ chịu uốn quanh trục không đối xứng 15
Hình 1.7	Xà gồ tường..... 16
Hình 1.8	Tiết diện được nghiên cứu 18
Hình 1.9	Minh họa các dạng mất ổn định đàn hồi cơ bản của thép chữ C bẻ móc chịu nén đúng tâm [32] 24
Hình 1.10	Mô hình AISI S100 và tương tác thực tế 26
Hình 1.11	Mô hình tách rời để giải bài toán mất ổn định của tiết diện chữ C 28
Hình 1.12	So sánh hệ số mất ổn định của bản cánh tiết diện chữ I 31
Hình 1.13	Hệ số mất ổn định k của tiết diện chữ C có sườn đối xứng 35
Hình 1.14	So sánh giữa nghiệm xấp xỉ và nghiệm chính xác của tiết diện chữ C có sườn đối xứng..... 35
Hình 1.15	Hệ số mất ổn định cục bộ của bản cánh dầm tiết diện chữ I và tiết diện hộp..... 36
Hình 2.1	Quan hệ giữa độ mảnh với độ bền thí nghiệm 46
Hình 2.2	Đường cong cường độ và dữ liệu thí nghiệm 47
Hình 2.3	Sự khác biệt giữa phương pháp Bề rộng hữu hiệu và phương pháp Cường độ trực tiếp 48
Hình 2.4	Đường cong ứng suất-biến dạng cho thép cán nguội..... 51
Hình 2.5	Định nghĩa của các biến ngẫu nhiên Q và R 52
Hình 2.6	Định nghĩa chỉ số độ tin cậy β 53

Số hiệu	Tên hình
Hình 2.7	Ví dụ về mối quan hệ giữa chỉ số độ tin cậy β và hệ số sức kháng ϕ ... 56
Hình 2.8	Mất ổn định của tấm dưới ứng suất nén..... 58
Hình 2.9	Mối quan hệ giữa tấm mất ổn định và tấm tăng cứng..... 59
Hình 2.10	Kích thước tấm và phân bố ứng suất 60
Hình 3.1	Mô hình tính của tiết diện chữ C không bẻ móc..... 66
Hình 3.2	Mô hình tính bộ phận tăng cứng của tiết diện chữ C bẻ móc 67
Hình 3.3	Trạng thái ban đầu của bài toán mất ổn định của các cấu kiện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng 68
Hình 3.4	Sơ đồ tính độ cứng chống xoay..... 77
Hình 3.5	Sơ đồ tính đầm chịu tải trọng dọc trục..... 79
Hình 3.6	Tiết diện để xác định độ cứng lò xo..... 81
Hình 3.7	Các sơ đồ khối tính toán hệ số mất ổn định 84
Hình 3.8	Kiểm chứng phương pháp RSM cho cấu kiện chịu nén 85
Hình 3.9	Kiểm chứng phương pháp RSM cho cấu kiện chịu uốn 87
Hình 3.10	Kiểm chứng RSM với các phương pháp số 88
Hình 3.11	Ảnh hưởng của độ cứng âm 90
Hình 3.12	Mô hình tính..... 93
Hình 3.13	Sơ đồ khối tính toán hệ số mất ổn định của bản bụng 94
Hình 3.14	Dạng mất ổn định của tiết diện chữ C thành mỏng..... 95
Hình 3.15	Quan hệ giữa hệ số mất ổn định với kích thước tiết diện 96
Hình 3.16	Hệ số mất ổn định sắp xếp theo chiều dày tiết diện..... 98
Hình 3.17	Hệ số mất ổn định sắp xếp theo chiều dài móc..... 100
Hình 3.18	Hệ số mất ổn định khi $\mu_L = 0,05$ 101
Hình 3.19	Quan hệ giữa hệ số mất ổn định trung bình và μ_B 102
Hình 3.20	Công thức đề xuất cho đoạn cong thứ ba khi $\mu_L = 0,45$ 103
Hình 3.21	Chênh lệch so với đường cơ sở do ảnh hưởng của μ_L và μ_B 104
Hình 3.22	Công thức đề xuất cho đoạn cong thứ hai với $\mu_L = 0,45$ 104

Số hiệu	Tên hình
Hình 3.23	Xác định các thông số của đoạn cong đầu tiên 105
Hình 3.24	Sự biến thiên của hệ số C_v 108
Hình 3.25	Kết quả kiểm tra trên bộ dữ liệu mở rộng..... 110
Hình 3.26	Phân phối xác suất của độ tương đồng so với kết quả đã có 112
Hình 4.1	Lưu đồ thực hiện 116
Hình 4.2	Đường cong ứng suất-biến dạng điển hình từ thí nghiệm 116
Hình 4.3	Các mô hình vật liệu của thép các bon cán nóng..... 117
Hình 4.4	Đường cong ứng suất-biến dạng Ramberg-Osgood hai đoạn..... 119
Hình 4.5	Mô hình trong ABAQUS 120
Hình 4.6	Độ bền xác định bằng phương pháp EWM..... 124
Hình 4.7	Đường cong độ bền và phân bố ứng suất trong ABAQUS..... 125
Hình 4.8	So sánh kết quả của ABAQUS với kết quả của Oey và Papangelis ... 126
Hình 4.9	So sánh với kết quả thí nghiệm..... 127
Hình 4.10	Kết quả mô phỏng độ bền của ABAQUS 128
Hình 4.11	Kết quả mô phỏng của ABAQUS phân nhóm theo B/H 129
Hình 4.12	Đường cong độ bền đề xuất với từng tỷ lệ B/H 131
Hình 4.13	Đường cong độ bền đề xuất so với kết quả mô phỏng..... 132
Hình 4.14	Phân phối xác suất của độ tương đồng của các công thức DSM đề xuất và hiện hành 133
Hình 4.15	Kiểm chứng với kết quả thí nghiệm và mô phỏng số 135
Hình 4.16	Quan hệ giữa hệ số sức kháng và chỉ số độ tin cậy 138

Hình vẽ, đồ thị phụ lục

Số hiệu	Tên hình
Hình A.1	Đường cong chữ ký sau khi phân tích dải hữu hạn cho tiết diện chữ C chịu nén [32] PL3
Hình A.2	Ví dụ về phân tích mất ổn định bằng phương pháp Dải hữu hạn [32]PL4
Hình A.3	Mất ổn định của cấu kiện chữ C chịu nén sử dụng phương pháp Phần tử hữu hạn [32] PL5
Hình A.4	Đường cong chữ ký của phương pháp Dải hữu hạn PL7
Hình A.5	Ví dụ khác về phân tích mất ổn định với FSM PL8
Hình A.6	Hệ số chống xoay PL11
Hình A.7	Tấm tựa khớp trên các cạnh b , ngàm đàn hồi trên các cạnh a PL14
Hình A.8	Giá trị của p và q theo ζ (Trường hợp I) 15
Hình A.9	Tấm ngàm đàn hồi ở một cạnh a và tự do ở cạnh a còn lại PL16
Hình A.10	Giá trị của p và q theo ζ (Trường hợp II) PL17
Hình A.11	Mất ổn định cục bộ của các tiết diện thành mỏng PL18
Hình A.12	Tấm chữ nhật chịu nén PL19
Hình A.13	Tấm chữ nhật có gờ PL21
Hình B.1	Đồ thị tra hệ số mất ổn định PL26

MỞ ĐẦU

1. *Tính cấp thiết của đề tài*

Phương pháp Cường độ trực tiếp (Direct Strength Method hay DSM) do Schafer và Peköz đề xuất đưa ra một cách tiếp cận mới và hiệu quả trong việc thiết kế các cấu kiện chịu uốn của kết cấu thép tạo hình nguội (cold-formed steel hay CFS). Phương pháp này tính toán độ bền uốn thông qua các ứng suất tới hạn đàn hồi của toàn bộ tiết diện và do đó tránh được quy trình tính lặp áp dụng cho từng phần của tiết diện theo yêu cầu của phương pháp Bề rộng hữu hiệu (Effective Width Method hay EWM). Ứng suất tới hạn đàn hồi của tiết diện có thể được xác định từ đường cong chữ ký (Signature curve) và được thực hiện bởi chương trình máy tính. Nhờ đó DSM trở thành một công cụ tính toán quan trọng trong kết cấu thép tạo hình nguội và cần tiếp tục được nghiên cứu để có thể thích ứng với nhiều hình dáng tiết diện trong các điều kiện chịu tải khác nhau.

DSM là phương pháp tiếp cận bán thực nghiệm chỉ phù hợp với các tiết diện và hình thức chịu lực được lựa chọn, xem xét trong các nghiên cứu đã thực hiện tương ứng. Vì các công thức tính toán theo DSM hiện tại được xây dựng dựa trên các số liệu thí nghiệm và mô phỏng của cấu kiện chịu uốn quanh trục đối xứng, do đó khi áp dụng phương pháp DSM theo tiêu chuẩn AISI S100 của Mỹ và tiêu chuẩn AS/NZS 4600 của Úc và New Zealand cho cấu kiện chịu uốn quanh trục không đối xứng của tiết diện (tiết diện có chỉ có một trục đối xứng hoặc không có trục đối xứng, mô men uốn nằm trong mặt phẳng vuông góc với trục không đối xứng của tiết diện), độ bền uốn thu được thường rất an toàn. Sự an toàn quá mức này được quan sát lần đầu tiên bởi Schafer và Peköz khi sử dụng các kết quả thí nghiệm của Winter cho các tiết diện mũ (hat section), có phân bố ứng suất uốn tương tự như thép chữ C gấp mép uốn quanh trục không đối xứng. Mặc dù các cấu kiện chịu uốn thường được bố trí để chịu uốn quanh trục đối xứng, nhưng hiện tượng uốn quanh trục không đối xứng vẫn có thể phát sinh trong các cột chịu tải lệch tâm hoặc xà gồ trên mái có độ dốc từ 10° trở lên. Đặc biệt đối với xà gồ tường được thiết kế với mô men hai phương thì thành phần độ bền uốn quanh trục không đối xứng chiếm tỷ trọng rất đáng kể và không thể bỏ qua.

Rõ ràng, việc thiết kế cầu kiện CFS chịu uốn quanh trục không đối xứng bằng phương pháp DSM hiện hành còn tồn tại nhiều bất cập cần giải quyết, vì vậy, đề tài **“Nghiên cứu ứng xử của cầu kiện thép tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng”** là cần thiết và có tính thực tiễn. Luận án sẽ tập trung vào cầu kiện thép tiết diện chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng. Đây là tiết diện được sử dụng phổ biến trong thực tế.

2. Mục đích nghiên cứu

Điều chỉnh công thức DSM (công thức tính toán độ bền theo phương pháp DSM) để dự đoán chính xác hơn độ bền của cầu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng.

3. Mục tiêu nghiên cứu

- Xây dựng phương pháp giải tích xác định hệ số mất ổn định của cả tiết diện.
- Đề xuất công thức thực hành hỗ trợ xác định ứng suất tới hạn của cầu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén.
- Đề xuất các điều chỉnh để nâng cao độ chính xác của công thức DSM khi dự đoán độ bền của cầu kiện thép tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng, cụ thể là tiết diện chữ C chịu uốn với bản bụng chịu nén. Các điều chỉnh cần có tính kế thừa, tức cần đơn giản, dễ áp dụng và đặc biệt phải giữ được hình thức ban đầu của công thức DSM hiện hành.

4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng: Độ bền theo phương pháp Cường độ trực tiếp (DSM) của cầu kiện thép tạo hình nguội

Phạm vi nghiên cứu:

Vật liệu: Vật liệu thép các bon cán nóng và thép dập nguội cường độ cao

Loại tiết diện: Tiết diện chữ C (bè móc và không có móc, không có sườn gia cường, hai cánh đều nhau), tiết diện mũ tương đương

Hình thức chịu lực: Chịu uốn một phương, quanh trục không đối xứng, bản bụng chịu nén

Luận án không xét đến trạng thái giới hạn 2

5. Phương pháp nghiên cứu

a) Phương pháp thu thập số liệu

Thu thập số liệu về lịch sử nghiên cứu phương pháp DSM

Thu thập số liệu thí nghiệm và mô phỏng số của các nghiên cứu đã có

Thu thập kết quả nghiên cứu về khiếm khuyết hình học (geometry imperfections), mô hình vật liệu... các dữ liệu khác

b) Phương pháp mô phỏng

Sử dụng các phần mềm phù hợp với cấu kiện thép tạo hình nguội, tiến hành mô phỏng số để thu thập số liệu trên diện rộng.

c) Phương pháp phân tích và tổng hợp

Sử dụng phương pháp xác suất thống kê, phân tích độ tin cậy, quy nạp, tổng hợp, hồi quy để thu được kết quả cần tìm từ bộ số liệu thí nghiệm đã có và mô phỏng số.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

Nghiên cứu sẽ giúp cho các kỹ sư, những cán bộ biên soạn tiêu chuẩn, nhà nghiên cứu có cái nhìn đầy đủ hơn về ứng xử cấu kiện thép tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng. Vì định hướng của nghiên cứu dựa trên nền tảng DSM, nên khi áp dụng vẫn có được sự đơn giản của DSM so với EWM, đồng thời vẫn đảm bảo được tính chính xác cần thiết. Kết quả nghiên cứu có thể được tham khảo để điều chỉnh nội dung thiết kế cấu kiện thép tạo hình nguội chịu uốn trong các tiêu chuẩn.

7. Kết quả nghiên cứu chính và những đóng góp mới của luận án

Xây dựng phương pháp Độ cứng biên (RSM) có khả năng xác định ứng suất tới hạn của cấu kiện có tiết diện hở được xây dựng từ các bản thép.

Đề xuất công thức thực hành ba đoạn để tính ứng suất tới hạn của cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén.

Đề xuất quan hệ tuyến tính giữa các tham số của công thức DSM với tỷ lệ kích thước tiết diện (B/H) khi áp dụng cho cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén.

8. *Cấu trúc của luận án*

Ngoài các nội dung quy định bao gồm phần Mở đầu, Danh mục chữ viết tắt, bảng biểu, hình vẽ, Kết luận và kiến nghị, Tài liệu tham khảo và Phụ lục, cấu trúc chính của luận án bao gồm 4 chương như được mô tả dưới đây:

Chương 1 Tổng quan về cấu kiện thép tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng

Chương này trình bày các vấn đề về độ bền DSM và ứng suất/mô men tới hạn, bao gồm: những tồn tại của công thức (phương pháp) hiện hành; các nghiên cứu đã có nhằm khắc phục các tồn tại trên; ưu nhược điểm của các nghiên cứu đã có; hướng nghiên cứu tiếp tục.

Chương 2 Cơ sở khoa học để thiết lập công thức độ bền theo phương pháp DSM

Chương 2 trình bày các phương pháp, công thức đã được sử dụng để xây dựng công thức độ bền theo DSM cũng như tính toán ứng suất/mô men tới hạn. Đây là cơ sở để xây dựng các công thức điều chỉnh ở Chương 3 và Chương 4.

Chương 3 Xây dựng công thức giải tích để xác định hệ số mất ổn định cục bộ của cấu kiện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén

Chương 3 xây dựng phương pháp Độ cứng biên (RSM) để xác định hệ số mất ổn định (cũng là ứng suất/mô men tới hạn) của tiết diện hở tổ hợp từ các bản thép. Sau đó, phương pháp RSM được sử dụng để xây dựng công thức giải tích hỗ trợ tính toán hệ số mất ổn định của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén. Khi so sánh với kết quả của các nghiên cứu đã có, phương pháp RSM và công thức giải tích đề xuất đều cho thấy có độ chính xác cao.

Chương 4 Đề xuất cải tiến công thức xác định độ bền của cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén

Trên cơ sở kết hợp mô men tới hạn xác định bằng công thức giải tích ở Chương 3 với độ bền mô phỏng số của phần mềm ABAQUS, Chương 4 đề xuất một số điều chỉnh cho công thức DSM hiện hành để phù hợp với cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ CẤU KIỆN THÉP TẠO HÌNH NGUỘI CHỊU UỐN QUANH TRỤC KHÔNG ĐỐI XỨNG

1.1. Giới thiệu về kết cấu thép tạo hình nguội

Kết cấu thép tạo hình nguội là kết cấu sử dụng các cấu kiện thép được tạo hình từ các dải, tấm hoặc thanh thép các bon hoặc hợp kim thấp có độ dày không quá 1 inch (25,4 mm) ở nhiệt độ môi trường. Đây là một trong hai loại kết cấu thép phổ biến hiện nay. Không giống như thép cán nóng truyền thống và các cấu kiện tổ hợp, tiết diện của cấu kiện thép tạo hình nguội được tạo ra ở nhiệt độ môi trường bởi các máy cán, chẵn hoặc uốn nguội (xem Hình 1.1).



a) Máy cán nguội [17]



b) Chẵn (máy ép khuôn) [16]



c) Uốn nguội (máy gấp mép) [15]

Hình 1.1 Các phương pháp tạo hình nguội

Vật liệu của cấu kiện thép tạo hình nguội có thể là thép các bon (ví dụ: ASTM A36 [35], giới hạn chảy 250 MPa) hoặc thép hợp kim thấp cường độ cao (ví dụ: ASTM A572 Gr 50 [36], giới hạn chảy 345 MPa) thường được sử dụng trong kết cấu thép cán nóng, hơn nữa có thể là thép có giới hạn chảy lên đến 550 MPa. Các kết cấu thép tạo hình nguội chủ yếu được sử dụng cho trường hợp chịu tải trọng tương đối

nhẹ và kết cấu nhịp ngắn. Độ dày của tấm hoặc dải thép được sử dụng để sản xuất cấu kiện thép tạo hình nguội thường từ 0,4 mm đến 6,0 mm. Tuy nhiên, thép tấm và thanh thép dày tới 25,4 mm vẫn có thể được tạo hình nguội thành các hình dạng khác nhau. Trong thực tế, cấu kiện thép tạo hình nguội được sử dụng làm vỏ xe ô tô, vỏ toa tàu hỏa, nhiều loại thiết bị, giá đỡ trong kho hàng, xi lô chứa ngũ cốc, các sản phẩm đường bộ (như lan can), tháp truyền tải, cột truyền tải, thiết bị thoát nước, công trình cầu và nhà.



a) Khung nhà xưởng [14]



b) Khung nhà thấp tầng [11]



c) Giàn [13]



d) Giá đỡ kho hàng [12]

Hình 1.2 Ứng dụng của kết cấu thép tạo hình nguội

Cấu kiện thép tạo hình nguội được sử dụng trong xây dựng công trình bắt đầu vào khoảng những năm 1850 tại cả Mỹ và Anh. Tuy nhiên, do thiếu tiêu chuẩn áp dụng nên loại kết cấu này không phát triển.

Từ năm 1946, việc ứng dụng và phát triển kết cấu thép tạo hình nguội tại Mỹ đã được đẩy nhanh nhờ việc ban hành nhiều phiên bản khác nhau của "Tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội" do Viện kim loại và thép của Mỹ (AISI) thực hiện. Hiện nay, tiêu chuẩn này được sử dụng phổ biến trên toàn thế giới, bao gồm cả

Việt Nam, cho nhiều loại kết cấu khác nhau, chẳng hạn như khung nhà kho hoặc nhà máy, khung nhà thấp tầng, giàn và giá lưu trữ, như thể hiện trong Hình 1.2.

Hình 1.3 trình bày loại cấu kiện thép tạo hình nguội phổ biến nhất.



a) Dầm và cột [7]



b) Tôn đáy sàn liên hợp [8]



c) Xà gồ và tôn lợp [10]



d) Xà gồ và tôn tường [9]

Hình 1.3 Các loại cấu kiện thép tạo hình nguội

So với kết cấu thép cán nóng, kết cấu thép tạo hình nguội có các ưu điểm sau: Sử dụng vật liệu cường độ cao tạo ra các sản phẩm nhẹ, giúp đơn giản hóa công tác di chuyển cấu kiện và do đó giảm chi phí bốc xếp tại nhà máy, vận chuyển đến và lắp đặt tại công trường.

Thiết bị cán nguội đơn giản hơn so với thiết bị cán nóng, giúp giảm chi phí đầu tư ban đầu.

Phương pháp liên kết đa dạng, dễ dàng và nhanh hơn. Có nhiều loại liên kết đơn giản có thể dùng cho cấu kiện thép mỏng như liên kết bu lông, vít, hàn máng, đinh rút, mối nối cơ và đôi khi là "đập đập". Ưu điểm này giúp giảm thời gian thi công cũng như sức lao động tại công trường.

Khi chi phí chế tạo tăng lên, sự đơn giản trong chế tạo và lắp dựng kết cấu thép tạo hình nguội trở thành yếu tố có lợi. Do đó, ứng dụng của kết cấu thép tạo hình nguội dự kiến sẽ tiếp tục tăng mạnh trong thời gian tới.

Nhiều nghiên cứu đang được tiến hành để mở rộng việc sử dụng kết cấu thép tạo hình nguội, trong đó cũng có nhiều hướng nghiên cứu mới như sử dụng vật liệu thép không gỉ, vật liệu nhôm cho các dự án ven biển; vật liệu có cường độ cao hơn và các loại tiết diện tổ hợp từ thép tạo hình nguội để ứng dụng cho công trình chịu tải lớn hơn như các nhà thấp tầng.

1.2. Tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội

Kết cấu thép cán nóng có xu hướng tránh (hoặc ít nhất là kiểm soát) hiện tượng mất ổn định cục bộ để huy động toàn bộ khả năng chịu lực của vật liệu. So với kết cấu thép cán nóng, các tấm thành phần trong tiết diện ngang của cấu kiện thép tạo hình nguội mảnh hơn nhiều và do đó dễ mất ổn định cục bộ hơn. Hiện tượng này trở thành bản chất của các cấu kiện thép tạo hình nguội, từ đó dẫn đến việc sử dụng độ bền sau mất ổn định. Ngoài ra, ứng suất dư và khiếm khuyết hình học trong quá trình chế tạo làm giảm đáng kể độ bền của cấu kiện. Do đó, các tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép cán nóng không thể áp dụng cho các kết cấu thép tạo hình nguội.

Nhiều nước đã xây dựng tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội. Một số tiêu chuẩn được liệt kê trong Bảng 1.1.

Tiêu chuẩn AISI S100 của Mỹ là tiêu chuẩn tiên phong trong thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội. Tiêu chuẩn này được xuất bản lần đầu tiên vào năm 1946 và hiện nay được sử dụng phổ biến trên toàn thế giới.

Các tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội khác bao gồm EBCS-3 (Ê-ti-ô-pi-a), NBR 14762:2001 (Bờ-ra-xin), NCH 427 (Chi lê – đã hủy bỏ), CIRSOC 303 (Ác-hen-ti-na), UNI CNR 10022 (Ý), NEN 6773 (Hà Lan), DAST-Chi dẫn 016: 1992 (Đức), Hướng dẫn thiết kế và thi công kết cấu thép nhẹ phiên bản đơn vị SI (tiếng Nhật: 軽鋼構造設計施工指針. 同解説 SI単位版) [196]. Nhiều tiêu chuẩn được biên soạn dựa trên AISI S100. Một số đã được thay thế bằng các tiêu chuẩn mới. Tiêu chuẩn mới có thể sử dụng trực tiếp Eurocode 3 hoặc dùng bản chuyển đổi của AISI S100 hiện hành.

Bảng 1.1 Phương pháp và tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội

Quốc gia hoặc vùng lãnh thổ	Số hiệu tiêu chuẩn	Bề dày giới hạn	Vật liệu	Phương pháp tính
Trung Quốc	GB 50018-2002 [197]		Thép các bon Q235, $F_y = 235$ MPa Thép hợp kim thấp Q345, $F_y = 345$ MPa	EWC
Châu Âu	EN 1993-1-3 - Part 1-3 [48]		Thép các bon và thép hợp kim thấp $F_y = 235 \sim 460$ MPa Ví dụ S235, S355	EWC
Anh	BS 5950-5:1998 [85] (Hết hiệu lực)	8 mm	$F_y = 200 \sim 420$ MPa Ví dụ S235, S355	EWC
Ấn độ	IS: 801 – 1975 [153]	12,5 mm	Thép các bon và thép hợp kim thấp $F_u = 320 \sim 780$ MPa	EWC
Nga	SP 260.1325800 – 2016 [195]		$F_y = 220 \sim 450$ MPa	EWC
Mỹ, Ca na đa và Mê xi cô	AISI S100-16 [31]	25,4 mm	Thép các bon và thép hợp kim thấp $F_y = 170 \sim 550$ MPa Ví dụ A36, A572	EWM DSM
Úc và Niu Di-lân	AS/NZS 4600 [89]	25 mm	$F_y = 170 \sim 550$ MPa Ví dụ G350, G550	EWM DSM

Ghi chú:

EWC - Sử dụng ý tưởng bề rộng hữu hiệu EWM - Phương pháp Bề rộng hữu hiệu

DSM - Phương pháp Cường độ trực tiếp F_y - Giới hạn chảy F_u - Giới hạn bền

Tất cả các tiêu chuẩn kết cấu thép tạo hình nguội đều sử dụng ý tưởng bề rộng hữu hiệu để làm phương pháp thiết kế chủ đạo. Chỉ có tiêu chuẩn AISI S100 của Mỹ [31] và AS/NZS 4600 của Úc và Niu Di-lân [89] chính thức cho phép sử dụng phương pháp Cường độ trực tiếp. Đây là một phương pháp mới, tiên tiến và đơn giản. Phương pháp này sẽ được trình bày chi tiết trong phần tiếp theo.

Việt Nam chưa ban hành tiêu chuẩn thiết kế cho các kết cấu thép tạo hình nguội. Để thực hành thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội tại Việt Nam, nhiều tác giả đã xuất bản các hướng dẫn thiết kế dựa trên các tiêu chuẩn nước ngoài, chẳng hạn như theo Eurocode 3 (Nguyễn Hồng Sơn, 2021 [6]) và AS/NZS 4600 (Vũ Quốc Anh, 2022 [1], Đoàn Định Kiến, 2022 [2]). Trên thực tế, các dự án sử dụng kết cấu thép tạo hình nguội tại Việt Nam phần lớn được thiết kế theo Tiêu chuẩn AISI S100 của Mỹ.

Có thể thấy rằng tiêu chuẩn AISI S100 của Mỹ là tiêu chuẩn tiên tiến nhất, hoàn thiện nhất và phổ biến nhất cho kết cấu thép tạo hình nguội. Đây cũng là tiêu chuẩn được sử dụng trong nghiên cứu này. Các nội dung từ đây trở đi sẽ được trình bày trên cơ sở của Tiêu chuẩn AISI S100.

1.3. Các phương pháp thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội

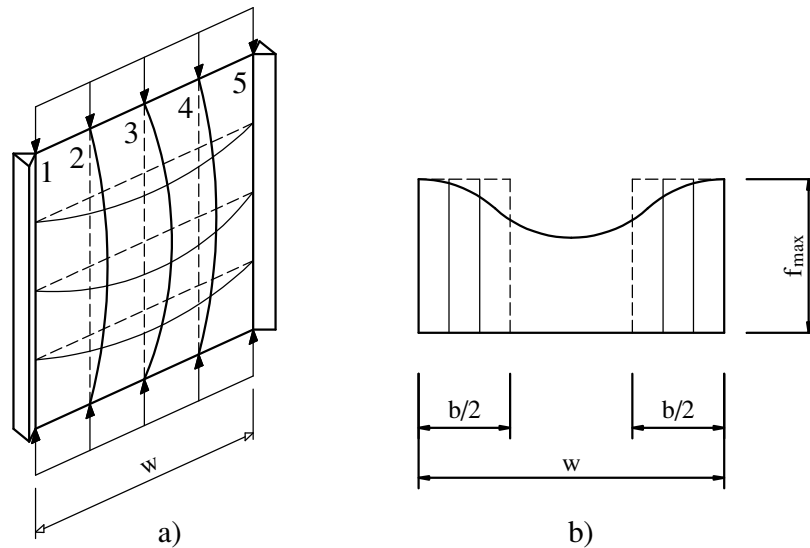
1.3.1. Phương pháp Bề rộng hữu hiệu

Phương pháp Bề rộng hữu hiệu (EWM) là phương pháp được phát triển sớm nhất để thiết kế các kết cấu thép tạo hình nguội và đã được AISI S100 áp dụng từ năm 1946 [31][32][89]. Tiết diện chiết giảm, tức là các tiết diện hữu hiệu, được sử dụng để xem xét hiện tượng mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo cũng như cơ chế sau mất ổn định của các cấu kiện thép thành mỏng tạo hình nguội.

Cơ chế sau mất ổn định rất quan trọng trong kết cấu thép tạo hình nguội vì nó có thể cải thiện đáng kể độ bền của cấu kiện. Cơ chế này lần đầu tiên được thảo luận bởi Winter [178] cho các tấm chịu nén.

Hình 1.5a thể hiện mô hình tính của một tấm mỏng liên kết khớp theo hai cạnh dọc và chịu ứng suất nén ở hai cạnh còn lại. Tấm được chia ra năm dải theo chiều dọc để giải thích rõ hơn về ứng xử của tấm. Biến dạng của các dải là khác nhau do sự cản trở tại các biên dọc của tấm. Độ võng của dải giữa số 3 là lớn nhất. Độ võng này giảm xuống khi khoảng cách của dải đến biên dọc giảm (dải 2 và 4). Dải bản nằm trên các biên dọc sẽ không xuất hiện biến dạng (dải bản 1 và 5).

Khác với hiện tượng mất ổn định của cột, tấm mỏng sẽ không bị phá hoại khi ứng suất trong tấm đạt đến ứng suất tới hạn. Tại ứng suất tới hạn, độ võng của tấm sẽ chỉ phát triển có giới hạn và sau đó tấm sẽ tiếp tục chịu được tải trọng lớn hơn. Trong tấm xuất hiện sự phân bố lại ứng suất, như thể hiện trong Hình 1.5b.



Hình 1.5 Mô hình độ bền và phân bố ứng suất sau mất ổn định [32]

a) Mô hình

b) Phân bố ứng suất

Tấm bị phá hoại, tức là không thể chịu thêm tải trọng, chỉ khi ứng suất của các dải gần biên đạt đến giới hạn chảy, tức là ứng suất nén f_{max} đạt đến F_y .

Độ bền sau mất ổn định của tấm được chứng minh bằng thực nghiệm vào năm 1928 và lý thuyết gần đúng về nó lần đầu tiên được Th. v. Karman đưa ra vào năm 1932 [44]. Các ảnh chụp về hiện tượng tăng độ bền sau mất ổn định đã được thực hiện bởi Winter [177].

Trong phương pháp Bề rộng hữu hiệu, thay vì xem xét sự phân bố ứng suất không đều trên toàn bộ chiều rộng w của tấm, giả định rằng tải trọng gây ra ứng suất nén đều có giá trị bằng ứng suất lớn nhất f_{max} trên chiều rộng hữu hiệu b như thể hiện trong Hình 1.5b. Chiều rộng b được chọn sao cho diện tích bên dưới đường cong phân bố ứng suất thực bằng tổng diện tích hai hình chữ nhật có tổng chiều rộng là b và ứng suất bằng f_{max} .

Mục B4.1 và Phụ lục 1 của tiêu chuẩn AISI S100 [31][89] bao gồm các yêu cầu cấu tạo đối với tỷ lệ chiều rộng và bề dày và các công thức xác định bề rộng hữu hiệu của các phần tử được tăng cứng, các phần tử không tăng cứng, các phần tử có biên tăng cường hoặc sườn cứng trung gian cũng như bản bụng của dầm.

EWM là một phương pháp mạnh mẽ có thể áp dụng cho các loại tiết diện bất kỳ. Cho đến nay, phương pháp này đã được sử dụng thành công trong nhiều công

trình. Tuy nhiên, nó cũng có một số nhược điểm. Đặc biệt, khối lượng tính toán của EWM khá lớn và lặp đi lặp lại trên từng phần tử, và do đó đã thúc đẩy việc phát triển phương pháp tính toán mới đơn giản hơn, nhanh hơn và hiệu quả hơn. Đó là phương pháp Cường độ trực tiếp hay DSM.

1.3.2. Phương pháp Cường độ trực tiếp

Dựa trên ý tưởng bề rộng hữu hiệu, phương pháp Cường độ trực tiếp (DSM) mở rộng ý tưởng “hữu hiệu” ra toàn bộ tiết diện. Độ mảnh của toàn bộ tiết diện được sử dụng thay cho độ mảnh của từng tấm thành phần, do đó có thể xác định trực tiếp độ bền của cả tiết diện (EWM cũng cho phép xác định trực tiếp độ bền của các tấm thành phần nhưng giá trị này không có ý nghĩa thực tiễn; do đó, bề rộng hữu hiệu được xác định để hình thành nên tiết diện hữu hiệu và từ đó tính toán độ bền của cầu kiện).

Phương pháp Cường độ trực tiếp được đề xuất bởi Schafer và Peköz vào năm 1998 [138]. Phương pháp này đã được chính thức tích hợp vào tiêu chuẩn AISI S100 kể từ năm 2004. Đến nay, DSM đã được chấp nhận rộng rãi nhờ vào tính đơn giản, dễ sử dụng. Ví dụ về tính toán cầu kiện xà gồ tường cho thấy khối lượng tính toán khi sử dụng DSM kết hợp với xác định mô men tới hạn bằng phương pháp số giảm khoảng 31% so với EWM. Nếu chỉ xét nội dung kiểm tra bền, mức giảm có thể lên tới 41%, gần bằng một nửa khối lượng tính toán theo EWM [166].

1.3.3. Các phương pháp số

Các phương pháp số như phương pháp Phần tử hữu hạn phi tuyến sử dụng trong phần mềm mô phỏng (ABAQUS, STRAND7, ANSYS...) có thể xác định được độ bền của các cấu kiện thép tạo hình nguội. Toàn bộ hình dạng của cấu kiện, các khiếm khuyết hình học, đường cong vật liệu, ứng suất dư, điều kiện biên hoặc thậm chí là hình dạng thực của gối tựa... có thể được nhập vào mô hình để mô phỏng ứng xử thực tế của cấu kiện cũng như kết cấu. Tuy nhiên, công tác mô hình hóa khá phức tạp và tốn nhiều công sức. Do đó, các phương pháp số chỉ phù hợp cho mục đích nghiên cứu.

1.3.4. Phương pháp được lựa chọn cho luận án

Phương pháp Cường độ trực tiếp là một phương pháp mới, với ưu điểm nhanh và đơn giản. Hiện nay, phương pháp này đã trở nên phổ biến và sẽ được sử dụng rộng

rãi trong tương lai. Hơn nữa, vẫn còn nhiều lĩnh vực trong DSM cần được nghiên cứu hoàn thiện thêm. Một trong những vấn đề chưa được giải quyết triệt để là sự chưa chính xác của công thức DSM khi áp dụng cho các cấu kiện thép tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng. Vấn đề này đã được đề cập ngay trong nghiên cứu đầu tiên về DSM của Schafer và Peköz [138] và tiếp tục được xem xét trong một số nghiên cứu khác [121][138]. Do đó, luận án này sẽ tập trung vào phương pháp DSM và vấn đề độ bền của cấu kiện chịu uốn quanh trục không đối xứng.

1.4. Tầm quan trọng và ứng dụng của trạng thái chịu uốn quanh trục không đối xứng

Các trạng thái chịu tải đơn lẻ như uốn một phương hoặc nén thuần túy ít khi xảy ra trong thực tế. Hình thức chịu lực kết hợp là phổ biến nhất và được thiết kế theo Chương H của AISI S100. Ví dụ, Mục H1.2 đưa ra công thức xác định độ bền của các cấu kiện chịu tải dọc trục kết hợp với uốn hai phương

$$\frac{P}{P_a} + \frac{M_x}{M_{ax}} + \frac{M_y}{M_{ay}} \leq 1 \quad (1.1)$$

trong đó M_{ax} và M_{ay} là độ bền uốn quanh hai trục chính.

Biểu thức này đơn giản hóa trạng thái chịu lực phức tạp bằng cách bỏ qua tương tác giữa các trạng thái chịu lực khác nhau. Mỗi trạng thái chịu lực được xử lý độc lập, do đó có thể áp dụng các độ bền riêng biệt của các trường hợp chịu tải thuần túy.

Đối với tiết diện đối xứng một trục, M_{ay} thường biểu thị độ bền uốn quanh trục không đối xứng. Có thể thấy rằng độ bền uốn của trục không đối xứng là quan trọng và thường xuyên được sử dụng.

Một trong các cấu kiện thép tạo hình nguội phổ biến nhất liên quan đến trạng thái chịu uốn quanh trục không đối xứng là xà gồ mái và xà gồ tường tiết diện chữ C. Chúng là các cấu kiện chịu lực phức tạp, trong đó có mô men theo hai phương. Bảng B.1 trình bày số liệu thống kê khối lượng xà gồ của 38 công trình làm bằng thép (chủ yếu là kết cấu nhà xưởng) thuộc 13 dự án ở Việt Nam. Có thể thấy rằng xà gồ chiếm khối lượng lớn trong kết cấu thép nhà xưởng, giá trị lớn nhất có thể đạt 44,1% (với trường hợp kết cấu thép chỉ được sử dụng cho phần mái của công trình, giá trị này có thể đạt tới 58,2%) khối lượng thép của toàn bộ kết cấu, trong đó bỏ qua khối lượng

của các tấm tôn. Tỷ lệ phần trăm khối lượng trung bình của xà gỗ là 34,2%. Do đó, loại cấu kiện này cần được quan tâm mặc dù chúng chỉ thuộc kết cấu bao che.



a) Xà gỗ tường chữ C [18]



b) Xà gỗ mái chữ C [19]



c) Xà gỗ tường tiết diện mũ [20]



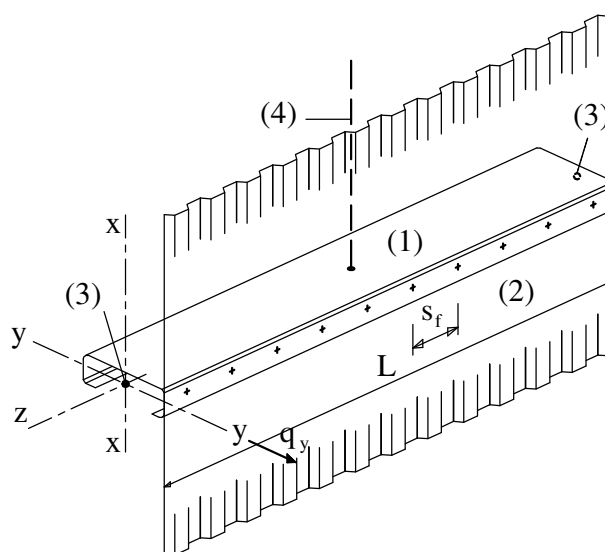
d) Xà gỗ mái tiết diện mũ [21]

Hình 1.6 Một số ứng dụng của cấu kiện thép tạo hình nguội tiết diện chữ C hoặc tiết diện mũ chịu uốn quanh trục không đối xứng

Đối với tiết diện chữ C, tỷ lệ độ bền uốn quanh trục không đối xứng trong công thức độ bền kết hợp của xà gỗ tường lớn hơn xà gỗ mái. Trong thực tế, trục không đối xứng của các cấu kiện này cũng đồng thời là trục yếu.

Đối với xà gỗ tường (Hình 1.7), mô men quanh trục yếu y (do trọng lượng cấu kiện, tấm lợp, cách nhiệt ...), M_y , nhỏ hơn nhiều so với mô men quanh trục khỏe x (do tải trọng gió), M_x , khiến tính toán quanh trục y được coi là ít quan trọng hơn so với trục x và đôi khi bị bỏ qua. Tuy nhiên, tính toán chi tiết đối với xà gỗ tường cho thấy, vì các đặc trưng hình học đối với trục y nhỏ hơn nhiều so với trục x , nên tỷ lệ ảnh hưởng của M_y trong độ bền kết hợp, tức Công thức (1.1), là đáng kể. Tỷ lệ này là 24% đối với LRFD và 31% đối với ASD [166], do đó không thể bỏ qua. Nếu tải trọng đứng tăng, ví dụ, khi có quạt thông gió treo trên xà gỗ tường, ảnh hưởng của M_y tăng nhanh và có thể đạt một nửa độ bền toàn phần.

Có thể thấy trạng thái chịu uốn quanh trục không đối xứng đóng vai trò quan trọng trong thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội. Thế nhưng một số nghiên cứu [38][59][120][121][128][138] đã chỉ ra công thức dự đoán độ bền uốn của DSM quá an toàn hoặc đôi khi thiên về mất an toàn trong một số trường hợp, thúc đẩy các nghiên cứu sâu hơn. Nội dung cụ thể về vấn đề này sẽ được trình bày trong phần sau.



Hình 1.7 Xà gỗ tường

(1) Xà gỗ tường (2) Tôn tường

(3) Liên kết hai đầu (4) Giằng xà gỗ

1.5. Phương pháp Cường độ trực tiếp: Vấn đề về độ bền uốn quanh trục không đối xứng

Phương pháp Bề rộng hữu hiệu (EWM) sử dụng trong thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội quá phức tạp, do cần tính toán độ võng đàn hồi một cách thủ công. Bên cạnh đó, nội dung xác định bề rộng và các đặc trưng hình học hữu hiệu cũng tốn nhiều công sức. Khi các tiết diện được tối ưu (ví dụ, tiết diện được bố trí thêm sườn dọc), độ phức tạp của các nội dung trên đều tăng đáng kể. Do đó, Schafer và Peköz đã đề xuất phương pháp Cường độ trực tiếp (DSM) vào năm 1998 [138] để cung cấp thêm một lựa chọn bên cạnh phương pháp EWM. Phương pháp này đã được chính thức tích hợp vào tiêu chuẩn của Viện thép và kim loại của Mỹ (AISI) [31] kể từ năm 2004. Phương pháp này dựa trên dữ liệu thí nghiệm thu thập được từ 17 nghiên cứu cho 574 cấu kiện uốn. Loại cấu kiện được nghiên cứu bao gồm tiết diện chữ C, tiết diện chữ Z, tiết diện mũ và các loại tôn có thể được gia cường bằng các sườn dọc với loại, vị trí và số lượng khác nhau.

Dựa trên quy luật về mối liên hệ giữa độ mảnh và độ bền uốn thí nghiệm, ba phương pháp dự đoán độ bền mới đã được đề xuất, trong đó, phương pháp thứ ba là phương án chọn. Đây là phương pháp dựa trên ý tưởng của EWM, tức các biểu thức

tính toán bề rộng hữu hiệu (1.7) đến (1.9), sau đó điều chỉnh để phù hợp với dữ liệu thí nghiệm. Phương pháp Dải hữu hạn với sự hỗ trợ của phần mềm CUFSM được dùng để xác định mô men tới hạn.

Các tác giả nhận thấy công thức đề xuất đảm bảo được độ chính xác cần thiết, ngoại trừ đối với các mẫu thí nghiệm của Winter (1946) [172] cho kết quả sai lệch lớn. Các tiết diện trong nghiên cứu của Winter là tiết diện chữ C bề móc có tỷ lệ bề rộng cánh/chiều cao bản bụng B/H và tỷ lệ bề rộng móc/ chiều cao bản bụng L_1/H đều thấp. Các yếu tố này liên quan đến các đặc tính quanh trục yếu và trục không đối xứng của tiết diện. Do đó, một số nghiên cứu đã được thực hiện để giải quyết vấn đề này.

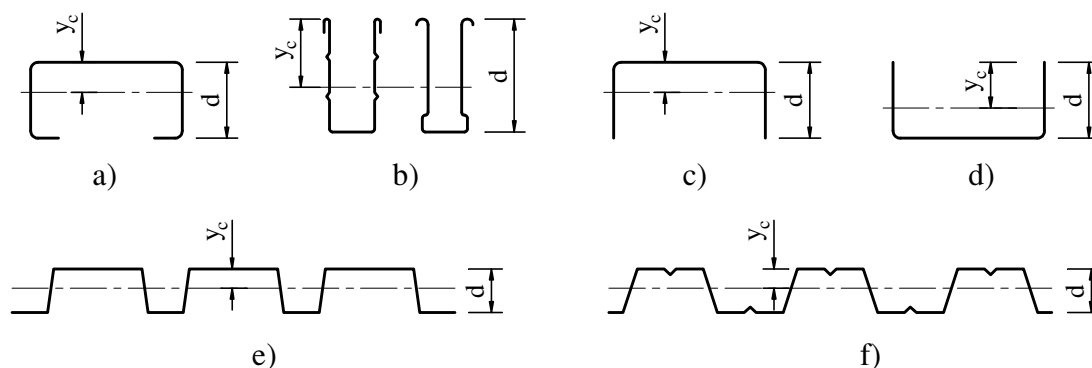
Baur và LaBoube [38] và Nuttayasakul và Easterling [120] (2001 và 2003) đã tiến hành thí nghiệm trên tiết diện mũ chịu uốn quanh trục không đối xứng như thể hiện trong Hình 1.8b. Các tiết diện này thường được sử dụng làm thanh cánh giàn. Khi chịu lực, các bản cánh thẳng đứng có sườn cứng khi chịu uốn sẽ bị mất ổn định méo. Nhóm tác giả nhận thấy đường cong độ bền theo DSM thiên về quá an toàn khi độ mảnh tiết diện nhỏ, nhưng lại thiếu an toàn ở độ mảnh lớn. Do vậy, nhóm tác giả đề xuất công thức tính độ bền mới cho dạng tiết diện đang xét, trên cơ sở giữ nguyên hình thức của công thức DSM hiện hành [120].

Raebel, C.H. và D. Gwozdz (2018, 2020) [128][129] so sánh kết quả thí nghiệm và độ bền tính theo DSM và EWM của các tấm tôn mái chịu uốn quanh trục không đối xứng. 24 thí nghiệm đã được tiến hành trên bốn loại chiều dày tôn khác nhau (dày cỡ 22, 20, 18 và 16) ở trạng thái chịu mô men dương và âm. Kết quả theo EWM được quan sát thấy có độ chính xác cao hơn đối với loại tôn mỏng trong khi kết quả theo DSM chính xác hơn đối với tôn có độ dày lớn chịu mô men uốn dương. Tuy vậy, cả hai phương pháp đều cho kết quả hợp lý đối với trường hợp tôn chịu mô men uốn âm. Do đó, nhóm tác giả đề xuất sử dụng EWM cho loại tôn mỏng (dày cỡ 20 hoặc mỏng hơn) và DSM cho loại tôn dày.

Fan và cộng sự (2019) [70] đã thực hiện thí nghiệm trên thép không gỉ S30408, với 6 thí nghiệm chịu uốn quanh trục khỏe và 6 thí nghiệm uốn quanh trục yếu. Các mô hình số đã được sử dụng để nghiên cứu ứng xử của dầm chữ C bề móc dùng vật liệu thép không gỉ. Các mô hình này được xây dựng trong ABAQUS và được kiểm

chứng bằng kết quả thí nghiệm. Dựa trên phân tích phần tử hữu hạn của 238 mô hình chịu uốn quanh trục khỏe và 229 mô hình chịu uốn quanh trục yếu, nhóm tác giả đã đề xuất các công thức tính toán độ bền của dầm thép không gọt tiết diện chữ C bẻ móc khi chịu uốn quanh trục khỏe và trục yếu.

Degtyarev (2020) [59] nghiên cứu mô men tới hạn và độ bền sau mất ổn định của tôn sàn chịu uốn thông qua 472 mô phỏng số trong ANSYS. Tác giả nhận thấy các tấm tôn sàn có bản cánh phẳng (không có sườn dọc gia cường) sẽ xảy ra hiện tượng mất ổn định cục bộ, trong khi các tấm tôn sàn với bản cánh có sườn dọc gia cường sẽ xảy ra hiện tượng mất ổn định méo. Độ bền sau mất ổn định của tôn sàn có bản cánh phẳng chịu ảnh hưởng từ mức độ không đối xứng của tấm tôn và độ mảnh của bản cánh nén. Các công thức thiết kế được đề xuất để dự đoán hệ số mất ổn định cục bộ của sàn có bản cánh phẳng và hệ số mất ổn định méo của sàn với bản cánh được gia cường. Một số điều chỉnh được đề xuất cho phương pháp Cường độ trực tiếp để có thể dự đoán chính xác hơn độ bền uốn của tôn sàn khi phá hoại theo mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo. Mức độ không đối xứng của tiết diện đã được tích hợp vào các công thức đề xuất về độ bền có kể đến tương tác với ổn định cục bộ.



Hình 1.8 Tiết diện được nghiên cứu [80]

a) C bẻ móc (Fan và cộng sự, Oey và Papangelis)

b) Tiết diện mũ phức hợp (Nuttayasakul và Easterling)

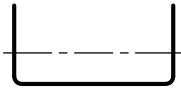
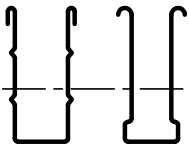
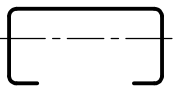
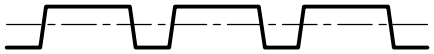
c, d) C tron (Georgantzia và cộng sự) e, f) Tôn sàn (Degtyarev)

Oey và Papangelis (2021) [121] đã đề xuất công thức DSM mới cho các thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục yếu với bản cánh chịu nén. Ứng xử của 33 tiết diện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục yếu đã được nghiên cứu thông qua phương pháp Dải hữu hạn và phần tử hữu hạn phi tuyến. Các kích thước của tiết

diện như độ dày, chiều cao bản bụng và chiều rộng bản cánh được thay đổi để cho phép độ mảnh tiết diện có thể biến thiên trong phạm vi tương đối rộng.

Georgantzia và cộng sự (2022) [76] nghiên cứu ứng xử của 14 tiết diện chữ C không bẻ móc chế tạo từ hợp kim nhôm xử lý nhiệt 6082-T6 chịu uốn quanh trục yếu trên thí nghiệm uốn bốn điểm. Mô hình số được bổ sung để kết hợp với kết quả thí nghiệm. Độ bền thu được từ thí nghiệm và mô phỏng số được sử dụng để đánh giá sự chính xác của các công thức trong tiêu chuẩn Châu Âu, cũng như tính khả dụng của phương pháp Cường độ liên tục và phương pháp Cường độ trực tiếp. Cuối cùng, nhóm tác giả đã đề xuất một phương pháp thiết kế thay thế dựa trên khái niệm bề rộng hữu hiệu dẻo áp dụng cho các tiết diện chữ C có độ mảnh lớn chịu uốn quanh trục yếu. Tuy nhiên, các công thức đề xuất khá dài và khó áp dụng.

Bảng 1.2 Tiết diện được sử dụng trong nghiên cứu của Glauz và Schafer

Chiều của mặt cắt	Số lượng	Tác giả	Kiểu dữ liệu
	11	Beale và cộng sự [128][129]	Thí nghiệm
	48	Baur và LaBoube [38]	Thí nghiệm
	67	Nuttayasakul và Easterling [120]	Thí nghiệm
	33	Oey và Papangelis [121]	Mô phỏng
	156-172	Degtyarev [59]	Mô phỏng
	153-168	Degtyarev [59]	Mô phỏng

Glauz và Schafer (2022) [80] sửa đổi toàn diện đường cong độ bền của DSM để nâng cao tính chính xác khi áp dụng cho các cấu kiện chịu uốn quanh trục không đối xứng. Một số điều chỉnh đơn giản xuất phát từ sự phân bố lại ứng suất do chảy dẻo và mất ổn định được đề xuất và kiểm chứng bởi kết quả thí nghiệm và mô phỏng

số đã công bố. Giới hạn về tiết diện áp dụng được thể hiện trong Bảng 1.2. Riêng đối với tiết diện chữ C, là loại tiết diện được sử dụng phổ biến trong thực tế, dữ liệu cho trục không đối xứng mới chỉ có kết quả mô phỏng với số lượng rất hạn chế (Oey và Papangelis với 33 kết quả mô phỏng số) hoặc kết quả thí nghiệm của trường hợp hiếm khi được sử dụng (Beale và cộng sự, thép chữ C không bẻ móc chịu uốn với bản bụng chịu kéo, xem Hình 1.8d). Công thức tính độ bền mới đã tích hợp độ bền dẻo dự trữ thành một công thức duy nhất và có dạng mới hoàn toàn. Hình thức mới này sau đó được Schafer và Glauz (2023) [143] sử dụng để áp dụng cho các trường hợp chịu lực khác.

Ma và Papangelis (2023, 2025) [115][116] đã nghiên cứu các tiết diện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục yếu khi bản bụng chịu nén. Phân tích dải hữu hạn đàn hồi được sử dụng tính toán mất ổn định và phân tích phần tử hữu hạn phi tuyến được dùng để xác định độ bền uốn. Các tác giả phát hiện ra rằng hiện tượng mất ổn định méo là dạng mất ổn định chủ đạo. Độ bền uốn tính toán bằng phân tích phần tử hữu hạn phi tuyến tính đã được so sánh với công thức DSM hiện hành cho thấy có sự khác biệt đáng kể. Các tác giả đã đề xuất công thức DSM mới liên quan đến ổn định méo trong đó sử dụng ba hệ số thay vì hai hệ số như trong công thức DSM hiện hành.

Các công thức mới đề xuất cho độ bền của cấu kiện chịu uốn quanh trục yếu và trục không đối xứng được tóm tắt trong Bảng B.3.

Về dữ liệu thí nghiệm, Schafer [138] khi xây dựng công thức DSM đã trình bày kết quả thí nghiệm của Winter, tiến hành trên dầm chữ C có móc cong chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén. Yu và Laboube [185] tiến hành thí nghiệm trên 12 tiết diện mũ sử dụng thép cán nóng, là loại tiết diện có ứng xử tương tự như tiết diện chữ C bẻ móc khi chịu uốn quanh trục không đối xứng. Fan và cộng sự [70][71] tiến hành thí nghiệm trên bốn tiết diện chữ C bẻ móc sử dụng thép không gỉ austenit S30408 (AISI304). Thép không gỉ sử dụng cùng một mô hình vật liệu Ramberg-Osgood hai giai đoạn [34] tương tự như thép cán nguội. Georgantzia và cộng sự (2022) [76] thí nghiệm 14 tiết diện chữ C không bẻ móc chế tạo từ hợp kim nhôm xử lý nhiệt 6082-T6 chịu uốn quanh trục yếu trên thí nghiệm uốn bốn điểm.

Ngoài ra, El Mahi và Rhodes (1985) [66][132] đã thực hiện 84 thí nghiệm trên các thép chữ C không bẻ móc và 17 mẫu thép chữ T. Enjily (1985) [69] thí nghiệm các thép chữ C không bẻ móc chịu uốn nhịp 0,5 m và 1 m. Jayabalan (1989) [88] đã thực hiện các thí nghiệm trên chín dầm tiết diện chữ C không bẻ móc nhịp 2m. Yiu F. và T. Peköz (2000) [179], (2001) [180] đã tiến hành thí nghiệm bốn điểm trên hai dầm tiết diện chữ C. Các thí nghiệm này được tiến hành chủ yếu trên các dầm tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục yếu với bản bụng chịu kéo.

Julie Cohen (1987) [52] đã đề xuất phương pháp tính lặp bề rộng hữu hiệu cho tiết diện chữ C không bẻ móc với bản bụng chịu kéo với một số hạn chế về kích thước. Do đó, không phải tất cả dữ liệu thí nghiệm đều có thể được đánh giá bởi phương pháp này.

Từ nội dung tóm tắt trên có thể rút ra các kết luận sau:

DSM là phương pháp bán thực nghiệm. Mỗi công thức chỉ đúng trong phạm vi áp dụng nhất định liên quan đến kết quả thí nghiệm và mô phỏng số được sử dụng để xây dựng nên công thức.

Công thức DSM hiện hành cho các cấu kiện chịu uốn được xây từ dữ liệu thí nghiệm của các cấu kiện chịu uốn quanh trục đối xứng [80] và trục khỏe [121]. Không có công thức riêng cho trường hợp chịu uốn quanh trục không đối xứng hoặc trục yếu. Vì tiêu chuẩn AISI S100 không giới hạn phạm vi của công thức độ bền uốn chỉ được áp dụng trong trường hợp chịu uốn quanh trục khỏe và đối xứng, nên trong thực tế, công thức độ bền này thường được sử dụng chung cho cả hai trường hợp chịu uốn.

Áp dụng công thức DSM hiện hành để dự báo độ bền uốn quanh trục không đối xứng hoặc trục yếu thường cho ra kết quả quá an toàn hoặc trong một số trường hợp là không an toàn. Độ bền uốn tính theo DSM có thể gần gấp đôi giá trị tính toán bằng EWM khi tiết diện có độ mảnh lớn. Do đó, cần phải cải thiện công thức xác định độ bền uốn hiện tại để thu được kết quả chính xác hơn cho trường hợp chịu uốn quanh trục không đối xứng và trục yếu.

Schafer [138] nhận ra rằng cả hai đặc điểm chịu uốn quanh trục yếu và chịu uốn quanh trục không đối xứng là nguyên do dẫn đến sự thiếu chính xác của công thức DSM. Glauz và Schafer [80] cho rằng sự khác biệt này là do hiện

tượng phân bố lại ứng suất dẫn đến sự dịch chuyển của trục trung hòa. Hiện tượng này trở nên rõ ràng hơn đối với các tiết diện không đối xứng quanh trục uốn. Do đó, thuật ngữ và khái niệm "trục không đối xứng" sẽ được sử dụng trong toàn bộ luận án chứ không phải thuật ngữ "trục yếu". Số lượng nghiên cứu về cấu kiện chịu uốn quanh trục không đối xứng vẫn còn khá khiêm tốn. Một số tác giả đã có những nỗ lực để cải tiến công thức DSM hiện tại. Trong nghiên cứu mới nhất, Glauz và Schafer (2022) [80] đã giới thiệu một dạng công thức mới để xác định độ bền theo DSM cho các cấu kiện chịu uốn quanh trục không đối xứng không phân biệt tiết diện. Tuy nhiên, dữ liệu thí nghiệm và mô phỏng để xây dựng công thức này còn khá hạn chế. Vì vậy, công thức mới chỉ có thể được xem là đề xuất sơ bộ. Cần nhiều nghiên cứu hơn nữa để hoàn thiện công thức xác định độ bền uốn quanh trục không đối xứng.

Chữ C bẻ và không bẻ móc là tiết diện quan trọng được sử dụng rộng rãi trong thực tế. Oey và Papangelis [121], Ma và Papangelis [115] đã đề xuất cải tiến công thức DSM hiện tại cho cấu kiện thép tạo hình nguội tiết diện chữ C bẻ móc chịu uốn quanh trục không đối xứng và nhưng sử dụng tập số liệu rất hạn chế, chưa đảm bảo độ tin cậy. Vì vậy, mục tiêu của luận án là tiếp tục nghiên cứu dạng cấu kiện này trên tập số liệu có tính tổng quát. Luận án sẽ tập trung vào trạng thái chịu lực phổ biến nhất, tức trường hợp bản bụng chịu nén.

Như đã đề cập ở trên, nghiên cứu này sẽ tập trung vào trường hợp chịu uốn quanh trục không đối xứng thay vì trường hợp chịu uốn quanh trục yếu. Đối với tiết diện chữ C, trường hợp uốn quanh trục không đối xứng bao trùm trường hợp chịu uốn quanh trục yếu, do đó cho ra kết quả rộng hơn và có tính ứng dụng cao hơn.

Việc điều chỉnh công thức DSM hiện hành hoặc xây dựng công thức mới sẽ liên quan đến ứng suất tới hạn của ổn định cục bộ hoặc ổn định méo (gọi chung là ứng suất tới hạn của tiết diện), hoặc hệ quả của chúng, tức mô men tới hạn đối với cấu kiện chịu uốn. Ứng suất hoặc mô men tới hạn của tiết diện cũng là một trong những giá trị đầu vào của công thức độ bền theo DSM. Các nghiên cứu cho thấy mất ổn định méo không xảy ra ở các cấu kiện có tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén [121][165]. Do đó, nội dung kế tiếp sẽ trình

bày tình trạng hiện tại của vấn đề xác định hệ số/ứng suất/mô men tới hạn đàn hồi (sau đây dùng ứng suất tới hạn làm đại diện) thu được từ hiện tượng mất ổn định cục bộ của các tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng khi bản bụng chịu nén.

1.6. Ứng suất tới hạn do mất ổn định cục bộ của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén

1.6.1. Vai trò của ứng suất tới hạn do mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo của toàn bộ tiết diện trong phương pháp DSM

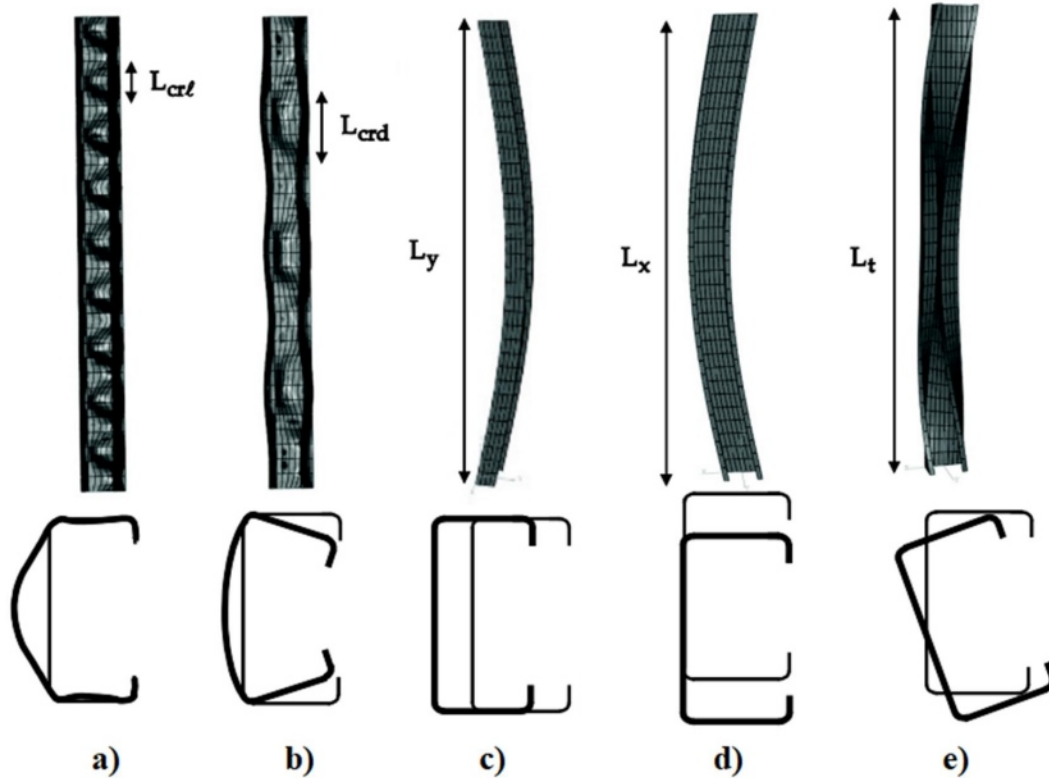
Ứng suất tới hạn do mất ổn định cục bộ và ổn định méo, hoặc hệ quả (lực dọc, lực cắt, mô men uốn, v.v.) được sử dụng rộng rãi trong tiêu chuẩn AISI S100-16 [31][32][89] để xác định độ bền của cấu kiện. Đây là một trong hai giá trị đầu vào cơ bản của công thức DSM, ví dụ, mô men tới hạn M_{cr1} trong công thức xác định độ bền uốn (1.2).

$$\text{Khi } \lambda_c \leq 0,776 \quad \phi_b M_{nl} \leq \phi_b M_{ne} \\ \text{Khi } \lambda_c > 0,776 \quad \phi_b M_{nl} \leq 1 - 0,15 \left(\frac{M_{cr1}}{M_{ne}} \right)^{0,4} \left(\frac{M_{cr1}}{M_{ne}} \right)^{0,4} M_{ne} \quad (1.2)$$

Các dạng mất ổn định gốc (gọi tắt là “dạng gốc”; thuật ngữ này được dùng để tránh nhầm lẫn với thuật ngữ “dạng mất ổn định cơ bản” thường được dùng để chỉ dạng mất ổn định đầu tiên) trong cấu kiện thép tạo hình nguội bao gồm mất ổn định cục bộ, mất ổn định méo và mất ổn định tổng thể. Mất ổn định tổng thể có thể là mất ổn định uốn, mất ổn định xoắn và mất ổn định uốn xoắn cho các cấu kiện chịu nén và mất ổn định ngang xoắn cho các cấu kiện chịu uốn. Các dạng gốc được minh họa trong Hình 1.9.

Các dạng gốc được phân biệt theo tài liệu [31][32][89] và được trình bày kỹ hơn ở Phụ lục A.1.

Chú ý rằng bản thân hiện tượng mất ổn định đàn hồi không phải là trạng thái giới hạn. Thay vào đó, ứng suất (hoặc hệ quả) tới hạn đàn hồi được sử dụng làm giá trị đầu vào của nhiều công thức tính độ bền khác nhau trong tiêu chuẩn AISI S100.



Hình 1.9 Minh họa các dạng mất ổn định đàn hồi cơ bản của thép chữ C bề móc chịu nén đúng tâm [32]

- a) Mất ổn định cục bộ b) Mất ổn định méo
 c) Mất ổn định ngang (y) d) Mất ổn định ngang (x)
 e) Mất ổn định xoắn

1.6.2. Các phương pháp xác định ứng suất tới hạn do mất ổn định cục bộ của toàn bộ tiết diện theo AISI S100

Tiêu chuẩn AISI S100 cung cấp hai phương pháp để xác định ứng suất tới hạn do mất ổn định cục bộ của toàn bộ tiết diện (sau đây gọi tắt là ứng suất tới hạn của tiết diện) theo AISI S100, bao gồm phương pháp sử dụng biểu thức giải tích có sẵn (sau đây gọi là “nghiệm giải tích”) và phương pháp số. Nghiệm giải tích sử dụng các công thức giải tích trong Phụ lục 1 của tiêu chuẩn AISI S100. Các công thức này thực chất thuộc về phương pháp EWM và được dùng để xác định hệ số mất ổn định của các tấm thành phần trong tiết diện. Phương pháp số dựa trên phần mềm chuyên dụng như THIN-WALL-2 [22], CUFSM [134], FStr [101][102] sử dụng phương pháp Dải

hữu hạn (FSM), GBTUL [40] sử dụng lý thuyết Dầm tổng quát (GBT) và ABAQUS [152], ANSYS và STRAND7 sử dụng phương pháp Phần tử hữu hạn (FEM). Phương pháp số có thể nhanh chóng giải ra mô men tới hạn đàn hồi với độ chính xác cao.

Tiêu chuẩn AISI S100 ưu tiên phương pháp số cho bài toán độ bền do có thể cung cấp kết quả với độ chính xác cao hơn.

a) *Nghiệm giải tích*

Nghiệm giải tích được giới thiệu trong Phụ lục 2 của tiêu chuẩn AISI S100, sau đó được tham chiếu đến Phụ lục 1, vốn dành riêng cho việc xác định bề rộng hữu hiệu. Phương pháp này rất đơn giản nhờ sử dụng các biểu thức giải tích có sẵn. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp là khối lượng tính toán lớn vì quá trình tính toán tương tự như EWM.

Đối với bài toán mất ổn định cục bộ của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén, nghiệm giải tích thiên về quá an toàn. Lý do là cách tiếp cận của EWM đối với vấn đề mất ổn định cục bộ khác với DSM. EWM sử dụng mô hình phần tử độc lập, trong khi DSM sử dụng mô hình tương tác.

Mô hình phần tử, trái ngược với mô hình tương tác, sử dụng nghiệm của bài toán mất ổn định tấm mỏng. Mô hình này bỏ qua tương tác giữa bản cánh, bản bụng và móc, và giải quyết bài toán mất ổn định của từng tấm thành phần một cách độc lập [31][32][89][138-140][164]. Điều này có thể được giải thích bởi quá trình xây dựng công thức EWM như sau:

Dựa vào ý tưởng về bề rộng hữu hiệu do von Karman và cộng sự [93] giới thiệu và nghiên cứu đánh giá trên nhiều tiết diện thép tạo hình nguội tại Đại học Cornell [171][173-176], Winter vào năm 1947 đã phát triển công thức xác định bề rộng hữu hiệu b_{eff} [173-176] cho các phần tử chịu nén tựa khớp trên hai cạnh dọc

$$b_{eff} = 1,9t \sqrt{\frac{E}{F_y}} \leq 0,475 \frac{t}{w} \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (1.3)$$

Sử dụng công thức tính ứng suất tới hạn đàn hồi

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12 (1 - \nu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2 \quad (1.4)$$

với $k = 4$ cho một tấm mỏng tựa khớp lý tưởng, công thức trên có thể được trình bày theo tỷ lệ σ_{cr}/F_y như sau

$$\frac{b_{eff}}{w} = \sqrt{\frac{cr}{F_y}} \left(1 - 0,25 \sqrt{\frac{cr}{F_y}} \right) \quad (1.5)$$

Kinh nghiệm tích lũy được đã chứng minh rằng công thức dưới đây có thể được sử dụng để xác định bề rộng hữu hiệu b_{eff} một cách chính xác hơn [178]

$$b_{eff} = 1,9t \sqrt{\frac{E}{F_y}} \left(1 - 0,415 \frac{t}{w} \sqrt{\frac{E}{F_y}} \right) \quad (1.6)$$

Mối tương quan giữa dữ liệu thí nghiệm trên các tấm chịu nén và Công thức (1.6) được minh họa bởi Yu và LaBoube [183]. Cần lưu ý rằng Công thức (1.6) cũng có thể được viết lại theo tỷ lệ σ_{cr}/F_y như sau

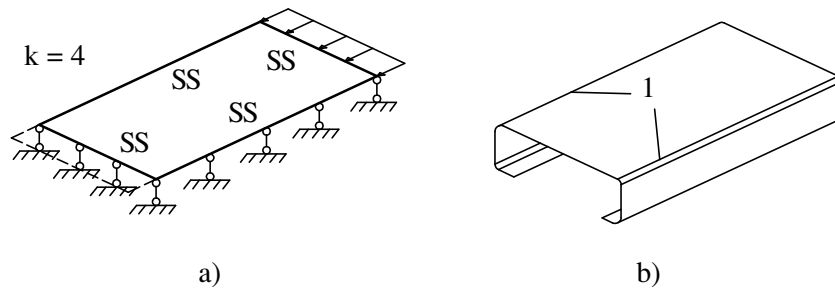
$$\frac{b_{eff}}{w} = \sqrt{\frac{cr}{F_y}} \left(1 - 0,22 \sqrt{\frac{cr}{F_y}} \right) \quad (1.7)$$

Do đó, bề rộng hữu hiệu, b_{eff} , có thể được biểu thị theo

$$b_{eff} = \rho w \quad (1.8)$$

trong đó ρ là hệ số chiết giảm

$$\rho = \frac{1 - 0,22 \sqrt{\frac{cr}{F_y}}}{1} \quad (1.9)$$



Hình 1.10 Mô hình AISI S100 và tương tác thực tế

a) Mô hình AISI S100 cho bản bụng chịu nén

b) Tương tác thực tế: bản cánh là gối đàn hồi của bản bụng

SS – Gối tựa khớp

1 – Cạnh liên kết giữa bản cánh và bản bụng

Trong Công thức (1.9), λ là độ mảnh, tính theo

$$\sqrt{\frac{F_y}{cr}} \quad (1.10)$$

Có thể thấy rằng ứng suất tới hạn chỉ là một công cụ để biểu thị bề rộng hữu hiệu theo một dạng khác, tức là chuyển Công thức (1.3) thành Công thức (1.5). Do đó, giá trị của ứng suất tới hạn không cần phải chính xác. Để đơn giản hóa, ứng suất tới hạn của tấm mỏng tựa khớp đã được sử dụng thay cho ứng suất tới hạn của tấm với các điều kiện biên cụ thể. Do đó, việc sử dụng ý tưởng EWM để xác định ứng suất tới hạn của toàn bộ tiết diện tất nhiên sẽ dẫn đến các kết quả thiếu chính xác (xem Hình 1.10).

b) Phương pháp số

Phương pháp số cho kết quả chính xác hơn. Vieiraa và cộng sự [164] tin rằng chỉ có thể dự đoán chính xác hệ số mất ổn định thông qua các phương pháp số. Nhưng phương pháp này cũng có những nhược điểm.

Một trong những vấn đề của các phương pháp số là nhận diện dạng mất ổn định. Sau khi giải được các dạng mất ổn định và các mô men tới hạn tương ứng, các dạng mất ổn định này cần được xác định là mất ổn định cục bộ, mất ổn định méo hay mất ổn định tổng thể. Đối với phương pháp số, công tác này khá khó khăn và nhiều khi mang tính chủ quan, thậm chí với phương pháp FSM. Phương pháp FEM còn khó hơn khi cần nhận diện các dạng gốc trong rất nhiều kết quả (có thể lên đến 100 dạng mất ổn định), đồng thời các dạng mất ổn định thường xuất hiện dưới hình thức kết hợp. Đối với FSM, có thể nhận diện các dạng mất ổn định ngay từ đường cong chữ ký, nhưng không phải lúc nào thành công. Phương pháp giải tích có thể tránh được vấn đề này do dạng mất ổn định được xác định ngay từ khi chuẩn bị thiết lập công thức và sẽ gắn liền với công thức được sử dụng. Vấn đề này được trình bày chi tiết trong Phụ lục A.3.

Nghiệm giải tích và phương pháp số hiện nay đang dùng để xác định ứng suất tới hạn cục bộ của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén đều có những nhược điểm. Nhược điểm của nghiệm giải tích là độ chính xác thấp. Tuy nhiên, so với phương pháp số, nghiệm giải tích thuận tiện và dễ áp dụng hơn. Đồng thời, các công thức giải tích có thể được dễ dàng tích hợp vào tiêu chuẩn

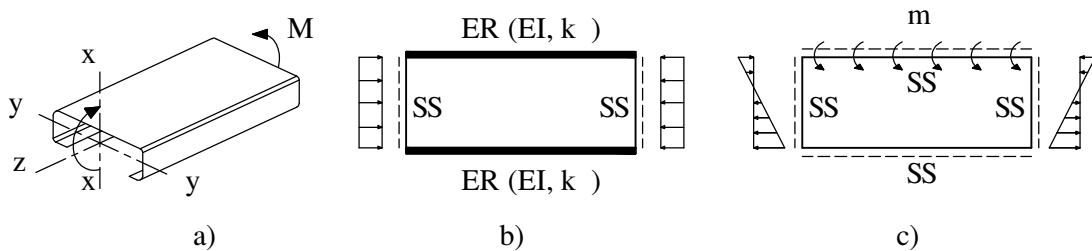
thiết kế. Do đó, đã có những nỗ lực nhằm cải thiện độ chính xác của các công thức giải tích hiện tại. Nội dung cụ thể được trình bày trong phần sau.

1.6.3. Một số đề xuất hiện có nhằm cải tiến công thức giải tích để xác định ứng suất tới hạn của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén

a) Các phương pháp giải bài toán mất ổn định cục bộ của tổ hợp tấm mỏng và những mặt hạn chế

Ổn định cục bộ của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén gắn liền với ổn định cong cục bộ của bản bụng [121][165]. Phương pháp giải có thể được phân loại thành phương pháp ở cấp độ phần tử và phương pháp ở cấp độ tiết diện. Ở cấp độ phần tử, tiết diện được chia thành các tấm phẳng giống như mô hình phần tử sử dụng trong EWM. Tương tác giữa các phần tử được xét đến thông qua các điều kiện biên trên trên cạnh chung. Kết quả là bản bụng được tách khỏi tiết diện thành một tấm mỏng riêng biệt chịu ứng suất nén đều với các biên bị ràng buộc bởi các bản cánh, như đã mô tả trong Mục a.1. Các biên này là sự kết hợp giữa tựa đàn hồi và ngàm đàn hồi (sau đây gọi là gối đàn hồi). Sau đó, phương pháp giải bài toán mất ổn định của tấm mỏng đơn lẻ được áp dụng cho bản bụng. Ở cấp độ tiết diện, tiết diện được nhìn nhận như là tổng thể hoàn chỉnh hoặc tổ hợp của các tấm thành phần. Bài toán mất ổn định của cả tiết diện sẽ được giải quyết đồng thời (Mục a.2).

a.1 Bài toán mất ổn định của tấm đơn chịu ứng suất nén đều trên gối đàn hồi



Hình 1.11 Mô hình tách rời để giải bài toán mất ổn định của tiết diện chữ C

a) Tiết diện chữ C chịu uốn b) Mô hình tách rời của bản bụng

c) Mô hình để tính độ cứng chống xoay k_θ của bản cánh

SS – Gối tựa khớp

ER – Gối đàn hồi

m – Mô men phân bố

Tiết diện chữ C chịu mô men dương M quanh trục không đối xứng y làm bản bụng chịu nén như thể hiện trong Hình 1.11a có thể được phân tích thành các mô hình trong Hình 1.11b và Hình 1.11c. Bản bụng trong Hình 1.11b sau khi bị tách rời sẽ chịu ứng suất nén đều σ . Các cạnh biên của bản bụng được đỡ bởi các dầm có độ cứng kháng uốn EI , đồng thời bị hạn chế bởi độ cứng kháng xoay k_θ . EI là độ cứng kháng uốn của bản cánh quanh trục y như thể hiện trong Hình 1.11a. Độ cứng kháng xoay k_θ được tính toán từ mô hình của Hình 1.11c, trong đó các bản cánh được coi là các tấm hình chữ nhật tựa khớp trên chu vi chịu ứng suất uốn trên hai cạnh ngang và chịu mô men phân bố trên cạnh chung giữa bản bụng và bản cánh.

Bài toán mất ổn định của tấm mỏng liên quan đến việc tìm hàm độ võng w của tấm.

Liên quan đến vấn đề này, Timoshenko (1961) [159] đã trình bày bài toán mất ổn định của các tấm hình chữ nhật tựa khớp quanh chu vi chịu nén uốn đồng thời (tức ứng suất phân bố tuyến tính). Tác giả đã sử dụng chuỗi lượng giác kép để biểu thị độ võng của tấm

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \sin \frac{m}{a} x \sin \frac{n}{b} y \quad (1.11)$$

Đây là hàm có tính tổng quát cao. Tuy nhiên, hàm này yêu cầu chu vi phải là gối tựa khớp và do đó không phù hợp với bài toán đang xét.

Timoshenko (1961) [159] ngoài ra cũng đã giải quyết hai bài toán mất ổn định của các tấm hình chữ nhật chịu nén đều trên hai cạnh tựa khớp và với cạnh không chịu tải: i) một cạnh ngàm đàn hồi và cạnh còn lại tự do; ii) cả hai cạnh tựa trên dầm đàn hồi. Hàm độ võng chứa bốn hệ số chưa biết C_1 đến C_4 như sau đã được sử dụng

$$w = \sin \frac{m}{a} x \left[C_1 e^{-y} + C_2 e^y + C_3 \cos y + C_4 \sin y \right] \quad (1.12)$$

Sau khi kết hợp với bốn điều kiện biên trên hai cạnh không tải (mỗi cạnh có một cặp điều kiện biên), một hệ bốn phương trình tuyến tính được tạo ra. Ứng suất tới hạn hoặc hệ số mất ổn định được xác định bằng cách cho định thức bằng không, từ đó sinh ra một phương trình siêu việt. Giải phương trình siêu việt bằng các phương pháp số. Kết quả cuối cùng được lập thành bảng. Trong nghiên cứu này, độ cứng chống xoay được coi là tỷ lệ thuận với độ cứng chống xoắn C của bản cánh, có thể

được tính toán từ hằng số xoắn J bằng cách coi tiết diện của bản cánh chỉ bao gồm các dải chữ nhật mỏng

$$C = GJ = G \frac{1}{3} \sum b_i t_i^3 \quad (1.13)$$

trong đó b và t là chiều dài và bề dày của các phần trong tiết diện bản cánh (bao gồm cả móc).

Độ cứng chống xoay nêu trên không xét đến độ cứng kháng uốn của các bản cánh dưới ứng suất phân bố tuyến tính gây ra bởi mômen uốn quanh trục không đối xứng như được thể hiện trong Hình 1.11c, cũng như khả năng mất ổn định cục bộ của bản cánh.

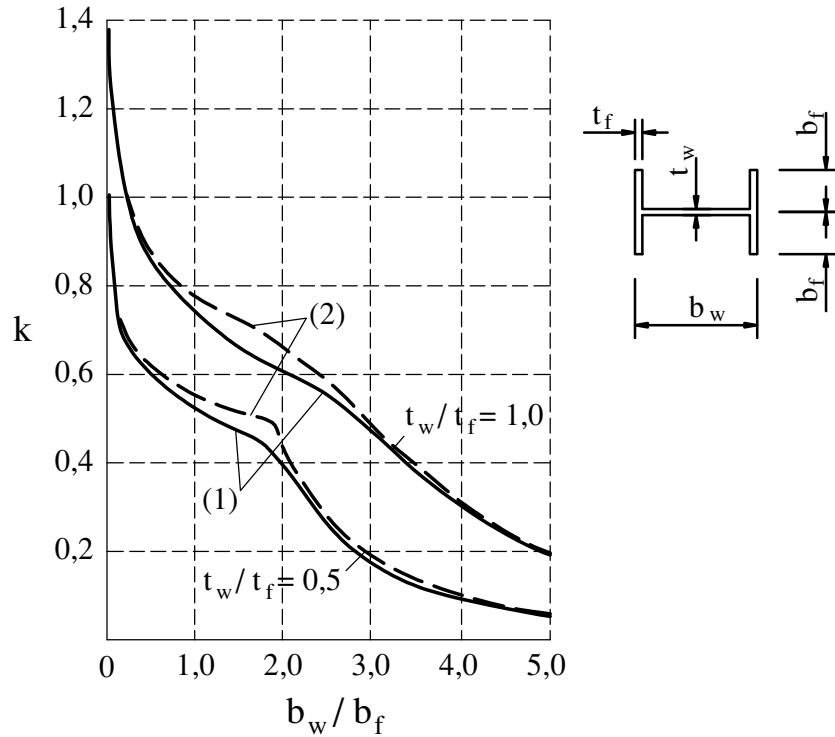
Như một biến thể của phương pháp Timoshenko, Bleich (1952) [44] đã đề xuất một phương pháp sử dụng khái niệm “hệ số chống xoay” để mô tả ảnh hưởng của các tấm liên kết lên một tấm thành phần của thép hộp chịu nén đúng tâm. Đây là hình thức phân bố ứng suất đơn giản nhất. Hệ số chống xoay trước tiên được giả định độc lập với ứng suất nén, sau đó được hiệu chỉnh bằng cách nhân với một hệ số để thỏa mãn chính xác các giá trị k giới hạn (khi tỷ lệ bề rộng bằng 1 và 0). Nhờ đó, hệ số mất ổn định k có thể được xác định từ lời giải bài toán mất ổn định của tấm mỏng. Phép gán gần đúng trên dẫn đến giá trị k thấp hơn một chút so với giá trị chính xác. Sai số của phương pháp này là 2% đối với các thép hộp có độ dày đồng đều và 5% đối với thép hộp có tỷ lệ độ dày là 0,5.

Kết quả so sánh cho thấy nghiệm xấp xỉ gần sát với “nghiệm chính xác” và thiên về an toàn.

Hệ số mất ổn định k được giải cho tiết diện chữ I và chữ C không bẻ móc bằng cách sử dụng hệ số chống xoay ζ và sau đó so sánh với kết quả từ phương pháp năng lượng (xem Mục a.2) của Lundquist và Stowell [107][108][154]. Kết quả so sánh được biểu diễn trong Hình 1.12 cho $t_w/t_f = 1$ và 0,5.

Cần lưu ý rằng thuật ngữ “nghiệm chính xác” được Bleich sử dụng trong Hình 1.12 (và các nội dung liên quan trong tài liệu của Bleich [44]) vẫn chỉ là giá trị xấp xỉ vì chúng được giải bằng phương pháp năng lượng, như Lundquist và Stowell đã giải thích trong [107][108][154].

Ngoài các thép hộp, chữ C không bẻ móc và tiết diện I, phương pháp Hệ số chống xoay cũng được áp dụng cho các cột tiết diện Z, T, U, thép góc, tiết diện hộp (box section, hay tiết diện tổ hợp, khác với rectangular tube, hay thép hộp định hình) và tiết diện chữ thập chịu nén đều. Mục 2.2.1 sẽ trình bày chi tiết hơn về phương pháp này.



Hình 1.12 So sánh hệ số mất ổn định của bản cánh tiết diện chữ I [44]

(1) Nghiệm xấp xỉ

(2) Nghiệm chính xác

T.A. Le (2010) [3] đã giải hệ số mất ổn định của các cột tiết diện rỗng hình chữ nhật RHS chịu nén đúng tâm. Hệ số chiết giảm trong Công thức (1.14) được sử dụng để xét đến ứng suất nén khi xác định độ cứng chống xoay C của tấm tăng cứng. Hệ số này liên quan đến tỷ lệ tải trọng tới hạn của tấm mất ổn định và tấm tăng cứng, N_{cr}^f và N_{cr}^w . Tác giả sử dụng phần mềm Mathematica để giải bài toán mất ổn định của tấm trên hai gờ đàn hồi. So với phương pháp FSM (CUFSM), kết quả của nghiên cứu thiên về an toàn với sai số nhỏ hơn 10%.

$$C = \frac{2D_f}{b_f} \left(1 - \frac{N_{cr}^w}{N_{cr}^f} \right) \quad (1.14)$$

Một quy trình tính gần đúng hệ số mất ổn định cục bộ của các cấu kiện thép tạo hình nguội có các tấm thành phần thuộc kiểu phần tử có sườn và phần tử không sườn chịu ứng suất nén đều và không đều được trình bày bởi Kalyanaraman (1979) [90], Jayabalan (1989) [88], Kalyanaraman và Jayabalan (1994) [91]. Các hệ số mất ổn định được trình bày dưới dạng hàm của hệ số chống xoay ε . Đối với các phần tử biên khớp

$$k_s = 5,485 - 1,485 \frac{0,94}{0,94} \frac{7,47}{7,47} \quad (1.15)$$

và với các phần tử không sườn

$$k_s = 0,851 - 0,426 \frac{0,7}{0,7} \frac{1,5}{1,5} \quad (1.16)$$

với

$$\frac{B_b}{D_b} S_r \quad (1.17)$$

trong đó B_b và D_b lần lượt là bề rộng và độ cứng kháng uốn của tấm mất ổn định, và S_r là độ cứng chống xoay của tấm tăng cứng. Phương pháp xác định hệ số chống xoay của Bleich được sử dụng để suy ra biểu thức của S_r .

$$S_r = C_f S'_r \quad (1.18)$$

trong đó S'_r là độ cứng chống xoay khi bỏ qua ứng suất nén dọc trên tấm tăng cứng và C_f là hệ số hiệu chỉnh theo Bleich

$$C_f = 1 - \frac{K_b}{K_r} \left(\frac{B_r}{B_b} \right)^2 \left(\frac{t_b}{t_r} \right)^2 \quad (1.19)$$

Trong biểu thức trên, K_b và K_r là hệ số mất ổn định của các tấm mất ổn định và tấm tăng cứng có biên tựa khớp. Ứng suất nén trên tấm tăng cứng có thể là ứng suất nén đều hoặc tam giác.

Phương pháp Hệ số chống xoay đã được sử dụng thành công cho các cấu kiện chịu nén, trong đó các tấm mất ổn định và tấm tăng cứng đều chịu nén đều. Tuy nhiên, trường hợp tấm tăng cứng chịu ứng suất tuyến tính vẫn chưa được nghiên cứu.

Vấn đề mất ổn định của các tấm đơn lẻ đã được nghiên cứu sâu. Nhiều tác giả đã giải quyết bài toán này trong các điều kiện biên và chịu tải khác nhau. Ví dụ, Wu

Wen Wei [184] và Hướng dẫn tiêu chuẩn AISI S100 [32] trình bày hệ số mất ổn định của các tấm tựa khớp và ngàm cứng chịu ứng suất uốn. Cheng Yu [181] và Wang, S.T. [169] đã nghiên cứu bài toán mất ổn định tấm chịu ứng suất hai đầu khác nhau hình thành do sự biến thiên của biểu đồ mô men dọc theo chiều dài cầu kiện. Trong mô hình ổn định, tấm sẽ chịu thêm ứng suất tiếp trên hai cạnh dọc. Nhiều lĩnh vực nghiên cứu khác cũng đã được khai thác, bao gồm mất ổn định ngoài phạm vi đàn hồi, vật liệu dị hướng, tấm nhiều lớp...

Tuy nhiên, tổng hợp các nghiên cứu cho thấy vấn đề mất ổn định của các tấm ngàm đàn hồi và tựa đàn hồi đồng thời trên các cạnh không chịu tải vẫn chưa được xem xét. Thống kê các nghiên cứu liên quan đến vấn đề này được thể hiện trong Bảng 1.3.

Bảng 1.3 Các nghiên cứu về ổn định của tấm mỏng

Tác giả	Điều kiện biên		Thuộc tính của tấm tăng cường	
	Tựa đàn hồi	Ngàm đàn hồi	Kiểu ứng suất nén	Xác định độ cứng chống xoay
Timoshenko và các tác giả khác) [159]	Có	Không	Không	Không
	Không	Có	Không	dùng độ cứng chống xoắn
Bleich [44]	Không	Có	Phân bố đều	Gần đúng
Le [3]	Không	Có	Phân bố đều	Gần đúng
			Phân bố đều	
Kalyanaraman [90]	Không	Có	Phân bố tam giác	Gần đúng
Các tác giả khác	Không	Không	Không	Không

a.2 Các phương pháp giải bài toán mất ổn định của tổ hợp tấm

Ở cấp độ tiết diện, bài toán mất ổn định được giải quyết bằng cách xem xét toàn bộ tiết diện như một đối tượng duy nhất. Ứng suất tới hạn của tiết diện có thể được giải bằng phương pháp chính xác, phương pháp năng lượng hoặc các phương

pháp số khác như phương pháp Dải hữu hạn FSM, phương pháp Phần tử hữu hạn FEM, phương pháp dầm tổng quát GBT...

Phương pháp năng lượng

Phương pháp năng lượng đã được Lundquist [108] sử dụng cho các thép hộp chịu nén, bởi Lundquist và Stowell [107][154][155] cho thép C không bẻ móc và tiết diện chữ I.

Độ võng tấm tựa khớp được giả định là hàm hình sin. Độ võng của tấm có mô men phân bố trên hai cạnh dọc bằng nhau về trị số và ngược chiều sẽ được giả định là cung tròn. Vì các tấm thành phần có liên kết theo cả hai cạnh dọc, hàm độ võng w của tấm thành phần sẽ là sự kết hợp của hình sin và cung tròn như sau

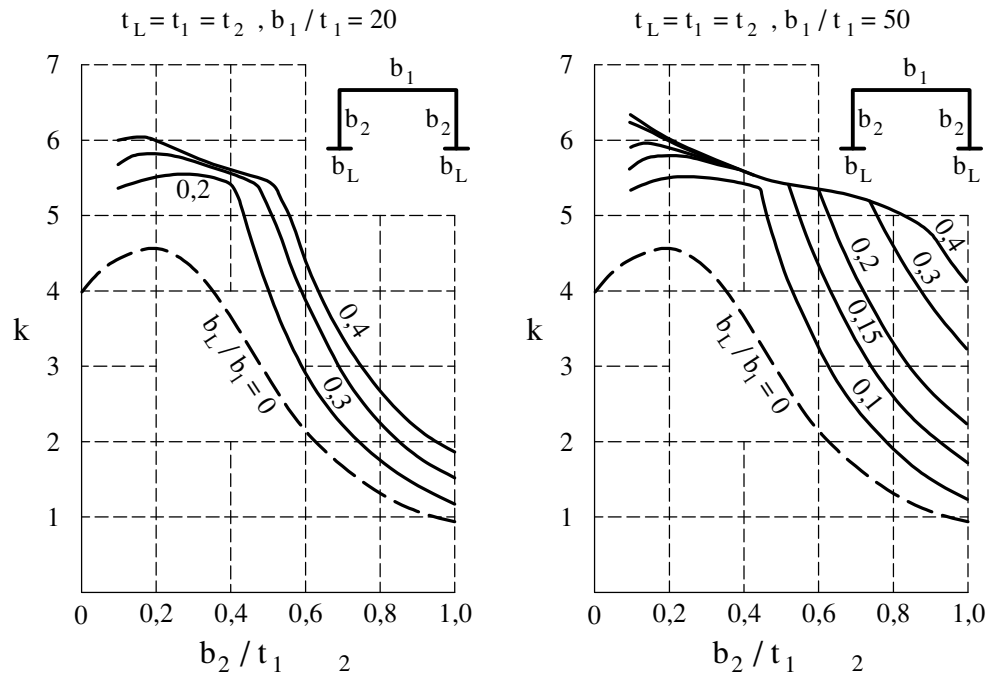
$$w = 4A \frac{y}{b} \left(1 - \frac{y}{b} \right) + B \sin \frac{y}{b} \sin \frac{m}{a} x \quad (1.20)$$

Giá trị A và B của một cặp tấm đối diện có thể được biểu thị theo giá trị của cặp tấm còn lại thông qua các điều kiện: (i) góc ban đầu giữa các tấm liên kề được giữ nguyên trong quá trình mất ổn định, (ii) các mô men tại các góc vẫn đảm bảo sự cân bằng. Tỷ lệ B/A cho một tấm thành phần và a/m sau đó được xác định để ứng suất tới hạn đạt cực tiểu. Lundquist đã chỉ ra rằng phương trình trên sẽ cho các giá trị k_{min} cao hơn một chút và trong phạm vi 1% của lời giải chính xác theo phương pháp Bulson (xem Mục a.2).

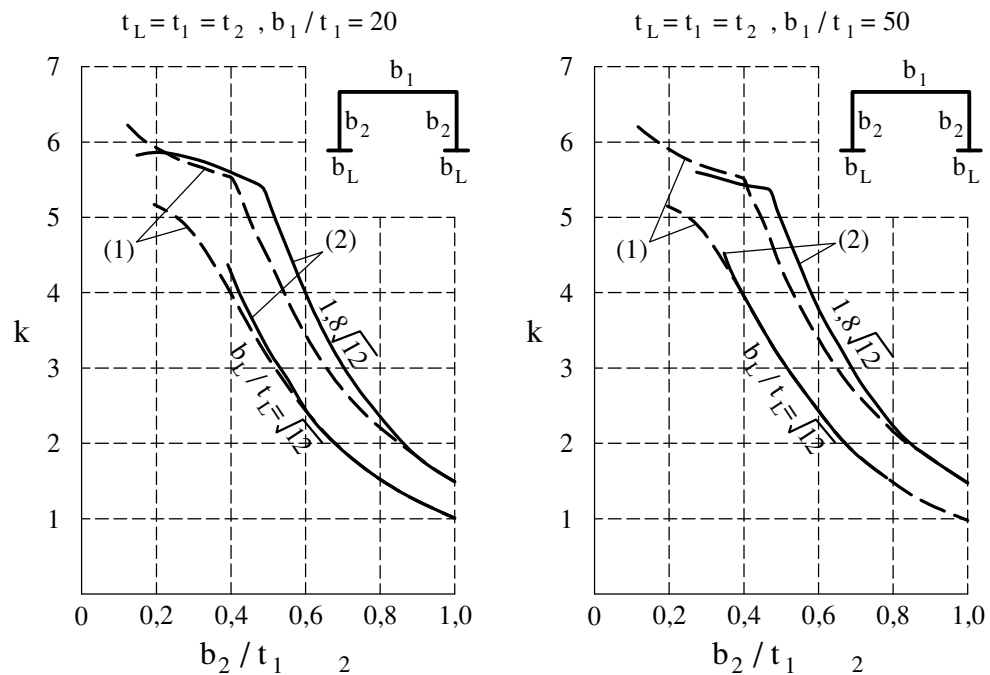
Hai tác giả trên chưa nghiên cứu tiết diện chữ C bẻ móc chịu uốn.

Lời giải chính xác

Lời giải chính xác sử dụng hàm độ võng thỏa mãn các phương trình vi phân của tấm mỏng, phương trình (2.17) và (2.19). Phương pháp này được Bulson (1970) [45] giới thiệu và được trình bày chi tiết trong phụ lục A.5. Sử dụng các phương trình cân bằng của từng tấm kết hợp các điều kiện cân bằng tại các giao tuyến, hình thành nên một hệ N_q phương trình cân bằng cho phép xem xét đồng thời tất cả các tấm thành phần (N_q liên quan đến tổng số phương trình cân bằng của tất cả các tấm thành phần). Đặt định thức của hệ phương trình bằng không giải ra được ứng suất tới hạn yêu cầu.



Hình 1.13 Hệ số mất ổn định k của tiết diện chữ C có sườn đối xứng [45]



Hình 1.14 So sánh giữa nghiệm xấp xỉ và nghiệm chính xác của tiết diện chữ C có sườn đối xứng [45]

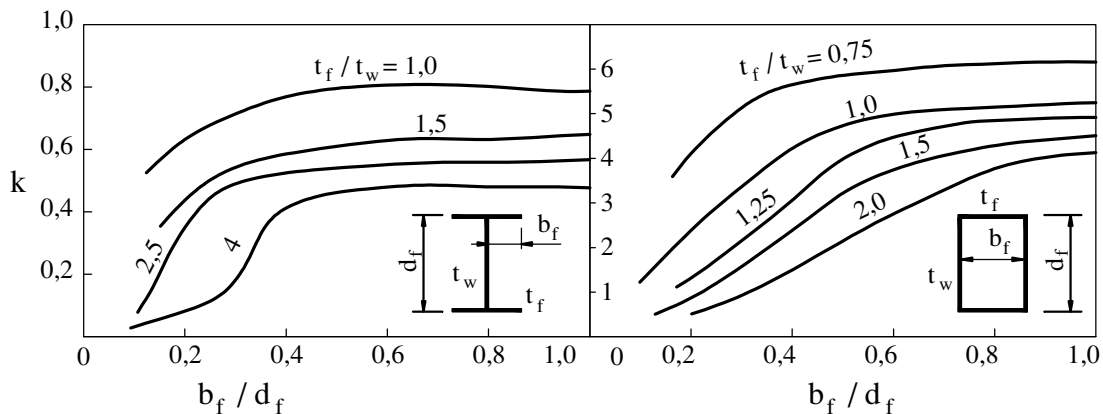
(1) Nghiệm xấp xỉ (2) Nghiệm chính xác

Phương pháp này đã được áp dụng cho các thép hộp chịu nén đều, tiết diện chữ C không bẻ móc, tiết diện chữ Z, I, tiết diện hộp, tiết diện mũ, tiết diện chữ C, chữ I có sườn đối xứng tại mép bản cánh, tiết diện tôn và các tiết diện hộp nhiều bản bụng. Các biểu đồ mang tính ứng dụng cũng đã được thiết lập.

24 biểu đồ đã được xây dựng để tra hệ số mất ổn định k của tiết diện chữ C có sườn đối xứng tại mép bản cánh cho tỷ lệ b_2/b_1 trong khoảng từ 0 đến 1. Phạm vi của các tham số khác bao gồm $b_1/t_1 = 20$ và 50; $t_2/t_1 = 0,8, 1,0$ và 1,2; $t_L/t_2 = 1, 2, 3$ và 4; $b_L/b_1 = 0, 0,2, 0,3$ và 0,4. Hai trong số các biểu đồ này được trình bày trong Hình 1.13.

Nghiệm chính xác của hệ số mất ổn định được sử dụng làm giá trị so sánh với các phương pháp xấp xỉ khác, chẳng hạn như phương pháp năng lượng và phương pháp được mô tả trong Mục 7.3.4 của tài liệu [45], như thể hiện trong Hình 1.14.

Bên cạnh việc trích dẫn các biểu đồ của Bulson [45] để xác định hệ số mất ổn định của các cột tiết diện I và hộp chịu nén khi bản cánh và bản bụng bị mất ổn định đồng thời, Trahair (2008) [160] cũng trình bày các biểu đồ mất ổn định của dầm chịu uốn, như thể hiện trong Hình 1.15. Tuy nhiên, tác giả không giải thích nguồn gốc của các biểu đồ hoặc phương pháp luận được sử dụng.



Hình 1.15 Hệ số mất ổn định cục bộ của bản cánh dầm tiết diện chữ I và tiết diện hộp [160]

Có thể thấy rằng tài liệu của Bulson không đề cập đến vấn đề mất ổn định của các cấu kiện chịu uốn. Đối với tiết diện chữ C chịu nén, khả năng áp dụng của các biểu đồ do Bulson thành lập khá hạn chế, do yêu cầu bản móc phải được chế tạo đối xứng với mặt phẳng bản cánh, điều này vốn không thực tế. Hơn nữa, đối với các tiết

diện thép chữ C bẻ móc tạo hình nguội, độ dày của các tấm thành phần giống nhau, tức $t_2 = t_1 = t_L$, Bulson chỉ cung cấp các biểu đồ tương ứng với tỷ lệ $b_1/t_1 = 20$ và 50. Các biểu đồ này cũng không áp dụng cho tỷ lệ $b_2/b_1 > 1$. Biểu đồ không đầy đủ khiến chúng khó sử dụng trong thực tế và có độ chính xác thấp.

So với Bulson, Trahair đã tiến thêm một bước nữa bằng cách xem xét các cấu kiện chịu uốn, nhưng chỉ đối với các tiết diện chữ I và thép hộp. Tiết diện chữ C bẻ móc vẫn chưa được thảo luận.

Các phương pháp số

Các phương pháp số như FEM, FSM và GBT đã được phát triển để giải quyết bài toán tổng quát, bao gồm phân tích ổn định đàn hồi của toàn bộ tiết diện. Nhiều phần mềm thương mại cung cấp lời giải chính xác ứng suất tới hạn đàn hồi, bao gồm ABAQUS, ANSYS, STRAND7 (FEM), THIN-WALL, CUFSM (FSM) và GBTUL (GBT)... Phụ lục A.2.1 sẽ mô tả rõ hơn về các phương pháp số này.

Các phương pháp khác

Hartmann (1934) [191] đã thảo luận về sự mất ổn định của các tiết diện T trong đó sử dụng một số giả thiết để đơn giản hóa. Tác giả đã lưu ý rằng độ cứng chống xoắn của bản cánh góp phần đáng kể vào độ cứng chống xoay đàn hồi của gối tựa trên biên của bản bụng. Điều này tương tự như đề xuất của Timoshenko [159] về độ cứng chống xoay gây ra bởi các bản cánh tại giao tuyến giữa bản cánh và bản bụng của tiết diện chữ C không bẻ móc. Lý do của sự tương đồng là các bản cánh trong hai trường hợp này giống nhau. Chúng đều là các tấm có ba cạnh tựa khớp và cạnh dọc còn lại tự do.

Áp dụng nguyên tắc của phương pháp phân phối mô men do James [86] đề xuất vào bài toán mất ổn định của cấu kiện tổ hợp chịu nén, Lundquist và cộng sự (1945) [112] đã đưa ra một phương pháp thích hợp để giải bài toán mất ổn định của tổ hợp tấm. Các tác giả đã phát triển một quy trình để tính hệ số mất ổn định k và đưa ra các biểu thức tính toán hệ số độ cứng.

Kroll và cộng sự [96] đã công bố các biểu đồ để tính ứng suất tới hạn cục bộ của cột tiết diện chữ I, chữ Z, chữ C và thép hộp chữ nhật, nhằm mục đích thay thế các biểu đồ trong Nghiên cứu số 743 của NACA [154]. Các giá trị trong biểu đồ được xác định thông qua phương pháp phân phối mô men, nhờ đó chính xác hơn so với

phương pháp năng lượng. Phương pháp phân phối mô men cũng cho phép nhận biết về mặt lý thuyết tấm thành phần nào của tiết diện sẽ là tấm mất ổn định đầu tiên.

Một phương pháp khác giúp giải trực tiếp bài toán mất ổn định cục bộ của tổ hợp tấm được trình bày ở Chương XII trong tài liệu của Bleich [44] về kết cấu vỏ tàu. Phương pháp này dựa trên phương trình bốn mô men và phù hợp cho cấu trúc dạng khoang của thiết kế tàu.

a.3 Những khó khăn trong bài toán mất ổn định của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén

Tính toán hệ số mất ổn định bằng các phương trình vi phân cân bằng chỉ phù hợp với bài toán đơn giản như các tấm đơn. Đối với tổ hợp tấm, đây thực sự là một thách thức. Trong tiết diện đang được nghiên cứu, nó xuất phát từ khó khăn trong việc xác định độ cứng chống xoay của bản cánh, vốn chịu đồng thời ứng suất nén không đều trên các cạnh ngang và mô men phân bố trên một cạnh dọc như thể hiện trong Hình 1.11c.

Đối với các tấm chỉ chịu ứng suất phân bố tuyến tính, Bulson trong tài liệu [45] phát biểu rằng "Không có lời giải chính xác cho bài toán mất ổn định của tấm chịu ứng suất nén không đều. Trường hợp này thường sử dụng phương pháp năng lượng hoặc phương pháp tương tự dựa trên hàm độ võng giả định. Phân tích thông dụng nhất cho tấm tựa khớp là của Timoshenko [159] sử dụng nguyên lý bảo toàn năng lượng".

Thống kê trong Bảng B.2 cho thấy, không có hàm độ võng giải tích đơn giản có thể phù hợp với trường hợp chịu ứng suất phức tạp nêu trên. Do đó, không thể thiết lập biểu thức giải tích cho độ cứng chống xoay của tấm tăng cường. Hàm độ võng phù hợp nhất là chuỗi lũy thừa do Jae Hoon Kang đề xuất gần đây [92]. Hàm này có thể xử lý các tấm chịu ứng suất nén tuyến tính và có các điều kiện biên tổng quát. Đây là một hàm rất mạnh và có khả năng xét đến mô men phân bố trên cạnh dọc. Hàm này sẽ được thảo luận trong Mục 2.2.3. Việc thiếu lời giải của bài toán tấm trên gối tựa đàn hồi (Hình 1.11b) cũng tạo ra những khó khăn. Cho đến nay, trong kết cấu thép tạo hình nguội, phương pháp giải tích chủ yếu chỉ được sử dụng để giải bài toán mất ổn định méo như Lau và Hancock (1987) [100], Schafer và Peköz (1999) [139], Teng và cộng sự (2002) [157] và những người khác.

Phương pháp chính xác yêu cầu phải có hàm độ võng giải tích để xây dựng hàm đặc trưng (xem phụ lục A.5.1), do đó lại quay về vấn đề lựa chọn hàm độ võng của bản cánh chịu ứng suất nén tuyến tính. Các hàm đặc trưng mới chỉ được xác định cho các tấm chịu nén đều. Điều đó có nghĩa là phương pháp này chỉ có thể giải quyết bài toán mất ổn định của các tiết diện chịu nén thuần túy. Nó không phù hợp với cấu kiện chịu uốn. Bên cạnh đó, phương pháp chính xác đòi hỏi giao tuyến giữa các tấm thành phần vẫn phải thẳng khi tiết diện mất ổn định. Đây là trường hợp phổ biến, nhưng không phải lúc nào đúng. Ví dụ, bản cánh của cột tiết diện chữ C chịu nén nếu không đủ rộng có thể bị uốn cong trong mặt phẳng, dẫn đến giao tuyến giữa bản cánh và bản bụng cong theo.

Phương pháp năng lượng yêu cầu phải chọn một hàm độ võng gần đúng. Với những bài toán phức tạp, việc lựa chọn này không dễ dàng.

Trong số các phương pháp giải quyết bài toán mất ổn định của tổ hợp tấm, chỉ có các phương pháp số là mạnh mẽ và có tính tổng quát. Do đó, cho đến nay, cách tiếp cận phổ biến để thiết lập các biểu thức gần đúng tính toán ứng suất tới hạn của toàn bộ tiết diện là hồi quy công thức từ kết quả mô phỏng số.

b) Thực trạng của bài toán cục bộ của tiết diện được nghiên cứu

Schafer và Peköz (1999) [139] đã giới thiệu các biểu thức giải tích tính hệ số mất ổn định cục bộ k của tiết diện chữ C và Z bề móc chịu uốn quanh trục khỏe được xây dựng từ mô hình phần tử và mô hình tương tác bán kinh nghiệm, trong đó mô hình phần tử bỏ qua tương tác của bản cánh, bản bụng, móc và giải độc lập bài toán mất ổn định của từng tấm thành phần. Các biểu thức được thiết lập bằng cách hồi quy kết quả phân tích dải hữu hạn. Các biểu thức này sau đó đã được Schafer và Yu (2002) [135] tinh chỉnh và mở rộng, cũng trên cơ sở hồi quy kết quả phân tích dải hữu hạn.

Yiu F. và T. Peköz (2000) [179], (2001) [180] đã nghiên cứu ứng xử của các thép chữ C chịu nén, uốn quanh cả hai trục chính và dưới tác động đồng thời của các loại tải trọng này. Các biểu thức gần đúng đã được đề xuất để tính toán hệ số mất ổn định dựa trên phương pháp hồi quy từ kết quả của CUFSM.

Năm 2002, Schafer [140] đã giới thiệu các biểu thức (1.21) tính k của cột tiết diện chữ C bề móc và chữ Z cho cả ổn định cục bộ cánh/móc và ổn định cục bộ

cánh/bụng bằng cách hồi quy kết quả phân tích dải hữu hạn. Công thức này xét đến tương tác giữa các tấm thành phần và cho kết quả phù hợp với các phương pháp số.

Có thể dự đoán ứng suất tới hạn do mất ổn định cục bộ của toàn bộ tiết diện thông qua giá trị nhỏ nhất được xác định bởi $k_{flange/lip}$ và $k_{flange/web}$.

Trong tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép cán nóng của Mỹ, mất ổn định cục bộ của tiết diện được ngăn chặn bằng cách khống chế độ mảnh các tấm thành phần theo giới hạn cho trong Bảng B4.1 của tiêu chuẩn AISC [27]. Giả thiết quan trọng để xây dựng bảng trên là tương tác giữa bản cánh và bản bụng đều không bị thay đổi (tức giá trị của k không biến đổi) đối với loại tiết diện cho trước.

$$\begin{aligned}
 k_{flange/lip} &= 11,07 \frac{L_1}{B}^2 - 3,95 \frac{L_1}{B} - 4 \quad \text{for } \frac{L_1}{B} \leq 0,6 \\
 \text{if } \frac{H}{B} &\leq 1, \quad k_{flange/web} = 4 \frac{B}{H}^2 - 2 \frac{B}{H}^{0,4} \\
 \text{if } \frac{H}{B} &\leq 1, \quad k_{flange/web} = 4 - 2 \frac{H}{B}^{0,2}
 \end{aligned} \tag{1.21}$$

Một số nghiên cứu đã được thực hiện cho các cấu kiện chịu uốn quanh trục yếu. Seif và Schafer (2010) [146] đã đưa ra các biểu thức giải tích tính ứng suất tới hạn đàn hồi cục bộ có xét đến tương tác giữa các phần tử của các tiết diện trong kết cấu thép cán nóng. Đầu tiên, giá trị của ứng suất tới hạn cục bộ được xác định bằng phân tích dải hữu hạn (FSA). Ổn định cục bộ của từng loại tiết diện trong cơ sở dữ liệu của AISC (trừ thép ống) đã được xem xét với các trường hợp chịu nén đúng tâm, chịu mô men uốn dương và âm quanh trục khỏe và trục yếu. Ứng suất tới hạn cục bộ được quy đổi thành hệ số mất ổn định k và các biểu thức đơn giản hóa đã được xây dựng cho tất cả các hệ số này. Các hệ số mất ổn định mới rõ ràng đã bao quát được tương tác đàn hồi giữa các tấm thành phần của tiết diện. Các giá trị k từ phân tích dải hữu hạn được so sánh với các giá trị đang sử dụng trong tiêu chuẩn AISC và cho thấy có sự khác biệt đáng kể.

De Miranda Batista (2010) [58] đề xuất các công thức tính hệ số mất ổn định của một số tiết diện CFS chịu nén thuần túy và chịu uốn quanh trục khỏe. Các công thức này sau đó đã được áp dụng trong tiêu chuẩn thiết kế kết cấu thép tạo hình nguội của Bờ-ra-xin. Các công thức đề xuất được so sánh với giá trị lý thuyết sinh ra từ mô

phỏng số, với sự trợ giúp của các chương trình phân tích FSM hoặc GBT. Tác giả nhận thấy các công thức đề xuất cho ra kết quả rất chính xác.

Luís Vieira (2018) [164] trình bày nghiên cứu hệ số mất ổn định cục bộ trên 124 tiết diện rỗng hình chữ nhật (RHS) chịu tải trọng nén kết hợp uốn hai phương có xem xét đến tương tác giữa bản cánh và bản bụng. Quá trình tính toán được thực hiện bởi MatLab bằng cách sử dụng lý thuyết Dầm tổng quát. Do nửa bước sóng của mất ổn định cục bộ nhỏ, có thể coi ứng suất nén không thay đổi theo chiều dài của tấm thành phần, nhờ đó có thể sử dụng hàm hình sin cho các kiểu biến dạng cơ bản trong GBT. Ban đầu, các trường hợp đơn giản chỉ có tải trọng dọc trục hay uốn quanh trục khỏe hoặc trục yếu được thực hiện riêng biệt. Sau đó, các trường hợp kết hợp giữa nén với uốn một phương, uốn hai phương, nén kết hợp với uốn hai phương cũng được nghiên cứu. Dựa trên các kết quả thu được, xác định được các tham số chính chi phối ổn định cục bộ, nhờ đó thành lập các biểu đồ và công thức cho trường hợp $N-M_y-M_z$, N , $N-M_y$ và $N-M_z$ để xác định hệ số mất ổn định cục bộ.

Gardner (2019) [75] đã trình bày công thức để xác định ứng suất tới hạn cục bộ đàn hồi của các tiết diện có sẵn dưới nhiều điều kiện tải trọng khác nhau có xét đến sự tương tác giữa các tấm phần tử. Công thức đề xuất là kết quả nội suy theo hệ số tương tác ζ giữa các tấm tựa khớp và ngàm cứng theo các cạnh dọc. Hệ số tương tác được tính ngược từ ứng suất tới hạn của phân tích dải hữu hạn có giá trị nằm trong khoảng từ 0 đến 1. Nhiều tiết diện cán nóng tiêu chuẩn của Châu Âu và Mỹ, bao gồm tiết diện chữ I, tiết diện rỗng hình vuông và hình chữ nhật, tiết diện chữ C, tiết diện chữ T và tiết diện thép góc, cũng như các tiết diện tổ hợp hàn, đã được xem xét. Trong phạm vi tiết diện nghiên cứu, sai số của ứng suất uốn cục bộ đàn hồi so với kết quả mô phỏng số nằm trong phạm vi 5%. Trong khi đó, nếu bỏ qua tương tác giữa các tấm thành phần và xem chúng là các tấm riêng biệt tựa khớp theo hai cạnh dọc như thường thấy trong các tiêu chuẩn thiết kế kết cấu hiện hành, ứng suất tới hạn cục bộ của các tiết diện kết cấu thông thường có thể bị ước tính thấp hơn tới 50%.

Ahdab (2022) [26] phát triển các biểu thức kinh nghiệm dự đoán ứng suất tới hạn cục bộ của tiết diện thép chữ C bẻ móc tạo hình nguội chịu bốn loại tải trọng khác nhau: nén thuần túy, uốn quanh trục khỏe, uốn quanh trục yếu với phần móc chịu kéo và uốn quanh trục yếu với phần móc chịu nén. Phân tích dải hữu hạn đã được tiến

hành để giải ra các hệ số mất ổn định cục bộ. Các biểu thức kinh nghiệm đã được xây dựng thông qua hồi quy kết quả mô phỏng số.

Ding và Schafer (2023) [63] phát triển các công thức giải tích để tính ứng suất tới hạn cục bộ của các thép chữ C bẻ móc có hoặc không có lỗ đục chịu nén và uốn. Phân tích dải hữu hạn được tiến hành trên hơn 1000 tiết diện chữ C bẻ móc chịu bốn điều kiện tải trọng khác nhau. Các công thức đơn giản dưới dạng thương của hai đa thức cho kết quả phù hợp với kết quả phân tích dải hữu hạn. Sau khi so sánh với các công thức trong tiêu chuẩn AISI S100, các công thức này được đề xuất sử dụng trong các phiên bản kế tiếp của tiêu chuẩn.

Quốc và Cường (2024) [4][5][126] nghiên cứu hiện tượng mất ổn định cục bộ của thép chữ I tổ hợp hàn và tiết diện hộp chịu nén đúng tâm và thuần uốn. Nghiên cứu tham số đã được tiến hành bằng phương pháp Dải hữu hạn bán giải tích thông qua chương trình CUFSM. Các tác giả đã đề xuất công thức gần đúng từ kết quả thu được.

Các biểu thức hiện có dùng để xác định hệ số mất ổn định của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục yếu được tóm tắt trong Bảng B.4.

Cần lưu ý rằng, trong quá trình hồi quy từ kết quả mô phỏng số, tác động của hệ số Poát ν và bán kính uốn R chưa được xem xét trong các nghiên cứu trên.

Ngoài ra, một phương pháp sử dụng hồi quy tuyến tính từ ứng suất tới hạn đàn hồi quan sát được trong các thí nghiệm của Desmond et al. (1981) [61][62] đã được phát triển. Phương pháp này hình thành nên hệ số k_a trong Mục B4.2 của tiêu chuẩn AISI S100-1996 [28] dùng để xét đến tương tác giữa bản bụng và bản cánh. Lựa chọn này thiếu tính chính xác vì các giá trị mất ổn định thực nghiệm dựa vào phương pháp đảo ngược biến dạng vốn rất nhạy cảm với các khiếm khuyết và thiết đặt cụ thể của thí nghiệm, thường được xem xét cho hệ số chiết giảm ρ của bài toán độ bền, chứ không phải hệ số mất ổn định k . Tất cả các phần khác của tiêu chuẩn AISI [28] đều sử dụng các giá trị k lý thuyết, không phải giá trị k thực nghiệm.

Có thể thấy rằng một số biểu thức giải tích để tính hệ số mất ổn định của tiết diện nghiên cứu trong luận án đã được phát triển. Đặc điểm chung của các công thức này là chúng được hồi quy từ kết quả CUFSM. Nhược điểm của chúng là không xem xét sự ảnh hưởng của các tham số trong quá trình xây dựng công thức. Do đó, độ

chính xác của các công thức được đề xuất bị hạn chế và vẫn còn cơ hội để tiếp tục cải thiện.

Các phương pháp số cho ra kết quả trực tiếp nhưng không làm sáng tỏ bản chất vấn đề mất ổn định của các cấu kiện được nghiên cứu, tức ảnh hưởng của kích thước tiết diện đến ứng suất tới hạn. Trong khi đó, phương pháp giải tích có thể đưa ra lời giải thích sâu trên cơ sở lý thuyết. Do đó, luận án sẽ tìm kiếm một hướng giải quyết vấn đề ổn định cục bộ của các cấu kiện đang được nghiên cứu bằng phương pháp giải tích.

1.7. Mục tiêu và nội dung của luận án

Công thức độ bền uốn DSM trong tiêu chuẩn AISI S100 của Mỹ thiên về quá an toàn đối với các cấu kiện chịu uốn quanh trục không đối xứng. Ngoài ra, phương pháp giải tích tính toán ứng suất tới hạn đàn hồi cục bộ theo Phụ lục 1 và 2 của tiêu chuẩn khi áp dụng cho tiết diện đang được nghiên cứu không thực sự được xây dựng cho bài toán mất ổn định, dẫn đến kết quả có độ sai lệch lớn. Do đó, mục đích của luận án là nhằm cải thiện độ chính xác của công thức độ bền DSM cho cấu kiện tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén. Có hai mục tiêu được xem xét:

Cải thiện công thức độ bền DSM cho cấu kiện tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén để phản ánh chính xác ứng xử của loại cấu kiện này. Nội dung này sẽ được trình bày trong CHƯƠNG 4.

Phát triển các công thức giải tích xác định hệ số mất ổn định của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén. Nội dung này sẽ được trình bày trong CHƯƠNG 3.

Các nội dung của luận án:

Phát triển một phương pháp giải tích để giải quyết bài toán mất ổn định đàn hồi của toàn bộ tiết diện.

Dùng phương pháp nêu trên để xây dựng bộ số liệu lớn cho bài toán mất ổn định đàn hồi của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng. Bộ số liệu này sau đó được sử dụng để xây dựng công thức dự đoán mô men tới hạn đàn hồi của tiết diện chữ C.

Dùng mô phỏng số xây dựng bộ dữ liệu lớn cho bài toán độ bền. Kết hợp với bộ dữ liệu về mô men tới hạn hình thành nhờ phương pháp nêu trên để xây dựng công thức tính toán độ bền uốn của cấu kiện chữ C.

Đã có nhiều thí nghiệm về độ bền của cấu kiện tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén, đủ để cung cấp dữ liệu để kiểm chứng các đề xuất về độ bền của luận án. Do đó, luận án sẽ không tiến hành thí nghiệm bổ sung mà sử dụng trực tiếp các số liệu thí nghiệm nêu trên.

Tiếp theo, CHƯƠNG 2 sẽ trình bày cơ sở lý thuyết của luận án.

CHƯƠNG 2. CƠ SỞ KHOA HỌC ĐỂ THIẾT LẬP CÔNG THỨC ĐỘ BỀN THEO PHƯƠNG PHÁP DSM

Chương này sẽ trình bày quy trình thiết lập công thức tính toán độ bền của DSM (Mục 2.1) và phương pháp giải bài toán ứng suất cục bộ tới hạn của toàn bộ mặt cắt (Mục 2.2). Nội dung thứ nhất sẽ được sử dụng trong CHƯƠNG 4 để kiến nghị một số điều chỉnh đối với công thức tính độ bền theo DSM khi cấu kiện chịu uốn quanh trục không đối xứng. Nội dung thứ hai sẽ được sử dụng trong CHƯƠNG 3 để xây dựng công thức giải tích dự đoán ứng suất cục bộ tới hạn của tiết diện thép chữ C tạo hình nguội.

2.1. Phương pháp xây dựng công thức xác định độ bền uốn theo DSM

Phần này giới thiệu các quy trình xây dựng công thức DSM. Quy trình thứ nhất khá đơn giản và trực quan vì chỉ sử dụng phương pháp hồi quy các dữ liệu thí nghiệm. Quy trình này được Schafer và Peköz [138] sử dụng để xây dựng công thức gốc của DSM và được trình bày trong Mục 2.1.1. Quy trình thứ hai được thực hiện bởi Oey và Papangelis cũng dùng để xây dựng biểu thức DSM nhưng trên nền tảng các dữ liệu mô phỏng số. Quy trình thứ hai sẽ được trình bày trong Mục 2.1.2. So với quy trình đầu tiên, quy trình thứ hai phức tạp hơn. Nó liên quan đến việc xây dựng cơ sở dữ liệu mô phỏng và đánh giá độ tin cậy.

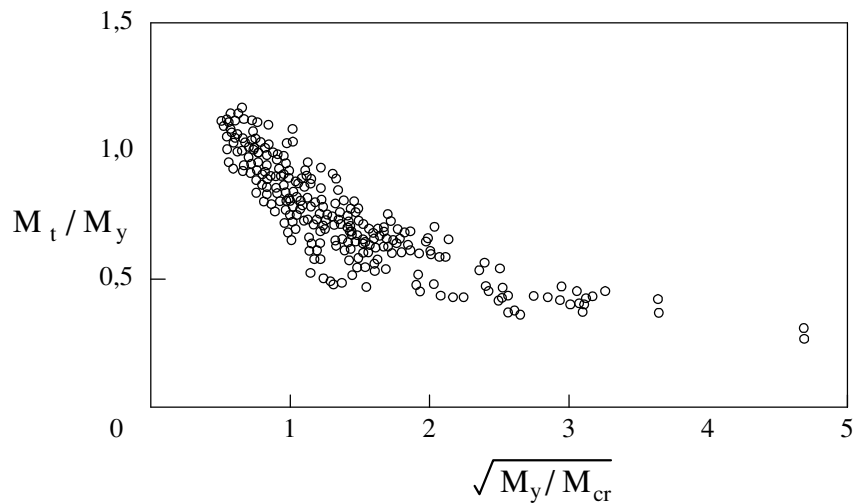
Quy trình đầu tiên được trình bày để nêu rõ bản chất của phương pháp Cường độ trực tiếp và cách công thức DSM được thiết lập. Quy trình thứ hai sẽ được sử dụng trong CHƯƠNG 4 để đề xuất một số thay đổi cho công thức DSM hiện hành.

2.1.1. Phương pháp xây dựng công thức DSM hiện hành

Khối lượng tính toán của phương pháp Bề rộng hữu hiệu (EWM) sử dụng trong thiết kế các cấu kiện thép tạo hình nguội khá lớn, chủ yếu do quá trình xác định các đặc trưng hình học hữu hiệu của mặt cắt. Khi mặt cắt ngang được bố trí thêm sườn gia cường, việc xác định độ võng đàn hồi và bề rộng hữu hiệu càng trở nên phức tạp. Vì thế, một phương pháp tính toán mới, phương pháp Cường độ trực tiếp (DSM), đã được Schafer và Peköz giới thiệu vào năm 1998 [138] để cung cấp một lựa chọn khác thay cho EWM. Phương pháp này được xây dựng dựa trên dữ liệu thực nghiệm thu thập từ 17 nghiên cứu với 574 cấu kiện chịu uốn, bao gồm Acharya (1997) [23][24], Bernard (1993) [43], Cohen (1987) [52], Desmond (1977) [60], Ellifritt và

cộng sự (1997) [67], Höglund (1980) [84], König (1978) [95], LaBoube và Yu (1978) cho tiết diện chữ C bẻ móc uốn quanh trục khỏe đối xứng [97], Moreyra (1993) cho tiết diện chữ C bẻ móc uốn quanh trục khỏe đối xứng [65][118][119], Papazian (1994) [127], Phung và Yu (1978) cho tiết diện chữ C bẻ móc uốn quanh trục không đối xứng [124], Rogers (1995) [133], Schardt và Schrade (1982) [193], Schuster (1992) [145], Shan (1994) [98][148][149], Willis và Wallace (1990) [170], Winter (1946) [172]. Tiết diện được nghiên cứu bao gồm chữ C có sườn, Z, tiết diện mũ (hat section) và tiết diện tôn. Vị trí và số lượng sườn gia cường khác nhau cũng đã được xem xét.

Độ mảnh của tiết diện λ được xác định dựa trên tỷ số giữa mô men uốn tới hạn M_{cr} và mô men uốn đàn hồi M_y . Sau đó, quan hệ giữa độ mảnh λ và tỷ số giữa mô men xác định từ thí nghiệm M_t và M_y đã được phác họa trong Hình 2.1. Có thể thấy rằng, mặc dù hình dạng tiết diện khác nhau nhiều nhưng mối quan hệ thể hiện trong Hình 2.1 có quy luật rõ ràng.



Hình 2.1 Quan hệ giữa độ mảnh với độ bền thí nghiệm [138]

(Kết quả thí nghiệm của Winter không được xem xét)

Dựa trên quy luật được thể hiện trong Hình 2.1, ba phương pháp dự đoán độ bền mới đã được Schafer đề xuất, trong đó, phương pháp thứ ba được Schafer lựa chọn làm phương án cuối cùng. Đây là phương pháp dựa trên ý tưởng của EWM, tức các biểu thức tính toán bề rộng hữu hiệu (1.7) đến (1.9), sau đó điều chỉnh để phù hợp với dữ liệu thí nghiệm. Đầu tiên, phương pháp này điều chỉnh công thức tính độ mảnh bằng cách sử dụng các nội lực thay vì ứng suất như thể hiện trong biểu thức (1.10)

$$\sqrt{\frac{M_y}{M_{cr}}} \quad (2.1)$$

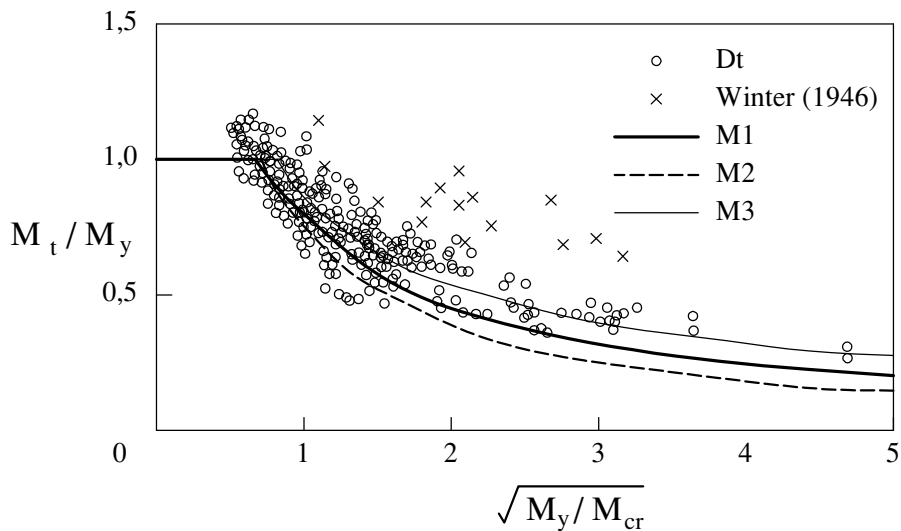
và cuối cùng đề xuất công thức tính độ bền danh nghĩa M_u

$$\text{Khi } 0,776 \leq \frac{M_u}{M_y} \leq 1,0 \quad \text{Khi } 0,776 \leq \frac{M_u}{M_y} < 1,0 \quad (2.2)$$

Lưu ý rằng công thức DSM cuối cùng trong tiêu chuẩn sử dụng độ bền mất ổn định xoắn ngang M_{be} thay cho độ bền đàn hồi M_y .

Trong nghiên cứu của Schafer, phương pháp Dải hữu hạn với phần mềm CUFSM đã được sử dụng để xác định mô men tới hạn M_{cr} .

Mối tương quan giữa công thức đề xuất và dữ liệu thí nghiệm được thể hiện trong Hình 2.2.



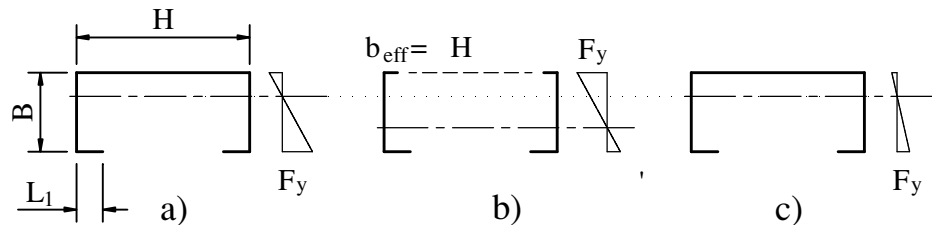
Hình 2.2 Đường cong cường độ và dữ liệu thí nghiệm [138]

Dt – Dữ liệu thí nghiệm

M1 – Phương pháp 1 M2 – Phương pháp 2 M3 – Phương pháp 3

Kết quả cho thấy công thức đề xuất đảm bảo được độ chính xác cần thiết, ngoại trừ đối với các mẫu thí nghiệm của Winter (1946) [172] cho kết quả sai lệch lớn. Các tiết diện trong nghiên cứu của Winter là tiết diện chữ C bẻ móc có tỷ lệ bề rộng cánh/chiều cao bản bụng B/H và tỷ lệ bề rộng móc/chiều cao bản bụng L_1/H đều

thấp. Sự khác biệt giữa EWM và DSM có thể được giải thích thông qua Hình 2.3. Đối với phương pháp Bề rộng hữu hiệu, khi ρ tiến tới 0 bản bụng sẽ dần mất tác dụng, gây ra sự dịch chuyển của trục trung hòa về phía móc. Tuy nhiên, tiết diện còn lại vẫn có thể tiếp tục chịu lực. Giới hạn của tiết diện chịu lực bao gồm bản cánh và móc, còn phần bản bụng bị loại bỏ hoàn toàn. Còn với phương pháp Cường độ trực tiếp, khi ρ tiến tới 0 thì mô men tới hạn M_{cr} tiến đến 0, dẫn đến độ bền cũng giảm về 0. Điều này thể hiện rõ trong biểu thức thứ hai của Công thức (2.2) khi cho M_{cr} bằng 0 (một dạng khác của biểu thức này là $M_u = \rho M_y$). Do đó, độ bền của tiết diện có hệ số ρ thấp có thể thiên về quá an toàn khi sử dụng phương pháp Cường độ trực tiếp. Tuy nhiên, khi các tỷ lệ B/H , L_1/H hoặc ρ tăng thì kết quả của hai phương pháp EWM và DSM sẽ khá tương đồng.



Hình 2.3 Sự khác biệt giữa phương pháp Bề rộng hữu hiệu và phương pháp Cường độ trực tiếp [138]

- a) Tiết diện ban đầu b) Tiết diện hữu hiệu khi ρ tiến tới 0
c) Phương pháp Cường độ trực tiếp khi ρ tiến tới 0.

2.1.2. Công thức DSM điều chỉnh đề xuất bởi Oey và Papangelis

Oey và Papangelis (2021) [121] tiến hành nghiên cứu bài toán độ bền của cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục yếu với bản bụng chịu nén. Bài toán mất ổn định đàn hồi và độ bền của 33 tiết diện chữ C đã được giải bằng phương pháp Dải hữu hạn (phần mềm THIN-WALL-2) và phương pháp Phần tử hữu hạn phi tuyến (phần mềm STRAND7). Độ mảnh của tiết diện biến thiên trên một dải khá rộng nhờ thay đổi các thông số tiết diện như độ dày, chiều cao bản bụng và bề rộng bản cánh. Nhận thấy kết quả của công thức DSM hiện hành sai khác đáng kể so với kết quả phân tích phần tử hữu hạn phi tuyến, nhóm tác giả đã đề xuất một số thay đổi để phù hợp với cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục yếu.

Trạng thái uốn quanh trục yếu của tiết diện chữ C không gây ra hiện tượng mất ổn định méo và mất ổn định xoắn ngang. Phần bẻ móc của tiết diện chữ C và phần lớn bản cánh chịu kéo cản trở sự hình thành mất ổn định méo tại giao tuyến giữa bản cánh và bản bụng. Đối với cấu kiện chịu uốn quanh trục yếu, hiện tượng mất ổn định xoắn ngang chỉ xảy ra khi chiều dài không giằng rất lớn (nghiên cứu độc lập cho tiết diện C200x65x20x2 là 7 m [165]), vốn không tồn tại trong thực tế. Do đó, nghiên cứu của Oey và Papangelis chỉ tập trung vào hiện tượng mất ổn định cục bộ.

Công thức DSM hiện hành xét đến sự tương tác giữa ổn định cục bộ và ổn định xoắn ngang. Tuy nhiên, do ổn định xoắn ngang không xảy ra đối với các tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục yếu, nên cơ chế phá hoại sẽ được khống chế bởi độ bền đàn hồi hoặc ổn định cục bộ. Vì thế, độ bền gây mất ổn định xoắn ngang M_{be} trong công thức DSM được thay bằng mô men đàn hồi M_y và hình thành nên công thức tương tự như (2.2).

$$\begin{aligned} \text{Khi} \quad & 1,170 \quad M_u \quad 1,4 \quad \frac{0,4}{2,17} \frac{M_{cr}^{0,5}}{M_y} \quad M_y \\ \text{Khi} \quad & 1,170 \quad M_u \quad 1 \quad 1,6 \quad \frac{M_{cr}^{0,4}}{M_y} \quad \frac{M_{cr}^{0,4}}{M_y} \quad M_y \end{aligned} \quad (2.3)$$

a) *Phân tích ổn định đàn hồi bằng phương pháp Dải hữu hạn*

Ứng suất mất ổn định cục bộ σ_{cr} , dùng để tính toán mô men mất ổn định cục bộ M_{cr} , được tính toán bằng cách sử dụng phương pháp Dải hữu hạn thông qua phần mềm THIN-WALL-2. Kết quả cho thấy mất ổn định cục bộ là dạng mất ổn định chính của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục yếu.

b) *Phân tích phần tử hữu hạn phi tuyến (NLFEA)*

Chương trình phần tử hữu hạn STRAND7 được sử dụng để thực hiện phân tích phần tử hữu hạn phi tuyến (NLFEA) của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục yếu. Tính chất phi tuyến được mô tả bởi tính phi tuyến của vật liệu, các khuyết tật hình học và ứng suất dư. Nghiên cứu của Schafer và Peköz [137] xác định rằng ứng suất dư chỉ làm hiện tượng chảy dẻo xảy ra sớm hơn chứ không ảnh hưởng đến độ bền cuối cùng của tiết diện, vì thế ứng suất dư được bỏ qua.

Mô hình vật liệu

Mô hình ứng suất-biến dạng được sử dụng là đường cong phi tuyến hai đoạn Ramberg-Osgood xây dựng cho vật liệu thép cán nguội do Gardner và Yun đề xuất [74]. Mô hình này mô tả chính xác tính phi tuyến tính của vật liệu thép cán nguội khi ba tham số đầu vào là E , F_y và F_u đã biết. Mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng được mô tả bởi

$$\begin{aligned} \text{Khi } \frac{F_y}{E} > 0,002 \frac{F_y}{F_y} \quad n_1 \\ \text{Khi } \frac{F_y}{E_{0,2}} < 0,2 \quad \frac{F_y}{E_{0,2}} < 0,2 \quad \frac{F_y}{F_u} \frac{F_y}{F_y} \quad m_1 \end{aligned} \quad (2.4)$$

trong đó n_1 và m_1 là các hệ số cứng nguội. $n_1 = 7,6$ và

$$m_1 = 1 + 3,3 \frac{F_y}{F_u} \quad (2.5)$$

và $E_{0,2}$ là mô đun tiếp tuyến của đường cong ứng suất-biến dạng tại giới hạn chảy quy ước F_y (tương ứng với biến dạng tương đối 0,2%) được xác định theo

$$E_{0,2} = \frac{E}{1 + 0,002 n_1 \frac{E}{F_y}} \quad (2.6)$$

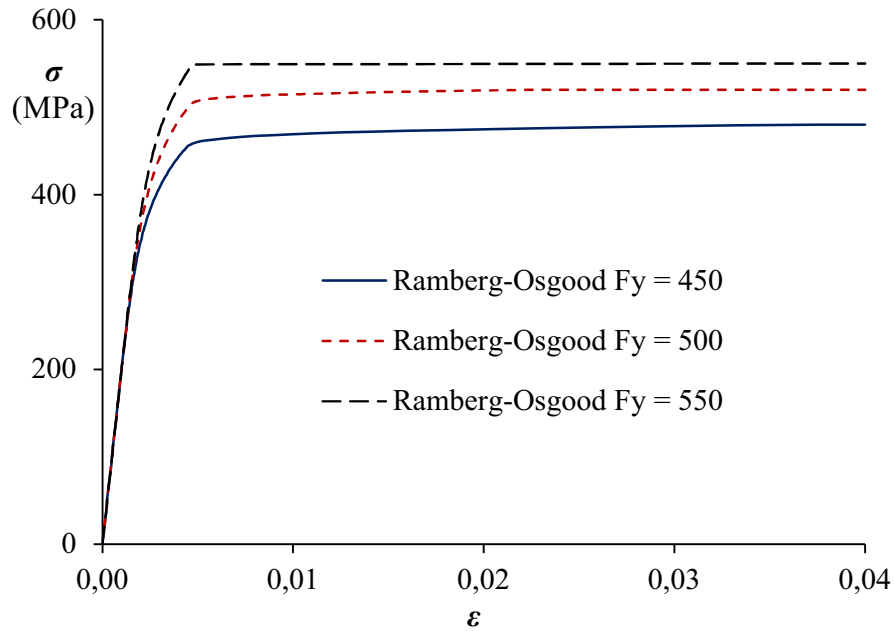
$\varepsilon_{0,2}$ là biến dạng tại giới hạn chảy quy ước F_y

$$\varepsilon_{0,2} = 0,002 \frac{F_y}{E} \quad (2.7)$$

và ε_u là biến dạng tương ứng với giới hạn bền F_u

$$\varepsilon_u = 0,6 + 1 \frac{F_y}{F_u} \quad (2.8)$$

Đường cong ứng suất-biến dạng của ba loại thép G450, G500 và G550 được thể hiện ở Hình 2.4.



Hình 2.4 Đường cong ứng suất-biến dạng cho thép cán nguội [121]

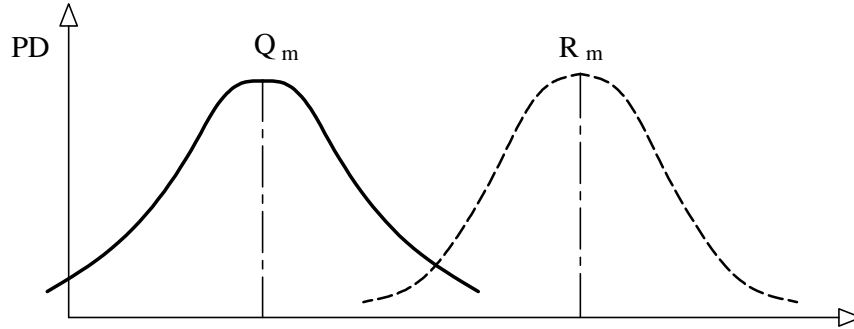
Khiếm khuyết hình học

Cấu kiện thép tạo hình nguội đặc biệt mẫn cảm với các khiếm khuyết hình học sinh ra trong quá trình chế tạo. Việc xem xét khuyết tật hình học đảm bảo rằng ứng xử sau mất ổn định và độ bền của cấu kiện thép tạo hình nguội được thể hiện chính xác bởi mô phỏng số [142]. Phân tích ổn định đàn hồi tuyến tính được thực hiện trên hình dạng lý tưởng của cấu kiện để thu được các dạng mất ổn định và trị riêng tương ứng. Dạng mất ổn định chủ đạo, cũng chính là mất ổn định cục bộ của bản bụng, sẽ được sử dụng để biểu diễn sự phân bố của khiếm khuyết hình học dọc theo chiều dài của cấu kiện [182]. Hệ số tỷ lệ $0,66t$ (với t là bề dày thép tấm làm tiết diện) dựa trên giá trị khiếm khuyết lớn nhất theo nghiên cứu xác suất do Schafer và Peköz thực hiện [137] sẽ được nhân vào biên độ biến dạng của dạng mất ổn định chủ đạo và được sử dụng trong phần mô phỏng phi tuyến của bài toán xác định độ bền.

c) Đánh giá độ tin cậy

Độ tin cậy của các công thức thiết kế mới hoặc độ bền tối ưu có thể được xác định thông qua chỉ số độ tin cậy (Mục B3.2.2 của tài liệu Hướng dẫn tiêu chuẩn AISI S100-16 [32]).

Hệ số an toàn của độ bền hoặc hệ số độ tin cậy của tải trọng được thiết lập để xét đến những yếu tố không xác định và biến động trong quá trình thiết kế. Thiết kế kết cấu bao gồm việc so sánh hệ quả của tải trọng danh nghĩa Q với độ bền danh nghĩa R . Kết cấu thỏa mãn trạng thái giới hạn nếu $Q \leq R$. Nhưng cả Q và R đều là các tham số ngẫu nhiên (xem Hình 2.5), phân phối của Q và R là không xác định. Chỉ có các giá trị trung bình, Q_m và R_m , độ lệch chuẩn, σ_Q và σ_R , là có giá trị cụ thể.



Hình 2.5 Định nghĩa của các biến ngẫu nhiên Q và R [32]

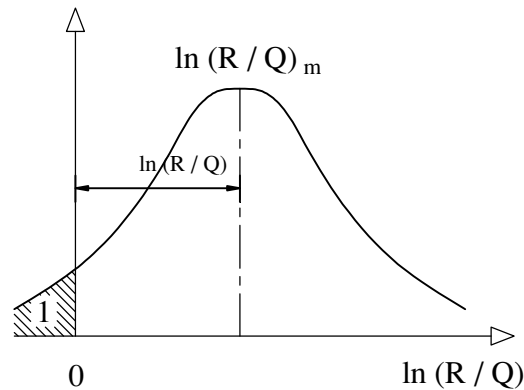
PD – Mật độ xác suất

Tuy nhiên, có thể xác định độ tin cậy tương đối bằng sơ đồ minh họa trong Hình 2.6. Đường cong phân phối được hiển thị trong hình là cho $\ln(R/Q)$, và trạng thái giới hạn bị vượt quá khi $\ln(R/Q) < 0$. Phần diện tích sau gốc tọa độ là xác suất trạng thái giới hạn bị vượt. Diện tích này phụ thuộc vào khoảng cách giữa gốc tọa độ và giá trị trung bình của $\ln(R/Q)$. Đối với các giá trị R_m , Q_m , σ_R và σ_Q cho trước, diện tích này có thể thay đổi bằng cách thay đổi giá trị của β (Hình 2.6).

Do $\beta\sigma_{\ln(R/Q)} = \ln(R/Q)_m$, nên có thể xấp xỉ chỉ số độ tin cậy β theo công thức

$$\frac{\ln R_m / Q_m}{\sqrt{V_R^2 + V_Q^2}} \quad (2.9)$$

Tăng chỉ số độ tin cậy β sẽ làm tăng khoảng cách $\beta\sigma_{\ln(R/Q)}$ và giảm diện tích xác suất vi phạm trạng thái giới hạn, nhờ đó làm tăng độ tin cậy của thiết kế. Chỉ số độ tin cậy hiện tại β_0 trong AISI S100 là 2,5 đối với các cầu kiện tính theo LRFD (để biết thêm thông tin về β_0 , xem nội dung tiếp theo và Hướng dẫn AISI S100-16 [32]). Khi đề xuất giá trị độ bền cao hơn hoặc đề xuất công thức xác định độ bền mới, nếu chỉ số độ tin cậy của chúng lớn hơn 2,5 thì có nghĩa các nội dung đề xuất là đáng tin cậy.



Hình 2.6 Định nghĩa chỉ số độ tin cậy β [32]

1 – Vùng xác suất trạng thái giới hạn bị vượt

Cách xác định chỉ số độ tin cậy β được giới thiệu trong nội dung sau.

Chương K kết hợp với Mục A1.2 của AISI S100 [31] đề cập đến cách xác định độ bền của cầu kiện và liên kết từ kết quả thí nghiệm để có được độ bền cao hơn so với độ bền tính theo công thức của tiêu chuẩn này.

Kết quả của các phương pháp phân tích kết cấu đáng tin cậy (sau đây gọi tắt là kết quả mô phỏng số, ví dụ kết quả của phương pháp Phần tử hữu hạn phi tuyến) và các thí nghiệm kiểm chứng sẽ được coi là độ bền danh nghĩa của cầu kiện. Các giá trị này không được nhỏ hơn độ bền danh nghĩa xác định theo các mục của Chương B đến M, Phụ lục A và B, và Phụ lục 1 và 2 của AISI S100.

Độ bền tính toán được xác định từ độ bền danh nghĩa chia cho hệ số an toàn hoặc nhân với hệ số chiết giảm (hệ số sức kháng). Các hệ số này được xác định từ kết quả của các phương pháp phân tích kết cấu đáng tin cậy và các thí nghiệm kiểm chứng (còn gọi là hệ số tính toán) thay vì các hệ số được chỉ định trong từng chương của AISI S100 (còn gọi là hệ số chỉ định). Ví dụ, hệ số an toàn hoặc sức kháng cho các cầu kiện chịu uốn được liệt kê trong Mục F2 của AISI S100 như sau:

- Hệ số an toàn $\Omega_b = 1,67$ (ASD)
- Hệ số sức kháng $\phi_b = 0,90$ (LRFD) hoặc $\phi_b = 0,90$ (LSD)

Nếu kết quả thí nghiệm là đáng tin cậy, các hệ số tối ưu hơn (tức hệ số an toàn thấp hơn hoặc hệ số sức kháng cao hơn) có thể được tính toán nhờ kết quả của các thí nghiệm kết hợp với mô phỏng số. Sau đó, các hệ số này có thể được sử dụng trong thiết kế. Theo chiều ngược lại, khi các hệ số tính toán tối ưu hơn các hệ số chỉ định,

việc sử dụng hệ số an toàn hoặc hệ số sức kháng chỉ định sẽ cho ra một thiết kế an toàn hơn. Do đó, các hệ số tính toán có thể được sử dụng để đánh giá độ tin cậy của các giá trị hoặc công thức thu được từ thí nghiệm và mô phỏng số.

Các hệ số an toàn hoặc hệ số sức kháng được tính toán theo trình tự sau:

Đối với LRFD và LSD, hệ số sức kháng được tính theo công thức (xem Mục B3.2.2 của Hướng dẫn tiêu chuẩn AISI [32])

$$C = \frac{M_m F_m P_m}{e \sqrt{V_M^2 V_F^2 C_P V_P^2 V_Q^2}} \quad (2.10)$$

trong đó

C_ϕ - Hệ số hiệu chuẩn. $C_\phi = 1,52$ đối với LRFD; $C_\phi = 1,42$ đối với LSD; đối với dầm có cánh kéo được bắt vít vào sàn hoặc tấm mái và cánh nén tự do, $C_\phi = 1,6$ khi tính theo LRFD và $C_\phi = 1,42$ khi tính theo LSD.

M_m - hệ số vật liệu (M) trung bình, xác định bằng phân tích thống kê hoặc, nếu có thể, theo Bảng 2.1 dựa trên hình thức chịu lực.

F_m - hệ số chế tạo (F) trung bình, xác định bằng phân tích thống kê hoặc, nếu có thể, theo Bảng 2.1 dựa trên hình thức chịu lực.

P_m - hệ số thành thực (P) trung bình của cấu kiện được thí nghiệm. $P_m = 1,0$. Đối với trường hợp sử dụng kết quả mô phỏng số kết hợp với thí nghiệm kiểm chứng

$$P_m = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{R_{t,i}}{R_{n,i}}}{n} \quad (2.11)$$

trong đó i là số thứ tự của mẫu thí nghiệm, $i = 1$ đến n ; n là tổng số mẫu thí nghiệm; $R_{t,i}$ là độ bền xác định từ thí nghiệm của mẫu thứ i (độ bền thí nghiệm); $R_{n,i}$ là độ bền xác định từ kết quả mô phỏng số của mẫu thí nghiệm thứ i (độ bền dự kiến).

e - Cơ số logarit tự nhiên. $e = 2,718$

β_0 - Chỉ số độ tin cậy mục tiêu. $\beta_0 = 2,5$ đối với cấu kiện tính theo LRFD; $\beta_0 = 3,0$ đối với cấu kiện tính theo LSD; đối với dầm có cánh kéo được bắt vít vào sàn hoặc tấm mái và cánh nén tự do, $\beta_0 = 1,5$ khi tính theo LRFD và $\beta_0 = 3,0$ khi tính theo LSD.

V_M - Hệ số biến thiên của vật liệu được liệt kê trong Bảng 2.1 theo hình thức chịu lực.

V_F - Hệ số biến thiên do chế tạo được liệt kê trong Bảng 2.1 theo hình thức chịu lực.

C_P - Hệ số điều chỉnh

$$C_P = 1 - \frac{1}{n} \frac{m}{m-2} \quad \text{For } n = 4$$

$$5,7 \quad \text{For } n = 3$$
(2.12)

với n là số mẫu thí nghiệm và m là số bậc tự do. $m = n - 1$.

Bảng 2.1 Dữ liệu thống kê để xác định hệ số sức kháng [32]

Hình thức chịu lực	M_m	V_M	F_m	V_F
<i>Cấu kiện</i>				
Chịu kéo	1,1	0,1	1	0,05
Chịu nén	1,1	0,1	1	0,05
Chịu uốn	1,1	0,1	1	0,05
Chịu cắt và ứng suất cục bộ	1,1	0,1	1	0,05
Chịu ứng suất phức tạp	1,05	0,1	1	0,05
Các trạng thái giới hạn khác	1	0,1	1	0,05
<i>Liên kết</i>				
Liên kết hàn	1,1	0,1	1	0,1
Liên kết bu lông	1,1	0,08	1	0,05
Liên kết vít	1,1	0,1	1	0,1
Đinh bắn bằng máy	1,1	0,1	1	0,1
Các liên kết khác	1,1	0,1	1	0,15
Liên kết với kết cấu bê tông	1,1	0,1	0,9	0,1
Liên kết với gỗ	1,1	0,15	1	0

V_P - Hệ số biến thiên của kết quả thí nghiệm. $V_P = s_c/P_m$, trong đó s_c là độ lệch chuẩn của tỷ số giữa $R_{t,i}$ và $R_{n,i}$ tính cho tất cả các kết quả thí nghiệm. Giá trị của V_P không nhỏ hơn 0,065.

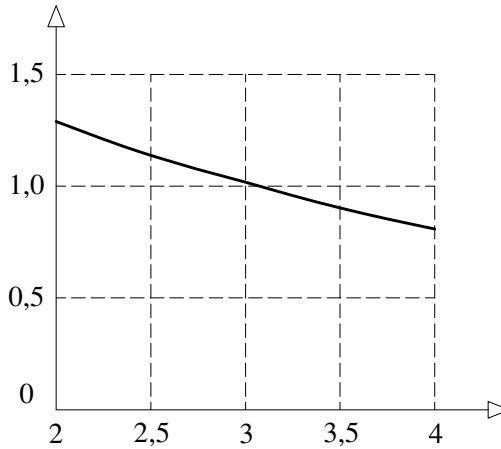
V_Q - Hệ số biến thiên của hiệu ứng tải trọng. $V_Q = 0,21$ đối với LRFD và LSD; đối với dầm có cánh kéo được bắt vít vào sàn hoặc tấm mái và cánh nén tự do, $V_Q = 0,43$ khi tính theo LRFD và $V_Q = 0,21$ khi tính theo LSD.

C_c - Hệ số tương quan

$$C_c = \frac{n}{\sqrt{n}} \frac{R_{t,i} R_{n,i}}{R_{t,i}^2 R_{n,i}^2} \frac{R_{t,i}}{R_{n,i}} \frac{R_{n,i}}{R_{n,i}^2} \quad (2.13)$$

Cho phép sử dụng các dữ liệu thống kê trong tài liệu khác thay cho các giá trị của Bảng 2.1 nếu chúng được thiết lập trên các tập dữ liệu đủ lớn về đặc tính vật liệu và phương pháp chế tạo.

Giá trị của chỉ số độ tin cậy β có thể được tính ngược từ Công thức (2.10) hoặc xác định từ biểu đồ ϕ - β , như thể hiện trong Hình 2.7 [121]. Khi sử dụng hệ số sức kháng do tiêu chuẩn chỉ định (0,9 đối với cấu kiện chịu uốn [31]), chỉ số độ tin cậy β lớn hơn so với chỉ số độ tin cậy mục tiêu β_0 (2,5 đối với cấu kiện chịu uốn [31]) có nghĩa thiết kế có độ tin cậy cao hơn.



Hình 2.7 Ví dụ về quan hệ giữa chỉ số độ tin cậy β và hệ số sức kháng ϕ [121]

Độ bền tính toán sẽ được xác định theo công thức

$$R_a = R_n \quad (2.14)$$

Đối với phương pháp ASD, hệ số an toàn Ω được tính như sau

$$\underline{1,6} \quad (2.15)$$

Độ bền tính toán sẽ được xác định theo công thức

$$R_a = \frac{R_n}{n} \quad (2.16)$$

R_n - Độ bền trung bình của tất cả các kết quả thí nghiệm

2.2. Mô men tới hạn đàn hồi của toàn bộ tiết diện

Phương trình vi phân cơ bản của tấm mỏng dưới tác động của lực tác dụng vào mặt phẳng giữa tấm khi độ võng w được coi là nhỏ so với độ dày của tấm (phương trình St. Venant)

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) - t \left(x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2xy \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) = 0 \quad (2.17)$$

trong đó

w – hàm độ võng

t – độ dày của tấm

D – độ cứng của tấm

$$D = \frac{EI}{1 - \nu^2} = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (2.18)$$

E – mô đun đàn hồi

ν – hệ số Poát xông

và σ_x và σ_y , lần lượt là ứng suất pháp theo trục x hoặc y , và τ_{xy} là ứng suất tiếp của tiết diện vuông góc với mặt phẳng của tấm và song song với trục x hoặc y . Các ứng suất này là hàm số của x và y , được sinh ra bởi các lực tác dụng trên các cạnh của tấm. Để biết cách suy luận phương trình (2.17), xem [159].

Đối với các tấm chỉ chịu ứng suất nén dọc như thể hiện trong Hình 2.8, Phương trình (2.17) có thể được đơn giản hóa thành

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) - x t \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (2.19)$$

Bleich [44] đã sử dụng tỷ số τ để cho phép tính toán với vật liệu ngoài phạm vi đàn hồi

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\sqrt{\tau} \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) - x t \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (2.20)$$

trong đó

$$\frac{E_t}{E} \quad (2.21)$$

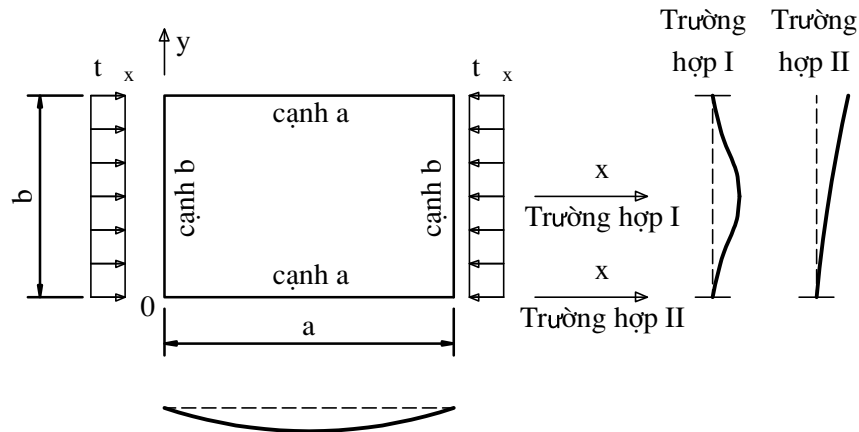
E_t – mô đun tiếp tuyến

Vật liệu trong phạm vi đàn hồi, $\tau = 1$. Do đó, tỷ số này sẽ bị bỏ qua trong các phần tiếp theo và (2.19) sẽ là phương trình được sử dụng.

Cho đến nay, có hai phương pháp giải tích để giải bài toán mất ổn định của toàn bộ tiết diện. Phương pháp đầu tiên chia tiết diện thành các tấm thành phần. Mỗi tấm thành phần đang xét (được gọi là tấm mất ổn định) chịu ảnh hưởng của các tấm lân cận (được gọi là các tấm tăng cứng) được mô tả thông qua hệ số chống xoay, và được giải quyết theo bài toán mất ổn định của tấm đơn. Phương pháp thứ hai xem xét toàn bộ tiết diện như một tổng thể và giải đồng thời tổ hợp tấm. Các phương pháp này sẽ được trình bày trong Mục 2.2.1 và phụ lục A.5.

2.2.1. Phương pháp Hệ số chống xoay

Bleich đã giới thiệu phương pháp này trong tài liệu [44] để giải bài toán mất ổn định của các tấm hình chữ nhật chịu ứng suất nén phân bố đều.



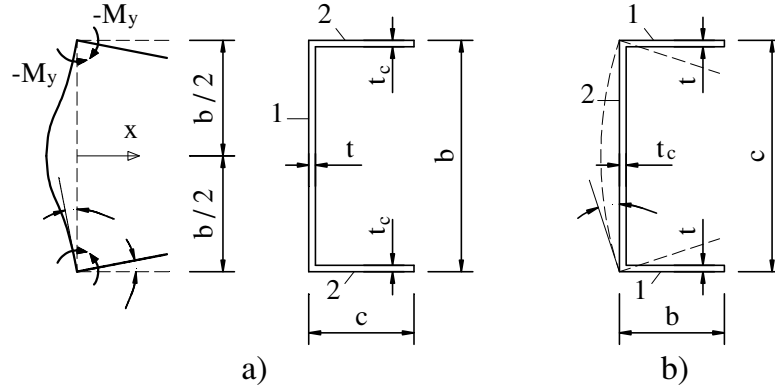
Hình 2.8 Mất ổn định của tấm dưới ứng suất nén [44]

Trường hợp I - Cả hai cạnh a đều ngàm đàn hồi

Trường hợp II – Một cạnh a ngàm đàn hồi, cạnh còn lại tự do

So với lý thuyết về độ ổn định của cột, vấn đề ổn định của các tấm phức tạp hơn do tải trọng tới hạn có thể khác với tải trọng lớn nhất (độ bền) của tấm.

Liên kết hai đầu (trên các cạnh chịu tải) tấm có chiều dài lớn ít tác động đến tải trọng tới hạn như đối với cột. Ảnh hưởng của liên kết trên các cạnh song song với hướng chịu tải (cạnh dọc) là mang tính quyết định.



Hình 2.9 Mối quan hệ giữa tấm mất ổn định và tấm tăng cứng [44]

- a) Mất ổn định của bản bụng b) Mất ổn định của bản cánh
1 – Tấm mất ổn định 2 – Tấm tăng cứng

Mối quan hệ giữa mô men tác dụng lên một cạnh dọc M_y và góc xoay của cạnh tấm tăng cứng (xem Hình 2.9a) có thể được coi là tuyến tính và được thể hiện bằng hệ số tỷ lệ

$$M_y = \zeta \frac{2D}{b} \theta \quad (2.22)$$

Khi đó, hệ số chống xoay được định nghĩa

$$\frac{2D}{b} \quad (2.23)$$

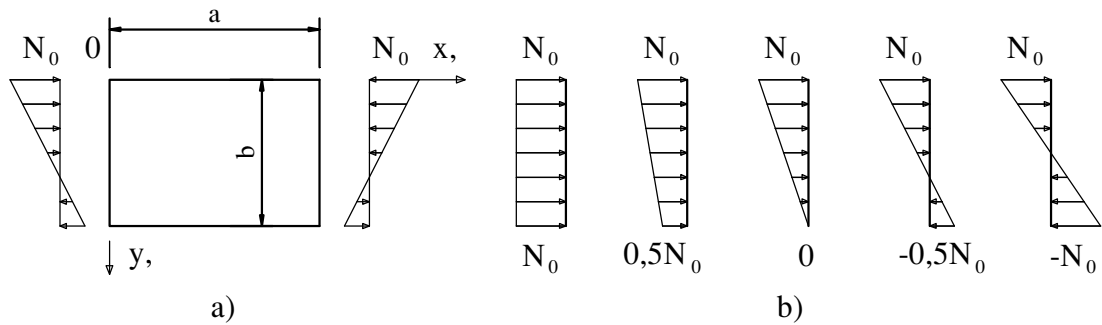
là một số không có thứ nguyên. ζ được coi là hằng số dọc theo các cạnh a và là một hàm số của các kích thước của tấm mất ổn định và tấm tăng cứng. Cần lưu ý rằng về mặt lý thuyết, ζ có thể nhận các giá trị từ 0 đến ∞ . Khi $\zeta = 0$, tấm mất ổn định được ngàm cứng hoàn toàn ở các cạnh a ; khi $\zeta = \infty$, nó có thể tự do quay quanh các cạnh này.

Cách xác định hệ số chống xoay và hệ số mất ổn định được trình bày ở Phụ lục A.4.

2.2.2. Phương pháp xem xét tiết diện như một tổng thể

Bulson (1970) [45] đã đề xuất phương pháp giải bài toán mất ổn định cục bộ của tổ hợp tấm một cách đồng thời. Phương pháp này không được áp dụng trong luận án, tuy nhiên có thể cung cấp góc nhìn tổng quát về các phương pháp giải tích dùng cho bài toán mất ổn định. Phương pháp này được trình bày cụ thể trong phụ lục A.5.

2.2.3. Tấm chữ nhật chịu ứng suất nén tuyến tính có điều kiện biên tổng quát



Hình 2.10 Kích thước tấm và phân bố ứng suất [92]

Kang (2005) [92] đã giới thiệu một phương pháp giải chính xác bài toán mất ổn định của tấm chữ nhật chịu ứng suất nén tuyến tính có điều kiện biên tổng quát.

a) Phương trình vi phân cơ bản

Xét tấm chữ nhật có kích thước $a \times b$, như thể hiện trong Hình 2.10a, có các cạnh $x = 0$ và $x = a$ tựa khớp và chịu ứng suất trong mặt phẳng thay đổi tuyến tính, Hai cạnh dọc ($y = 0$ và $y = b$) có thể là ngàm cứng (C), tựa khớp (S) hoặc tự do (F) và không chịu ứng suất trong mặt phẳng. Giả thiết đây là tấm mỏng, có độ dày đồng đều và vật liệu đồng nhất, đẳng hướng và đàn hồi tuyến tính, phương trình vi phân của độ võng là

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - \frac{N_x}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (2.24)$$

trong đó w là độ võng; D là độ cứng kháng uốn của tấm được xác định theo

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2.25)$$

Trong biểu thức trên, E là mô đun đàn hồi; ν là hệ số Poát xôn; và t là độ dày của tấm.

N_x - lực dọc trên một đơn vị chiều dài của tấm theo hướng x , dương nếu chịu nén.

$$N_x = N_0 \left(1 - \frac{y}{b} \right) \quad (2.26)$$

trong đó N_0 là giá trị lực nén tại $y = 0$, và α là hệ số phân bố. Phân bố ứng suất này là của các đầu tấm, tức là $x = 0$ và $x = a$, tuy nhiên vẫn giữ nguyên khi vào bên trong tấm, đảm bảo thỏa mãn chính xác các phương trình cân bằng trong mặt phẳng tấm. Bằng cách thay đổi α , có thể thu được nhiều trường hợp cụ thể khác nhau. Ví dụ, với $\alpha = 0$, ta có trường hợp lực nén phân bố đều. Khi $\alpha = 1$, lực nén thay đổi tuyến tính từ N_0 tại $y = 0$ về 0 tại $y = b$. Đối với $\alpha = 2$, ta thu được trường hợp uốn thuần túy. Đối với α khác trong phạm vi $0 < \alpha < 2$, đây là trường hợp nén uốn. Minh họa về các trường hợp phân bố ứng suất được thể hiện trong Hình 2.10b. Khi $\alpha < 0$ hoặc $\alpha > 2$, phân bố ứng suất giống hệt với trường hợp $0 < \alpha < 2$ bằng cách thay đổi cạnh $y = 0$ và $y = b$ một cách phù hợp. Phương trình (2.24) do đó trở thành

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - \frac{N_0}{D} \left(1 - \frac{y}{b} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (2.27)$$

Vì N_x và N_0 chịu nén là dương, do đó $y = 0$ được gọi là cạnh nén và $y = b$ được gọi là cạnh kéo.

Sử dụng các hệ số không thứ nguyên

$$\frac{x}{a}; \quad \frac{y}{b} \quad (2.28)$$

Phương trình (2.27) trở thành

$$\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} - 2 \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2 \partial \eta^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial \eta^4} - \frac{a^2 N_0}{D} \left(1 - \frac{\eta}{b} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} = 0 \quad (2.29)$$

trong đó κ là tỷ lệ hai cạnh tấm

$$\frac{a}{b} \quad (2.30)$$

Hàm độ võng của tấm w có thể được chọn bằng

$$w = Y_m \sin m \xi \quad (2.31)$$

Y_m là hàm của η , và m là số nửa sóng theo phương x . Biểu thức (2.31) thỏa mãn chính xác các điều kiện biên tựa khớp tại $\xi = 0$ và 1. Thay biểu thức (2.31) vào phương trình (2.29) thu được

$$Y_m^{IV} - 2 \frac{d^2 Y_m}{d\eta^2} + Y_m = \frac{4}{m^4} N_0^* \quad (2.32)$$

trong đó Y_m^{IV} và Y_m'' lần lượt là đạo hàm bậc bốn và bậc hai của Y_m theo η . β_m xác định theo công thức

$$\beta_m = \frac{m}{m^2}; m = 1, 2, 3, \dots \quad (2.33)$$

và N_0^* là lực nén tương đối tại cạnh $y = 0$, được định nghĩa bởi

$$N_0^* = \frac{a^2 N_0}{2D} - \frac{N_0 b^2}{D} \quad (2.34)$$

b) *Mô tả hàm độ võng dưới dạng chuỗi lũy thừa và xác định mối quan hệ giữa các hệ số của chuỗi*

Phương trình (2.32) là phương trình vi phân tuyến tính của η đối với mỗi giá trị của m . Phương trình vi phân tuyến tính chỉ có một đối số, và có thể được giải chính xác bằng phương pháp chuỗi lũy thừa của Frobenius (Wylie, 1951). Giả sử hàm độ võng là

$$Y_m = \sum_{p=0}^{\infty} C_{m,p} \eta^p \quad (2.35)$$

trong đó $C_{m,p}$ là một hệ số tùy ý. Bằng cách thay thế biểu thức (2.35) vào Công thức (2.32), ta có

$$\sum_{p=4}^{\infty} p(p-1)(p-2)(p-3) C_{m,p} \eta^{p-4} - 2 \sum_{p=2}^{\infty} p(p-1) C_{m,p} \eta^{p-2} + \sum_{p=0}^{\infty} C_{m,p} \eta^p = \frac{4}{m^4} N_0^* \quad (2.36)$$

Sắp xếp lại các chỉ số, Công thức (2.36) trở thành

$$\sum_{p=0}^{\infty} \left[\frac{4}{m^4} N_0^* - p(p-1)(p-2)(p-3) C_{m,p} + 2p(p-1) C_{m,p-2} \right] \eta^p = 0 \quad (2.37)$$

Sử dụng tính chất đồng nhất đối với hệ số của η^0

$$C_{m,4} = \frac{2}{24} \frac{m}{4} 4C_{m,2} - \frac{2}{m} N_0^* C_{m,0} \quad (2.38)$$

và đối với các hệ số của η^p ($p = 1, 2, 3, \dots$)

$$C_{m,p+4} = \frac{2}{p+4} \frac{p+2}{p+3} \frac{p+1}{p+2} C_{m,p+2} - \frac{2}{p+2} \frac{p+1}{p+3} \frac{p}{p+2} \frac{p-1}{p+1} C_{m,p} + \frac{2}{p+1} \frac{p}{p+2} \frac{p-1}{p+1} N_0^* C_{m,p-1} - \frac{2}{p} N_0^* C_{m,p-1} \quad (2.39)$$

Các công thức (2.38) và (2.39) là các mối quan hệ đệ quy đối với $C_{m,p+4}$ khi $p \geq 0$. Điều đó có nghĩa là $C_{m,0}$, $C_{m,1}$, $C_{m,2}$, và $C_{m,3}$ là các hệ số chưa biết, trong khi $C_{m,4}$, $C_{m,5}$, $C_{m,6} \dots$ là các hệ số phụ thuộc. $C_{m,0}$, $C_{m,1}$, $C_{m,2}$, và $C_{m,3}$ có thể được xác định từ bốn điều kiện biên của hai cạnh dọc.

Đối với bài toán mất ổn định, bốn điều kiện biên trên hai cạnh thiết lập một hệ bốn phương trình tuyến tính đối với bốn biến $C_{m,0}$ đến $C_{m,3}$. Ứng suất tới hạn sẽ thu được bằng cách đặt định thức của hệ phương trình bằng 0.

Cơ sở lý thuyết của phần này sẽ được sử dụng trong Mục 3.1.1 để tính độ cứng chống xoay trên một cạnh không tải của tấm chữ nhật chịu ứng suất phân bố tuyến tính.

2.3. Nhận xét chương

Chương này đã giới thiệu các lý thuyết về độ bền theo phương pháp DSM, các phương pháp giải tích hiện có để xác định ứng suất tới hạn đàn hồi do mất ổn định cục bộ của toàn bộ tiết diện và nghiên cứu mới nhất về ổn định của tấm mỏng có điều kiện biên tổng quát chịu ứng suất nén phân bố không đều. Các lý thuyết này sẽ lần lượt được áp dụng ở các chương kế tiếp.

CHƯƠNG 3. XÂY DỰNG CÔNG THỨC GIẢI TÍCH ĐỂ XÁC ĐỊNH HỆ SỐ MẤT ỔN ĐỊNH CỤC BỘ CỦA CẤU KIỆN CHỮ C CHỊU UỐN QUANH TRỤC KHÔNG ĐỐI XỨNG VỚI BẢN BỤNG CHỊU NÉN

Phương pháp Độ bền trực tiếp (DSM) do Schafer và Peköz [138] đề xuất sử dụng mô men tới hạn của các cấu kiện chịu uốn làm giá trị đầu vào cho công thức xác định độ bền. Phương pháp này đã được đưa vào Tiêu chuẩn AISI S100 [31] và Tiêu chuẩn AS/NZS 4600 [89] kể từ năm 2004.

Các tiêu chuẩn trên nêu ra hai phương pháp để tính toán mô men tới hạn đàn hồi, bao gồm nghiệm giải tích và phương pháp số. Phương pháp số cho phép sử dụng các phần mềm phân tích kết cấu dựa trên phương pháp Dải hữu hạn (FSM), phương pháp Phần tử hữu hạn (FEM) hoặc lý thuyết Dầm tổng quát (GBT)... để giải ra ứng suất tới hạn của tiết diện. Tuy nhiên, các kỹ sư phải có kinh nghiệm sử dụng phần mềm. Hướng dẫn tiêu chuẩn AISI S100 [32] cũng chỉ ra rằng việc xác định dạng mất ổn định cũng là một thách thức khi sử dụng các phương pháp số.

Nghiem giải tích trong các tiêu chuẩn trên thực chất tận dụng nội dung của phương pháp Bề rộng hữu hiệu (EWM) mô tả trong Phụ lục I của AISI S100. Tuy nhiên, ứng suất tới hạn thu được từ phương pháp này bỏ qua sự tương tác giữa các tấm thành phần của tiết diện, vì thế kết quả không chính xác. Sai số này có thể lên đến 25,8% đối với các thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng [121][166] (và thấp hơn 40,5% so với kết quả ABAQUS đối với tập hợp tiết diện sử dụng trong luận án này). Ngoài ra, khối lượng tính toán lớn và phải tính toán cho từng tấm là một nhược điểm của phương pháp khi dựa trên quy trình tính toán của EWM. Các nghiên cứu chỉ ra rằng sử dụng phương pháp số hoặc biểu thức trực tiếp để tính ứng suất tới hạn có thể giảm 41% khối lượng tính toán của xà gồ tường so với giải pháp sử dụng nghiệm giải tích cho trong Tiêu chuẩn AISI S100 [166].

Nghiem giải tích mô tả trong Tiêu chuẩn AISI S100 sử dụng lý thuyết tấm mỏng đàn hồi, chỉ áp dụng cho từng tấm đơn lẻ. Bài toán mất ổn định của toàn bộ tiết diện đã được đề cập bởi Bleich [44] và Bulson [45]. Bleich giới thiệu Phương pháp Hệ số chống xoay với các giả định sau:

Mất ổn định cục bộ xảy ra trước mất ổn định tổng thể.

Giao tuyến giữa các tấm vẫn thẳng và không bị vặn quanh trục trước khi xảy ra mất ổn định cục bộ.

Phương pháp của Bleich yêu cầu các cạnh chung vẫn thẳng sau khi mất ổn định, tương tự như các giả định của phương pháp Bulson (xem Phụ lục A.5), do đó hạn chế việc phạm vi áp dụng các phương pháp này. Ngoài ra, cả hai phương pháp đều sử dụng các hàm độ võng dạng đóng của lý thuyết tấm mỏng, vốn rất khó xác định. Cho đến nay, hàm độ võng dạng đóng chỉ được giải cho các trường hợp đơn giản, bao gồm các tấm mỏng chịu ứng suất nén đều hoặc phân bố tuyến tính có các điều kiện biên điển hình (ví dụ biên tựa khớp, ngàm hoặc tự do). Hàm độ võng dạng đóng cho trường hợp tổng quát, tức tấm mỏng chịu tải trọng bất kỳ (ứng suất nén đều hoặc không đều) có các điều kiện biên đàn hồi vẫn chưa được phát triển vào thời điểm các phương pháp trên ra đời. Do đó, ứng dụng thực tế của các phương pháp này rất hạn chế. Chúng chỉ áp dụng được cho các cấu kiện chịu nén và không được tiếp tục phát triển kể từ đó đến nay.

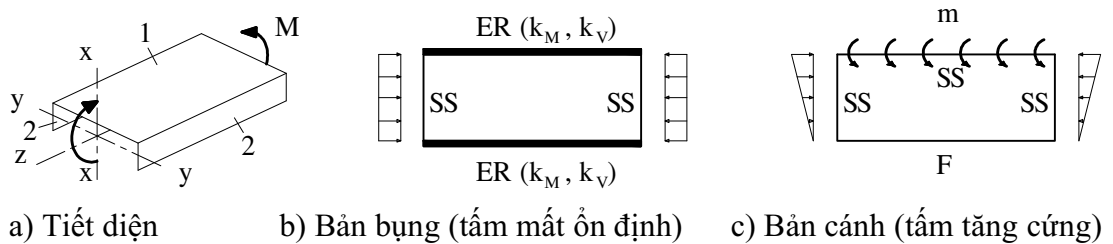
Tuy nhiên, công thức giải tích có ưu điểm là dễ sử dụng và dễ dàng tích hợp vào tiêu chuẩn thiết kế. Do đó, nhiều nhà nghiên cứu đang nỗ lực cải tiến công thức giải tích, bao gồm Schafer và Peköz (1999) [139], Schafer và Yu (2002) [135], Schafer [140], Seif và Schafer (2010) [146], De Miranda Batista (2010) [58], Luís Vieira (2018) [164], Gardner (2019) [75], Ahdab (2022) [26], Ding và Schafer (2023) [63], Glauz (2017) [78], Lapira và cộng sự (2023) [99], Bureau và cộng sự (2022) [46], Fieber và cộng sự (2019) [72].

Tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng như dầm và xà gồ thể hiện hai dạng mất ổn định riêng biệt. Khi bản bụng chịu ứng suất kéo, mất ổn định méo là dạng chi phối [63][80][115][116]. Bài toán này đã được Glauz giải quyết bằng phương pháp giải tích [79]. Ngược lại, khi bản bụng chịu nén, dạng mất ổn định chiếm ưu thế là ổn định cục bộ [80][121]. Các công thức xác định hệ số mất ổn định đã được xây dựng cho trường hợp này. Seif [146], Gardner [75], và Yiu [180] đã đề xuất các biểu thức cho các tiết diện chữ C không bẻ móc, trong khi Ding [63] và Ahdab [26] giải quyết bài toán tiết diện chữ C bẻ móc. Các nghiên cứu trên phát triển biểu thức dạng đóng bằng cách hồi quy từ dữ liệu mô phỏng số. Góc uốn và đặc tính vật liệu chưa được xem xét trong quá trình xây dựng các công thức này. Đồng thời chúng

cũng được thiết lập cho các tiết diện có sẵn vốn được thiết kế cho các cấu kiện chịu uốn quanh trục quán tính lớn (cũng là trục đối xứng).

Do đó, chương này sẽ phát triển một phương pháp giải tích dùng để giải quyết mất ổn định cục bộ đàn hồi của toàn bộ tiết diện. Phương pháp này được đặt tên là phương pháp Độ cứng biên (RSM) và được trình bày trong Mục 3.1. Phương pháp RSM dựa trên phương pháp Hệ số chống xoay (Coefficient of Restraint method) của Bleich kết hợp với kết quả của bài toán mất ổn định cho tấm tổng quát do Kang (2005) [92] giới thiệu trong Mục 2.2.3. Phương pháp RSM coi mỗi tấm thành phần là một phần tử, nên số lượng phần tử ít hơn các phương pháp số khác như FEM, FSM. RSM còn có khả năng xác định được tấm mất ổn định đầu tiên. Tiếp đó, công thức xác định hệ số mất ổn định cục bộ của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén sẽ được đề xuất trong Mục 3.2. Các biểu thức này có khả năng áp dụng cho tiết diện chữ C với tỷ lệ cạnh ngoài phạm vi của tiết diện thương mại. Ảnh hưởng của các đặc tính vật liệu, chẳng hạn như hệ số Poát xôn và bán kính góc uốn đối với hệ số mất ổn định cũng sẽ được xem xét.

3.1. Phương pháp Độ cứng biên giải quyết bài toán mất ổn định cục bộ đàn hồi của toàn bộ tiết diện



Hình 3.1 Mô hình tính của tiết diện chữ C không bẻ móc

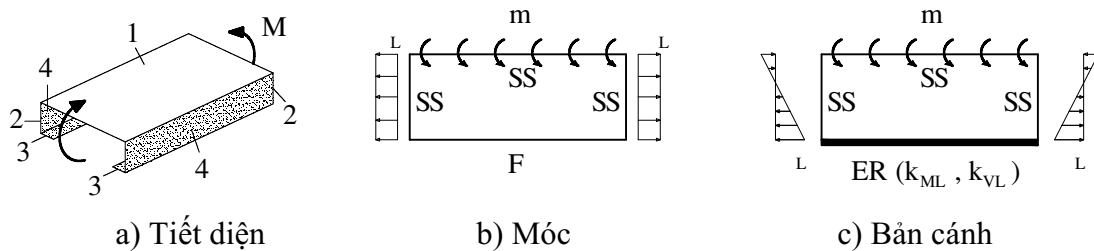
SS - Biên tựa khớp F - Biên tự do ER - Biên đàn hồi

1 - Bản bụng 2 - Bản cánh

Hình 3.1 trình bày mô hình tính xác định hệ số mất ổn định của bản bụng tiết diện chữ C không bẻ móc. Bản bụng được xem là tấm mất ổn định chịu ứng suất nén đều trên hai cạnh ngang tựa khớp còn các cạnh dọc không chịu tải là cạnh đàn hồi (Hình 3.1b). Độ cứng trên các cạnh dọc bao gồm độ cứng chống xoay (k_M) và độ cứng lò xo (k_V) do bản cánh (còn gọi là tấm tăng cứng) cung cấp. Độ cứng chống xoay (k_M)

được xác định theo Mục 3.1.1 bằng cách mô hình hóa bản cánh thành tấm mỏng chữ nhật chịu ứng suất nén đều với cạnh dọc liên kết với bản bụng được coi là cạnh tựa khớp và cạnh dọc còn lại là biên tự do, như thể hiện trong Hình 3.1c. Độ cứng lò xo (k_r) được trình bày ở Mục 3.1.3. Cuối cùng, bài toán mất ổn định của tấm mỏng chịu ứng suất phân bố tuyến tính có điều kiện biên tổng quát được giải quyết trong Mục 3.1.4.

Đối với các tiết diện được tạo bởi nhiều tấm thành phần hơn như tiết diện chữ C bẻ móc (xem Hình 3.2), tấm ngoài cùng, tức phần bẻ móc, sẽ được xem xét trước tiên. Độ cứng của nó được tính toán và sử dụng làm điều kiện biên cho tấm kế tiếp (bản cánh). Nhờ đó, độ cứng mà bản cánh cung cấp cho tấm tiếp theo có thể được xác định. Quá trình này được lặp lại cho đến khi tấm cuối cùng là tấm mất ổn định. Sau đó, ứng suất tới hạn của tấm mất ổn định có thể được giải như đã nêu ở trên. Trong quá trình này, phần móc và bản cánh hợp lại thành một “Bộ phận tăng cứng” duy nhất.



Hình 3.2 Mô hình tính bộ phận tăng cứng của tiết diện chữ C bẻ móc

SS - Biên tựa khớp

F - Biên tự do

ER - Biên đàn hồi

1 - Bản bụng

2 - Bản cánh

3 - Móc

4 - Bộ phận tăng cứng

Phương pháp này giải quyết bài toán mất ổn định của toàn bộ tiết diện thông qua bài toán của tấm đơn trên biên đàn hồi, trong đó độ cứng đàn hồi của biên dọc được xác định bằng phương pháp lặp qua từng tấm thành phần trong Bộ phận tăng cứng. Phương pháp này được đặt tên là phương pháp Độ cứng biên, viết tắt là RSM.

RSM sử dụng các giả thiết sau:

Trạng thái ban đầu của bài toán mất ổn định là trạng thái cân bằng của cấu kiện khi chịu tải trọng. Ở trạng thái này, cấu kiện đã xuất hiện biến dạng và tiết diện đã sản sinh ứng suất ban đầu. Tuy nhiên, bài toán mất ổn định chỉ sử

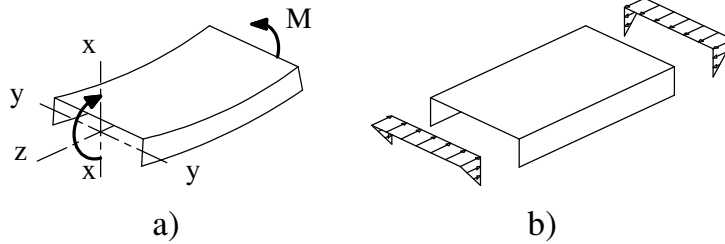
dụng ứng suất ban đầu. Biến dạng bị bỏ qua như thể cấu kiện không bị biến dạng (xem Hình 3.3b). Trạng thái ban đầu này cũng được gọi là trạng thái không;

Tiết diện được cấu tạo từ các tấm liên tiếp (còn gọi là Cụm tấm liên tiếp, xem Hình A.11c). Tiết diện hoa thị (Hình A.11b) không được xem xét trong phương pháp này;

Tiết diện có dạng hờ. Các điều kiện biên ngoài cùng đã biết;

Tiết diện được hình thành bởi các tấm thép đặt vuông góc với nhau. Góc uốn giữa các tấm bị bỏ qua;

Vật liệu làm việc trong giai đoạn đàn hồi.



a) Biến dạng khi chịu uốn

b) Trạng thái không của bài toán mất ổn định

Hình 3.3 Trạng thái ban đầu của bài toán mất ổn định của các cấu kiện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng

3.1.1. Mở rộng bài toán tấm chữ nhật chịu ứng suất phân bố tuyến tính có điều kiện biên tổng quát trên hai cạnh dọc

Nghiên cứu của Jae Hoon Kang về vấn đề ổn định của các tấm chữ nhật chịu ứng suất nén tuyến tính có điều kiện biên tổng quát trên cạnh dọc trong Mục 2.2.3 sẽ được sử dụng trong phần này.

a) *Biểu diễn các hệ số của hàm độ võng dưới dạng ma trận*

Biểu diễn tất cả các hệ số $C_{m,i}$ của hàm độ võng w dưới dạng ma trận và sử dụng ma trận cơ sở $C_m^* = [C_{m,0} \ C_{m,1} \ C_{m,2} \ C_{m,3}]^T$ như sau

$$C_{m,i} = C_m^* \quad (3.1)$$

Với $i = 0$ đến 4

$$\begin{array}{cccc}
m,0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
m,1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
m,2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
m,3 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
m,4 & \frac{m^2}{24} & \frac{m^2}{m} & N_0^* & 0 & \frac{m^2}{6} & 0
\end{array} \quad (3.2)$$

trong đó $\Phi_{m,4}$ xác định từ Công thức (2.38).

Và khi $i > 4$, bằng cách thay $p = i - 4$ vào Công thức (2.39), ta có

$$\begin{array}{cccc}
m,i & \frac{m^2}{i(i-1)(i-2)(i-3)} & \begin{array}{c} N_0^* \\ N_0^* \end{array} & \begin{array}{c} T \\ m \end{array} \\
& & \begin{array}{c} 2 \\ 2 \end{array} & \begin{array}{c} i \\ i \end{array} \\
& & \begin{array}{c} 2 \\ 2 \end{array} & \begin{array}{c} i \\ i \end{array} \\
& & \begin{array}{c} 3 \\ 3 \end{array} & \begin{array}{c} m,i \\ m,i \end{array}
\end{array} \quad (3.3)$$

b) Các hàm ứng xử

Các hàm độ võng, góc xoay, mô men

$$w = Y_m \sin m \frac{w}{y} M_y D \frac{w^2}{y^2} \frac{w^2}{x^2}$$

và hàm lực cắt kết hợp mô men xoắn trên cạnh tự do

$$V_{yT} = V_y \frac{M_{yx}}{x} D \frac{w^3}{y^3} 2 \frac{w^3}{y x^2}$$

được biểu diễn bằng chuỗi lũy thừa như sau

$$\begin{aligned}
w &= \sin m \sum_{i=0}^{\infty} C_{m,i}^* \\
\frac{1}{b} \sin m &= \sum_{i=1}^{\infty} i^{i-1} C_{m,i}^* \quad \frac{1}{b} \sin m = \sum_{i=0}^{\infty} i^{i-1} C_{m,i-1}^* \\
M_y &= \frac{D}{b^2} \sum_{i=2}^{\infty} i(i-1) C_{m,i}^* \quad \frac{2}{m} Y_m \sin m \\
\frac{D}{b^2} \sin m &= \sum_{i=0}^{\infty} i^{i-2} C_{m,i}^* \quad \frac{2}{m} \sum_{i=0}^{\infty} C_{m,i}^*
\end{aligned}$$

$$V_{yT} = \frac{D}{b^3} \sum_{i=3}^{\infty} \eta^i \sum_{m,i} \frac{2}{m} \eta^{i-1} C_m^* \sin m$$

$$\frac{D}{b^3} \sin m \sum_{i=0}^{\infty} \eta^i \sum_{m,i} \frac{2}{m} \eta^{i-1} C_m^* \sin m$$

Cuối cùng ta có

$$w = K_{m,w} C_m^* \sin m \quad (3.4)$$

$$K_m = C_m^* \sin m \quad (3.5)$$

$$M_y = K_{m,M} C_m^* \sin m \quad (3.6)$$

$$V_{yT} = K_{m,VT} C_m^* \sin m \quad (3.7)$$

với

$$K_{m,w} = \sum_{i=0}^{\infty} \eta^i \sum_{m,i}$$

$$K_m = \frac{1}{b} \sum_{i=0}^{\infty} \eta^i \sum_{m,i-1}$$

$$K_{m,M} = \frac{D}{b^2} \sum_{i=0}^{\infty} \eta^i \sum_{m,i} \frac{2}{m} \eta^{i-1}$$

$$K_{m,VT} = \frac{D}{b^3} \sum_{i=0}^{\infty} \eta^i \sum_{m,i} \frac{2}{m} \eta^{i-1}$$
(3.8)

Biểu thức (3.8) có thể được giản lược khi áp dụng cho hai cạnh biên dọc.

Với $y = 0$ (hoặc $\eta = 0$)

Tất cả các giá trị η^i đều bằng 0 ngoại trừ trường hợp $i = 0$ ($\eta^0 = 1$). Ký hiệu tổng chỉ còn một số hạng tương ứng với $i = 0$. Do đó, bằng cách loại bỏ ký hiệu tổng, bỏ đi thừa số η^i (vì $\eta^0 = 1$), và đặt i bằng 0, các biểu thức trong (3.8) trở thành

$$K_{m,w} = \sum_{m,0}$$

$$K_m = \frac{1}{b} \sum_{m,1}$$

$$K_{m,M} = \frac{D}{b^2} \sum_{m,2} \frac{2}{m} \sum_{m,0}$$

$$K_{m,VT} = \frac{D}{b^3} \sum_{m,3} \frac{2}{m} \sum_{m,1}$$
(3.9)

Với $y = b$ (hoặc $\eta = 1$)

Tất cả các giá trị $\eta^i = 1$, các biểu thức trong (3.8) trở thành

$$\begin{aligned}
 K_{m,w} &= \frac{1}{b} \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{y} \frac{dw}{dy} \right) + \frac{1}{y^2} \frac{d^2 w}{dy^2} \\
 K_{m,M} &= \frac{D}{b^2} \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{y} \frac{dM}{dy} \right) + \frac{1}{y^2} \frac{d^2 M}{dy^2} \\
 K_{m,VT} &= \frac{D}{b^3} \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{y} \frac{dV}{dy} \right) + \frac{1}{y^2} \frac{d^2 V}{dy^2}
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

Phần sau áp dụng các công thức (3.9) và (3.10) cho các điều kiện biên cụ thể.

c) Điều kiện biên trên cạnh $y = 0$

c.1 Cạnh $y = 0$ là gối tựa khớp

Các điều kiện biên là $w = 0$ và $M_y = 0$

hoặc

$$K_{m0} C_m^* = K_{m,w} C_m^* = M_{m,0} C_m^* = 0 \tag{3.11}$$

và

$$K_{m1} C_m^* = K_{m,M} C_m^* = \frac{D}{b^2} \frac{d}{dy} \left(\frac{1}{y} \frac{dM}{dy} \right) + \frac{1}{y^2} \frac{d^2 M}{dy^2} = 0 \tag{3.12}$$

Hay

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{y} \frac{dw}{dy} &= 0 \\
 \frac{1}{y} \frac{dM}{dy} &= 0
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

c.2 Cạnh $y = 0$ là gối ngàm

Các điều kiện biên là $w = 0$ và $\frac{dw}{dy} = 0$

hoặc

$$K_{m0} C_m^* = K_{m,w} C_m^* = M_{m,0} C_m^* = 0 \tag{3.14}$$

và

$$K_{m1} C_m^* = K_{m,M} C_m^* = \frac{1}{b} \frac{dM}{dy} = 0 \tag{3.15}$$

Hay

$$\begin{matrix} & & m,0 \\ & & C_m^* \\ & & 0 \\ & & m,1 \\ & & 0 \end{matrix} \quad (3.16)$$

c.3 Cạnh $y = 0$ tự do

Các điều kiện biên là $M_y = 0$ và $V_y = 0$

hoặc

$$K_{m0} C_m^* - K_{m,M} C_m^* - \frac{D}{b^2} 2 \quad \frac{2}{m} \quad \frac{2}{m} \quad C_m^* = 0 \quad (3.17)$$

và

$$K_{m1} C_m^* - K_{m,VT} C_m^* - \frac{D}{b^3} 6 \quad \frac{2}{m} \quad \frac{2}{m} \quad C_m^* = 0 \quad (3.18)$$

Hay

$$\begin{matrix} & & 2 & \frac{2}{m} & & 0 \\ & & m,2 & m,0 & & \\ 6 & & 2 & \frac{2}{m} & & \\ & & m,3 & m,1 & & \end{matrix} C_m^* = 0 \quad (3.19)$$

c.4 Cạnh $y = 0$ là gối đàn hồi

Các điều kiện biên là $V_y = 0$, $k_{V0} w = 0$ và $M_y = 0$, với k_{M0} và k_{V0} lần lượt là độ cứng chống chuyển vị xoay và chuyển vị tịnh tiến của gối tựa trên cạnh $y = 0$.

Do đó

$$\begin{matrix} K_{m0} C_m^* & K_{m,M} & k_{Mb} K_{m,} & C_m^* \\ \frac{D}{b^2} 2 & \frac{2}{m} & \frac{1}{b} & C_m^* = 0 \end{matrix} \quad (3.20)$$

và

$$\begin{matrix} K_{m1} C_m^* & K_{m,VT} & k_{Vb} K_{m,w} & C_m^* \\ \frac{D}{b^3} 6 & \frac{2}{m} & k_{Vb} & C_m^* = 0 \end{matrix} \quad (3.21)$$

Hay

$$\begin{pmatrix} 2 & \frac{k_{Mb}b}{D} \\ 6 & \frac{k_{Vb}b^3}{D} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m,2 & m,0 & m,1 \\ m,3 & m,1 & m,0 \end{pmatrix} C_m^* = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.22)$$

d) Điều kiện biên trên cạnh $y = b$

d.1 Cạnh $y = b$ là gối tựa khớp

Các điều kiện biên là $w|_{y=b} = 0$ và $M_y|_{y=b} = 0$

hoặc

$$K_{m2}C_m^* - K_{m,w}C_m^* = 0 \quad (3.23)$$

và

$$K_{m3}C_m^* - K_{m,M}C_m^* = \frac{D}{b^2} \left(i^2 - i - 1 \right) C_m^* = 0 \quad (3.24)$$

Hay

$$\begin{pmatrix} K_{m2} & -K_{m,w} \\ K_{m3} & -K_{m,M} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_m^* \\ C_m^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

d.2 Cạnh $y = b$ là gối ngàm

Các điều kiện biên là $w|_{y=b} = 0$ và $\theta|_{y=b} = 0$

hoặc

$$K_{m2}C_m^* - K_{m,w}C_m^* = 0 \quad (3.26)$$

và

$$K_{m3}C_m^* - K_{m,\theta}C_m^* = \frac{1}{b} \left(i - 1 \right) C_m^* = 0 \quad (3.27)$$

Hay

$$\begin{pmatrix} K_{m2} & -K_{m,w} \\ K_{m3} & -K_{m,\theta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_m^* \\ C_m^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.28)$$

d.3 Cạnh $y = b$ tự do

Các điều kiện biên là $M_y|_{y=b} = 0$ và $V_y|_{y=b} = 0$

hoặc

$$K_{m2}C_m^* - K_{m,M}C_m^* - \frac{D}{b^2} \begin{matrix} i & 2 & i & 1 \\ i & 0 & m,i & 2 \end{matrix} \begin{matrix} 2 \\ m \end{matrix} \begin{matrix} m,i \\ 2 \end{matrix} C_m^* = 0 \quad (3.29)$$

và

$$K_{m3}C_m^* - K_{m,VT}C_m^* - \frac{D}{b^3} \begin{matrix} i & 1 & i & 3 & i & 2 \\ i & 0 & m,i & 3 & 2 \end{matrix} \begin{matrix} 2 \\ m \end{matrix} \begin{matrix} m,i \\ 1 \end{matrix} C_m^* = 0 \quad (3.30)$$

Hay

$$\begin{matrix} i & 2 & i & 1 \\ i & 0 & i & 3 & i & 2 & i & 1 \\ m,i & 2 & m,i & 3 & 2 \end{matrix} \begin{matrix} 2 \\ m \end{matrix} \begin{matrix} m,i \\ 1 \end{matrix} C_m^* = \begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix} \quad (3.31)$$

d.4 Cạnh $y = b$ là gối đàn hồi

Các điều kiện biên là $V_y|_{y=b} = k_{Vb}w|_{y=b} = 0$ và $M_y|_{y=b} = k_{Mb}b = 0$, với k_{Mb} và k_{Vb} lần lượt là độ cứng chống chuyển vị xoay và chuyển vị tịnh tiến của gối tựa trên cạnh $y = b$.

Do đó

$$K_{m2}C_m^* - K_{m,M} - k_{Mb}K_{m,}C_m^* - \frac{D}{b^2} \begin{matrix} i & 2 & i & 1 \\ i & 0 & m,i & 2 \end{matrix} \begin{matrix} 2 \\ m \end{matrix} \begin{matrix} m,i \\ 2 \end{matrix} k_{Mb} \frac{1}{b} \begin{matrix} i & 1 \\ i & 0 \end{matrix} \begin{matrix} m,i \\ 1 \end{matrix} C_m^* = 0 \quad (3.32)$$

và

$$K_{m3}C_m^* - K_{m,VT} - k_{Vb}K_{m,w}C_m^* - \frac{D}{b^3} \begin{matrix} i & 1 & i & 3 & i & 2 \\ i & 0 & m,i & 3 & 2 \end{matrix} \begin{matrix} 2 \\ m \end{matrix} \begin{matrix} m,i \\ 1 \end{matrix} k_{Vb} \begin{matrix} i & 0 \\ i & 0 \end{matrix} \begin{matrix} m,i \\ 1 \end{matrix} C_m^* = 0 \quad (3.33)$$

Hay

$$\begin{matrix} i & 2 & i & 1 \\ i & 0 & i & 3 & i & 2 & i & 1 \\ m,i & 2 & m,i & 3 & 2 \end{matrix} \begin{matrix} 2 \\ m \end{matrix} \begin{matrix} m,i \\ 1 \end{matrix} \frac{k_{Mb}b}{D} \begin{matrix} i & 1 \\ i & 0 \end{matrix} \begin{matrix} m,i \\ 1 \end{matrix} C_m^* = \begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix} \quad (3.34)$$

e) Điều kiện biên tổng quát và phương trình cân bằng

Mỗi cạnh $y = 0$ và $y = b$ có hai điều kiện biên, do đó hai cạnh sinh ra bốn điều kiện biên. Giả sử các giá trị của điều kiện biên là hàm của $\sin m\pi\zeta$, tức có dạng $P \sin m\pi\zeta$, thì hệ phương trình cân bằng được viết như sau

$$K_m^* C_m^* P \quad \text{hay} \quad \begin{matrix} K_{m0} & P_1 \\ K_{m1} & P_2 \\ K_{m2} & P_3 \\ K_{m3} & P_4 \end{matrix} C_m^* \quad (3.35)$$

Trong đó K_m^* là ma trận độ cứng 4×4 , được tạo thành bởi bốn ma trận độ cứng phụ K_{m0} , K_{m1} , K_{m2} , và K_{m3} có kích thước 1×4 , mỗi ma trận này có thể là một trong bốn ma trận $K_{m,w}$, $K_{m,\theta}$, $K_{m,M}$, hoặc $K_{m,VT}$ của các biểu thức (3.4) đến (3.7). K_{m0} và K_{m1} tương ứng với cạnh $y = 0$ trong khi K_{m2} và K_{m3} tương ứng với cạnh $y = b$. Tương tự với P_1 , P_2 và P_3 , P_4 . P là biên độ của điều kiện biên (là giá trị của điều kiện biên sau khi loại bỏ thừa số $\sin m\pi\zeta$).

f) Đánh giá tính hội tụ

Giới hạn của ma trận thành phần $\Phi_{m,i}$ trong Công thức (3.3) khi i tiến tới vô cùng là

$$\lim_i \lim_{m,i} \lim_{i \rightarrow \infty} \frac{2^2}{i^4} \frac{N_0^*}{2i^2} \quad (3.36)$$

Loại bỏ các vô cùng nhỏ liên quan tới i (hai số hạng đầu tiên) thu được

$$\lim_i \lim_{m,i} \lim_{i \rightarrow \infty} \frac{2^2}{i^2} \frac{m}{i^2} \quad (3.37)$$

Khi i chẵn

$$\lim_i \lim_{m,i} \frac{2^2}{i^2} \frac{2^2}{i^2} \frac{2^2}{2^2} \cdots \frac{2^2}{2^2} \quad (3.38)$$

và khi i lẻ

$$\lim_i \lim_{m,i} \frac{2^2}{i^2} \frac{2^2}{i^2} \frac{2^2}{2^2} \cdots \frac{2^2}{1^2} \quad (3.39)$$

với ký hiệu “!!” là giai thừa kép

$$\begin{aligned} i!! &= 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots i \quad ; i \text{ lẻ} \\ i!! &= 2 \cdot 4 \cdot 6 \cdots i \quad ; i \text{ chẵn} \end{aligned} \quad (3.40)$$

$\Phi_{m,i,A}$ là ma trận hàng 1×4 và biến đổi theo chỉ số i (tức $\Phi_{m,i,A} \neq \Phi_{m,j,A}$ khi $i \neq j$). Tuy nhiên, các phần tử của ma trận $\Phi_{m,i,A}$ lại không phụ thuộc vào i , do đó các phần tử này là xác định và do đó ma trận là xác định. Lý do $\Phi_{m,i,A}$ được sử dụng thay cho $\Phi_{m,0}$ hoặc $\Phi_{m,1}$ là vì Công thức (3.37) đúng khi i tiến tới vô cùng nhưng sai khi i nhỏ.

Công thức (3.38) và (3.39) cho thấy ma trận thành phần $\Phi_{m,i}$ tiến tới ma trận không kích thước 1×4 khi i tiến tới vô cùng.

Để đánh giá tính hội tụ của khai triển chuỗi trong Công thức (3.8), (3.9), và (3.10), số hạng đầu tiên của $K_{m,VT}$ trong Công thức (3.10) được xem xét và ký hiệu là Ω . Đây là ma trận hàng 1×4 và là số hạng quan trọng nhất trong Công thức (3.8), (3.9), và (3.10) do liên quan đến bậc cao nhất của i .

$$\frac{D}{b^3} i^1 i^3 i^2 \quad m,i \quad (3.41)$$

Giá trị của Ω khi i tiến tới vô cùng

$$\lim_i \lim_i \frac{Di^3}{b^3} \quad m,i \quad (3.42)$$

hay

$$\begin{aligned} \lim_i \lim_i \frac{Di^3}{b^3} \frac{2^{\frac{2}{m}} i^{1/2}}{i!!^2} \quad m,i,A &= 0 \quad ; i \text{ chẵn} \\ \lim_i \lim_i \frac{Di^3}{b^3} \frac{2^{\frac{2}{m}} i^{1/2}}{i!!^2} \quad m,i,A &= 0 \quad ; i \text{ lẻ} \end{aligned} \quad (3.43)$$

Áp dụng cách tiếp cận tương tự cho các số hạng khác, có thể thấy rằng tất cả các số hạng trong các biểu thức (3.8), (3.9), và (3.10) đều tiến tới các ma trận không kích thước 1×4 khi i tiến tới vô cùng. Điều đó có nghĩa khi i tiến tới vô cùng, ma trận độ cứng K_m^* trong biểu thức (3.35) tiến tới một ma trận xác định. Do đó, có thể xây dựng điều kiện hội tụ bằng cách kiểm soát một giá trị sai số toàn cục. Sai số toàn cục sẽ bằng tổng sai số của tất cả các phần tử trong ma trận K_m^*

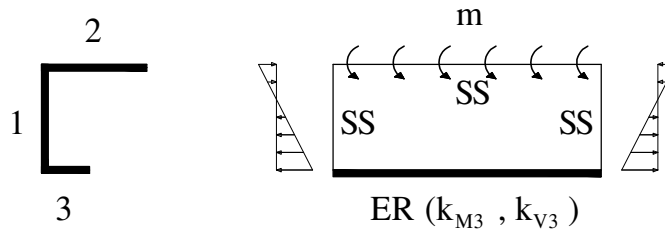
$$\frac{a_i - a_{i-1}}{a_{i-1}}^2 \quad (3.44)$$

trong đó a_i và a_{i-1} là các giá trị của một phần tử trong ma trận K_m^* tại bước triển khai thứ i và $i-1$.

3.1.2. Độ cứng chống xoay trên cạnh dọc của tấm chịu ứng suất nén tuyến tính

a) Độ cứng chống xoay của cạnh $y = 0$

Hình 3.4 thể hiện mô hình tính độ cứng chống xoay do “Tấm 1” cung cấp cho “Tấm 2”. Trong mô hình này, cạnh chung giữa “Tấm 1” và “Tấm 2” được coi là liên kết khớp. Cạnh dọc còn lại của “Tấm 2” có thể liên kết với “Tấm 3” và tiếp nhận độ cứng đàn hồi k_{M3} và k_{V3} do “Tấm 3” cung cấp hoặc có điều kiện biên cụ thể. Ứng suất hai đầu “Tấm 1” có thể phân bố tuyến tính. Lý thuyết về tấm sử dụng chuỗi lũy thừa như được đề cập ở trên sẽ được áp dụng cho bài toán này.



a) Mặt cắt ngang b) Mô hình tính toán

Hình 3.4 Sơ đồ tính độ cứng chống xoay

1 - Tấm đang xét 2 - Tấm tiếp theo 3 - Tấm liền trước

SS – Gối tựa đơn giản ER – Gối đàn hồi

Cho cạnh $y = 0$ (hoặc $\eta = 0$) chịu mô men

$$M_0 \sin m \quad \frac{D}{b^2} 1u \sin m \quad (3.45)$$

Với $1u$ đại diện cho một đơn vị chiều dài.

Các điều kiện biên là $w = 0$ và $M_y = M_0 \sin m$

Tại cạnh $y = 0$ (hoặc $\eta = 0$), từ các biểu thức (3.4), (3.6), và (3.9) ta có

$$\begin{aligned} K_{m0} &= K_{m,w} \quad m,0 \\ K_{m1} &= K_{m,M} \quad \frac{D}{b^2} 2 \quad m,2 \quad \frac{2}{m} \quad m,0 \end{aligned} \quad (3.46)$$

kết quả sinh ra hai phương trình

$$\begin{aligned} K_{m0} C_m^* &= 0 \\ K_{m1} C_m^* &= M_0 \end{aligned} \quad (3.47)$$

Từ phương trình đầu suy ra

$$C_{m,0} = 0 \quad C_{m,0} = 0 \quad (3.48)$$

Thay thế vào phương trình thứ hai thu được

$$\frac{D}{b^2} \left(2 C_{m,2} - \frac{b^2 M_0}{2D} \right) = 0.5 \quad 1u \quad (3.49)$$

Hệ phương trình cân bằng đầy đủ có thể viết như sau

$$\begin{aligned} K_m^* C_m^* &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{m,0} \\ C_{m,1} \\ C_{m,2} \\ C_{m,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} \quad 1u \end{aligned} \quad (3.50)$$

Phương trình đầu tiên trong (3.50) cho ra kết quả $C_{m,0} = 0$, và phương trình thứ hai cho ra kết quả $C_{m,2} = -0,5 \times 1u$. Các phương trình còn lại giải ra $C_{m,1}$ và $C_{m,3}$.

Tại cạnh $y = 0$ (hoặc $\eta = 0$), từ phương trình (3.5) và (3.9) ta có

$$0 = \frac{1}{b} \sin m \quad C_{m,1}^* = \frac{1}{b} \sin m \quad C_{m,1} \quad (3.51)$$

Từ Công thức (3.49) ta có

$$M_0 = \frac{2D}{b^2} C_{m,2} \quad (3.52)$$

Do đó, độ cứng chống xoay của tấm tại cạnh $y = 0$ khi cạnh này bị xoắn và cạnh đối diện $y = b$ quay tự do là

$$k_M = \frac{M_y}{0} = \frac{\frac{2D}{b^2} C_{m,2} \sin m}{\frac{1}{b} \sin m \quad C_{m,1}} = \frac{2C_{m,2}}{C_{m,1}} \frac{D}{b} = \frac{D}{b C_{m,1}} \quad 1u \quad (3.53)$$

b) Độ cứng âm

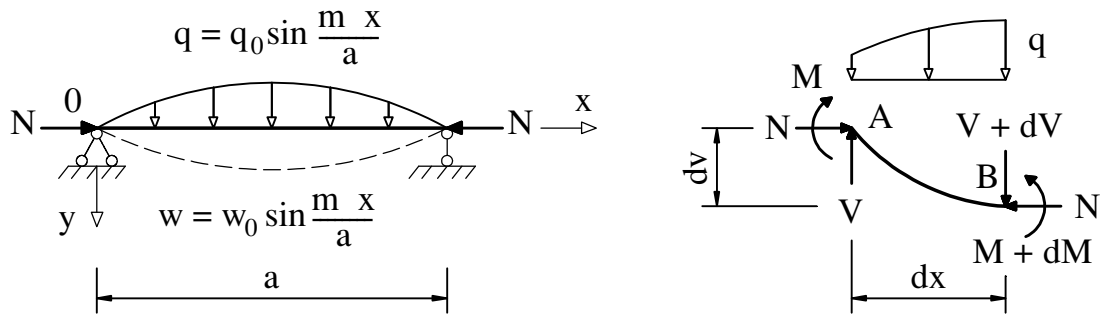
Công thức (3.53) có thể tính ra độ cứng âm. Bleich [44] giới hạn hệ số chống xoay ζ chỉ có giá trị dương. Khi tấm tăng cứng bị mất ổn định, hệ số chống xoay nhận

giá trị 0. Tuy nhiên, nghiên cứu này cho phép sử dụng độ cứng âm. Chi tiết về độ cứng âm được thảo luận trong Mục 3.1.6.

3.1.3. Độ cứng lò xo

a) Độ cứng của dầm chịu tải trọng dọc trục

Bộ phận tăng cứng trên cạnh dọc của tấm mắt ổn định có thể được coi là dầm đàn hồi có sơ đồ đơn giản và chịu tải trọng hình sin q như thể hiện trong Hình 3.5. Độ cứng lò xo mà bộ phận tăng cứng cung cấp cho tấm mắt ổn định được xác định bằng cách chia tải trọng q cho độ võng w .



Hình 3.5 Sơ đồ tính dầm chịu tải trọng dọc trục

Quy ước về dấu như sau: đối với lực dọc N , lực nén là dương; đối với mô men M , ngược chiều kim đồng hồ là dương.

Các phương trình cân bằng cơ bản

$$X \quad 0 \quad N \quad N \quad 0 \quad (3.54)$$

$$Y \quad 0 \quad V \quad dV \quad V \quad qdx \quad 0 \quad dV \quad qdx \quad (3.55)$$

$$M_B \quad 0 \quad \frac{qdx^2}{2} \quad Vdx \quad Ndw \quad M \quad M \quad dM \quad 0 \quad (3.56)$$

Loại bỏ vô cùng nhỏ bậc cao dx^2 thu được

$$dM \quad Vdx \quad Ndw \quad (3.57)$$

Tích phân phương trình (3.55) cho kết quả

$$V \quad \frac{a}{m} q_0 \cos \frac{m}{a} x \quad V_0 \quad (3.58)$$

Tại $x = a / 2m$, ta có $V = 0$ hay $V_0 = 0$. Cuối cùng thu được

$$V = \frac{a}{m} q_0 \cos \frac{m}{a} x \quad (3.59)$$

Chia phương trình (3.56) cho dx ta có

$$\frac{dM}{dx} = V = N \frac{dw}{dx} \quad (3.60)$$

Nghiệm của phương trình (3.60) là

$$w = w_0 \sin \frac{m}{a} x \quad (3.61)$$

thỏa mãn các điều kiện biên.

Thay (3.61) vào (3.60) ta được

$$\frac{m^3}{a^3} EI w_0 \cos \frac{m}{a} x = \frac{a}{m} q_0 \cos \frac{m}{a} x = N \frac{m}{a} w_0 \cos \frac{m}{a} x \quad (3.62)$$

hay

$$q_0 = \frac{m^2}{a^2} w_0 \left(\frac{m^2}{a^2} EI - N \right) = \frac{m^2}{a^2} w_0 (N_{cr,m} - N) \quad (3.63)$$

Độ cứng lò xo tương đương

$$k_V = \frac{q}{w} = \frac{q_0 \sin \frac{m}{a} x}{w_0 \sin \frac{m}{a} x} = \frac{m^2}{a^2} (N_{cr,m} - N) \quad (3.64)$$

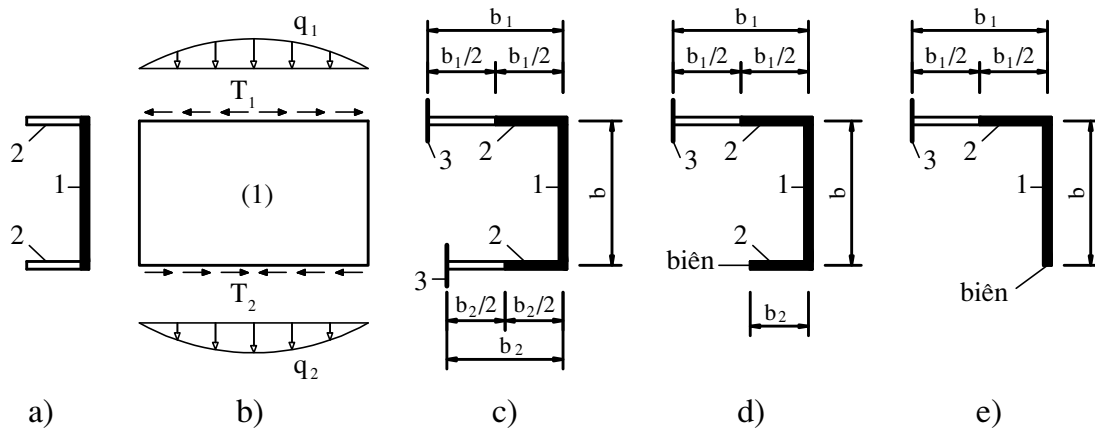
Độ cứng này được hình thành dựa trên độ cứng kháng uốn của dầm, có xét đến lực dọc trục $N = \sigma_x A$, trong đó lực nén là dương. Trong phương trình này, $N_{cr,m}$ là tải trọng tới hạn của dầm tương ứng với dạng mất ổn định có số lượng nửa bước sóng là m

$$N_{cr,m} = \frac{m^2}{a^2} EI \quad (3.65)$$

b) *Tiết diện để xác định độ cứng lò xo*

Hình 3.6a thể hiện mối quan hệ giữa một tấm tăng cứng với các tấm xung quanh. Tấm tăng cứng này được tách riêng ở Hình 3.6b. Các tấm liền kề được thay thế bằng tải trọng thẳng đứng trong mặt phẳng q_1 và q_2 và tải trọng theo phương dọc T_1 và T_2 . Ngoài các tải trọng trên còn có các lực và mô men ngoài mặt phẳng nhưng không được thể hiện trong hình. T_1 và T_2 có thể ảnh hưởng đến độ võng của tấm và

làm giảm độ cứng lò xo. Do đó, tiết diện để xác định độ cứng lò xo, được gọi là tiết diện tăng cứng, không chỉ là tiết diện của riêng tấm tăng cứng. Thay vào đó, tiết diện này phải bao gồm tấm tăng cứng và một phần các tấm liền kề. Trong nghiên cứu này, phương pháp RSM được giới hạn cho các tiết diện cấu tạo bởi các tấm vuông góc với nhau, do đó, để đơn giản hóa, một nửa bề rộng của mỗi tấm liền kề sẽ được kết hợp vào tiết diện tăng cứng dưới dạng các bản cánh, như thể hiện bằng vùng tô đặc trong Hình 3.6c. Đối với tấm liền kề là tấm ngoài cùng của cụm tấm liền tiếp, toàn bộ bề rộng của nó sẽ được huy động (Hình 3.6b). Tấm tăng cứng nằm ngoài cùng của cụm tấm liền tiếp sẽ chỉ có một bản cánh (Hình 3.6e). Lực dọc trục N của tiết diện tăng cứng là tổng của các lực dọc trục N_i của mỗi tiết diện thành phần. N_i phụ thuộc vào ứng suất ban đầu phân bố trong mặt cắt ngang của mỗi tấm thành phần.



Hình 3.6 Tiết diện để xác định độ cứng lò xo

a) Tương quan giữa tấm tăng cứng và các tấm xung quanh

b) Tải trọng trên biên tấm tăng cứng

c, d, e) Tiết diện để xác định độ cứng lò xo

1 - Tấm tăng cứng đang xét

2 - Các tấm liền kề với tấm tăng cứng

3 - Các tấm kề tiếp với tiết diện tăng cứng

c) *Độ cứng âm*

Độ cứng lò xo cũng có thể có giá trị âm và được chấp nhận trong nghiên cứu này. Tuy nhiên, điều này hiếm khi xảy ra trong thực tế.

3.1.4. Xác định ứng suất tới hạn của tấm mất ổn định

Đối với bài toán mất ổn định, ứng suất tới hạn có thể thu được bằng cách đặt định thức của K_m^* của phương trình (3.50) bằng 0. Điều này liên quan đến số bậc lũy thừa của tải trọng nén. Ví dụ, $C_{m,4}$ liên quan đến lũy thừa bậc nhất của N_0^*

$$C_{m,4} = \frac{m^2}{24} 4C_{m,2} - \frac{m^2}{m} N_0^* C_{m,0}$$

Trong khi đó, $C_{m,8}$ ($p = 4$) lại liên quan đến lũy thừa bậc hai của N_0^* . Có thể thấy điều này từ số hạng thứ hai của $C_{m,8}$

$$C_{m,8} = \frac{60C_{m,7} - \frac{m^2}{m} N_0^* C_{m,4} - \frac{m^2}{m} N_0^* C_{m,3}}{1680} \\ = \frac{60C_{m,7}}{1680} - \frac{N_0^* C_{m,3}}{1680} \frac{m^2}{m} C_{m,4} \\ = \frac{60C_{m,7}}{1680} - \frac{N_0^* C_{m,3}}{1680} \frac{m^2}{m} \frac{m^2}{24} 4C_{m,2} - \frac{m^2}{m} N_0^* C_{m,0} \\ = \frac{60C_{m,7}}{1680} - \frac{N_0^* C_{m,3}}{40320} 4 \frac{m^2}{m} N_0^* C_{m,2} - \frac{m^2}{m} N_0^{*2} C_{m,0}$$

Đây là bài toán tìm trị riêng đa thức. Hình 3.7 trình bày sơ đồ khối giải bài toán này bằng phương pháp thử dần.

Trong sơ đồ chính, tức là Sơ đồ 1, đầu tiên chọn một tấm trong tiết diện làm tấm mất ổn định, từ đó xác định được bộ phận tăng cứng trên hai biên dọc. Tiếp theo, tiết diện tăng cứng tương ứng với mỗi tấm thành phần trong bộ phận tăng cứng được xác định theo Mục 3.1.3(b). Chọn giá trị ban đầu cho chiều dài cầu kiện a và sau đó tiến hành tăng dần. Hệ số mất ổn định sẽ được tính toán cho từng giá trị của chiều dài cầu kiện.

Đối với mỗi chiều dài cầu kiện, ứng suất ban đầu σ được chọn theo ứng suất lớn nhất trong tiết diện. Giá trị này được gọi là ứng suất cơ sở và sẽ được tăng dần theo từng lần tính toán. Giá trị và phân bố ứng suất trên mỗi tấm thành phần của tiết diện được xác định theo ứng suất cơ sở.

Tiếp đến, sơ đồ 2 trong Hình 3.7 sẽ được sử dụng. Thao tác sẽ bắt đầu với tấm thành phần ngoài cùng và lặp lại qua từng tấm thành phần trong bộ phận tăng cứng. Độ cứng chống xoay k_M và độ cứng lò xo k_V được tính toán theo Mục 3.1.1 và 3.1.3.

Các giá trị này sẽ được sử dụng làm độ cứng đàn hồi trên biên dọc của các tấm thành phần tiếp theo trong bộ phận tăng cứng cho đến khi tiếp cận tới tấm mất ổn định. Sau đó, độ cứng đàn hồi cuối cùng cho tấm mất ổn định được xác định và thông tin về sơ đồ tính của tấm mất ổn định sẽ được hoàn tất.

Sử dụng Công thức (3.35) để tính toán ma trận độ cứng K_m^* của tấm mất ổn định. Kiểm tra định thức của K_m^* . Nếu dấu của định thức thay đổi, ứng suất khiến định thức bằng không, tức là tấm mất ổn định rơi vào trạng thái mất ổn định, sẽ nằm giữa giá trị ứng suất ở bước trước và ứng suất hiện tại. Khi số gia ứng suất nhỏ, ứng suất mất ổn định có thể lấy bằng giá trị ứng suất hiện tại.

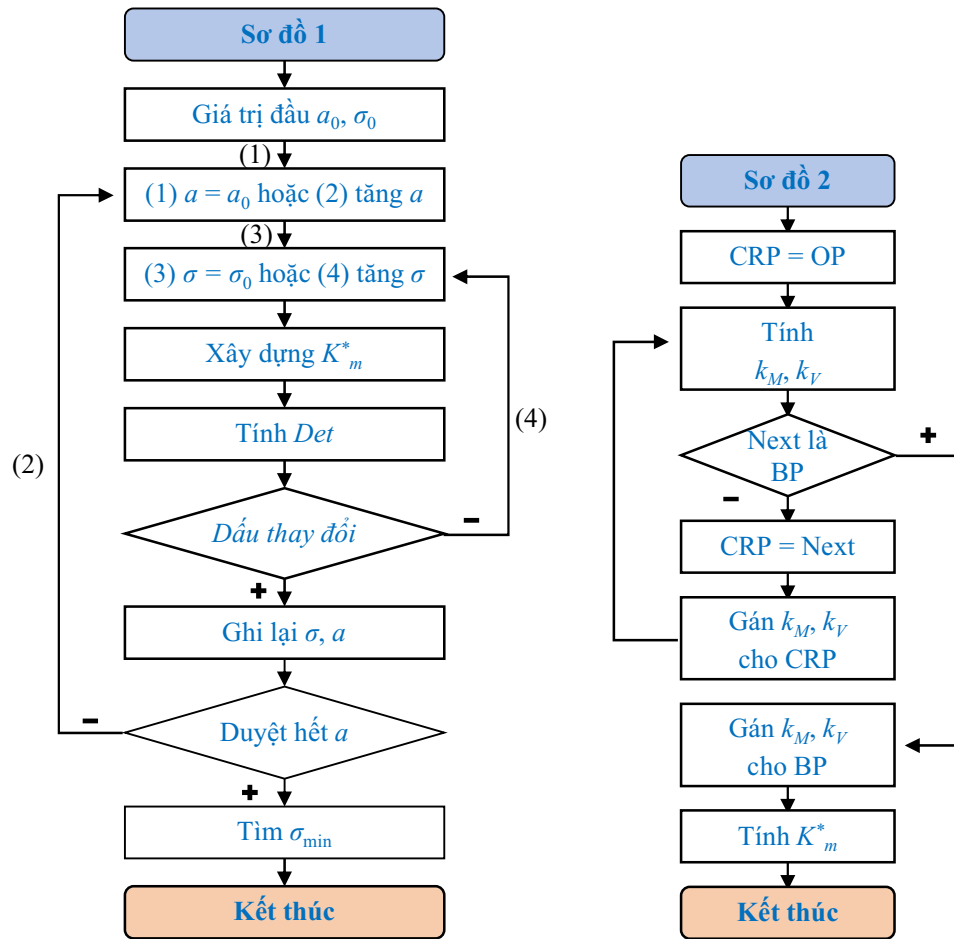
Nếu dấu của định thức không thay đổi, tiếp tục tăng ứng suất cơ sở σ và lặp lại quy trình này cho đến khi tìm thấy ứng suất mất ổn định.

Chú ý rằng ứng suất mất ổn định vừa xác định sẽ tương ứng với một chiều dài cầu kiện nhất định. Vì thế, ứng suất mất ổn định nhỏ nhất $\sigma_{\min}$ trong các ứng suất mất ổn định ở trên sẽ là ứng suất tới hạn cần tìm.

Thực tế lập trình có sự điều chỉnh nhất định. Một kích thước sẽ được chọn là kích thước chuẩn, ký hiệu là b . Kích thước chuẩn thường được chọn bằng bề rộng của một tấm thành phần nào đó. Tỷ lệ giữa chiều dài cầu kiện và kích thước chuẩn a/b được sử dụng thay thế cho chiều dài cầu kiện a . Hệ số mất ổn định k được sử dụng thay cho ứng suất cơ sở σ . Ứng suất cơ sở có thể được tính bằng công thức Timoshenko cho các tấm hình chữ nhật, trong đó bề rộng tấm lấy bằng kích thước chuẩn b .

$$k = \frac{E}{12} \frac{t^3}{b^3} \quad (3.66)$$

Đối với công tác chọn tấm mất ổn định, tất cả các tấm thành phần có ứng suất nén trong tiết diện đều sẽ được chọn làm tấm mất ổn định. Các tấm này sẽ được tính toán và kết quả sẽ được so sánh với nhau. Xem Mục 3.2.2 để hiểu rõ hơn về cách ứng dụng phương pháp RSM, trong đó dự mô tả chi tiết cho tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng.



Hình 3.7 Các sơ đồ khối tính toán hệ số mất ổn định

CRP - Tấm tăng cứng đang xét BP - Tấm mất ổn định

OP - Tấm ngoài cùng

Next - Tấm tiếp theo

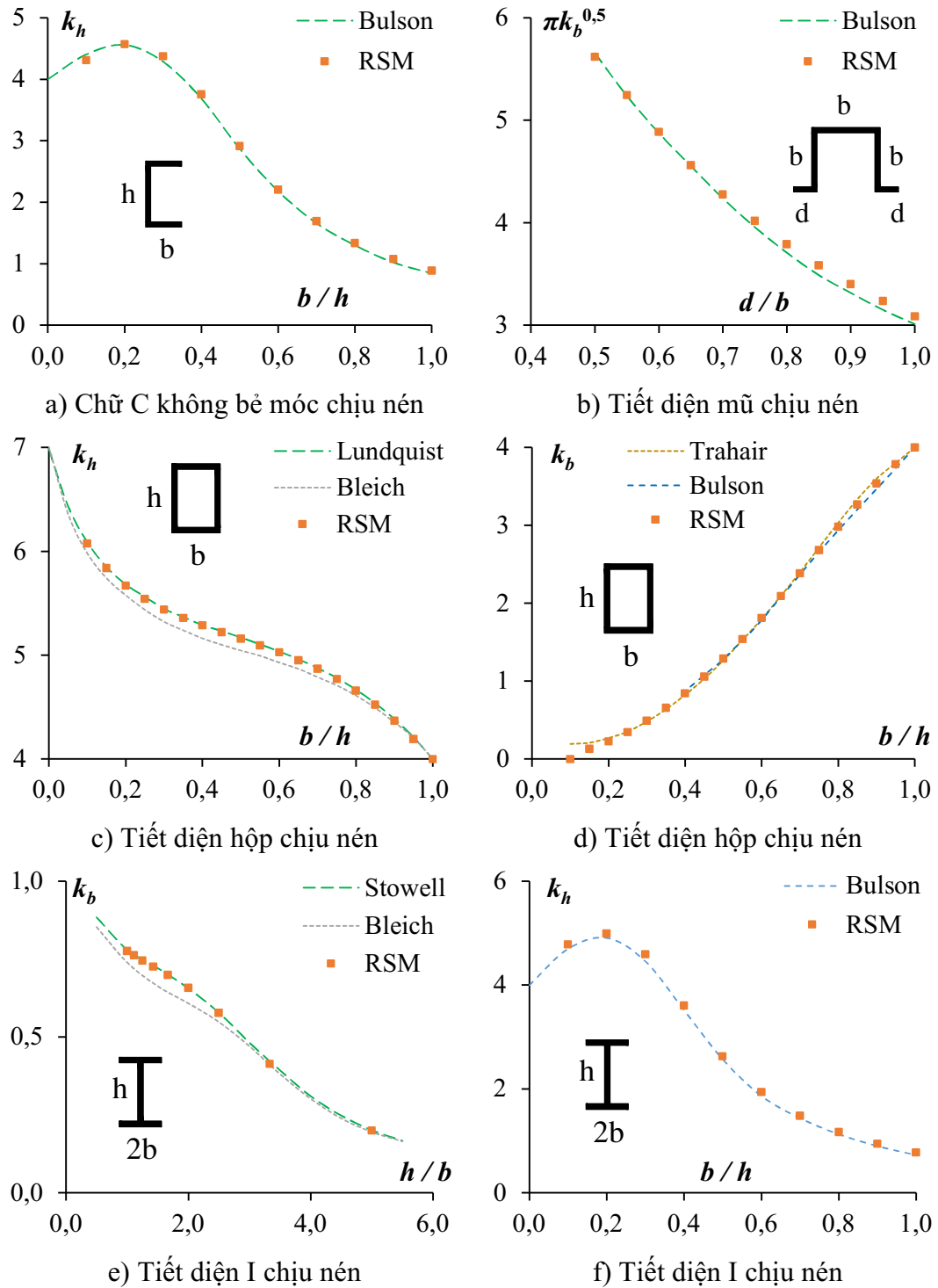
Sơ đồ 1: Sơ đồ tính chính

Sơ đồ 2: Sơ đồ tính K_m

3.1.5. Kiểm chứng phương pháp

Nhiều biểu đồ hệ số mất ổn định cho tiết diện chịu nén hoặc uốn thuần túy đã được công bố. RSM tính toán lại và so sánh với các giá trị hiện có. Hệ số mất ổn định và ứng suất tới hạn liên quan đến một tấm thành phần cụ thể. Do đó, trong các biểu đồ sau, k_h được chỉ định cho tấm thành phần có bề rộng h và ứng suất tới hạn của tấm này có thể được tính bằng Công thức (3.67)

$$cr \quad k_h \frac{^2 E}{12 \quad 1 \quad ^2} \frac{t}{h}^2 \quad (3.67)$$



Hình 3.8 Kiểm chứng phương pháp RSM cho cấu kiện chịu nén

trong khi k_b tương ứng với tấm thành phần có bề rộng b và ứng suất tới hạn của tấm có thể được tính bằng Công thức (3.68)

$$k_{cr} = \frac{E}{12} \frac{t^2}{b^2} \quad (3.68)$$

Nội dung so sánh sẽ chỉ được thực hiện cho các tiết diện có chiều dày không đổi.

a) *Cấu kiện chịu nén*

Lundquist [108], Stowell và Lundquist [154], Bleich [44], Bulson [45], và Trahair [160] đã giới thiệu các biểu đồ cho các tiết diện chữ C, mũ, hộp và chữ I chịu nén. Kết quả so sánh giữa RSM và các nghiên cứu này được thể hiện trong Hình 3.8. Các ký hiệu trên trục hoành và trục tung được lấy theo biểu đồ gốc để tiện đối chiếu. Kết quả so sánh của RSM cho thấy phương pháp này cho kết quả tương tự với các phương pháp khác trong tất cả các biểu đồ có sẵn. Trong Hình 3.8c và Hình 3.8e, kết quả của RSM phù hợp với đường cong của Lundquist và Stowell. Đây là các đường cong cơ sở và được Bleich gọi là "giá trị chính xác". Sự phù hợp này chứng minh độ tin cậy của RSM đối với các cấu kiện chịu nén.

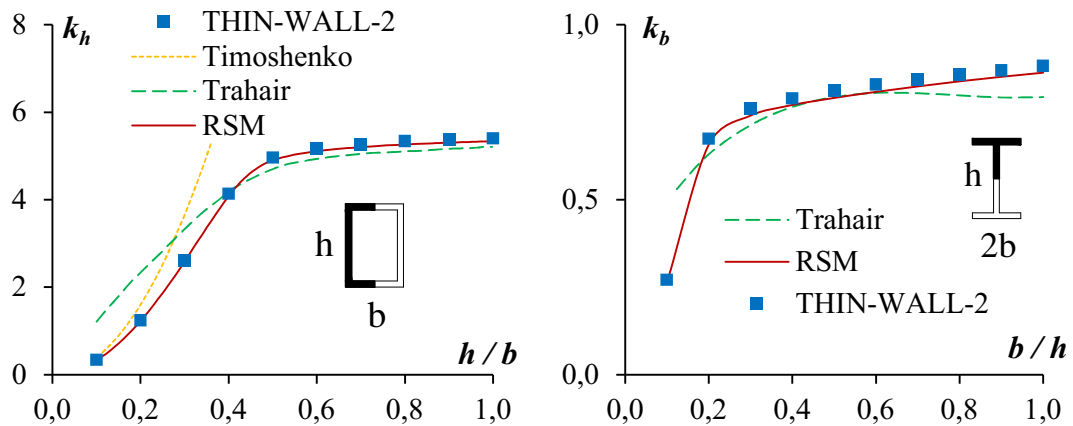
Sai số giữa hệ số mất ổn định xác định từ phương pháp RSM và kết quả của các nghiên cứu hiện có được liệt kê trong Bảng 3.1. Trong bảng, $\varepsilon_{\min}$ và $\varepsilon_{\max}$ là các giá trị chênh lệch (sai số) âm và dương lớn nhất giữa giá trị k của RSM với các giá trị tương ứng trên các đồ thị của Hình 3.8 và Hình 3.9. Ngoại trừ trường hợp tiết diện chữ C không bẻ móc chịu nén (Hình 3.8a) có sự khác biệt là 5,69%, sai số của các trường hợp khác đều khá nhỏ và ở mức 2%.

Bảng 3.1 Sai số của phương pháp RSM

Dạng tải trọng	Loại tiết diện	$\varepsilon_{\min}$ (%)	$\varepsilon_{\max}$ (%)
Chịu nén	Tiết diện C không bẻ móc (Hình 3.8a)	-2,14	5,69
	Tiết diện mũ (Hình 3.8b)	-0,62	2,77
	Tiết diện hộp, so sánh với Lundquist (Hình 3.8c)	-0,4	-
	Tiết diện chữ I, so sánh với Stowell (Hình 3.8e)	-1,86	0,34
Chịu uốn	Tiết diện hộp, so sánh với THIN-WALL-2 (Hình 3.9a)	-1,41	-
	Tiết diện chữ I, so sánh với THIN-WALL-2 (Hình 3.9b)	-2,57	-

b) *Cấu kiện chịu uốn*

Số lượng kết quả giải tích về mất ổn định của toàn bộ tiết diện cho cấu kiện chịu uốn khá ít. Chỉ có Trahair [160] giới thiệu hai biểu đồ về hệ số mất ổn định của tiết diện hộp và tiết diện chữ I (Hình 3.9) nhưng không chỉ rõ nguồn gốc các biểu đồ này. Trong hình Hình 3.9, vùng tô đen trên tiết diện biểu thị vùng nén, trong khi vùng để trắng là vùng chịu ứng suất kéo.



a) Tiết diện hộp chịu uốn quanh trục y

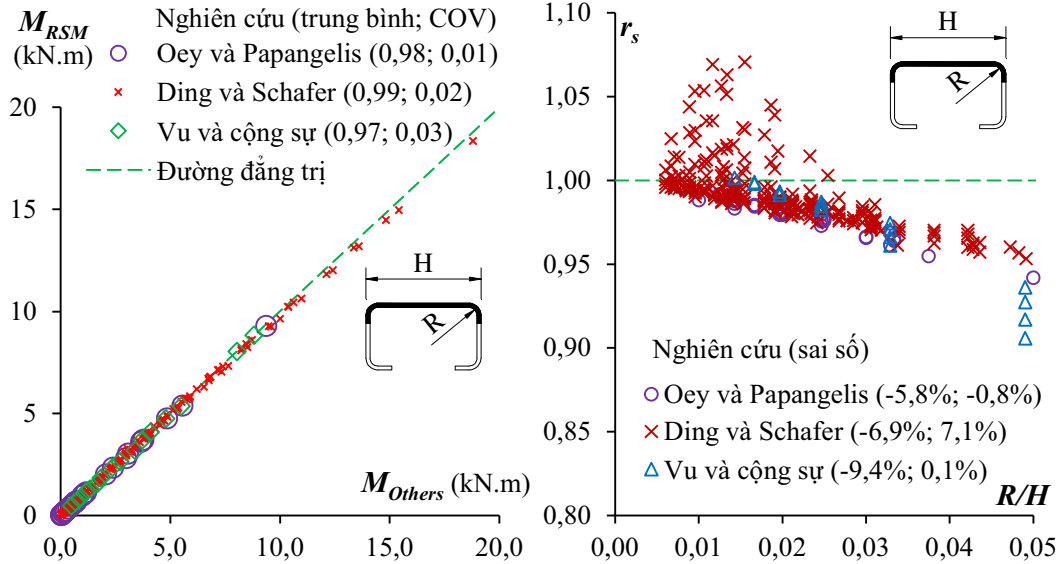
b) Tiết diện I chịu uốn quanh trục x

Hình 3.9 Kiểm chứng phương pháp RSM cho cấu kiện chịu uốn

RSM không hoàn toàn phù hợp với các đường cong của Trahair, ngoại trừ đoạn đường cong có tỷ lệ h/b cao trong Hình 3.9a. Tuy nhiên, RSM phù hợp với kết quả của THIN-WALL-2. Đây là dữ liệu bổ sung được tạo ra trong nghiên cứu này với mục đích kiểm tra chéo. Hình 3.9a cũng biểu diễn đường cong tên “Timoshenko”. Đường cong này được tạo ra bằng cách coi tấm “ h ” là tấm độc lập chịu nén đều được ngàm trên hai cạnh dọc, tức các điều kiện biên cứng nhất. Nhờ đó, hệ số mất ổn định có thể được nội suy bằng cách sử dụng các bảng tra sẵn của Timoshenko [159]. Có thể thấy rằng kết quả của RSM và THIN-WALL-2 hợp lý hơn vì chúng nằm bên dưới đường cong “Timoshenko”. Sai số của kết quả RSM đối với cấu kiện chịu uốn (xem Bảng 3.1) cũng khá nhỏ và khoảng 2%.

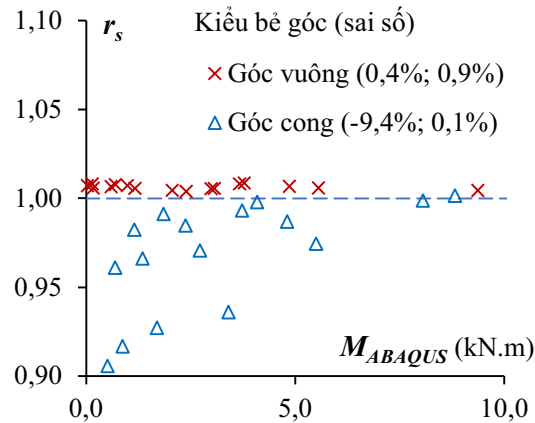
Đối với cấu kiện thành mỏng tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng, một số thí nghiệm đã được tiến hành để xác định độ bền uốn của cấu kiện [52][66][69][76][88][132][179][180]. Tuy nhiên, tác giả không tìm thấy dữ liệu thí nghiệm về mô men/ứng suất mất ổn định, thay vào đó chỉ có kết quả mô phỏng số. Ahdab và cộng sự [26], Ding và Schafer [63] trình bày kết quả mô phỏng số từ phần

mềm CUFSM bằng đồ thị, mật độ rất dày nên không thể trích xuất dữ liệu. Mặc dầu vậy, dữ liệu từ phần mềm CUFSM trên các tiết diện chữ C của SFIA [147] dưới tác dụng của nhiều trường hợp tải trọng khác nhau, trong đó bao gồm trường hợp chịu uốn quanh trục không đối xứng, đã được tìm thấy trong nghiên cứu của Schafer [136].



a) Độ tương đồng của RSM với các phương pháp khác

b) Sai số so với phương pháp khác



c) Góc vuông và góc cong

Hình 3.10 Kiểm chứng RSM với các phương pháp khác

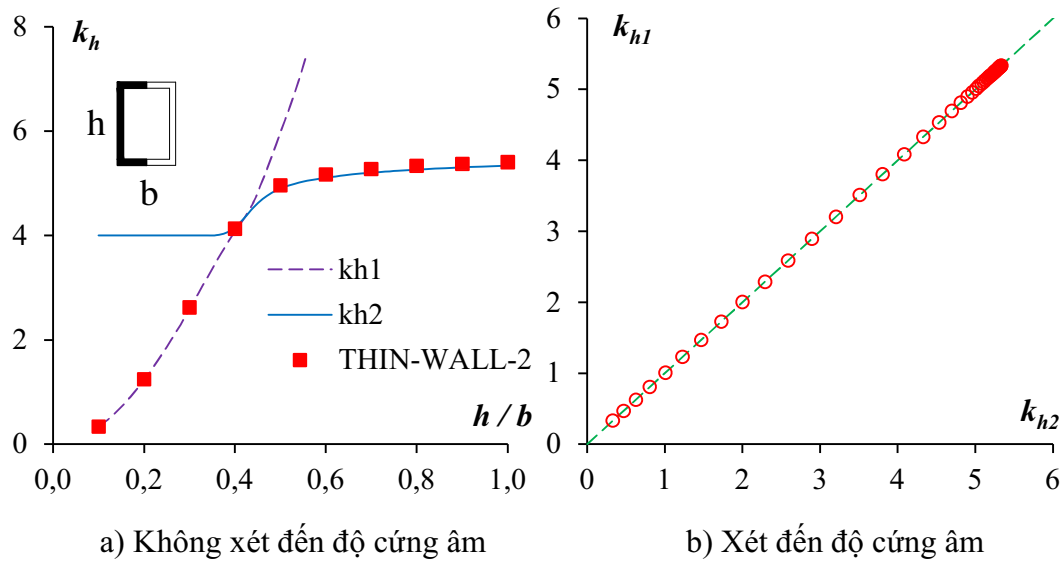
Ngoài ra, Oey và Papangelis [121], trong quá trình xây dựng công thức độ bền uốn mới theo DSM đã cung cấp bảng dữ liệu đầy đủ bao gồm cả giá trị mô men tới hạn. Do đó, RSM đã được kiểm chứng với các kết quả mô phỏng số do Oey và

Papangelis (dùng THIN-WALL-2), Schafer (sử dụng CUFSM) và Vu và cộng sự (sử dụng ABAQUS) [165] đối với tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng, như thể hiện trong Hình 3.10. Chi tiết cách ứng dụng phương pháp RSM cho tiết diện này được mô tả trong Mục 3.2.2.

Tất cả các điểm trong Hình 3.10a đều nằm sát với đường đẳng trị, đồng nghĩa rằng kết quả của RSM phù hợp với các phương pháp số khác. Sai số lớn nhất tương ứng với số liệu của Vu và cộng sự. Tập số liệu này có độ tương đồng trung bình là 0,97 và COV là 0,03. Sai số lớn nhất đạt 9,4% (xem Hình 3.10b) là do nghiên cứu hiện có sử dụng tiết diện dập nguội có góc cong sinh ra khi chế tạo, trong khi RSM sử dụng góc vuông lý tưởng. Có thể thấy trong Hình 3.10b rằng sai số tăng khi tỷ số giữa bán kính uốn và chiều cao tiết diện R/H tăng. Sau khi loại bỏ góc uốn, kết quả của RSM trở lại phù hợp với kết quả ABAQUS của Vu (xem Hình 3.10c).

3.1.6. Độ cứng âm

Bleich [44] đã thảo luận về hiện tượng mất ổn định cục bộ của tiết diện hộp chịu nén. Tác giả coi một cặp thành là các tấm mất ổn định và cặp còn lại là các tấm tăng cứng. Trường hợp mất ổn định đồng thời đã được đề cập. Ở trạng thái này, tấm tăng cứng không thể cung cấp độ cứng cho tấm mất ổn định (hệ số chống xoay ζ bằng 0) và cả hai loại đều làm việc như tấm tựa khớp trên cạnh không tải. Sau đó, tác giả áp dụng khái niệm này cho các hệ số chiết giảm (r) để xem xét tác động của ứng suất nén lên hệ số chống xoay ζ . Hệ số r có giá trị dương, khiến ζ luôn dương và giá trị nhỏ nhất bằng 0. Khái niệm này đã được áp dụng cho tiết diện hộp chịu uốn như thể hiện trong Hình 3.11a. Hệ số mất ổn định k_h khi chọn hai tấm mất ổn định khác nhau, một là tấm cạnh h và một là tấm cạnh b , đã được tính toán, kết quả tương ứng là k_{h1} và k_{h2} (lưu ý rằng cả hai trường hợp đều gọi là k_h vì kích thước chuẩn lấy chung cho cả hai trường hợp đều là h). Trong cả hai trường hợp, nếu tấm tăng cứng bị mất ổn định trước (và do đó k_M bị âm) thì độ cứng chống xoay k_M sẽ được gán giá trị 0 và tấm mất ổn định sẽ bị xem là tấm tựa khớp, từ đó sinh ra đoạn nằm ngang ở phần đầu của đường cong k_{h2} , tương ứng với $k_h = 4$. Hệ số mất ổn định của toàn bộ tiết diện là giá trị nhỏ nhất giữa hai đường cong này và phù hợp với kết quả thu được từ phần mềm THIN-WALL-2.



Hình 3.11 Ảnh hưởng của độ cứng âm

Nghiên cứu này đề xuất sử dụng độ cứng âm. Khi tấm tăng cứng bị mất ổn định trước, tấm mất ổn định sẽ sinh ra những cản trở để ngăn tấm tăng cứng bị mất ổn định. Ngược lại, tấm tăng cứng làm suy yếu tấm mất ổn định bằng cách cung cấp độ cứng âm thông qua cạnh chung giữa chúng. Do đó, ứng suất tới hạn của tấm tăng cứng sẽ tăng lên trong khi ứng suất tới hạn của tấm mất ổn định lại giảm xuống cho đến khi hai giá trị bằng nhau. Hiện tượng này có thể được quan sát thấy trong Hình 3.11b. Hình này mô tả sự tương quan giữa k_{h1} và k_{h2} trong Hình 3.11a nhưng sử dụng độ cứng âm. Rõ ràng, khi độ cứng âm được sử dụng, các giá trị k_{h1} và k_{h2} trở nên tương đương nhau, nghĩa là các đường cong k_{h1} và k_{h2} trong Hình 3.11a sẽ trùng nhau (và gần như trùng với kết quả THIN-WALL-2).

Hệ số mất ổn định trong Hình 3.8 đến Hình 3.10 đã được tính toán với các tấm mất ổn định khác nhau của tiết diện. Kết quả cho thấy đối với các tấm mất ổn định khác nhau, hệ số mất ổn định được xác định là gần như bằng nhau. Lý do gây ra sự khác biệt là tính gần đúng của phương pháp xác định độ cứng lò xo k_V .

3.2. Sử dụng phương pháp RSM để xây dựng công thức xác định hệ số mất ổn định của cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén

Phần này đề xuất các công thức để xác định hệ số mất ổn định của các cấu kiện thành mỏng tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng

chịu nén. Các công thức này được xây dựng từ quá trình phân tích tham số và hồi quy trên dữ liệu thu được từ phương pháp RSM.

Các giả thiết sau được sử dụng:

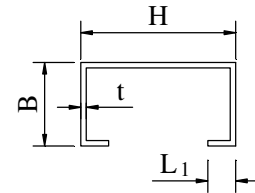
Tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén

Vật liệu làm việc trong giai đoạn đàn hồi

Cấu kiện bị mất ổn định cục bộ tại bản bụng chịu nén

3.2.1. Phạm vi biến thiên của tham số nghiên cứu

Sự biến thiên của ứng suất tới hạn phụ thuộc vào tỷ lệ của mặt cắt ngang, không phải vào một kích thước cụ thể. Trong nghiên cứu này, chiều cao tiết diện được giữ không đổi và lấy bằng 200 mm.



Đây là kích thước tiết diện được sử dụng phổ biến trong thực tế và được C.H. Phạm sử dụng trong tài liệu [123]. Các kích thước khác được thay đổi để tạo ra một bộ số liệu tham số đầu vào như thể hiện trong Bảng 3.2.

Bảng 3.2 Phạm vi thay đổi của các tham số mô phỏng

Tham số	Giá trị									
B (mm)	15	20	25	30	35	40	45	50	60	80
	100	120	160	200	240	300	350	400	450	500
L_1 (mm)	0	10	20	30	40	60	80	90		
t (mm)	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,5	1,9	2,4	3,0	3,2
$\mu_B = B/H$	0,075	0,1	0,125	0,15	0,175	0,2	0,225	0,25	0,3	0,4
	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5	1,75	2,0	2,25	2,5
$\mu_L = L_1/H$	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,45		
$\mu_t = t/H$ (%)	0,35	0,4	0,45	0,5	0,6	0,75	0,95	1,2	1,5	1,6

Phạm vi của các tham số và tỷ lệ so với chiều cao tiết diện (H) được liệt kê trong Bảng 3.2. Bề rộng bản cánh (B) biến đổi trong phạm vi từ 15 đến 500 mm, đủ để bao quát tiết diện thương mại của các nhà sản xuất. Cận trên của tỷ lệ giữa bề rộng bản cánh và chiều cao tiết diện (μ_B) là 2,5 (tương ứng với bề rộng bản cánh là 500 mm) được lấy từ tỷ lệ lớn nhất của tiết diện mũ [64][73][161], do loại tiết diện này ứng xử giống như tiết diện chữ C khi chịu uốn quanh trục không đối xứng. Phần đầu

của μ_B tăng chậm (số gia bằng 5 mm) giúp khảo sát kỹ hơn sự biến thiên của hệ số mất ổn định trong vùng này. Chiều dài bẻ móc (L_1) dao động từ 0 đến 90 mm, với giá trị 0 tương ứng với tiết diện chữ C không bẻ móc. Chiều dày tiết diện (t) được lấy từ 1 mm đến 3,2 mm dựa vào hướng dẫn của Lysaght áp dụng cho tiết diện chữ C, Z, Supa C và Supa Z [113][114]. Ngoài ra, ba loại chiều dày, 0,7, 0,8 và 0,9 mm, được bổ sung thêm để mở rộng phạm vi nghiên cứu. Các độ dày này là giá trị thông dụng của thép tấm cán nguội. Bán kính uốn R được lấy chung là 5 mm cho tất cả các tiết diện nghiên cứu. Trên cơ sở đó, 1576 mô hình đã được xem xét. Trong đó, một vài bộ tham số không đảm bảo để xây dựng mô hình tính do kích thước góc uốn vượt quá bề rộng bản cánh sẽ bị loại trừ. Ví dụ, khi $t = 3$ mm và $B = 15$ mm, tổng kích thước của các góc uốn là 16 mm và lớn hơn bề rộng bản cánh, do đó, mô hình tương ứng được bỏ qua.

3.2.2. Mô hình và phương pháp tính

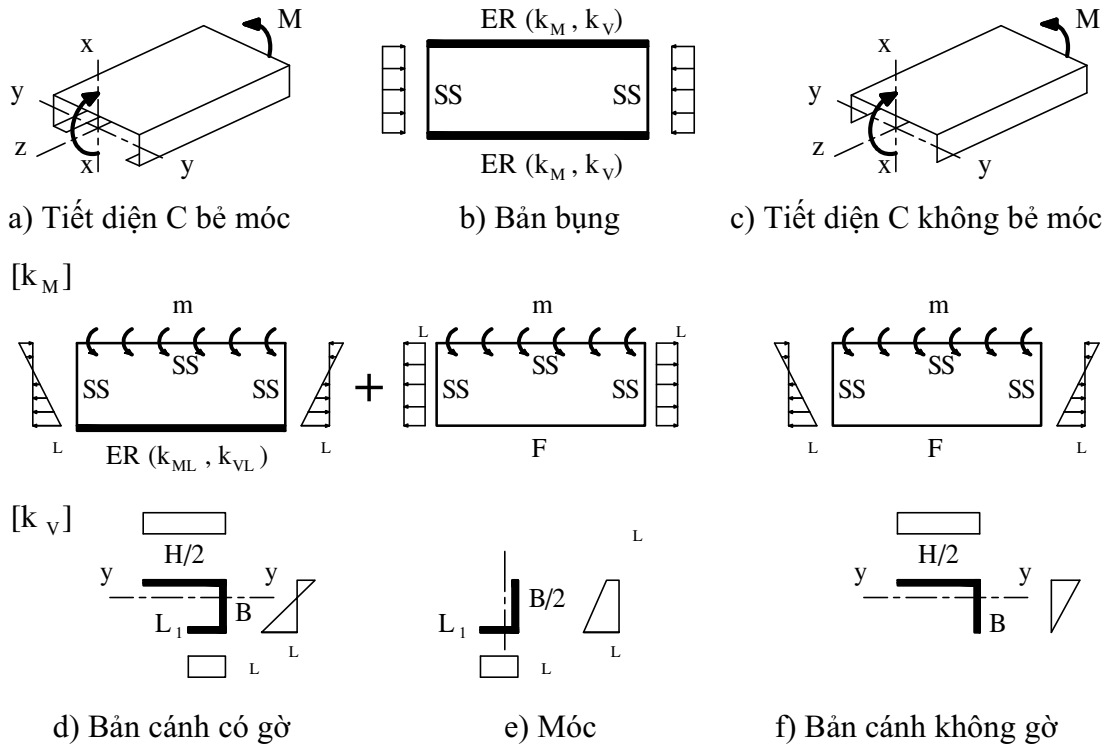
Mô hình tính của cấu kiện chịu uốn tiết diện chữ C là dầm đơn giản, được gia tải mô men tập trung ở hai đầu, như thể hiện trên Hình 3.12a và Hình 3.12c.

Mất ổn định tổng thể xảy ra ở chiều dài nửa bước sóng lớn (lớn hơn hoặc bằng 7 m [166]). Trong thực tế, hiện tượng này hiếm khi được quan sát thấy vì cấu kiện được liên kết vào tấm sàn hoặc tấm mái, giúp ngăn cản chuyển dịch ngang. Do đó, chỉ có hiện tượng mất ổn định ở cấp độ tiết diện, bao gồm mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo, mới được xem xét. Và RSM là phương pháp phù hợp để giải bài toán mất ổn định dạng này.

DSM chỉ yêu cầu ứng suất/mô men tới hạn đàn hồi. Do đó, hai thông số vật liệu bao gồm mô đun đàn hồi $E = 200000$ MPa và hệ số Poát $\nu = 0,3$ sẽ được sử dụng trong mô hình tính.

Hình 3.12 trình bày mô hình tính xác định hệ số mất ổn định của bản bụng. Bản bụng của thép C bẻ móc (Hình 3.12a) hoặc thép C không bẻ móc (Hình 3.12c) được mô hình hóa thành tấm mỏng chữ nhật chịu ứng suất phân bố đều với các cạnh chịu tải tựa khớp còn các cạnh dọc được coi là biên đàn hồi (Hình 3.12b). Độ cứng đàn hồi trên các cạnh dọc bao gồm độ cứng chống xoay (k_M) và độ cứng lò xo (k_V). Độ cứng lò xo k_V được tính toán theo Mục 3.1.3 bằng cách sử dụng một nửa mô men quán tính quanh trục y ($I_y / 2$) của tiết diện. Cách xác định độ cứng chống xoay k_M

được thể hiện trong Hình 3.12f cho thép C không bẻ móc và Hình 3.12d kết hợp với Hình 3.12e cho thép C bẻ móc. Sơ đồ khối tương ứng được thể hiện trong Hình 3.13. Đối với thép C không bẻ móc, bộ phận tăng cứng chỉ bao gồm bản bụng, do đó quy trình tính phía trên trong Hình 3.13 được sử dụng. Bản cánh được mô hình hóa thành tấm mỏng chữ nhật chịu ứng suất phân bố tuyến tính với cạnh dọc liên kết với bản bụng được coi là cạnh tựa khớp trong khi cạnh dọc còn lại được coi là cạnh tự do (Hình 3.12f).



Hình 3.12 Mô hình tính

SS - Biên tựa khớp

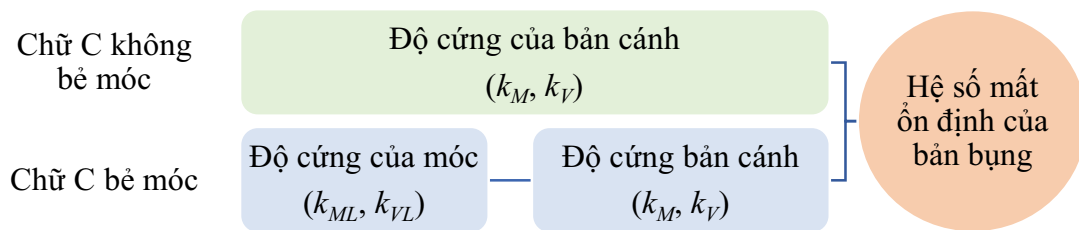
F - Biên tự do

ER - Biên đàn hồi

Quy ước dấu: chịu nén là dương, chịu kéo là âm

Đối với tiết diện chữ C bẻ móc, bộ phận tăng cứng bao gồm móc và bản cánh, và quy trình phía dưới trong Hình 3.13 được sử dụng. Độ cứng đàn hồi của móc được xác định trước tiên. Độ cứng lò xo k_{VL} được tính toán bằng cách sử dụng mô men quán tính của tiết diện chứa móc và nửa dưới của bản cánh quanh trục song song với bản cánh (Hình 3.12e). Để tính độ cứng chống xoay k_{ML} , móc được mô hình hóa thành một tấm mỏng chữ nhật chịu ứng suất kéo đều với cạnh dọc liên kết với bản cánh

được coi là cạnh tựa khớp và cạnh dọc còn lại là được coi là cạnh tự do (Hình 3.12e). Sau khi độ cứng đàn hồi k_{ML} và k_{VL} được xác định, bản cánh được mô hình hóa thành một tấm mỏng chữ nhật chịu ứng suất phân bố tuyến tính với cạnh dọc liên kết với bản bụng được coi là cạnh tựa khớp và cạnh dọc liên kết với móc được coi là cạnh đàn hồi có độ cứng k_{ML} và k_{VL} (Hình 3.12d). Dựa trên mô hình này, độ cứng chống xoay k_M của bản cánh cung cấp cho bản bụng được xác định. Độ cứng lò xo do bản cánh cung cấp cho bản bụng k_V vẫn được tính bằng một nửa mô men quán tính quanh trục y của cả tiết diện, như thể hiện trong (Hình 3.12d).



Hình 3.13 Sơ đồ khối tính toán hệ số mất ổn định của bản bụng

Dưới đây là mã lệnh mô tả thông số tính toán:

Buckling Plate: Name = Web, b = 198,1, $\alpha = 0,00$, iEnd = ElasticallyRestraint, jEnd = ElasticallyRestraint

Left (compressive side) Restraining Plates

1: Name = Lip, b = 39,1, $\sigma = -40,44$, $\alpha = 0,00$, iEnd = SimplySupported, jEnd = Free, kMScale = 1,00, kVScale = 1,00

Elastic Beam: hw = 39,1, b1 = 1,6, b2 = 0,0, $\sigma_{wb} = -40,442$, $\sigma_{1b} = -26,251$, $\sigma_{2b} = 0,000$

2: Name = Flange, b = 3,1, $\sigma = 16,32$, $\alpha = 3,48$, iEnd = SimplySupported, jEnd = ElasticallyRestraint, kMScale = 1,00, kVScale = 1,00

Elastic Beam: hw = 3,1, b1 = 99,1, b2 = 39,1, $\sigma_{wb} = -12,060$, $\sigma_{1b} = 16,322$, $\sigma_{2b} = -40,442$

Right (tensile side) Restraining Plates

The same as left

Bản cánh được mô hình hóa theo quy trình tương tự như với bản bụng. Dưới đây là mã lệnh mô tả thông số tính toán khi coi bản cánh là tấm mất ổn định:

Buckling Plate: Name = Flange, b = 3,1, $\alpha = 3,48$, iEnd = ElasticallyRestraint, jEnd = ElasticallyRestraint

Left (compressive side) Restraining Plates

1: Name = Web, b = 99,1, $\sigma = 16,32$, $\alpha = 0,00$, iEnd = SimplySupported, jEnd = Guided, kMScale = 1,00, kVScale = 1,00

Elastic Beam: Infinity rigid. No movement

Right (tensile side) Restraining Plates

1: Name = Lip, b = 39,1, $\sigma = -40,44$, $\alpha = 0,00$, iEnd = SimplySupported, jEnd = Free, kMScale = 1,00, kVScale = 1,00

Elastic Beam: hw = 39,1, b1 = 1,6, b2 = 0,0, $\sigma_{wb} = -40,442$, $\sigma_{1b} = -26,251$, $\sigma_{2b} = 0,000$

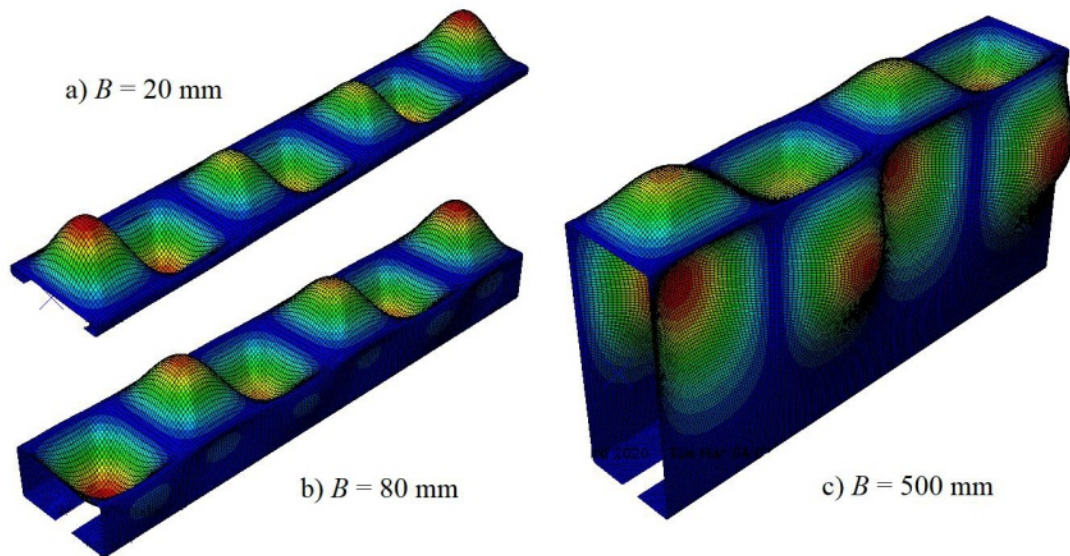
Về trình tự thực hiện, bước đầu tiên là kiểm tra tính đúng đắn của phương pháp RSM bằng dữ liệu từ các nghiên cứu đã có. Bước này đã được thực hiện ở Mục 3.1.5.b). Sau đó sử dụng phương pháp loại trừ để loại bỏ các tham số có mức ảnh

hưởng thấp đồng thời cô lập các tham số để có thể nghiên cứu riêng rẽ mối quan hệ giữa chúng và hệ số mất ổn định. Phương pháp hồi quy sẽ được sử dụng để xây dựng công thức xác định hệ số mất ổn định từ các kết quả RSM rời rạc. Cuối cùng, các công thức mới sẽ được so sánh với các công thức đã được đề xuất trước đây. Sự khác biệt giữa chúng sẽ được thảo luận.

Tiết diện chữ C uốn ngược thực tế có góc uốn nên bản bụng không hoàn toàn phẳng. Khi xấp xỉ bản bụng thành một tấm phẳng, hai điểm đầu của tấm tương đương sẽ nằm trong các góc cong. Vị trí của các điểm này phụ thuộc vào nhiều yếu tố và khó xác định chính xác. Do đó, để thuận tiện cho các tính toán sau này, bề rộng tấm (b) sẽ được lấy bằng chiều cao tiết diện (H). Phương pháp RSM sử dụng kích thước đường tim tiết diện, vì thế hệ số mất ổn định tính từ phương pháp RSM cần được nhân với hệ số $(H/h)^2$ trước khi được sử dụng, trong đó h là chiều cao từ tim đến tim của tiết diện.

3.2.3. Kết quả tính toán và nhận xét

a) Dạng mất ổn định

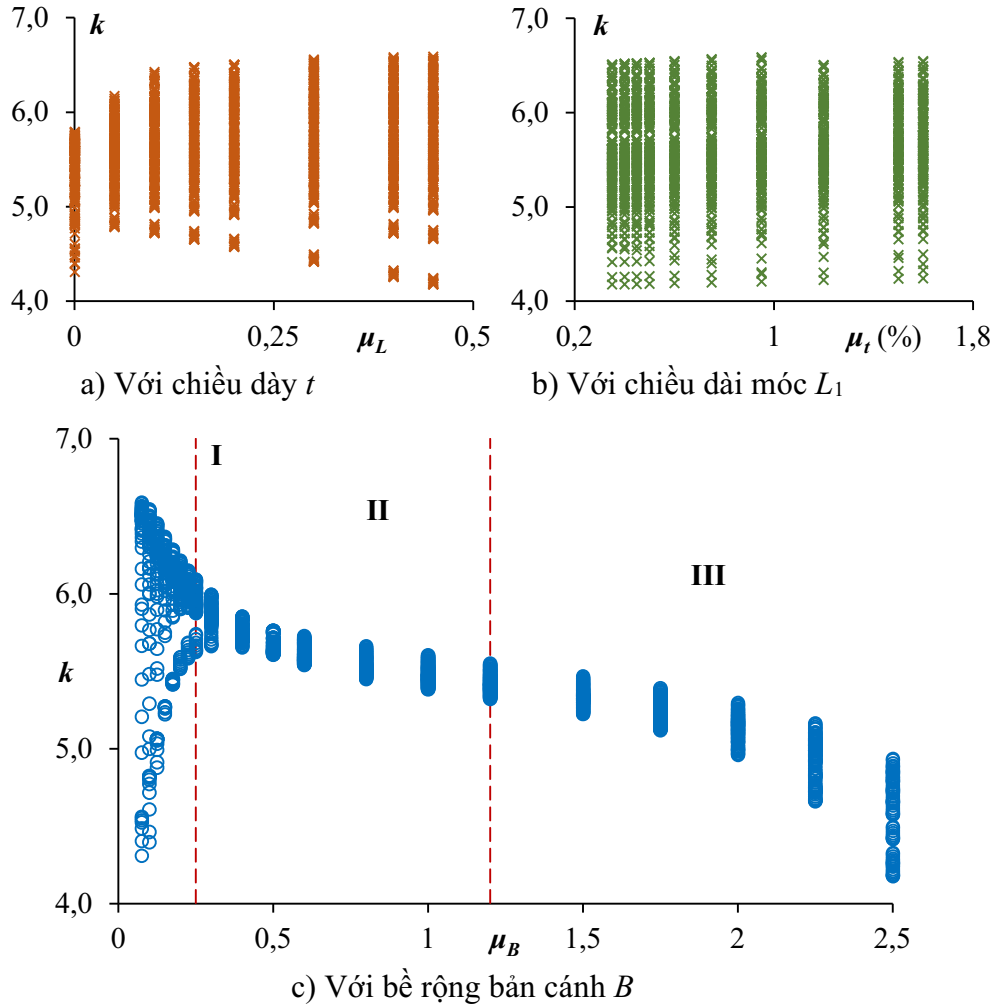


Hình 3.14 Dạng mất ổn định của tiết diện chữ C thành mỏng

Nghiên cứu trong tài liệu [168] cho thấy dạng mất ổn định của tất cả tiết diện đều là mất ổn định cục bộ của bản bụng với mọi kích thước bản cánh và các thông số khác. Để khẳng định kết luận trên, 1576 tiết diện chữ C ở trên đã được mô phỏng trong ABAQUS. Kết quả mô phỏng của ABAQUS cũng cho kết luận tương tự, như

thể hiện trong Hình 3.14 về dạng mặt ổn định của ba loại chiều cao tiết diện khác nhau. Sự đồng nhất về dạng mặt ổn định sẽ giúp giải thích quy luật biến thiên của ứng suất tới hạn trong các phần tiếp theo.

b) *Mối quan hệ giữa hệ số mất ổn định với kích thước tiết diện*

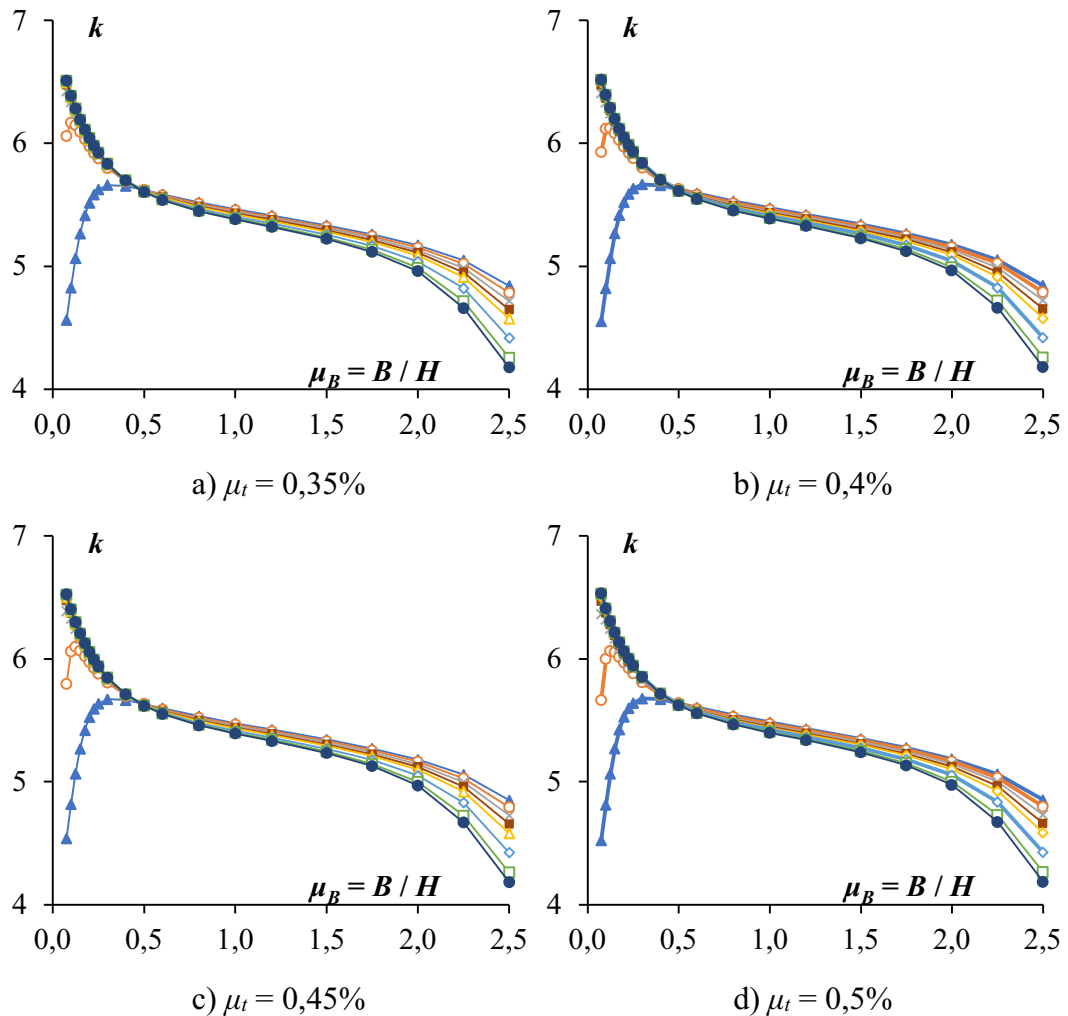


Hình 3.15 Quan hệ giữa hệ số mất ổn định với kích thước tiết diện

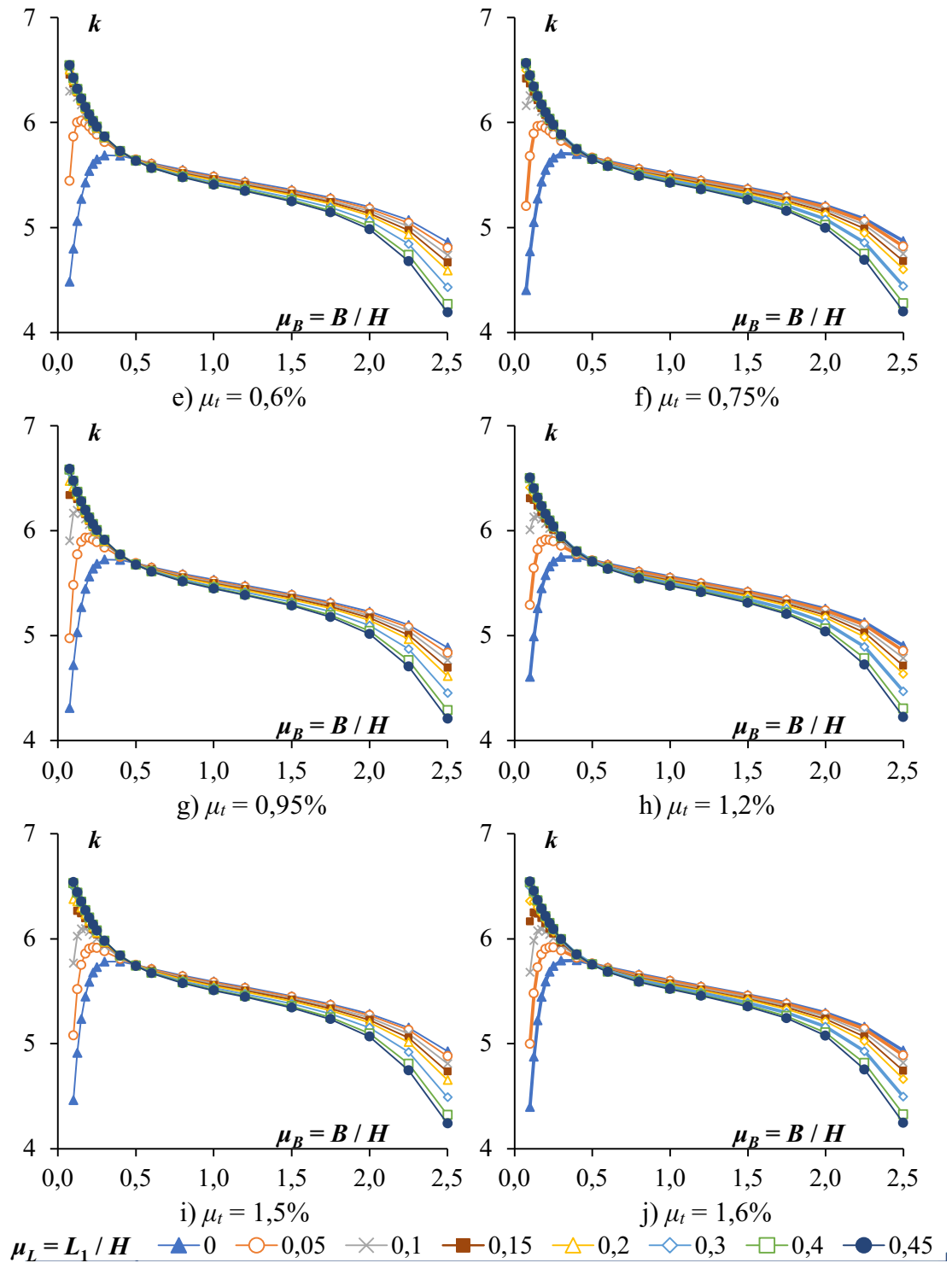
Hình 3.15 thể hiện mối quan hệ giữa hệ số mất ổn định từ phương pháp RSM (kết quả đầy đủ được trình bày ở Bảng C.1) và từng thông số hình học của tiết diện, mục đích để nghiên cứu riêng ảnh hưởng của từng thông số tới hệ số mất ổn định. Các điểm mô tả mối quan hệ giữa hệ số mất ổn định với chiều dài móc (μ_L) trong Hình 3.15a và chiều dày tiết diện (μ_t) trong Hình 3.15b rất phân tán, trong khi sự biến thiên của hệ số mất ổn định theo bề rộng bản cánh (μ_B) trong Hình 3.15c có quy luật rõ ràng.

Giá trị của hệ số mất ổn định nằm trong khoảng từ 4,227 đến 6,743, cao hơn hằng số 4,0 theo AISI S100. Dữ liệu trong Hình 3.15c có thể được chia thành ba vùng. Vùng I có μ_B nhỏ hơn 0,25 ($B < 50$ mm). Dữ liệu trong vùng I khá phân tán. Vùng II nằm trong khoảng μ_B từ 0,25 đến nhỏ hơn 1,2 ($50 \text{ mm} \leq B < 240$ mm). Dữ liệu trong vùng II rất tập trung và theo xu hướng giảm chậm dần. Vùng III có μ_B lớn hơn 1,2 ($B \geq 240$ mm). Dữ liệu trong vùng III phân tán nhiều hơn vùng II, vẫn có xu hướng giảm nhưng nhanh dần. Do vậy, các phần sau tập trung nghiên cứu quy luật của hệ số mất ổn định theo bề rộng bản cánh.

c) *Mối quan hệ giữa hệ số mất ổn định với chiều dày tiết diện và chiều dài móc*



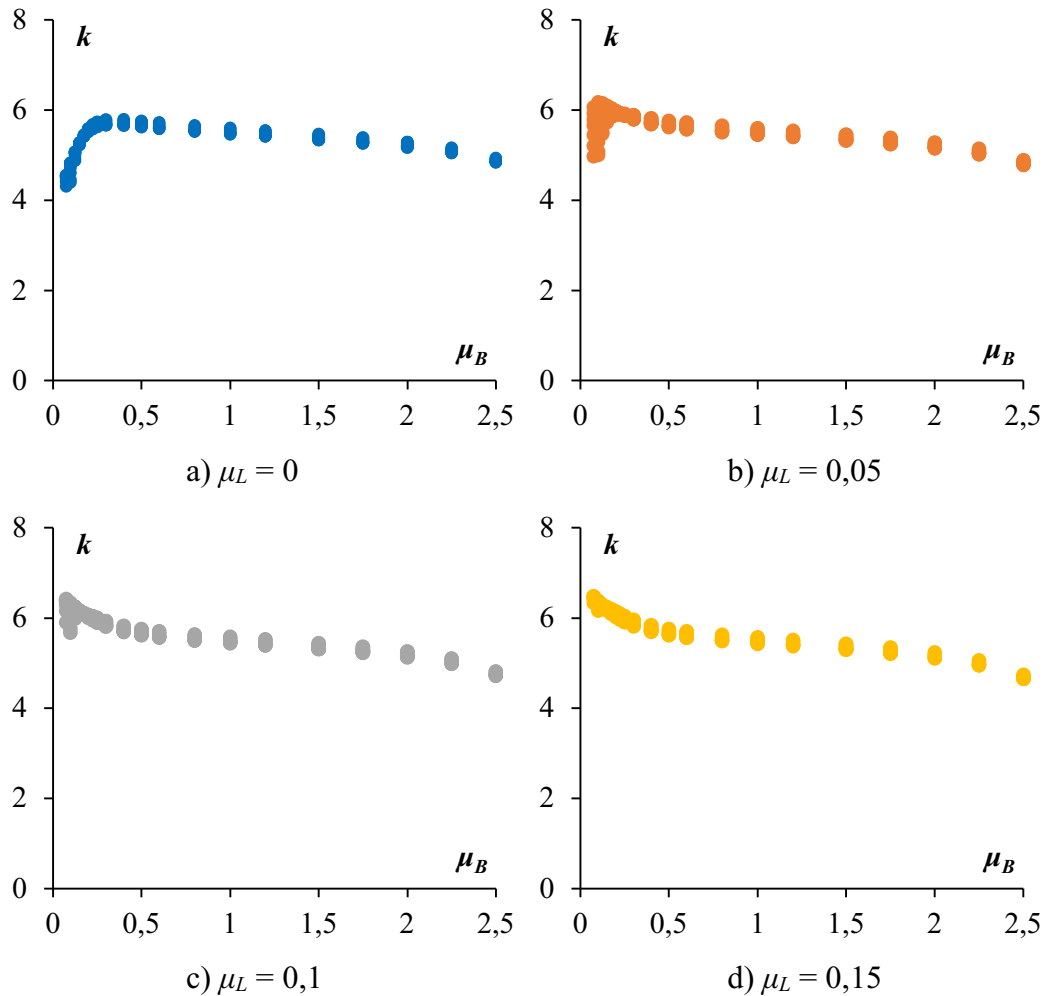
Hình 3.16- Hệ số mất ổn định sắp xếp theo chiều dày tiết diện (Phần 1)



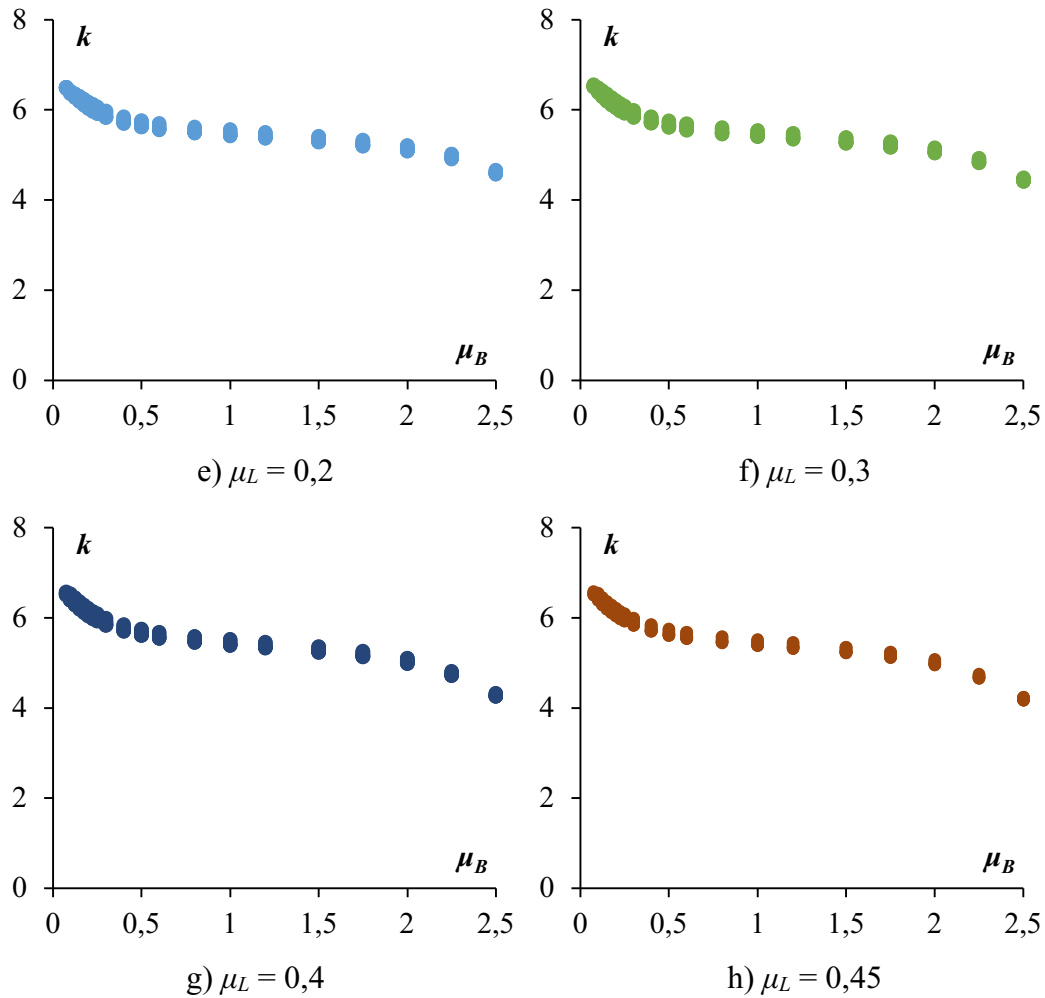
Hình 3.16 Hệ số mất ổn định sắp xếp theo chiều dày tiết diện

Để đánh giá tác động riêng rẽ của chiều dài móc đối với hệ số mất ổn định, Hình 3.16 nhóm dữ liệu trong Hình 3.15 theo chiều dài móc (μ_L), sau đó tiếp tục được tách thành các đường cong khác nhau theo chiều dày tiết diện (μ_t).

Có thể thấy rằng tất cả các biểu đồ trong Hình 3.16 đều có hình dạng tương tự nhau. Toàn bộ đường cong trong mỗi biểu đồ xoay quanh một điểm chung với μ_B khoảng 0,5. Trước điểm này, các đường cong tương ứng với μ_L nhỏ nằm bên dưới các đường cong có μ_L cao hơn. Sau điểm này, hệ số mất ổn định giảm khi μ_L tăng.



Hình 3.17 Hệ số mất ổn định sắp xếp theo chiều dài móc (Phần 1)



Hình 3.17 Hệ số mất ổn định sắp xếp theo chiều dài móc

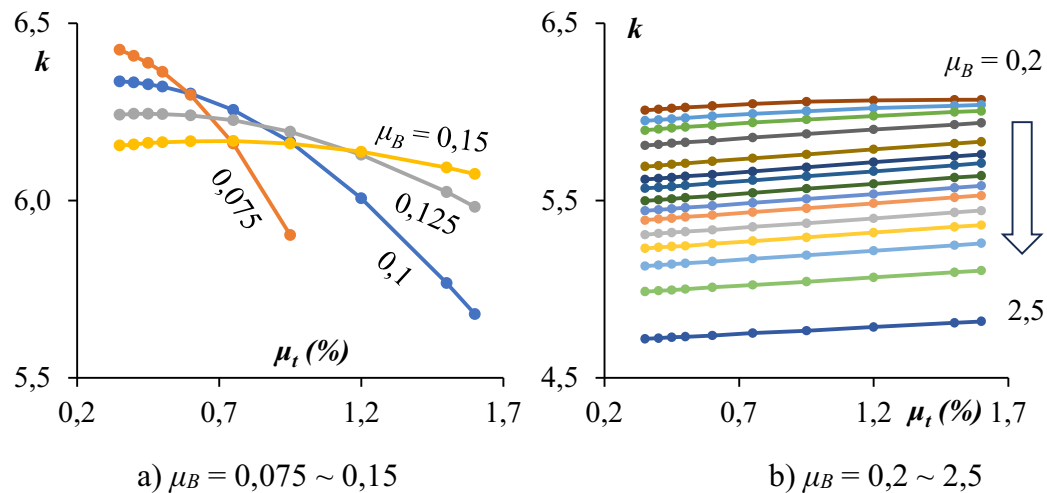
Các đường cong trong một biểu đồ có hình dạng tương tự nhau. Có thể quan sát rõ ba giai đoạn trên mỗi đường cong. Đầu tiên là giai đoạn hệ số mất ổn định tăng dần. Đường cong chuyển sang giai đoạn thứ hai tại một điểm nằm trước điểm xoay chung. Đoạn hai cho thấy xu hướng giảm dần với độ cong âm. Cuối cùng, đường cong chuyển vào giai đoạn cuối với xu hướng giảm dần với độ cong dương. Điểm uốn giữa đoạn hai và đoạn ba có μ_B bằng 1,2. Sự biến thiên của hệ số mất ổn định theo μ_L ở giai đoạn ba không phải là tuyến tính.

Để đánh giá tác động riêng rẽ của chiều dày tiết diện đối với hệ số mất ổn định, Hình 3.17 nhóm mối quan hệ giữa hệ số mất ổn định với bề rộng bản cánh theo chiều dài bề móc. Lưu ý rằng dữ liệu trong mỗi biểu đồ đại diện cho nhiều chiều dày tiết diện khác nhau. Mặc dù có nhiều chiều dày khác nhau, dữ liệu được tập trung lại

như một đường cong duy nhất, chứng tỏ rằng hệ số mất ổn định hầu như không phụ thuộc vào t . Chỉ có đoạn đầu tiên của đường cong với μ_L từ 0,05 đến 0,2 cho thấy sự khác biệt lớn về giá trị của hệ số mất ổn định. Sự khác biệt này lớn nhất khi $\mu_L = 0,05$ và giảm dần khi μ_L tăng.

Đặc biệt, đối với $\mu_L = 0$ tức tiết diện chữ C không bẻ móc, giá trị của hệ số mất ổn định gần như không còn phụ thuộc vào t .

Quy luật trên được thể hiện rõ hơn trong Hình 3.18 đối với $\mu_L = 0,05$. Khi $\mu_B < 0,2$ (Hình 3.18a), độ dốc lớn của các đường cong cho thấy sự phụ thuộc lớn của hệ số mất ổn định vào μ_t . Khi $\mu_B \geq 0,2$ (Hình 3.18b), các đường cong gần như nằm ngang, thể hiện sự độc lập của k với t .



Hình 3.18 Hệ số mất ổn định khi $\mu_L = 0,05$

Bản chất của cấu kiện thành mỏng có thể giải thích quy luật trên. Tiết diện thành mỏng bao gồm các tấm mỏng có độ dày rất nhỏ so với các kích thước khác, và có thể giả định độ dày bằng không. Do đó, hệ số mất ổn định trên nguyên tắc không phụ thuộc vào độ dày. Tuy nhiên, trong thực tế độ dày vẫn tồn tại và có thể quan sát thấy những ảnh hưởng nhỏ đối với hệ số mất ổn định. Ví dụ, khi bề rộng bản cánh và chiều dài bẻ móc nhỏ, tỷ lệ t/B và t/L_1 sẽ lớn, hiệu ứng của t đối với k sẽ trở nên rõ rệt.

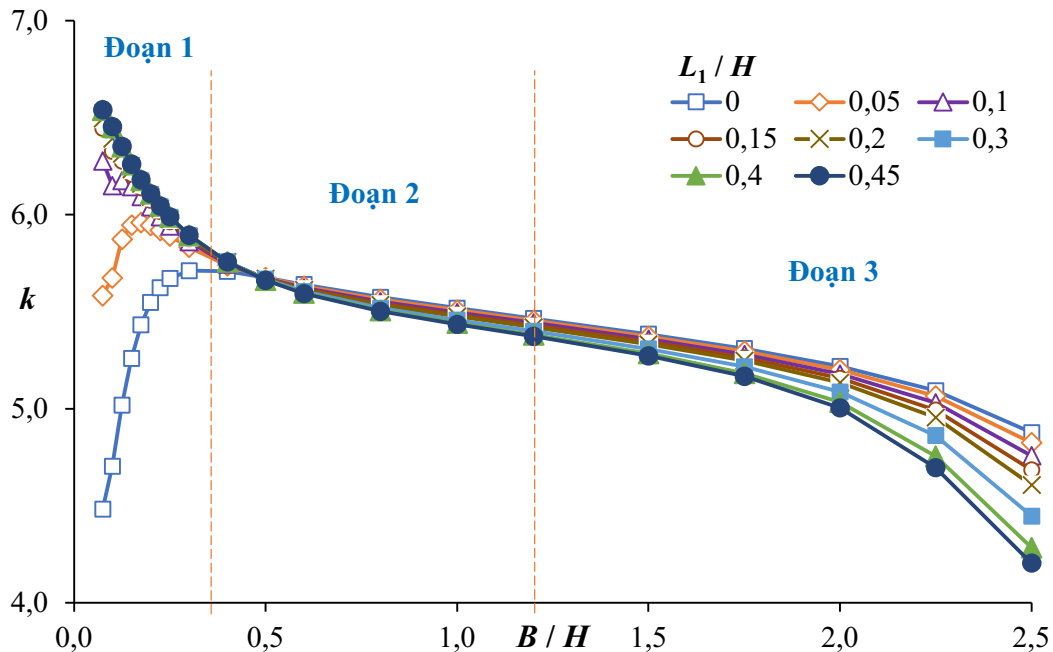
Trên cơ sở bỏ qua sự ảnh hưởng của t đối với k , hệ số mất ổn định trung bình trong cùng một độ dày đã được tính toán tạo nên một tập hợp dữ liệu mới và được sử dụng trong các phần sau để xây dựng các công thức xấp xỉ.

d) *Hệ số mất ổn định trung bình*

Hệ số mất ổn định trung bình được tính toán và được thể hiện trong Hình 3.19 theo μ_B . Đây là giá trị trung bình của hệ số mất ổn định nhỏ nhất và lớn nhất ứng với một độ dày nhất định:

$$k = \frac{k_{\min} + k_{\max}}{2} \quad (3.69)$$

Có thể thấy hình dạng của đồ thị trong Hình 3.19 tương tự nhau và giữ nguyên được các đặc tính của đồ thị trong Hình 3.16. Ba giai đoạn của đồ thị tiếp tục được quan sát thấy trên Hình 3.19. Tồn tại một số ngoại lệ tại điểm bắt đầu của đường cong tương ứng với $\mu_L = 0,1$ và $0,2$. Các điểm bất thường này là hệ quả của thao tác lấy giá trị trung bình.



Hình 3.19 Quan hệ giữa hệ số mất ổn định trung bình và μ_B

Vì các đường cong trong Hình 3.19 tương tự nhau, nên một đường cong, cụ thể là đường cong có $\mu_L = 0,45$, sẽ được chọn làm đường cơ sở và được sử dụng để xây dựng công thức. Đây là đường cong đơn giản nhất và có tính nhất quán cao. Sau đó, ảnh hưởng của μ_L đối với hệ số mất ổn định sẽ được xem xét thông qua các hệ số điều chỉnh.

3.2.4. Xây dựng công thức xác định hệ số mất ổn định

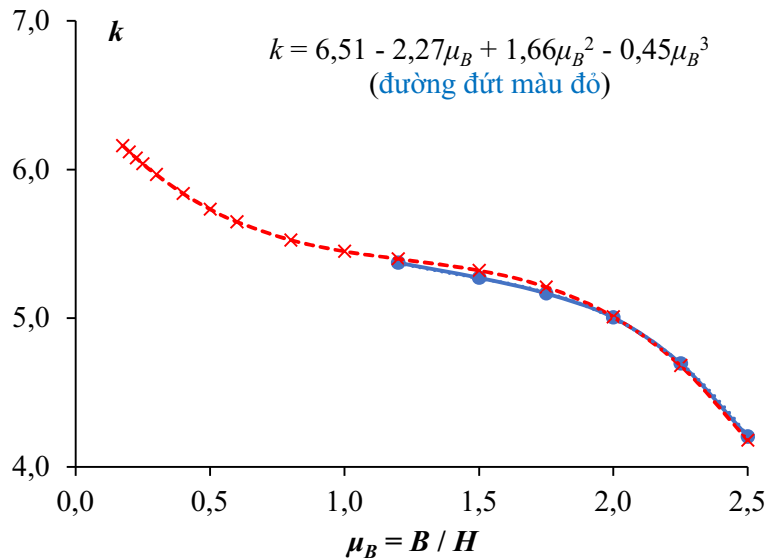
a) Xây dựng công thức cho đoạn cong thứ ba

Hình 3.20 thể hiện các điểm liên quan đến hệ số mất ổn định ở đoạn cong thứ ba tương ứng với $\mu_L = 0,45$ (đường cong nét liền). Hồi quy thu được công thức sau (đường cong nét đứt):

$$k_3 = 6,51 - 2,27 \mu_B + 1,66 \mu_B^2 - 0,45 \mu_B^3 \quad (3.70)$$

Đồ thị trong Hình 3.21 thể hiện sự độ chênh của các hệ số mất ổn định (Δk) giữa các giá trị μ_L khác nhau với đường cơ sở ($\mu_L = 0,45$). Sự phụ thuộc của Δk với $(0,45 - \mu_L)$ và $(\mu_B - 0,5)^3$ gần như tuyến tính. Do đó, có thể thực hiện hồi quy tuyến tính để xây dựng công thức

$$k_3 = 0,2 \mu_L + 0,45 \mu_B + 0,5^3 \quad (3.71)$$



Hình 3.20 Công thức đề xuất cho đoạn cong thứ ba khi $\mu_L = 0,45$

Cộng (3.71) với (3.70) thu được

$$k_3 = 6,51 - 2,27 \mu_B + 1,66 \mu_B^2 - 0,45 \mu_B^3 + 0,2 \mu_L + 0,45 \mu_B + 0,5^3 \quad (3.72)$$

Giản lược công thức trên, ta có

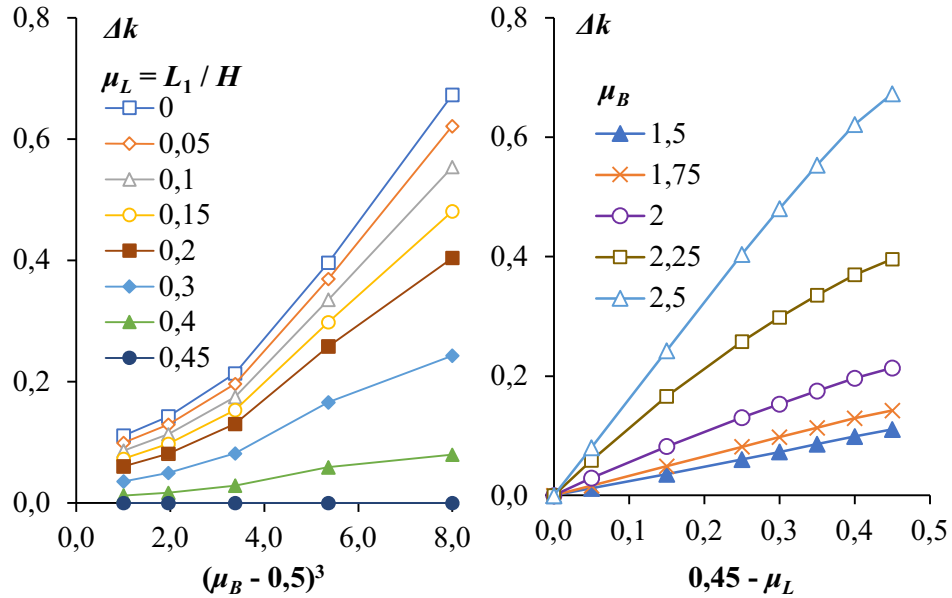
$$k_3 = 5,73 - 0,95 \mu_B + 0,98 \mu_B^2 + 0,36 \mu_L + 0,2 \mu_L / D + 0,5^3 \quad (3.73)$$

trong đó

$$b \quad B \quad 0,5 \quad (3.74)$$

Điều kiện áp dụng công thức trên là

$$B \quad 1,2 \quad (3.75)$$

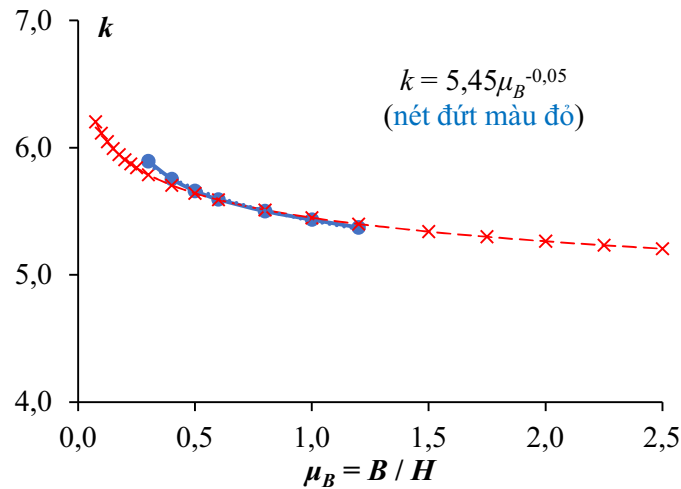


a) Do ảnh hưởng của μ_L

b) Do ảnh hưởng của μ_B

Hình 3.21 Chênh lệch so với đường cơ sở do ảnh hưởng của μ_L và μ_B

b) Công thức cho đoạn cong thứ hai



Hình 3.22 Công thức đề xuất cho đoạn cong thứ hai với $\mu_L = 0,45$

Hình 3.22 thể hiện các điểm liên quan đến hệ số mất ổn định ở đoạn cong thứ hai tương ứng với $\mu_L = 0,45$ (đường cong nét liền). Hồi quy thu được công thức sau (đường cong nét đứt):

$$k_2 = 5,45 \cdot B^{0,05} \quad (3.76)$$

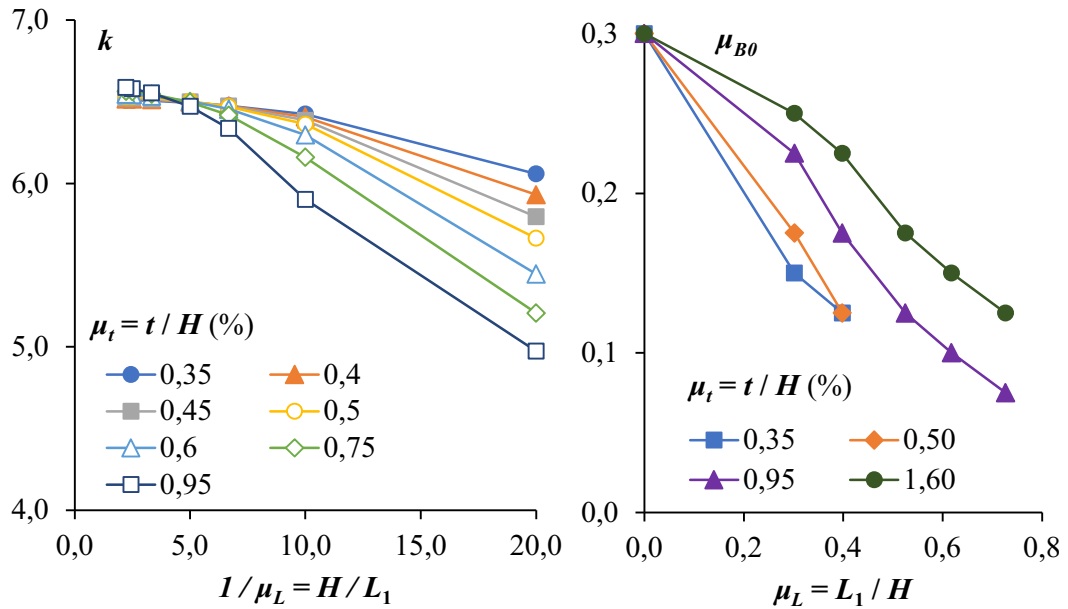
Từ hình Hình 3.19 có thể thấy các điểm trong giai đoạn hai rất gần nhau. Ảnh hưởng của μ_L đối với hệ số mất ổn định rất nhỏ và do đó được bỏ qua.

c) Công thức cho đoạn cong đầu tiên

Quy luật của hệ số mất ổn định trong giai đoạn đầu tiên rất phức tạp. Do đó, công thức gần đúng sẽ được đề xuất dưới dạng nội suy tuyến tính.

Điểm đầu của đường cong tương ứng với $B = 15 \text{ mm}$ (hoặc $\mu_B = 0,075$).

Hình 3.23 biểu diễn giá trị của hệ số mất ổn định và cận dưới của đoạn cong đầu tiên theo μ_t và μ_L .



a) k tại điểm đầu ($\mu_B = 0,075$)

b) Cận dưới của đoạn cong đầu tiên μ_{B0}

Hình 3.23 Xác định các thông số của đoạn cong đầu tiên

Hồi quy tuyến tính trên dữ liệu trong Hình 3.23a thu được công thức xác định hệ số mất ổn định tại điểm đầu đường cong

$$k_0 = 7,2 - \frac{0,1}{L} - 0,97 \cdot \mu_t + 4,2 \quad (3.77)$$

Lưu ý rằng $\mu_L = 0$ làm k_0 âm vô cùng. Do đó, khi $\mu_L = 0$, $k_0 = 4,2$.

Cận dưới của đoạn cong đầu tiên được hồi quy tuyến tính từ Hình 3.23b

$$\mu_{B0} = 0,21 - 0,34 \cdot \mu_L^{0,4} - 0,06 \cdot \mu_t + 0,08 \quad (3.78)$$

Nhờ đó, hệ số mất ổn định tại μ_{B0} có thể được tính theo Công thức (3.76). Công thức nội suy tuyến tính theo μ_B giữa 0,075 và μ_{B0} như sau:

$$k_1 = k_0 + \frac{\mu_{B0} - 0,075}{0,075} (5,45 - k_0) \quad (3.79)$$

Khi $\mu_B = 0,075$, $k_1 = k_0$.

d) *Quan hệ giữa hệ số mất ổn định và tỷ số R/H*

Robert Glauz đã xét ảnh hưởng của bán kính uốn trong biểu thức xác định hệ số mất ổn định điều chỉnh cho các tấm phẳng kết nối với đoạn cong. Biểu thức này sau đó được Zeinoddini trích dẫn [187] và sau đó được tích hợp trong Mục B4.1 của Tài liệu hướng dẫn tiêu chuẩn AISI S100 [32]

$$k_{reduced} = 1,08 + 0,02 \frac{R_1}{t} = 1,08 + 0,02 \frac{R_2}{t} k \quad (3.80)$$

trong đó R_1 và R_2 là các bán kính trong, t là chiều dày của tấm và k là hệ số mất ổn định của riêng phần phẳng. Biểu thức này chỉ áp dụng cho mô hình phần tử và do đó không thể sử dụng trong nghiên cứu này.

Phương pháp năng lượng do Marsh [117] thực hiện trên thép hộp vuông cho thấy yếu tố chính ảnh hưởng đến ứng suất tới hạn cục bộ là tỷ lệ giữa bề rộng phần phẳng và bán kính cong. Nhận thấy việc không xét đến bề rộng của phần phẳng trong biểu thức (3.80) có thể dẫn đến kết quả không an toàn, Vieira [162][163] đã giới thiệu công thức mới cho các tiết diện hộp

$$C_{k,r} = \frac{c_1}{\frac{u}{r_c}} + c_2 + c_3 \quad (3.81)$$

trong đó u là một nửa chu vi tiết diện, r_c là bán kính uốn tại góc, tất cả được xác định theo đường tim của các tấm thành phần tạo nên tiết diện. c_1 , c_2 , và c_3 là các hằng số phụ thuộc vào điều kiện gia tải. Do kiểu tiết diện và điều kiện chịu tải đã bị ràng buộc, công thức này không phù hợp với tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng.

Luận án này sử dụng hệ số bán kính góc do Vu [168] đề xuất cho tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng, tức Công thức (3.82)

$$C_{R_{5/200}} = 0,982 + 0,177 \left(\frac{R}{34} \right)^2 \quad (3.82)$$

Hệ số mất ổn định tương ứng với tỷ lệ R/H bất kỳ có thể thu được bằng cách nhân hệ số này với hệ số mất ổn định cơ bản tương ứng với $R/H = 5/200$. Đối với các tiết diện lý tưởng có bán kính góc uốn bằng không, $C_{R_{5/200}} = 0,982$. Do đó, hệ số C_R dùng để chuyển đổi hệ số mất ổn định tương ứng với $R/H = 0$ sang tỷ lệ R/H bất kỳ có thể được xác định bằng cách đầu tiên chuyển đổi hệ số mất ổn định từ $R/H = 0$ thành $R/H = 5/200$ (hệ số chuyển đổi là $1/0,982$), và sau đó từ $R/H = 5/200$ sang tỷ lệ R/H yêu cầu theo Công thức (3.82). Quy trình này hình thành nên biểu thức sau

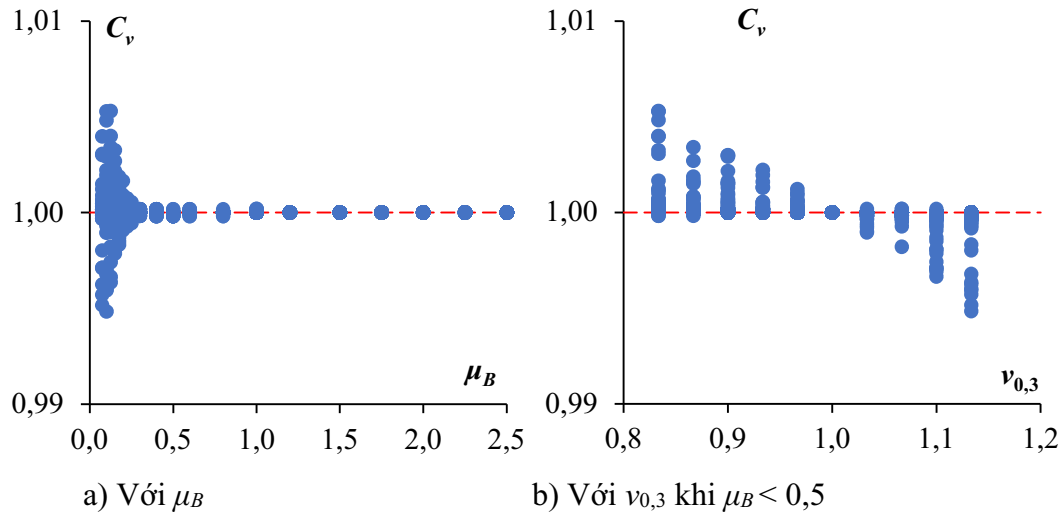
$$C_R = 1 - 0,18 \left(\frac{R}{H} \right)^{3/4} \quad (3.83)$$

Zeinoddini [187] lưu ý rằng hiện tượng mất ổn định của tấm cong có thể xảy ra ở các góc uốn khi tỷ lệ giữa bán kính góc uốn và chiều dày tấm R/t lớn. Do đó, giới hạn $R/t \leq 20$ theo yêu cầu của AISI S100-16 [31] phải được tuân thủ.

e) *Ảnh hưởng của hệ số Poát xông*

Hệ số Poát xông ảnh hưởng đến ứng suất tới hạn theo hai cách. Đầu tiên là ảnh hưởng đến độ cứng của tấm dưới dạng nhân tử $(1 - \nu^2)$ trong mẫu số của Công thức (3.86). Kế đến là ảnh hưởng đến hệ số mất ổn định dưới dạng phương trình siêu việt (xem Timoshenko [159] và các tài liệu khác thảo luận về bài toán mất ổn định của tấm mỏng). Trong một số trường hợp đặc biệt, chẳng hạn như tấm mỏng tựa khớp chịu ứng suất nén đều theo một phương, hệ số mất ổn định không phụ thuộc vào hệ số Poát xông. Trong các trường hợp khác, phải xem xét ảnh hưởng của hệ số Poát xông đến hệ số mất ổn định.

Để nghiên cứu ảnh hưởng của hệ số Poát xông đến hệ số mất ổn định, 1520 mô hình trong phần trước (mô hình có $B = 15\text{mm}$ bị loại bỏ) đã được tính toán lại với hệ số Poát xông ngẫu nhiên trong phạm vi từ 0,25 đến 0,35. Sau đó, tỷ số hệ số mất ổn định C_v của mô hình đang xét với mô hình cơ sở (mô hình sử dụng hệ số Poát xông bằng 0,3) sẽ được tính toán. Sự biến thiên của C_v theo bề rộng bản cánh được thể hiện trên Hình 3.24a. Có thể thấy rằng khi $\mu_B \geq 0,5$, hệ số Poát xông không ảnh hưởng đến giá trị của hệ số mất ổn định. Chỉ khi $\mu_B < 0,5$, ảnh hưởng của hệ số này mới trở nên rõ ràng. Mối quan hệ giữa C_v và hệ số nở hông tương đối $\nu_{0,3}$, tức tỷ số giữa hệ số Poát xông đang xét với giá trị 0,3, khi $\mu_B < 0,5$ được biểu diễn trên Hình 3.24b.



Hình 3.24 Sự biến thiên của hệ số C_v

Đường bao khi $\mu_B < 0,5$ (Hình 3.24b) có phương trình

$$C = 1,04 - 0,04 \nu_{0,3} \quad (3.84)$$

Và với $\mu_B \geq 0,5$ (Hình 3.24a)

$$C = 1,0 \quad (3.85)$$

f) *Tổng hợp công thức đề xuất*

Ứng suất tới hạn đàn hồi tại mặt phẳng trung bình của cấu kiện thành mỏng chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén có thể được xác định bởi Công thức (3.86) tương tự công thức cho tấm mỏng của Timoshenko [159], với hệ số uốn mất ổn định k^* được xác định bởi công thức gần đúng và được điều chỉnh bởi các hệ số C_R và C_v khi xét tới các góc uốn và hệ số Poát xông:

$$\sigma_{cr} = k^* \frac{E}{12} \frac{t}{H}^2 \quad (3.86)$$

với

$$k^* = C C_R k \quad (3.87)$$

C_R và C_v được xác định bởi các biểu thức từ (3.83) đến (3.85). Hạt nhân (k) của hệ số mất ổn định (k^*) có quan hệ mật thiết với kích thước tiết diện và được trình bày trong Bảng 3.3.

Bảng 3.3 Hệ số chủ đạo (k) để xác định hệ số mất ổn định

	0,075	B	$B0$		$B0$	B	1,2		1,2	B	
k_0	$\frac{B}{B0} \frac{0,075}{0,075}$	5,45	$B0^{0,05}$	k_0	5,45	$B^{0,05}$		5,73	0,95	b	$0,98_b^2$
								0,36	0,2	L	b^3
với k_0	7,2	$\frac{0,1}{L}$	0,97	t	4,2			với b	B		0,5

Ghi chú

$$B \quad \frac{B}{H} \quad t \quad \frac{t}{H} \quad 100 \quad L \quad \frac{L_1}{H} \quad B_0 \quad 0,21 \quad 0,34 \quad {}^{0,4}_L \quad 0,06 \quad t \quad 0,08$$

Phạm vi áp dụng

$$0,075 \quad_B \quad 2,5 \quad 0,35 \quad_t \quad 1,6 \quad 0 \quad_L \quad 0,45$$

Những giới hạn sử dụng khác áp dụng cho phương pháp DSM trong Mục B4.1 của AISI S100-16 [31] cũng được áp dụng cho các công thức này.

Các công thức xác định hệ số mất ổn định trong Bảng 3.3 được trình bày dưới dạng các biểu đồ ở Hình B.1 của Phụ lục B.1 để tiện tra cứu.

3.2.5. Độ tin cậy của công thức đề xuất

a) *Đánh giá độ chính xác*

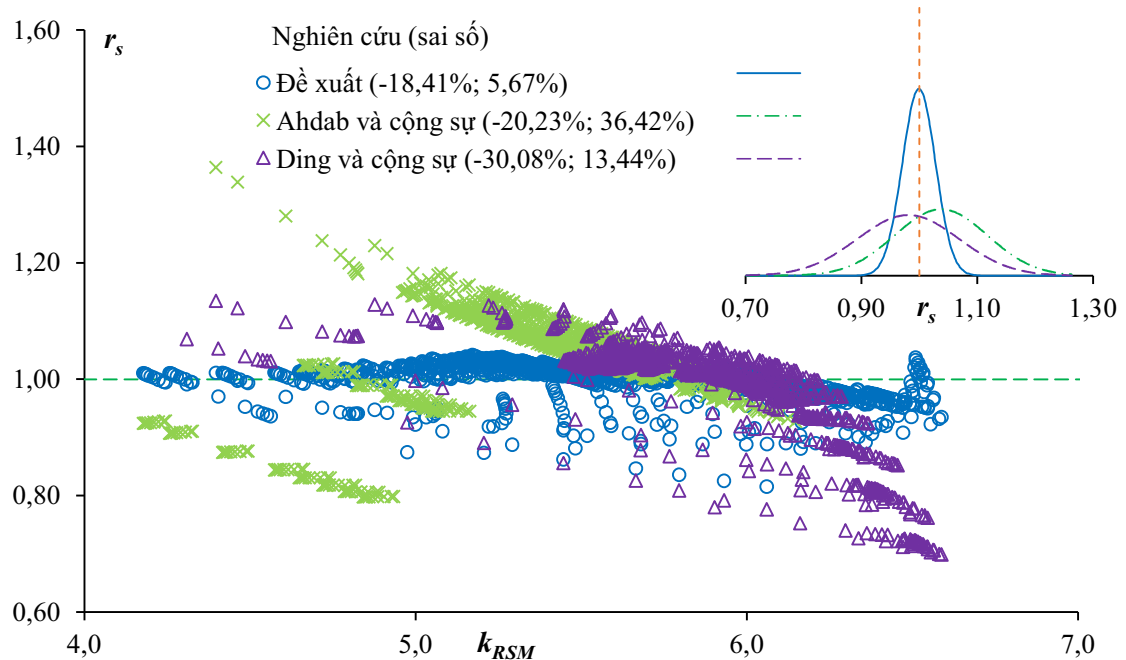
Độ chính xác của Công thức (3.87) được đánh giá dựa trên kết quả của 1576 mô hình gốc (còn gọi là nhóm tiết diện mở rộng) sử dụng trong Mục 3.2.3(b).

Thuật ngữ “độ tương đồng”, ký hiệu r_s , được định nghĩa trong luận án này để mô tả mức độ tương đồng của một giá trị so với một giá trị khác. Hệ số này được định nghĩa là tỷ lệ giữa hai số. Độ tương đồng bằng 1 có nghĩa là hai giá trị bằng nhau và độ tương đồng gần với 1 thể hiện là một giá trị xấp xỉ với giá trị còn lại.

Kết quả kiểm chứng được thể hiện trong Hình 3.25. k_{RSM} là hệ số mất ổn định xác định từ phương pháp RSM. r_s là độ tương đồng giữa hệ số mất ổn định tính bằng công thức đề xuất trong luận án hoặc công thức của các tác giả khác ($k_{proposed}$) với k_{RSM} . Ba biểu thức được dùng để xác định hệ số mất ổn định, bao gồm biểu thức đề xuất bởi Ahdab và cộng sự [26], Ding và Schafer [63] (xem Bảng B.4) và Công thức (3.87). Sai số phần trăm giữa $k_{proposed}$ và k_{RSM} được tính toán và thể hiện trong Hình 3.25. Dữ liệu thống kê khác được thể hiện trong Bảng 3.4.

Quan sát từ Hình 3.25 cho thấy kết quả của Công thức (3.87), tức tập “Đề xuất”, ít phân tán nhất. COV của tập “Đề xuất” là 0,029, chỉ bằng 1/3 giá trị của Ahdab (0,077) và Ding (0,09) (xem Bảng 3.4). Sai số lớn nhất của Công thức (3.87) là 18,4%, nhỏ hơn nhiều sai số của Ahdab là (36,4%) và Ding (30,1%). Giá trị trung bình của độ tương đồng khi dùng Công thức (3.87) là 0,999, chứng tỏ rằng công thức phù hợp kết quả của RSM. Các giá trị thu được từ Công thức (3.87) đa phần nhỏ hơn các mô men tới hạn thu được từ mô phỏng số, có nghĩa Công thức (3.87) thiên về an toàn.

Bảng 3.4 cũng so sánh kết quả của ba biểu thức trên trong ba giai đoạn của đường cong hệ số mất ổn định. Công thức (3.79) cho thấy tính hiệu quả ở đoạn cong đầu tiên với sai số lớn nhất nhỏ hơn 20% trong khi của Ahdab và Ding là khoảng 30%. Đối với đoạn cong thứ ba, sai số của công thức đề xuất ở mức 4,2% nhỏ hơn nhiều so với 20,2% của Ahdab, cho thấy Công thức (3.73) phù hợp với tỷ lệ B/H lớn. Công thức này có thể áp dụng cho tiết diện chữ C cánh rộng hoặc tiết diện mũ.



Hình 3.25 Kết quả kiểm tra trên bộ dữ liệu mở rộng

Đặc biệt, trong phạm vi tỷ lệ kích thước của tiết diện thông dụng, tức $0,3 \leq B/H \leq 1,2$, Công thức (3.76) của đoạn cong thứ hai khá sát với kết quả của phương pháp RSM với sai số tối đa nhỏ hơn 5%, như được thể hiện bằng các giá trị trong dấu ngoặc đơn ở Bảng 3.4.

Bảng 3.4 Độ chính xác của các biểu thức được đề xuất trên bộ dữ liệu mở rộng

Đoạn	Công thức đề xuất				Ahdab và cộng sự [26]				Ding và cộng sự [63]			
	$\varepsilon_{\min}$	$\varepsilon_{\max}$	μ	COV	$\varepsilon_{\min}$	$\varepsilon_{\max}$	μ	COV	$\varepsilon_{\min}$	$\varepsilon_{\max}$	μ	COV
Đoạn 1	-18,4	5,7	0,951	0,047	-7,3	36,4	1,080	0,077	-30,1	13,4	0,935	0,163
Đoạn 2	-5,0	5,6	1,000	0,018	-6,5	9,9	1,035	0,032	-23,8	6,8	0,990	0,064
	(-1,8)	(4)	(1,011)	(0,011)	(-1,9)	(9,9)	(1,043)	(0,024)	(0,7)	(6,8)	(1,031)	(0,011)
Đoạn 3	-0,7	4,2	1,018	0,011	-20,2	18,2	1,032	0,105	-	-	-	-
Tổng	-18,4	5,7	0,999	0,029	-20,2	36,4	1,038	0,077	-30,1	13,4	0,981	0,090

Ghi chú: Giá trị trong ngoặc tương ứng với $\mu_B \geq 0,3$

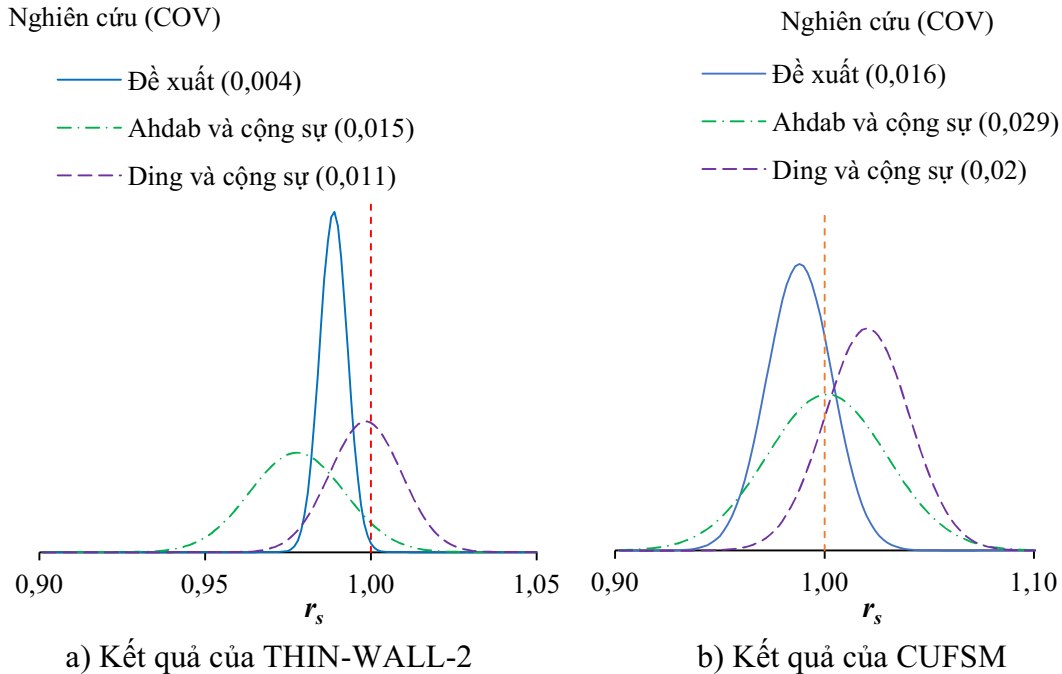
b) *Kiểm chứng công thức đề xuất thông qua kết quả của các nghiên cứu đã có*

Hai bộ dữ liệu trích xuất từ phương pháp Dải hữu hạn, như trình bày trong Mục 3.1.5(b), được sử dụng để đánh giá độ tin cậy của các công thức đề xuất. Nhóm đầu tiên bao gồm các mô men tới hạn được thực hiện bởi Oey và Papangelis (M_{Oey}) trên phần mềm THIN-WALL-2. Nhóm thứ hai kết quả của phần mềm CUFSM được thực hiện bởi Schafer ($M_{Schafer}$) [136] trên tiết diện thương mại và phi thương mại của SFIA [147]. Các công thức do Ahdab [26], Ding và Schafer [63] đề xuất và Công thức (3.87) được sử dụng để xác định mô men tới hạn $M_{proposed}$. Độ tương đồng (r_s) giữa $M_{proposed}$ và M_{Oey} (và $M_{Schafer}$) được tính toán. Kết quả thống kê về độ tương đồng được thể hiện trong Hình 3.26a đối với dữ liệu của Oey và Papangelis và Hình 3.26b đối với dữ liệu của Schafer.

Hình 3.26 cho thấy (3.87) vẫn là công thức phù hợp nhất với kết quả mô phỏng của THIN-WALL-2 và CUFSM. Công thức (3.87) có độ chính xác tương tự công thức của Ding và tốt hơn so với biểu thức Ahdab. Giá trị trung bình và COV của Công thức (3.87) lần lượt là (0,989; 0,004) và (0,988; 0,016) cho kết quả của THIN-WALL-2 và CUFSM. Kết quả này tái khẳng định độ tin cậy của các biểu thức được đề xuất.

Lý do Công thức (3.87) không vượt trội hơn các biểu thức của Ahdab và Ding trong nhóm tiết diện của SFIA và của Oey và Papangelis là độ mảnh của các tiết diện này tương tự nhau, sinh ra hệ số mất ổn định trong một phạm vi tương đối hẹp. Phạm vi này là từ 5,3 đến 6,2, do đó thậm chí nếu sử dụng hằng số 5,62 theo công thức của Ahdab cũng gây ra sai số không đáng kể (dưới 10%). Phạm vi của hệ số mất ổn định

trở nên lớn hơn, từ 4,2 đến 6,8, khi dùng nhóm tiết diện mở rộng. Lúc này, các biểu thức hiện có sẽ gây ra những sai số lớn hơn.



Hình 3.26 Phân phối xác suất của độ tương đồng so với kết quả đã có

Seif và Schafer [146], Gardner [75], và Yiu và Peköz [180] cũng đã đề xuất các biểu thức cho tiết diện chữ C không bẻ móc. Tuy nhiên, các giá trị bất thường của hệ số mất ổn định đã được quan sát thấy khi sử dụng các biểu thức của Seif và Yiu. Các biểu thức của Gardner chỉ áp dụng cho bản cánh chịu ứng suất nén tuyến tính, không phù hợp cho cấu kiện chịu uốn với ứng suất trên bản cánh gồm cả nén và kéo. Cho đến nay, vẫn chưa có biểu thức áp dụng cho cấu kiện chữ C không bẻ móc chịu uốn quanh trục không đối xứng. Do đó, các biểu thức trên không được sử dụng trong luận án này.

3.3. Nhận xét chương

Chương này (Mục 3.1) giới thiệu một phương pháp phân tích mới để xác định mô men tới hạn đàn hồi của toàn bộ tiết diện, gọi là phương pháp Độ cứng biên (RSM), được xây dựng dựa trên phương pháp Hệ số chống xoay (CRM) do Bleich đề xuất. Phương pháp cải tiến có các đặc điểm sau:

Giải quyết bài toán mất ổn định của tiết diện chịu tải trọng tổng quát.

Mô tả biến dạng võng của tấm thành phần bằng cách sử dụng chuỗi lũy thừa.

Định nghĩa Bộ phận tăng cứng có thể bao gồm nhiều tấm tăng cứng.

Sử dụng quy trình lặp để xác định độ cứng chống xoay cuối cùng.

Đã xét tới biến dạng uốn trong mặt phẳng của các tấm thành phần.

Giới thiệu khái niệm mới về “độ cứng âm”.

Kết quả kiểm chứng cho thấy RSM có sai số khoảng 2%, qua đó phản ánh độ chính xác và tiềm năng của RSM trong ứng dụng thực tế.

RSM đã được sử dụng trong Mục 3.2 để xây dựng bộ dữ liệu lớn về mô men uốn đàn hồi của các cấu kiện tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng, từ đó xây dựng nên công thức dạng đóng để xác định mô men uốn đàn hồi. So với các công thức đã được đề xuất trong các nghiên cứu trước đây, công thức mới có một số đặc điểm và ưu điểm sau:

Sự kết hợp của các công thức (3.79), (3.76), và (3.73) hình thành nên một hàm số rời rạc và là hạt nhân của công thức đề xuất, giúp phản ánh chính xác bản chất của sự phụ thuộc của hệ số mất ổn định vào tỷ lệ B/H ;

Các công thức (3.79), (3.76), và (3.73) có hình thức đơn giản. Đặc biệt, trong phạm vi tiết diện thông dụng, Công thức (3.76) được thể hiện dưới dạng hàm lũy thừa đơn giản;

Kết quả của biểu thức mới chính xác hơn. Trong phạm vi tiết diện thông dụng, Công thức (3.76) có độ tương đồng trung bình 1,011 và COV chỉ 1,1%;

Công thức đề xuất có thể áp dụng cho các tiết diện có tỷ lệ kích thước bao ngoài lớn hơn. Đoạn ba của công thức đề xuất, tức Công thức (3.73), có thể được sử dụng cho tiết diện mũ và tiết diện chữ C cánh rộng;

Ảnh hưởng của bán kính uốn đã được xem xét trong công thức đề xuất;

Ảnh hưởng của vật liệu đã được xem xét. Kết quả cho thấy có thể bỏ qua ảnh hưởng của vật liệu đối với ứng suất tới hạn.

Mặc dù phương pháp RSM đã chứng minh được tính hiệu quả, phương pháp này cũng có những hạn chế nhất định, bao gồm: i) không xét được góc cong do chế tạo; ii) không áp dụng được với các tiết diện kín, trừ các tiết diện kín có tính đối xứng

để có thể quy đổi về tiết diện hở tương đương; iii) chưa được nghiên cứu áp dụng cho các tiết diện có góc giữa các tấm thành phần không phải là góc vuông; iv) độ cứng k_V là độ cứng gần đúng nên vẫn còn gây ra sai số nhất định.

Trong chương tiếp theo, công thức mới đề xuất sẽ được sử dụng để tính toán giá trị mô men uốn đàn hồi, làm cơ sở để xây dựng công thức độ bền cho tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng.

CHƯƠNG 4. ĐỀ XUẤT CẢI TIẾN CÔNG THỨC XÁC ĐỊNH ĐỘ BỀN CỦA CẤU KIỆN THÉP CHỮ C TẠO HÌNH NGUỘI CHỊU UỐN QUANH TRỤC KHÔNG ĐỐI XỨNG VỚI BẢN BỤNG CHỊU NÉN

Như đã trình bày ở CHƯƠNG 1, công thức xác định độ bền uốn hiện hành còn nhiều bất cập khi áp dụng cho cấu kiện chịu uốn quanh trục không đối xứng. Nghiên cứu cải tiến đã được tiến hành cho một số loại tiết diện cụ thể. Đối với tiết diện chữ C, các nghiên cứu hiện có chưa phản ánh hiệu quả sự làm việc của loại tiết diện này. Do đó, CHƯƠNG 4 sẽ tiến hành nghiên cứu và đề xuất công thức hiệu chỉnh để nâng cao độ chính xác về khả năng dự đoán độ bền của cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén.

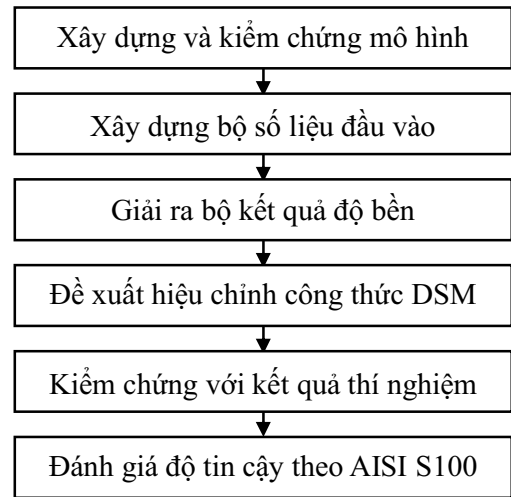
Mô men đàn hồi tới hạn là một bộ phận cấu thành của công thức xác định độ bền theo DSM. Công thức DSM đầu tiên được Schafer xây dựng dựa trên giá trị mô men tới hạn xác định từ phần mềm CUFSM. Tiêu chuẩn AISI S100 kiến nghị ưu tiên sử dụng các phương pháp số được để thu được kết quả chính xác hơn. Nghiên cứu độc lập trên bốn phần mềm, bao gồm ABAQUS áp dụng FEM, THIN-WALL-2, CUFSM 5 áp dụng FSM, GBTUL áp dụng GBT [165] cho thấy đối với bài toán xác định mô men tới hạn tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén, kết quả của các phần mềm tương tự nhau. Nghiên cứu trong CHƯƠNG 3 cho thấy phương pháp RSM cũng có độ chính xác cao trong bài toán mất ổn định đàn hồi nêu trên. Do vậy, phương pháp RSM sẽ được dùng để xác định mô men tới hạn trong quá trình xây dựng công thức độ bền tại chương này.

Các bước xây dựng công thức độ bền theo DSM bao gồm xây dựng và kiểm chứng mô hình tính, triển khai mô hình đã kiểm chứng trên bộ mẫu số liệu lớn, đề xuất công thức phù hợp với kết quả mô phỏng, kiểm chứng độ chính xác của công thức đề xuất với kết quả thí nghiệm và đánh giá độ tin cậy của công thức theo tiêu chuẩn AISI S100. Các nội dung này sẽ được trình bày trong phần tiếp theo.

Chương này áp dụng giả thiết cấu kiện thép chữ C được giằng giữ để không xuất hiện mất ổn định xoắn ngang. Giả thiết này phù hợp với thực tế sử dụng của dạng cấu kiện này và sẽ được giải thích cụ thể ở phần sau. Ứng suất dư được bỏ qua dựa trên nghiên cứu của Schafer và Peköz [137], cụ thể xem Mục 2.1.2(b).

4.1. Ứng dụng phương pháp phân tích phi tuyến để xác định độ bền

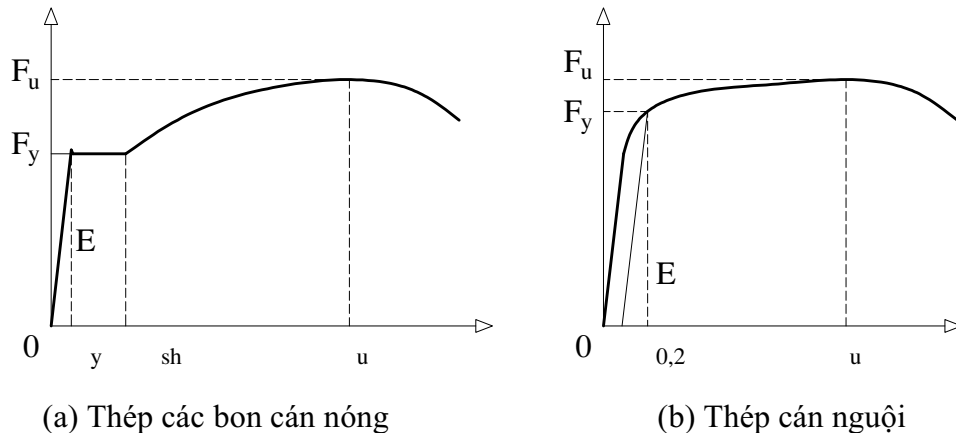
Phương pháp GMNIA (Phân tích phi tuyến tính hình học và vật liệu có xét đến các khiếm khuyết) được sử dụng phổ biến để xác định độ bền của các cấu kiện thép tạo hình nguội. Phương pháp này đã được kiểm chứng phù hợp với kết quả thực nghiệm. Trong nghiên cứu này, ABAQUS được sử dụng làm phần mềm mô phỏng. Đây là phần mềm có độ tin cậy cao và đã được áp dụng phổ biến cho các nghiên cứu lý thuyết. Quá trình xác định độ bền và đề xuất hiệu chỉnh công thức DSM hiện hành được thể hiện trên Hình 4.1.



Hình 4.1 Lưu đồ thực hiện

4.1.1. Mô hình vật liệu

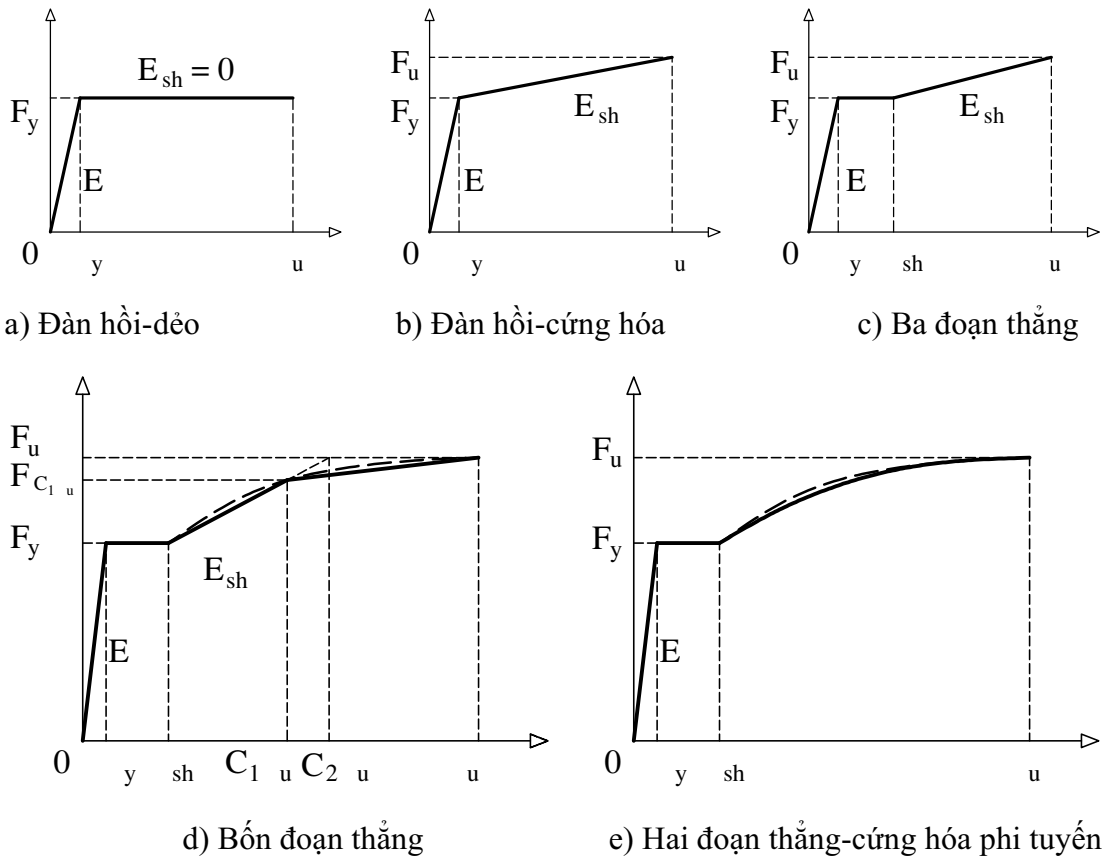
Vật liệu của kết cấu thép tạo hình nguội có thể là thép cán nóng hoặc thép cán nguội, như thể hiện trong Bảng 1.1. Cả hai loại vật liệu đều được sử dụng trong nghiên cứu này. Đường cong ứng suất-biến dạng điển hình của thép cán nóng và thép cán nguội chịu tải trọng tĩnh được minh họa trên Hình 4.2.



Hình 4.2 Đường cong ứng suất-biến dạng điển hình từ thí nghiệm

Nhiều mô hình vật liệu đã được đề xuất để ứng xử của thép cán nóng, trong đó các mô hình tuyến tính có thể được nhóm lại thành (1) mô hình hai đoạn

thẳng đàn hồi-dẻo, (2) mô hình hai đoạn thẳng đàn hồi-cứng hóa và (3) mô hình ba đoạn thẳng. Mô hình đàn hồi-dẻo được minh họa trong Hình 4.3a. Đây là mô hình đơn giản phù hợp với trường hợp không xét đến giai đoạn cứng hóa (ví dụ các cấu kiện có độ bền chi phối bởi hiện tượng mất ổn định) hoặc giai đoạn cứng hóa bị bỏ qua. Mô hình này chỉ sử dụng hai tham số vật liệu cơ bản (E và F_y). Mô hình đàn hồi-cứng hóa mô tả quá trình cứng hóa theo cách đơn giản nhất, như minh họa trong Hình 4.3b, trong đó E_{sh} là mô đun cứng hóa. Mô hình này cho phép xem xét ảnh hưởng có lợi của quá trình cứng hóa đến độ bền của cấu kiện kim loại, bao gồm thép các bon xây dựng, nhôm và thép không gỉ. Tuy nhiên, do không có thêm chảy, mô hình này ít phù hợp với thép các bon cán nóng.



Hình 4.3 Các mô hình vật liệu của thép các bon cán nóng

Ghi chú: Nét đứt thể hiện đường cong ứng suất-biến dạng thí nghiệm điển hình

Mức độ phức tạp tiếp theo là mô hình ba đoạn thẳng. Mô hình bao gồm cả thêm chảy và giai đoạn cứng hóa, như thể hiện trong Hình 4.3c. Tương tự như mô

hình đàn hồi-cứng hóa, mô hình ba đoạn thẳng giả định mô đun cứng hóa E_{sh} (sau thêm chảy) là hằng số, dẫn đến không mô tả chính xác ứng xử cứng hóa. Thực tế thí nghiệm cho thấy độ cứng giảm dần đến khi đạt đến giới hạn bền F_u , như thể hiện trong Hình 4.2a.

Yun và Gardner (2017) [186] đã đề xuất hai mô hình vật liệu cải tiến để biểu diễn giới hạn chảy và ứng xử cứng hóa của thép cán nóng. Mô hình đầu tiên là mô hình bốn đoạn thẳng như thể hiện trong Hình 4.3d. Mô hình này phù hợp với các phương pháp phân tích/thiết kế đơn giản có xét đến giai đoạn cứng hóa đồng thời cũng có thể cung cấp đầu vào chính xác cho các mô phỏng số. Mô hình thứ hai, tức là mô hình hai đoạn thẳng kết hợp với cứng hóa phi tuyến, như trong Hình 4.3e và Công thức (4.1), mô tả được đường cong cứng hóa của thép cán nóng và do đó phù hợp với các mô phỏng số yêu cầu sự giảm dần độ cứng tại giai đoạn cứng hóa phải được mô tả chính xác.

$$F_y = F_u - \frac{E}{F_y} \left(\frac{F_y}{F_u} \right)^{0,2} \quad (4.1)$$

với

$$r = 0,6 - 1 \frac{F_y}{F_u} - 0,06 \quad (4.2)$$

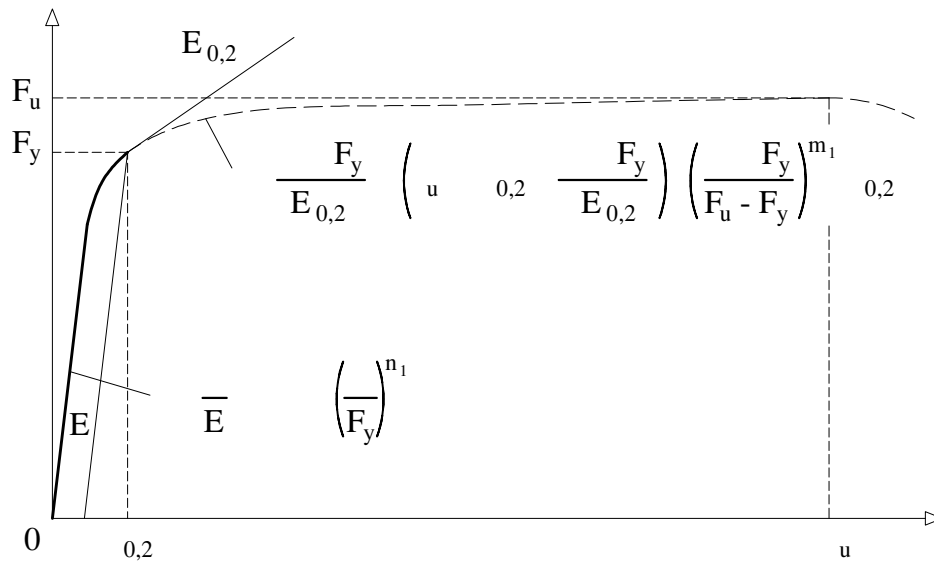
$$r = 0,1 \frac{F_y}{F_u} - 0,055, \quad r = 0,015 \quad (4.3)$$

và

$$r = \frac{sh}{u} \quad (4.4)$$

Mô hình Ramberg-Osgood [81][130] (phương trình đầu tiên trong Hình 4.4) được sử dụng rộng rãi để mô tả ứng suất-biến dạng phi tuyến của các vật liệu kim loại như thép không gỉ, nhôm và thép các bon cán nguội vượt quá biến dạng dẻo làm mất đi thêm chảy. Biểu thức Ramberg-Osgood yêu cầu mô đun đàn hồi E , giới hạn chảy quy ước $\sigma_{0,2}$ tương ứng với biến dạng 0,2% và hệ số mũ cứng hóa n_1 . Mô hình

Ramberg-Osgood đã được chứng minh là có khả năng mô tả chính xác đường cong ứng suất-biến dạng lên đến $\sigma_{0,2}$, nhưng thiếu chính xác ở phạm vi biến dạng cao hơn. Do đó, một số nghiên cứu đã được thực hiện nhằm cải thiện mô hình này ở vùng biến dạng lớn [74][125][131]. Mô hình Ramberg-Osgood hai đoạn cong cho CFS đã được Gardner và Yun [74] đề xuất. Kết quả của mô hình này khá sát với các đường cong ứng suất-biến dạng thực nghiệm và được sử dụng trong nghiên cứu của Oey và Papangelis để nghiên cứu độ bền của các cấu kiện thép tạo hình nguội chữ C uốn quanh trục không đối xứng. Mô hình này được giới thiệu trong 2.1.2 và trình bày trên Hình 4.4.



Hình 4.4 Đường cong ứng suất-biến dạng Ramberg-Osgood hai đoạn

Mô hình hai đoạn thẳng kết hợp cứng hóa phi tuyến và mô hình Ramberg-Osgood hai đoạn lần lượt thể hiện được hiệu quả đối với thép cán nóng và thép cán nguội. Các mô hình vật liệu này sẽ được sử dụng trong quá trình lập mô hình ở nội dung tiếp theo.

ABAQUS sử dụng ứng suất thực và biến dạng thực làm đầu vào của mô hình vật liệu dẻo (plastic). Dữ liệu thí nghiệm chỉ cung cấp các giá trị ứng suất và biến dạng danh nghĩa, do đó cần phải được chuyển đổi thành ứng suất và biến dạng thực trước khi sử dụng trong ABAQUS theo các công thức sau [156]

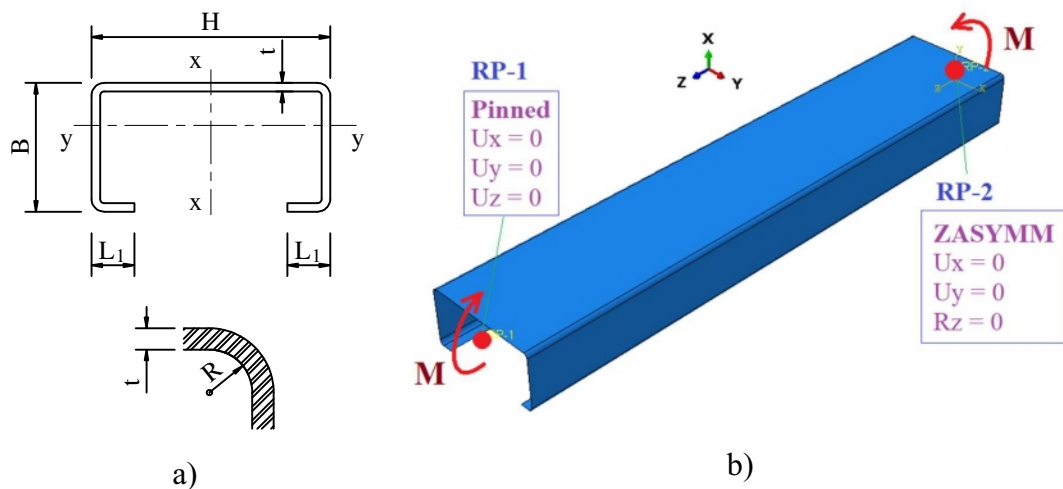
$$\frac{t_r}{t_r} \ln 1 = 1 \quad (4.5)$$

4.1.2. Kiểm khuyết hình học ban đầu

Cầu kiện thép tạo hình nguội đặc biệt mẫn cảm với các khiếm khuyết hình học sinh ra trong quá trình chế tạo. Việc xem xét khuyết tật hình học đảm bảo rằng ứng xử sau mất ổn định và độ bền của cầu kiện thép tạo hình nguội được thể hiện chính xác bởi mô phỏng số [142]. Phân tích ổn định đàn hồi tuyến tính được thực hiện trên hình dạng lý tưởng của cầu kiện để thu được các dạng mất ổn định và trị riêng tương ứng. Dạng mất ổn định chủ đạo, cũng chính là mất ổn định cục bộ của bản bụng, sẽ được sử dụng để biểu diễn sự phân bố của khiếm khuyết hình học dọc theo chiều dài của cầu kiện [182]. Hệ số tỷ lệ 0,66t (với t là bề dày thép tấm làm tiết diện) dựa trên giá trị khiếm khuyết lớn nhất theo nghiên cứu xác suất do Schafer và Peköz thực hiện [137] sẽ được nhân vào biên độ biến dạng của dạng mất ổn định chủ đạo và được sử dụng trong phần mô phỏng phi tuyến của bài toán xác định độ bền.

4.1.3. Xây dựng sơ đồ tính

Mô hình dầm đơn giản được sử dụng để nghiên cứu độ bền của các cầu kiện chữ C chịu uốn thuần túy quanh trục không đối xứng y - y , như thể hiện trong Hình 4.5.



Hình 4.5 Mô hình trong ABAQUS

a) Kích thước hình học b) Mô hình ABAQUS

Một đầu dầm được gán gối tựa khớp, đầu còn lại gán gối tựa ngàm trượt bằng cách sử dụng các tính năng “Rigid Body” (khối cứng) và “Reference Point” (điểm tham chiếu) của ABAQUS. Mô men tập trung xoay quanh trục không đối xứng $y-y$ được gán lên hai điểm tham chiếu theo chiều gây ra ứng suất nén trên bản bụng.

Ngôn ngữ lập trình Python tích hợp bên trong ABAQUS được sử dụng để tự động hóa quá trình tính toán, bao gồm công tác tạo dựng mô hình, giải bài toán độ bền và trích xuất kết quả.

4.1.4. Lựa chọn kiểu phần tử tính toán và chia lưới phần tử

Mô hình của cầu kiện được phân chia thành các phần tử tám S4R. Đây là phần tử tứ giác 4 nút sử dụng quan hệ ứng suất/chuyển vị với tích phân giản lược và công thức biến dạng lớn. Một nút của S4R chứa sáu bậc tự do. Kích thước lưới chia, $H/40$, đã được minh chứng là có đủ độ chính xác trong các bài toán cầu kiện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén [167]. Chiều dài cầu kiện được lấy bằng 5 lần chiều cao tiết diện dựa trên nghiên cứu của Oey và Papangelis [121]. Chiều dài này đã được chứng minh là thiên về an toàn [167].

4.1.5. Lựa chọn bộ mẫu số liệu dùng cho mô phỏng số

Thông số nghiên cứu cần mô tả được tiết diện trên một phạm vi rộng. Dựa trên tiêu chí đó, kích thước tiết diện và vật liệu thép đã được lựa chọn và liệt kê trong Bảng 4.1 đối với thép cán nguội và Bảng 4.2 đối với thép các bon cán nóng.

Đối với cầu kiện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng, tỷ lệ bề rộng trên chiều cao ($\mu_B = B/H$), hay còn gọi là tỷ lệ tiết diện, là yếu tố quan trọng nhất ảnh hưởng đến tính hiệu quả của tiết diện. Tỷ lệ này càng cao thì khả năng sử dụng vật liệu càng tối ưu. Do đó, tỷ lệ tiết diện từ 0,2 đến 2,5 đã được lựa chọn đủ để bao quát được toàn bộ kích thước tiết diện chữ C thông dụng. Cận trên 2,5 được lấy từ tỷ lệ tiết diện lớn nhất của tiết diện mũ [64][73][161]. Đây là loại tiết diện có ứng xử tương tự tiết diện chữ C bẻ móc khi chịu uốn quanh trục không đối xứng. Chiều cao của tiết diện được lấy theo tài liệu hướng dẫn của SFIA [147] và thay đổi trong phạm vi từ 100 mm đến 400 mm. Bề rộng bản cánh khi sử dụng chiều cao tiết diện trên kết hợp với $\mu_B = 2,5$ có thể lên đến 1000 mm. Đối với các mô hình sử dụng vật liệu thép cán nguội (Bảng 4.1), chiều dày tiết diện (t) dao động từ 0,8 mm đến 3,2 mm. Giá trị của chiều dày được lấy theo tài liệu của Lysaght cho tiết diện chữ C, Z, Supa C và Supa

Z [113][114] và tham khảo thêm tiết diện chữ C của SFIA. Theo hướng dẫn của SFIA, bán kính góc uốn (R) phụ thuộc vào chiều dày thép tấm và được lấy bằng 3, 4 và 5 mm tương ứng với độ dày nhỏ hơn 1,8, 2,7 và 3,5 mm. Tỷ lệ chiều dài móc trên chiều cao tiết diện (μ_L) được lấy từ 0,04 đến 0,18 cũng dựa trên hướng dẫn của SFIA. Phạm vi biến thiên của chiều dài móc không lớn và so với các thông số khác có ít ảnh hưởng hơn. Do vậy, giá trị μ_L trong mỗi mô hình sẽ được chọn ngẫu nhiên từ Bảng 4.1 để giảm tổng số mô hình cần xem xét. Chiều dài móc được kiểm soát để không vượt quá 0,7 lần bề rộng bản cánh. Như vậy, 1152 mô hình sẽ được tạo ra dựa trên phạm vi biến thiên được nêu trong Bảng 4.1.

Đối với thép cán nguội, mô đun đàn hồi (E) và hệ số Poát xông (ν) lần lượt là 200000 MPa và 0,3.

Bảng 4.1 Phạm vi tham số cho mô hình sử dụng vật liệu thép cán nguội

Tham số	Giá trị							
H (mm)	100	150	200	250	300	400		
t (mm)	0,8	1,0	1,2	1,5	1,9	2,4	3,0	3,2
$\mu_B = B/H$	0,2	0,5	1	1,5	2	2,5		
$\mu_L = L_l/H$	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18
F_y (MPa)	350	450	500	550				
F_u (MPa)	420	480	520	550				

Đối với các cấu kiện sử dụng thép cán nóng (Bảng 4.2), chiều dày tiết diện biến động từ 1,6 mm đến 3,2 mm, dày hơn so với thép cán nguội do vật liệu thép cán nóng có độ bền kéo thấp hơn. Giá trị của chiều dày được lấy theo hướng dẫn của Nippon Steel dành cho thép tấm và thép cuộn cán nóng [54].

Hai mác thép sẽ được xem xét, gồm ASTM A36 và ASTM A572 Gr 50. Phạm vi biến thiên của các thông số khác được lấy giống như của vật liệu thép cán nguội. Đối với thép cán nóng, mô đun đàn hồi $E = 210000$ MPa và hệ số Poát xông $\nu = 0,3$. Số lượng mô hình sử dụng thép cán nóng là 288 mô hình.

Bảng 4.2 Phạm vi tham số cho mô hình sử dụng vật liệu thép cán nóng

Tham số	Giá trị							
H (mm)	100	150	200	250	300	400		
t (mm)	1,6	2,0	2,6	3,2				
$\mu_B = B/H$	0,2	0,5	1	1,5	2	2,5		
$\mu_L = L_1/H$	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18
F_y (MPa)	250	345						
F_u (MPa)	400	450						

AISI S100-16 giới hạn khả năng áp dụng của phương pháp Cường độ trực tiếp bởi các điều kiện nêu trong Mục B4.1 và Bảng B4.1-1 của tiêu chuẩn. Đối với các cấu kiện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén, các giới hạn trên được tóm tắt trong Bảng 4.3, trong đó bản bụng được coi là phần tử tăng cứng chịu nén đều và bản cánh được coi là phần tử tăng cứng chịu ứng suất uốn.

Bảng 4.3 Giới hạn khả năng áp dụng của phương pháp Cường độ trực tiếp

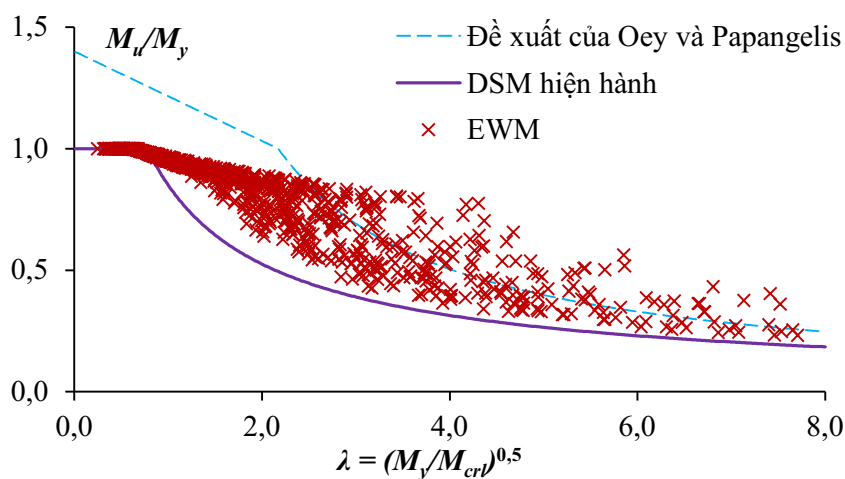
Tiêu chuẩn và mô hình	H_0/t	B_0/t	R/t	L_1/B	F_y
AISI S100	≤ 500	≤ 300	≤ 20	$\leq 0,7$	< 655 MPa
Mô hình sử dụng thép cán nóng	244	619	2,0	0,7	345
Mô hình sử dụng thép cán nguội	491	1241	3,8	0,7	550

Bảng 4.3 cũng liệt kê các giá trị lớn nhất của các tham số được áp dụng trong các mô hình sử dụng thép các bon cán nóng và thép cán nguội. Do bề rộng bản cánh biến đổi trong phạm vi khá rộng, một số mô hình có tỷ lệ giữa bề rộng bản cánh và chiều dày tiết diện vượt quá giới hạn của AISI S100. Kết quả của các mô hình này không gây ra bất lợi khi xây dựng công thức DSM mới. Ngược lại, sự tồn tại của các giá trị này sẽ giúp mở rộng cơ sở dữ liệu và do đó giúp xây dựng công thức dễ dàng hơn. Tuy nhiên, tại giai đoạn kế tiếp, tức giai đoạn kiểm chứng tính đúng đắn của các công thức hiệu chỉnh, các mô hình này sẽ bị loại bỏ để phù hợp với giới hạn đã nêu trong tiêu chuẩn.

4.1.6. Dùng phương pháp EWM để đánh giá công thức DSM hiện hành

Độ bền uốn theo phương pháp EWM của các tiết diện trong Mục 4.1.5 được tính toán dựa theo Mục F3.1 của tiêu chuẩn AISI S100 với sự trợ giúp của ngôn ngữ lập trình C#. Bề rộng hữu hiệu của mỗi phần tử của tiết diện được xác định theo Phụ lục 1 của tiêu chuẩn. Bản bụng được coi là phần tử gia cường chịu nén đều. Bản cánh của tiết diện chữ C không bẻ móc được coi là phần tử không gia cường chịu ứng suất biến thiên. Đối với bản cánh của tiết diện chữ C có bẻ móc chịu ứng suất tuyến tính, cạnh liên kết với móc được coi là gối đàn hồi và không có mô hình chính xác nào có thể áp dụng cho phần tử này. Do đó, mô hình gần đúng của phần tử gia cường biên chịu ứng suất biến thiên được áp dụng. Kết quả độ bền theo EWM được biểu diễn trên Hình 4.6.

Đường cong DSM hiện hành nằm dưới các điểm dữ liệu của EWM, chứng minh rằng công thức DSM là thiên về an toàn. Tuy nhiên, khi độ mảnh tiết diện lớn, công thức DSM trở nên quá dư thừa. Sự khác biệt giữa hai phương pháp được quan sát với giá trị lớn nhất là 2,6 lần. Điều đó tiếp tục khẳng định công thức DSM hiện hành cần được cải thiện khi áp dụng cho các cấu kiện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng.



Hình 4.6 Độ bền xác định bằng phương pháp EWM

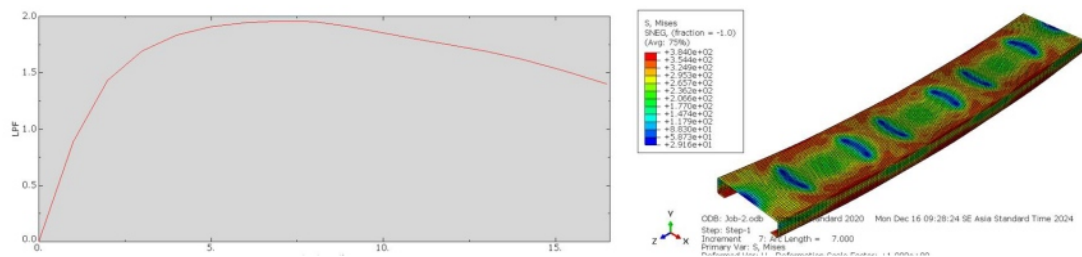
4.2. Kiểm chứng mô hình số

Trước khi chính thức xây dựng cơ sở dữ liệu độ bền, quy trình xây dựng mô hình tính sử dụng Python cần được kiểm chứng với các nghiên cứu hiện có để đảm bảo tính chính xác.

Hai bài toán, bao gồm bài toán về ổn định và độ bền, đã được mô phỏng trong ABAQUS dựa trên phương pháp của Oey và Papangelis [121] và được giải đồng thời để thu được mô men tới hạn đàn hồi M_{crl} và độ bền uốn M_u . Nghiên cứu của Oey và Papangelis gồm hai nội dung chính: i) lập mô hình tính trong TRAND7 và kiểm tra tính đúng đắn của mô hình; ii) mô phỏng 33 tiết diện và xây dựng mối quan hệ giữa độ bền và mô men tới hạn. Độ tin cậy của mô hình của Oey và Papangelis đã được kiểm chứng. Do đó, kết quả mô phỏng trong phần này sẽ được so sánh với kết quả mô phỏng của Oey và Papangelis để kiểm tra sự tương đồng giữa hai mô hình. Tuy nhiên, 33 kết quả về độ bền của Oey và Papangelis sẽ không được sử dụng ở mục 4.4 về xây dựng công thức độ bền của luận án do số lượng dữ liệu quá ít. Thay vào đó, dữ liệu mô phỏng của luận án trên bộ số liệu đầu vào mở rộng sẽ được sử dụng. Ngoài kiểm chứng độ tin cậy của mô hình với kết quả của Oey và Papangelis, độ tin cậy cũng sẽ được kiểm chứng thêm thông qua kết quả thực nghiệm.

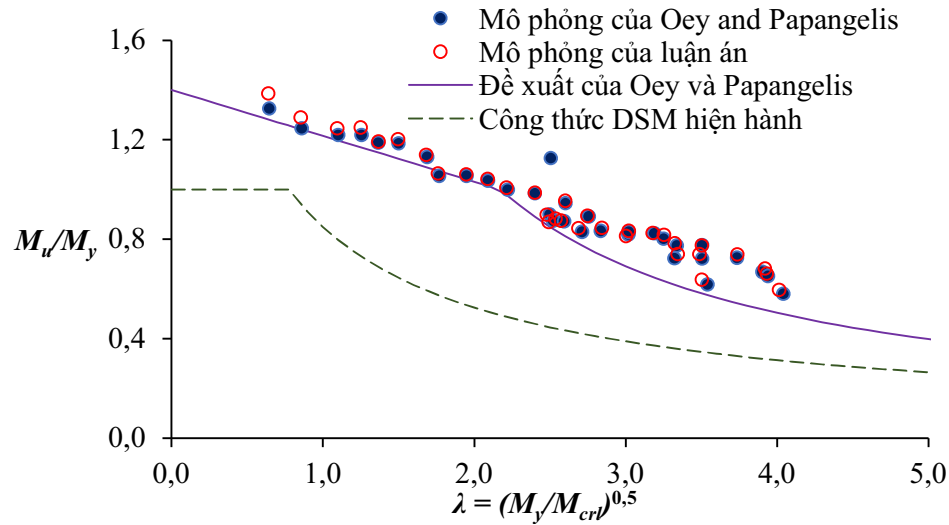
4.2.1. So sánh với kết quả của Oey và Papangelis

Đầu vào của các bài toán này được lấy từ nghiên cứu của Oey và Papangelis trên 33 tiết diện thép chữ C tạo hình nguội. Độ bền thu được từ đường cong độ bền như thể hiện trong Hình 4.7. Các kết quả thu được từ nghiên cứu của Oey và Papangelis và nghiên cứu trong luận án được hiển thị trong Hình 4.8.



Hình 4.7 Đường cong độ bền và phân bố ứng suất trong ABAQUS

Tất cả các điểm tương ứng với hai mô phỏng đều gần nhau ngoại trừ một điểm bất thường tại (2,506; 1,126) trong nghiên cứu của Oey và Papangelis. Sau khi loại bỏ điểm bất thường này, độ tương đồng giữa hai mô phỏng có giá trị trung bình là 1,014 và COV là 0,011, chứng tỏ rằng mô hình trong nghiên cứu này tương đồng với mô hình sử dụng trong nghiên cứu của Oey và Papangelis.



Hình 4.8 So sánh kết quả của ABAQUS với kết quả của Oey và Papangelis

4.2.2. So sánh với kết quả thực nghiệm

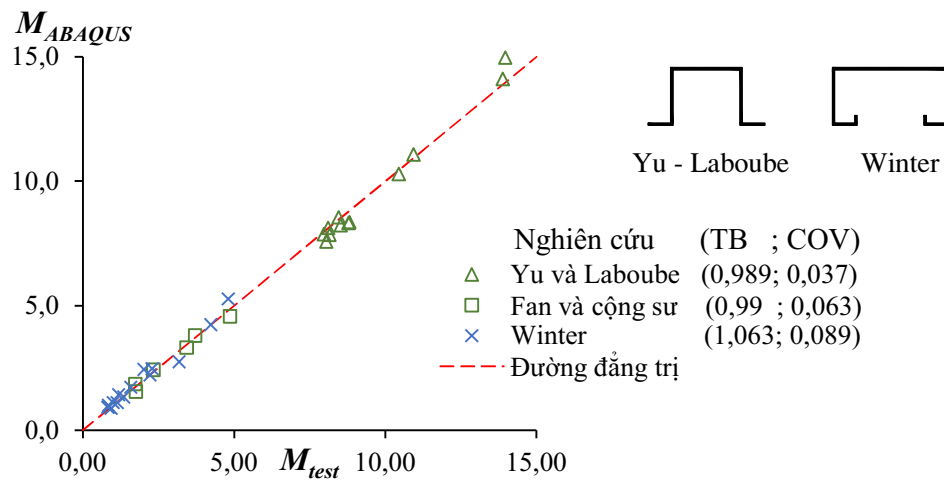
Ba kết quả thí nghiệm được sử dụng để kiểm chứng. Thí nghiệm đầu tiên được Yu và Laboube [185] tiến hành trên 12 tiết diện mũ sử dụng thép cán nóng, là loại tiết diện có ứng xử tương tự như tiết diện chữ C bẻ móc khi chịu uốn quanh trục không đối xứng. Có hai tỷ lệ tiết diện B/H trong thí nghiệm của Yu và Laboube là 0,5 và 1,0. Thí nghiệm thứ hai được Fan và cộng sự [70][71] tiến hành trên bốn tiết diện chữ C bẻ móc sử dụng thép không gỉ austenit S30408 (AISI304). Thép không gỉ sử dụng cùng một mô hình vật liệu Ramberg-Osgood hai giai đoạn [34] (Hình 4.4) tương tự như thép cán nguội, với hai thay đổi nhỏ trong biểu thức xác định hệ số tăng cứng m_1 và biến dạng khi đứt ε_u (xem Bảng 4.4). Do đó, thí nghiệm này phù hợp để tiến hành kiểm chứng. Tỷ lệ tiết diện B/H trong thí nghiệm của Fan và cộng sự biến thiên từ 0,2 đến 0,5.

Thí nghiệm thứ ba được thực hiện bởi Winter. Dữ liệu thí nghiệm được trích xuất từ các sơ đồ trong nghiên cứu của Schafer [138]. Tiết diện sử dụng trong thí nghiệm của Winter là chữ C có móc cong, với tỷ lệ B/H biến thiên từ 0,28 đến 0,57. Trường hợp chịu uốn quanh trục không đối xứng với phần bẻ móc chịu kéo, các tiết diện này ứng xử tương tự như tiết diện chữ C có móc phẳng. Mô phỏng trong ABAQUS đã được thực hiện trên hai bộ tiết diện. Bộ thứ nhất bao gồm các tiết diện chữ C bẻ móc cong của Winter. Bộ thứ hai bao gồm các tiết diện chữ C bẻ móc phẳng tương đương, trong đó chiều dài của móc phẳng bằng tổng chiều dài của móc cong.

So sánh kết quả mô phỏng cho thấy sự khác biệt về mô men tới hạn giữa hai bộ tiết diện này nhỏ hơn 2%, trong khi sự khác biệt về mô men cực đại là 3%. Do đó, kết quả thí nghiệm của Winter có thể được sử dụng để tiến hành kiểm chứng.

Bảng 4.4 Sự khác biệt giữa hai mô hình vật liệu

Tham số	Thép cán nguội	Thép không gỉ Austenit
m_1	1 $3,3 F_y / F_u$	1 $2,8 F_y / F_u$
ε_u	0,6 1 F_y / F_u	1 F_y / F_u



Hình 4.9 So sánh với kết quả thí nghiệm

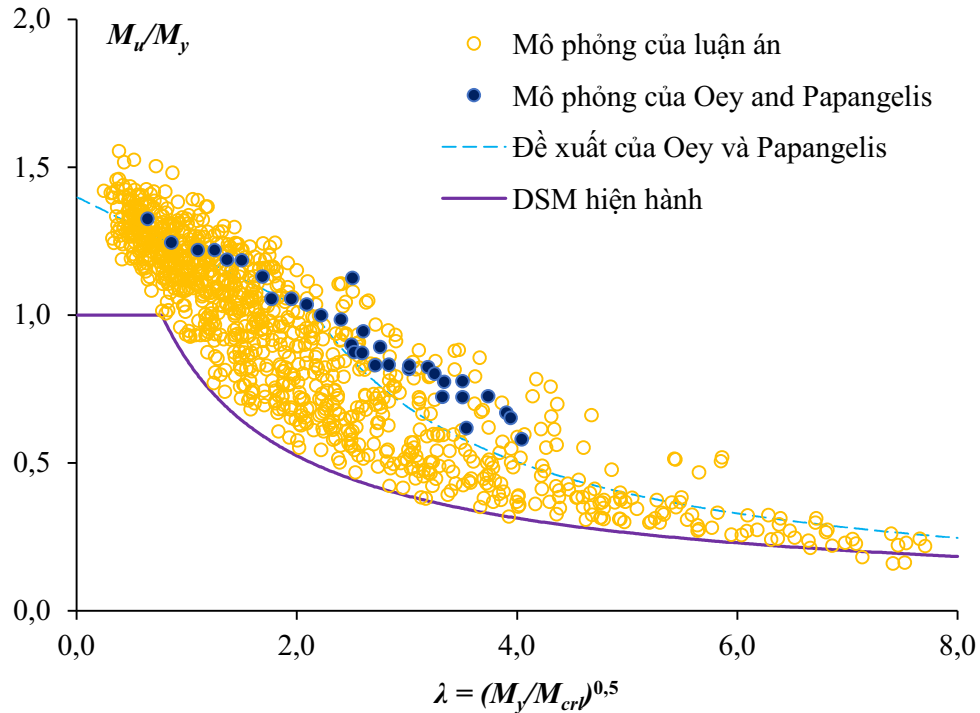
Kết quả so sánh giữa độ bền mô phỏng số và độ bền thực nghiệm được thể hiện trong Hình 4.9. Tất cả các điểm dữ liệu đều gần với đường đẳng trị, cho thấy kết quả mô phỏng phù hợp với kết quả thực nghiệm. Giá trị trung bình của tỷ số M_{ABAQUS}/M_{test} đối với các thí nghiệm Yu và Fan rất gần với 1, với COV là khoảng 6%. Đối với thí nghiệm Winter, kết quả mô phỏng cao hơn một chút so với kết quả thực nghiệm, với giá trị trung bình của tỷ số M_{ABAQUS}/M_{test} là 1,063. Độ tương đồng giữa M_{ABAQUS} và M_{test} phân tán hơn, với COV là 8,9%.

Kết quả so sánh chứng tỏ rằng mô hình trong nghiên cứu này là đáng tin cậy và có thể được sử dụng trong các nội dung tiếp theo.

4.3. Kết quả mô phỏng

Hình 4.10 hiển thị kết quả mô phỏng độ bền của ABAQUS. Kết quả bằng số được liệt kê trong Bảng C.2 của Phụ lục. Kết quả mô phỏng và đường cong độ bền

uốn đề xuất của Oey và Papangelis cũng được biểu diễn trong Hình 4.10 với mục đích so sánh.



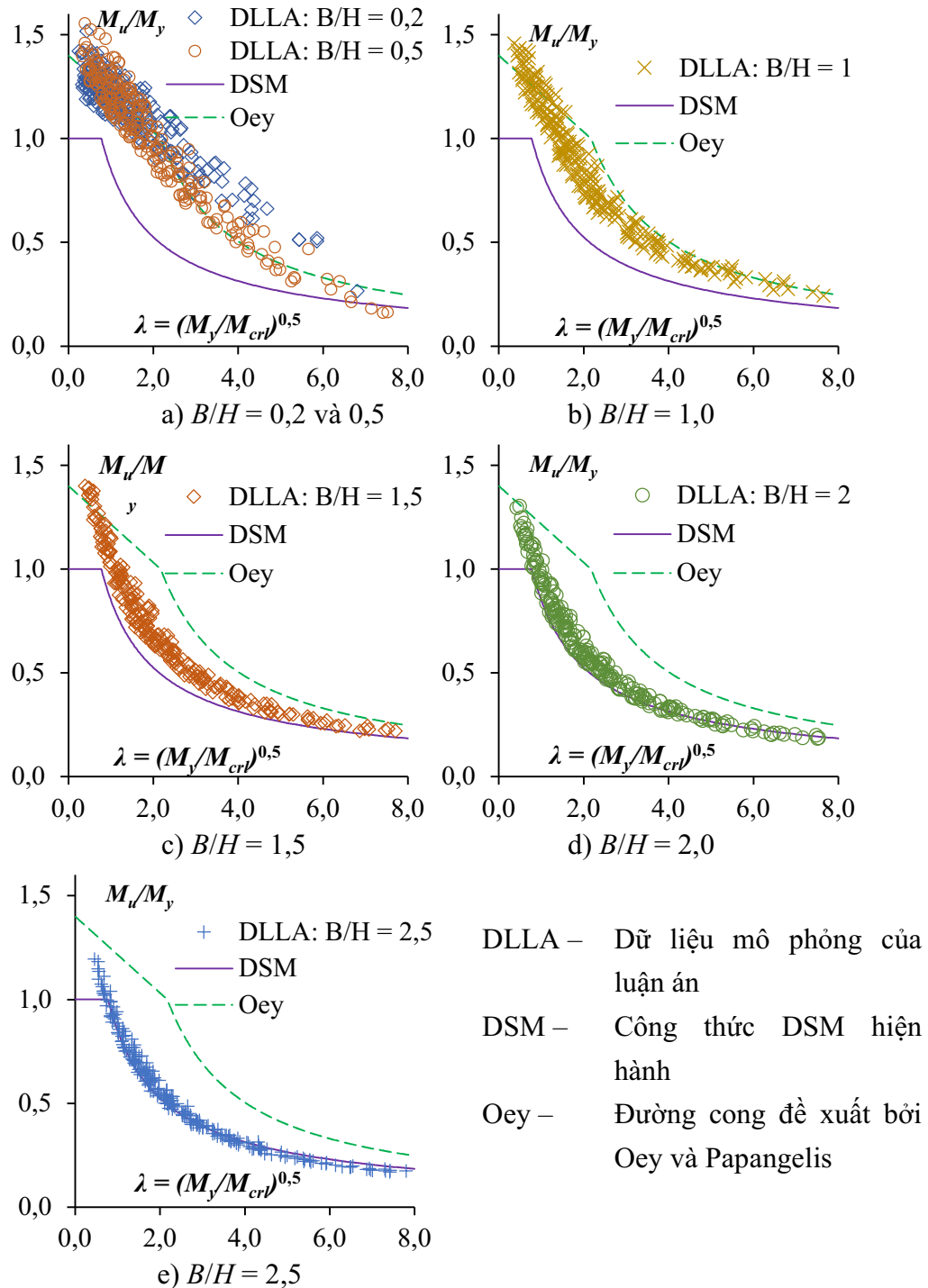
Hình 4.10 Kết quả mô phỏng độ bền của ABAQUS

Khi phạm vi biến thiên của các tham số hình học đầu vào được mở rộng, có thể thấy xuất hiện sự khác biệt lớn so với kết quả mô phỏng từ nghiên cứu của Oey và Papangelis. Dữ liệu mới phân tán hơn và trên tổng thể thấp hơn kết quả mô phỏng cũng như đường cong đề xuất của Oey và Papangelis. Tuy nhiên, đường cong DSM hiện hành vẫn thể hiện được độ tin cậy. Đường cong DSM hiện hành gần như nằm dưới tất cả dữ liệu mới và do đó thiên về an toàn.

4.4. Đề xuất cải tiến công thức tính toán cấu kiện thép tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén theo phương pháp DSM

4.4.1. Đánh giá kết quả mô phỏng

Kết quả mô phỏng được nhóm theo tỷ lệ tiết diện (B/H) và được thể hiện trên Hình 4.11. Đường cong DSM hiện hành và đường cong do Oey và Papangelis đề xuất cũng được thể hiện trong Hình 4.11 và được sử dụng làm đường cơ sở với mục đích so sánh.



Hình 4.11 Kết quả mô phỏng của ABAQUS phân nhóm theo B/H

Ngoại trừ Hình 4.11a, về cơ bản đường cong do Oey và Papangelis đề xuất và đường cong DSM hiện hành là các cận trên và cận dưới của dữ liệu mô phỏng, cho thấy công thức DSM thiên về an toàn trong khi công thức do Oey và Papangelis đề

xuất có xu hướng dự đoán độ bền cao hơn thực tế. Khi B/H tăng, độ bền giảm, các điểm dữ liệu hạ thấp dần, rời xa đường cong của Oey và Papangelis và tiệm cận đường cong DSM hiện hành tại $B/H = 2,5$. Các điểm dữ liệu ít bị phân tán hơn ở các giá trị B/H cao, đồng nghĩa với tính nhất quán cao hơn.

Đáng chú ý là mặc dù dữ liệu có sự phân tán khác nhau, dạng lũy thừa của công thức DSM hiện hành tiếp tục được quan sát thấy trong tất cả các đồ thị của Hình 4.11 với mọi tỷ lệ B/H . Do đó, các công thức độ bền uốn mới dưới hình thức của công thức DSM hiện hành có thể được đề xuất.

4.4.2. Đề xuất công thức dự đoán độ bền uốn

Công thức DSM hiện hành dùng để xác định độ bền uốn của cấu kiện thép tạo hình nguội là Công thức (2.2). Khi xét đến sức kháng dẻo, độ bền uốn có thể được xác định bằng cách nội suy giữa mô men đàn hồi (M_y) và mô men dẻo (M_p) dựa vào mô men mất ổn định xoắn ngang đàn hồi (M_{be}) theo hướng dẫn trong Mục 2.4.2 của AISI S100.

Các công thức độ bền mới được đề xuất dựa trên công thức DSM hiện hành, tức Công thức (2.2), xét đến sức kháng dẻo với một số điều chỉnh như sau

$$\text{Khi } \lambda_0 \leq M_u \leq 1 \quad / \quad \lambda_0 \leq M_p \leq 1 \quad / \quad \lambda_0 \leq M_y \leq 1$$

$$\text{Khi } \lambda_0 \leq M_u \leq C \quad \frac{M_{cr}}{M_y} \leq \frac{M_{cr}}{M_y} \leq \frac{M_{cr}}{M_y} \quad M_y \quad (4.6)$$

trong đó các hệ số λ_0 , C , và ψ là các hàm của tỷ lệ tiết diện B/H , được xác định bởi

$$\lambda_0 = 1,77 - 0,4 B/H$$

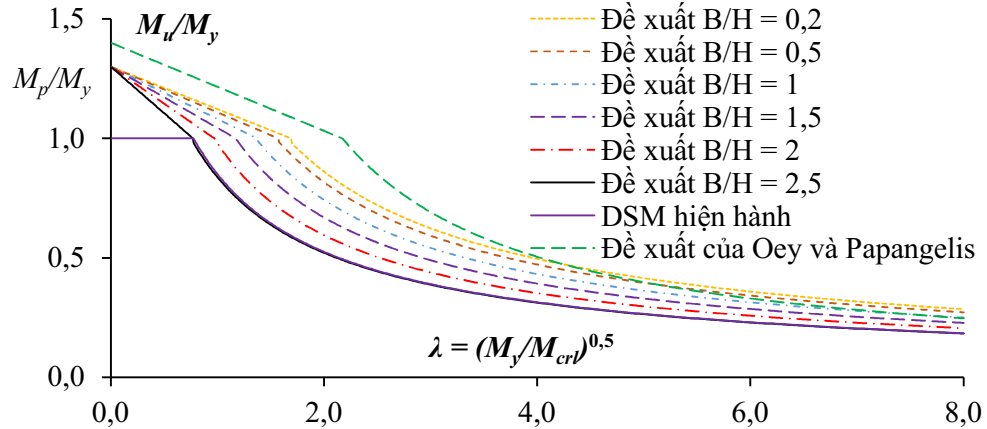
$$C = 1,55 - 0,22 B/H$$

$$0,065 B/H \quad (4.7)$$

và λ là độ mảnh của toàn bộ tiết diện được xác định theo Công thức (2.1).

Hình 4.12 hiển thị tập hợp các đường cong của Công thức (4.6) theo tỷ lệ tiết diện. Đoạn thẳng đầu tiên của mỗi đường cong tương ứng với sức kháng dẻo. Điểm bắt đầu của các đoạn thẳng thực tế không tập trung tại một điểm. Điểm này phụ thuộc vào giá trị của mô men dẻo và thay đổi theo từng tiết diện. Do đó, đoạn thẳng đầu tiên không tuyệt đối chính xác mà chỉ có tính chất biểu diễn (tuy nhiên, điểm cuối của đoạn thẳng là chính xác).

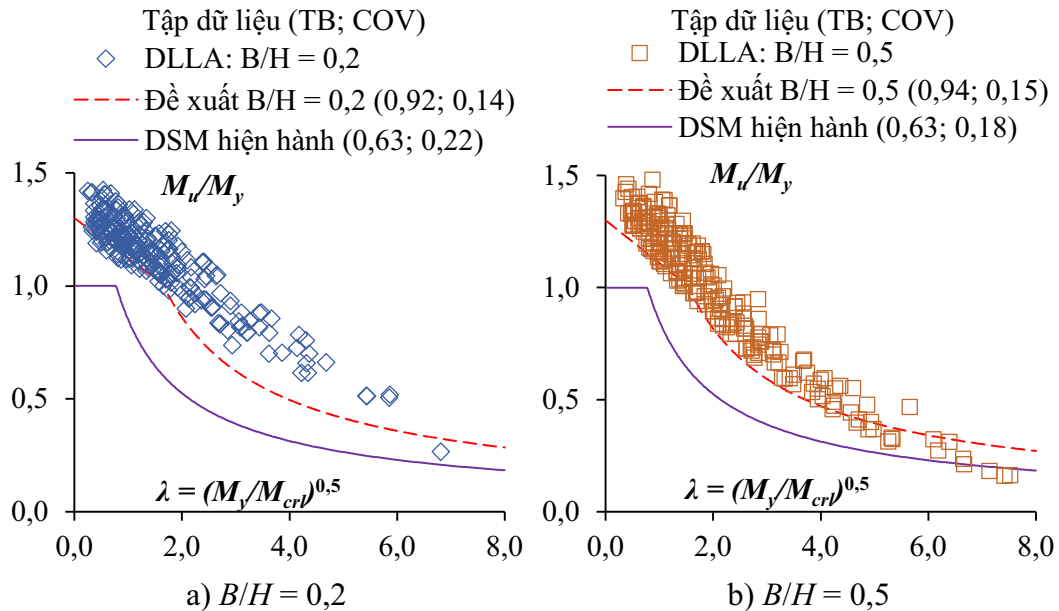
Công thức độ bền mới đề xuất nằm giữa đường cong do Oey và Papangelis đề xuất và đường cong DSM hiện hành. Khi $B/H = 2,5$, đoạn cong thứ hai của đường cong độ bền mới đề xuất trùng với đường cong DSM hiện hành.



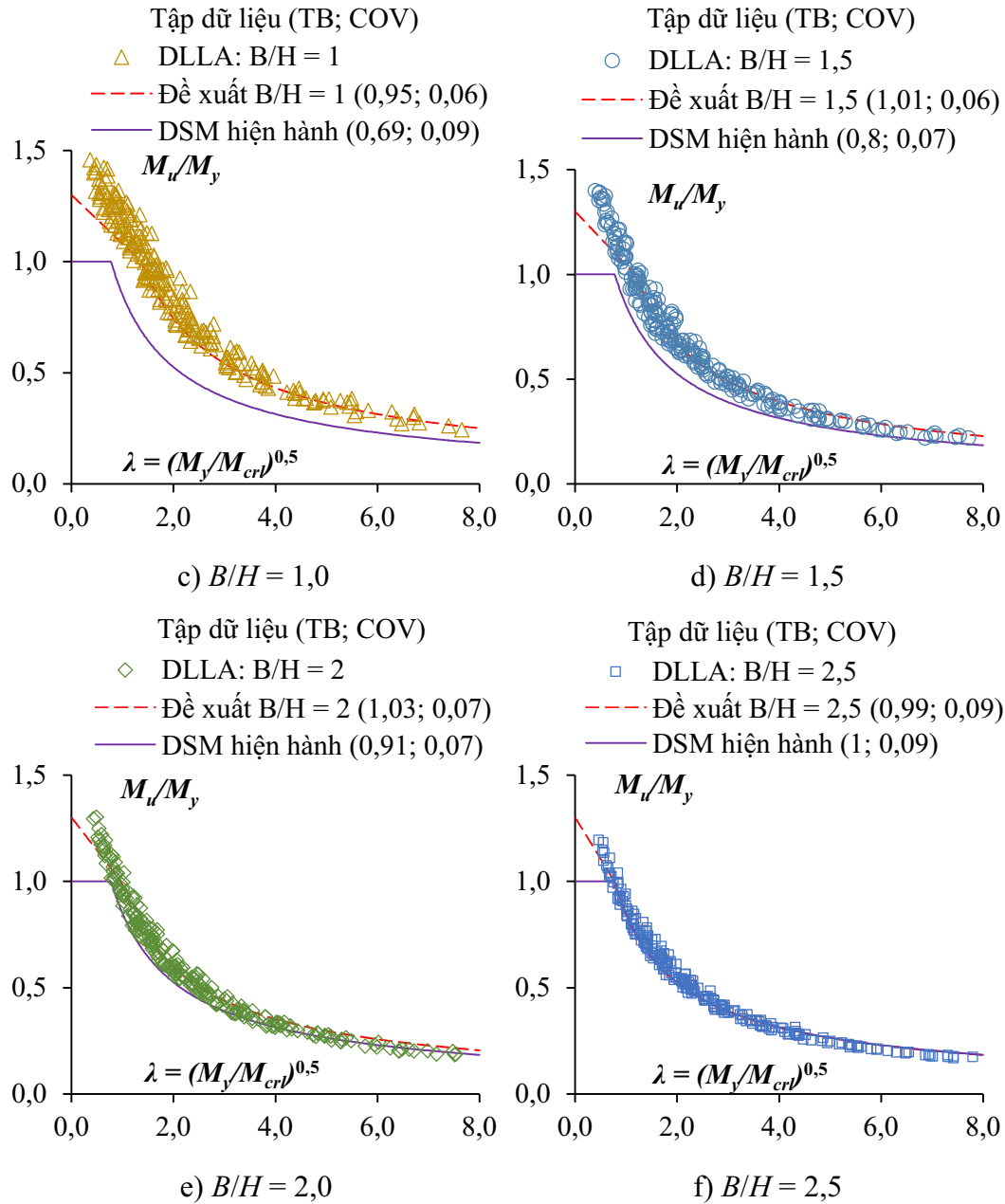
Hình 4.12 Đường cong độ bền đề xuất với từng tỷ lệ B/H

Đề xuất – Công thức (4.6) đề xuất trong luận án

Mối tương quan giữa công thức độ bền mới đề xuất và dữ liệu mô phỏng được thể hiện trong Hình 4.13 cho từng tỷ lệ tiết diện. Giá trị trung bình và COV của độ tương đồng giữa công thức DSM đề xuất và công thức DSM hiện hành với dữ liệu mô phỏng cũng được trình bày trong các biểu đồ này.



Hình 4.13 Đường cong độ bền đề xuất so với kết quả mô phỏng (Phần 1)



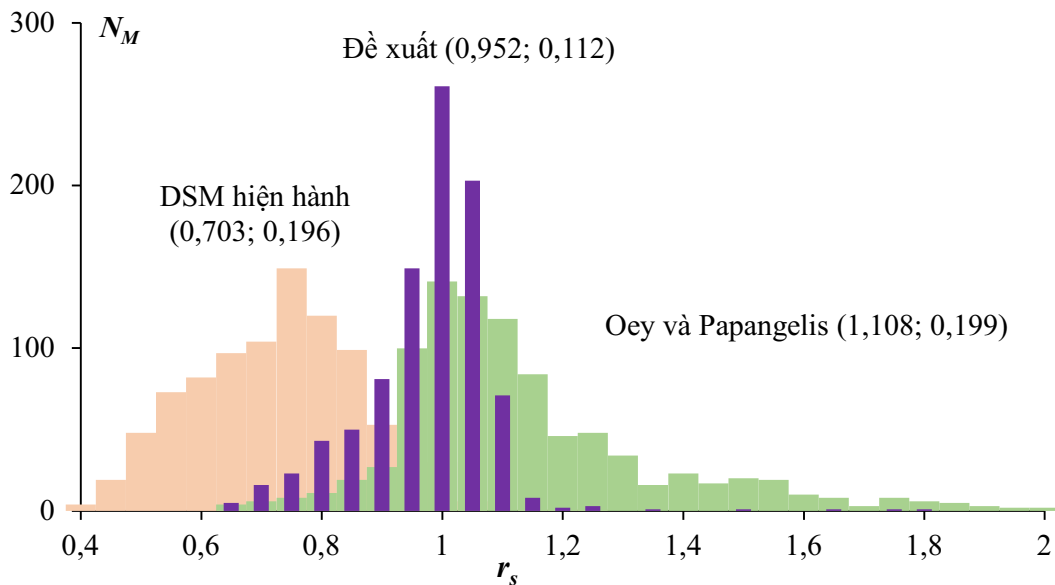
Hình 4.13 Đường cong độ bền đề xuất so với kết quả mô phỏng

Đề xuất – Công thức (4.6) đề xuất trong luận án

DLLA – Dữ liệu mô phỏng của luận án

Từ Hình 4.13 có thể thấy, các công thức đề xuất phù hợp với kết quả mô phỏng hơn công thức DSM hiện hành. Giá trị trung bình của độ tương đồng của công thức đề xuất gần với 1 hơn và COV nhỏ hơn so với công thức DSM hiện hành.

Hình 4.14 thể hiện phân phối xác suất của độ tương đồng (r_s) của các công thức DSM đề xuất, công thức của Oey và Papangelis, và công thức DSM hiện hành với dữ liệu mô phỏng, trong đó N_M là số lượng mô hình. Dữ liệu của các tiết diện có tỷ lệ B_0/t lớn hơn 300 (xem giới hạn đối với phương pháp DSM trong Bảng 4.3) sẽ bị loại bỏ để còn lại 920 mô hình. Có thể thấy rằng các công thức đề xuất phù hợp với dữ liệu mô phỏng. Độ tương đồng của các công thức đề xuất có giá trị trung bình là 0,95, lớn hơn nhiều so với 0,7 của công thức DSM hiện hành, với COV là 0,11, chỉ bằng một nửa của giá trị 0,2 của công thức DSM hiện hành và công thức của Oey và Papangelis. Trong tập dữ liệu mở rộng, công thức của Oey và Papangelis thiên về không an toàn với giá trị trung bình của độ tương đồng là 1,11. Độ bền tính theo công thức của Oey và Papangelis trong một số trường hợp có thể lớn gấp đôi giá trị mô phỏng số.



Hình 4.14 Phân phối xác suất của độ tương đồng của các công thức DSM đề xuất và hiện hành

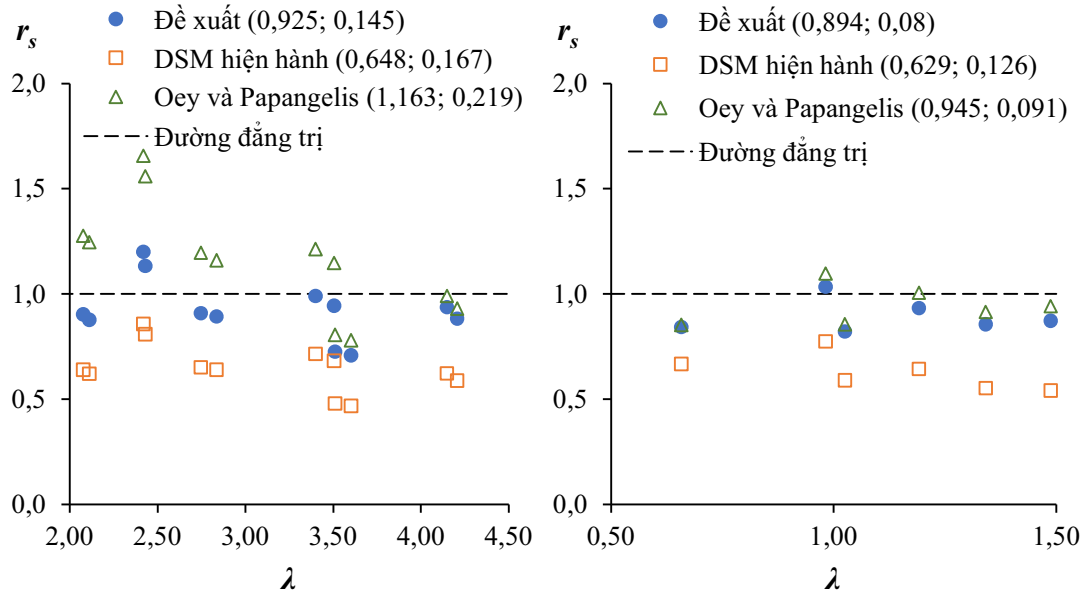
Mục 4.1.6 trình bày kết quả tính toán độ bền theo phương pháp EWM. Thống kê cho thấy độ tương đồng của phương pháp EWM với kết quả mô phỏng của luận án là 0,918, cao hơn nhiều so với công thức DSM hiện hành. Hệ số biến thiên của độ tương đồng là 0,185 tương đương với giá trị của công thức DSM hiện hành. Như vậy có thể đánh giá, đối với cấu kiện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản

bụng chịu nén, phương pháp EWM hiệu quả hơn phương pháp DSM hiện hành, nhưng không hiệu quả hơn so với công thức DSM đề xuất trong luận án.

4.5. Kiểm chứng công thức đề xuất

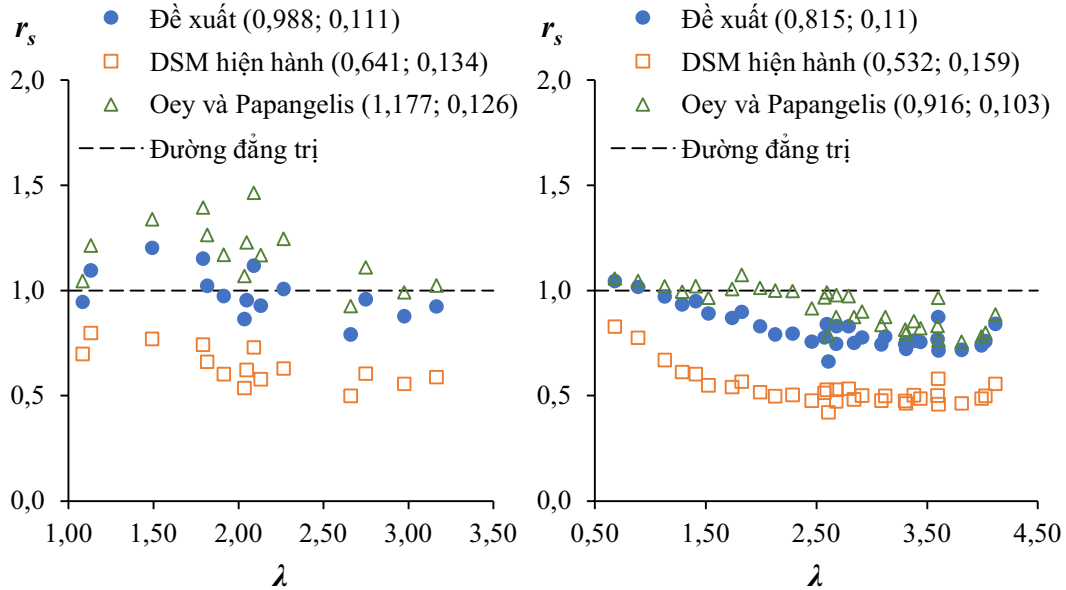
Công thức độ bền đề xuất được kiểm chứng với kết quả thí nghiệm của Winter, Yu và Laboube, và Fan và cộng sự. Độ tương đồng giữa độ bền được tính toán bằng công thức đề xuất trong luận án (4.6), công thức đề xuất bởi Oey và Papangelis (2.3) và công thức độ bền DSM hiện hành (2.2) so với các kết quả thực nghiệm được trình bày trong Hình 4.15a đến c.

Cả ba biểu đồ đều có những đặc điểm tương tự. Tập dữ liệu tương ứng với công thức độ bền được đề xuất trong luận án (4.6) nằm giữa các tập dữ liệu của Oey và Papangelis và công thức DSM hiện hành. Các điểm dữ liệu thấp nhất thuộc về công thức DSM hiện hành, với độ tương đồng trung bình nhỏ hơn 0,65, cho thấy công thức DSM hiện hành quá an toàn. Công thức (4.6) có độ chính xác cao hơn khi có độ tương đồng trung bình so với kết quả thực nghiệm lần lượt là 0,925, 0,894 và 0,988. Các giá trị trung bình này gần bằng nhưng nhỏ hơn 1,0, chứng tỏ Công thức (4.6) là đáng tin cậy và vẫn thiên về an toàn. Công thức độ bền do Oey và Papangelis đề xuất tính ra kết quả cao hơn thí nghiệm của Yu và Laboube và Winter, với giá trị độ tương đồng trung bình là 1,163 và 1,177. Tuy nhiên, công thức này phù hợp với kết quả thí nghiệm của Fan và cộng sự.



a) Với thí nghiệm của Yu và Laboube

b) Với thí nghiệm của Fan và cộng sự



c) Với thí nghiệm của Winter

d) Với mô phỏng của Oey và Papangelis

Hình 4.15 Kiểm chứng với kết quả thí nghiệm và mô phỏng số

Trong cả ba đồ thị, tập dữ liệu của Công thức (4.6) ít phân tán nhất so với tập dữ liệu của các công thức độ bền còn lại, từ đó tái khẳng định độ tin cậy của công thức độ bền mới.

Bảng 4.5 Tổng hợp kết quả kiểm chứng

Kiểu dữ liệu	Nghiên cứu	Số lượng	Kiểu tiết diện	Vật liệu thép	Đề xuất		DSM hiện hành		Oey	
					TB	COV	TB	COV	TB	COV
TN	Winter	15	C bề móc cong	Cán nóng	0,988	0,111	0,641	0,134	1,177	0,126
	Yu	12	Mũ	Cán nóng	0,925	0,145	0,648	0,167	1,163	0,219
	Fan	6	C bề móc	Thép không gỉ	0,894	0,080	0,629	0,126	0,945	0,091
	Tổng	33			0,948	0,127	0,641	0,146	1,130	0,183
MF	Oey	33	C bề móc	Cán nguội	0,815	0,110	0,532	0,159	0,916	0,103
	Luận án	920	C bề móc	Cán nguội	0,952	0,112	0,703	0,196	1,108	0,199
	Tổng	953			0,947	0,116	0,697	0,201	1,101	0,199
Toàn bộ		986			0,947	0,116	0,695	0,200	1,102	0,199

Ghi chú:

TN - Kết quả thực nghiệm, MF - Kết quả mô phỏng

Yu - Yu và Laboube, Fan - Fan và cộng sự, Oey - Oey và Papangelis

Luận án - Dữ liệu mô phỏng trong luận án (Hình 4.14)

So sánh giữa ba công thức độ bền thông qua dữ liệu mô phỏng của Oey và Papangelis cũng được trình bày trong Hình 4.15d. Có thể thấy công thức độ bền của Oey và Papangelis vẫn cho kết quả dự đoán tốt nhất trong tập dữ liệu này. Công thức (4.6) có độ chính xác khá cao, với độ tương đồng trung bình là 0,815.

Dữ liệu kiểm chứng được tóm tắt trong Bảng 4.5. 33 kết quả thí nghiệm và 953 kết quả mô phỏng chứng tỏ Công thức (4.6) có độ chính xác cao, với độ tương đồng trung bình là 0,947 và COV là 0,116. Nhìn chung, công thức đề xuất trong luận án dự đoán độ bền tốt hơn hai công thức còn lại.

Khả năng dự đoán độ bền của ba công thức trên, tức Công thức (4.6), (2.3) và (2.2), đối với các tỷ lệ tiết diện khác nhau đã được xem xét dựa trên kết quả thí nghiệm của Yu và Laboube và được trình bày trong Bảng 4.6.

Bảng 4.6 Khả năng dự đoán độ bền với tỷ lệ B/H khác nhau

B/H	Đề xuất	DSM hiện hành	Oey và Papangelis
	Ct. (4.6)	Ct. (2.2)	Ct. (2.3)
0,5	0,81	0,54	0,88
1	0,98	0,70	1,31

Ghi chú: Ct. – Công thức

Có thể thấy rằng công thức độ bền đề xuất trong luận án có khả năng dự đoán tốt hơn hai công thức còn lại đối với tỷ lệ tiết diện cao ($B/H = 1,0$) nhưng không vượt trội ở tỷ lệ B/H thấp.

Bảng 4.7 Kết quả tính toán độ bền khi dùng giá trị mô men tới hạn khác nhau

Công thức độ bền	Phương pháp tính mô men tới hạn	Winter		Yu và Laboube	
		TB	COV	TB	COV
Công thức của luận án (4.6)	CUFSM	0,988	0,111	0,925	0,145
	Ct. (3.87)	0,985	0,113	0,918	0,138
Công thức DSM hiện hành (2.2)	CUFSM	0,641	0,134	0,648	1,163
	Ct. (3.87)	0,638	0,134	0,643	0,16
Công thức của Oey và Papangelis (2.3)	CUFSM	1,177	0,126	0,167	0,219
	Ct. (3.87)	1,173	0,129	1,152	0,206

Công thức tính toán hệ số mất ổn định (3.87) đề xuất trong CHƯƠNG 3 được kiểm chứng một lần nữa thông qua độ tương đồng giữa độ bền thu được từ ba công thức nêu trên với kết quả thí nghiệm. Phần mềm CUFSM và Công thức (3.87) được sử dụng để xác định mô men tới hạn, từ đó tạo ra một cặp giá trị. Kết quả tính toán được liệt kê trong Bảng 4.7.

Các giá trị trong cùng một cặp đều xấp xỉ nhau, một lần nữa chứng minh độ tin cậy của Công thức (3.87) trong việc tính toán hệ số mất ổn định của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng.

4.6. Đánh giá độ tin cậy của công thức đề xuất

Quy trình trong Mục 2.1.2(c) được sử dụng để thực hiện phân tích độ tin cậy. Hệ số tương quan, C_c , giữa độ bền R_t và độ bền danh nghĩa R_n là 0,996 lớn hơn giá trị yêu cầu là 0,80, trong đó R_t lấy theo độ bền mô phỏng số còn R_n xác định theo

Công thức (4.6). Sau đó, Công thức (2.10) được sử dụng để xác định hệ số sức kháng ϕ . Mối quan hệ giữa hệ số sức kháng và chỉ số độ tin cậy (β) được thể hiện trong Hình 4.16 bằng cách sử dụng các giá trị sau

Hệ số hiệu chuẩn $C_\phi = 1,52$

Giá trị trung bình của hệ số vật liệu $M_m = 1,1$

Giá trị trung bình của hệ số chế tạo $F_m = 1$

Giá trị trung bình của hệ số thành thực $P_m = 1,065$

Hệ số biến thiên của hệ số vật liệu $V_M = 0,1$

Hệ số biến thiên của hệ số chế tạo $V_F = 0,05$

Số lượng mô phỏng $n_t = 920$

Số bậc tự do $m_f = 919$

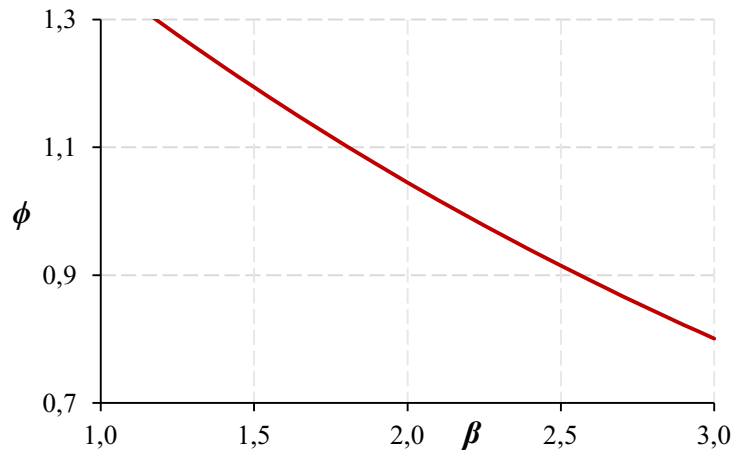
Hệ số hiệu chỉnh $C_P = 1,003$

Độ lệch chuẩn của $(R_{t,i}/R_{n,i})$ $s_c = 0,1271$

Hệ số biến thiên của kết quả mô phỏng $V_P = 0,1193$

Hệ số biến thiên của hệ quả của tác động $V_Q = 0,21$

Hệ số tương quan $C_c = 0,996$



Hình 4.16 Quan hệ giữa hệ số sức kháng và chỉ số độ tin cậy

Oey và Papangelis [121] đề xuất các giá trị của hệ số vật liệu M_m và các hệ số biến thiên tương ứng V_M và V_F tốt hơn tiêu chuẩn AISI S100 và lần lượt bằng 1,192, 0,031 và 0,01. Các giá trị này được nhà máy BlueScope Steel Australia cung cấp dựa trên 1207 thí nghiệm vật liệu thép G450, G500 và G550 với độ dày khác nhau. Mặc

dầu vậy, trong nghiên cứu này, giá trị gợi ý bởi Tiêu chuẩn AISI S100 như trình bày trong Bảng 2.1 được sử dụng, và cho kết quả đánh giá thiên về an toàn.

Hệ số sức kháng bằng 0,91 được xác định từ Hình 4.16 dựa vào chỉ số độ tin cậy mục tiêu $\beta_0 = 2,5$ đối với các cầu kiện chịu uốn (hệ số sức kháng bằng 1,05 khi sử dụng các giá trị do Oey và Papangelis đề xuất). Giá trị này lớn hơn giá trị 0,9, là hệ số sức kháng quy định trong tiêu chuẩn AISI S100 cho LRFD. Điều này có nghĩa rằng các công thức đề xuất có thể dự đoán được độ bền của các cầu kiện chịu uốn bằng cách sử dụng hệ số an toàn 0,9. Chỉ số độ tin cậy tương ứng với hệ số an toàn 0,9 là 2,55 và lớn hơn chỉ số độ tin cậy mục tiêu, qua đó khẳng định độ tin cậy của các công thức đề xuất.

4.7. Ví dụ áp dụng

Ví dụ sau minh họa ứng dụng của công thức độ bền đề xuất trong luận án.

Đề bài

Xác định độ bền của cầu kiện chữ C dẹt nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén. Cầu kiện được giằng ngang để ngăn mất ổn định tổng thể. Tiết diện của cầu kiện là C20015 của Lysaght. Đặc trưng vật liệu bao gồm: giới hạn chảy $F_y = 450$ MPa, mô đun đàn hồi $E = 200000$ MPa và hệ số Poát $\nu = 0,3$.

Lời giải

Tra bảng thông số hình học do Lysaght [114] cung cấp, với tiết diện C20015 ta có: $H = 203$ mm, $B = 76$ mm, $L_1 = 15,5$ mm, $t = 1,5$ mm, $R = 5$ mm. Mô men quán tính và mô men kháng uốn quanh trục không đối xứng lần lượt là $I_y = 396000$ mm⁴ và $Z_y = 7700$ mm³. Khoảng cách từ trọng tâm tiết diện đến mặt phẳng giữa của bản bụng $x_c = 19,9$ mm. Khi đó

$$\begin{array}{ll} B & \frac{B}{H} = \frac{76}{203} = 0,374 \quad t & \frac{t}{H} = \frac{1,5}{203} = 0,0074 \\ L & \frac{L_1}{H} = \frac{15,5}{203} = 0,0764 \quad R & \frac{R}{H} = \frac{5}{203} = 0,025 \end{array}$$

Mô men kháng uốn vùng nén tính đến mặt phẳng giữa của bản bụng

$$Z_{ycm} = \frac{I_y}{x_c} = \frac{396000}{19,9} = 19900 \text{ mm}^3$$

a) *Xác định mô men tới hạn*

Mô men tới hạn sẽ được xác định theo công thức đề xuất ở CHƯƠNG 3.

Hệ số C_R và C_v tính toán theo Công thức (3.83) đến (3.85).

$$C_R = 1 - 0,18 \sqrt{R} = 1 - 0,18 \sqrt{34,6} = 0,025$$

Vì $\mu_B < 0,5$

$$C_v = \frac{1}{1 + 0,3 \sqrt{0,3}} = 1,0$$

Tra Bảng 3.3, ta có

$$B_0 = 0,21 \sqrt{L} = 0,21 \sqrt{0,4} = 0,06$$

Vì $B_0 < B$

$$k_B = 5,45 \sqrt{B} = 5,45 \sqrt{0,05} = 5,725$$

Hệ số mất ổn định được xác định theo Công thức (3.87)

$$k^* = C_R C_v k_B = 1,0 \cdot 0,025 \cdot 5,725 = 5,822$$

Ứng suất tới hạn tại mặt phẳng trung bình của bản bụng được tính theo Công thức (3.86)

$$\sigma_{cr} = k^* \frac{E}{12(1-\nu^2)} \frac{t}{H^3} = 5,822 \cdot \frac{3,142^2 \cdot 200000}{12 \cdot 1 \cdot 0,3^2} \cdot \frac{1,5}{203} = 57,48 \text{ MPa}$$

Mô men tới hạn bằng

$$M_{cr} = \sigma_{cr} Z_{ycm} = 57,48 \cdot 19900 = 1,144 \cdot 10^6 \text{ N.m} = 1,144 \text{ kN.m}$$

Sử dụng phần mềm CUFSM [134] để xác định mô men tới hạn, hoặc tham khảo tài liệu [165], ta có $M_{cr} = 1,149 \text{ kN.m}$. Như vậy, giá trị trên có sai số là 0,4%.

b) *Xác định độ bền uốn*

Vì cầu kiện được giằng ngang để giữ ổn định, giá trị mô men đàn hồi, M_y , sẽ được sử dụng

$$M_y = F_y Z_y = 450 \cdot 7700 = 3465000 \text{ N.mm} = 3,465 \text{ kN.m}$$

Độ mảnh của tiết diện và giá trị giới hạn của độ mảnh bằng

$$\sqrt{\frac{M_y}{M_{crl}}} \sqrt{\frac{3,465}{1,144}} = 1,74$$

$$0 \quad 1,77 \quad 0,4B/H \quad 1,77 \quad 0,4 \quad 76/203 \quad 1,62$$

Vì $\lambda > \lambda_0$

$$C \quad 1,55 \quad 0,22B/H \quad 1,55 \quad 0,22 \quad 76/203 \quad 1,468$$

$$0,065B/H \quad 0,065 \quad 76/203 \quad 0,0243$$

Độ bền uốn của tiết diện C20015 quanh trục không đối xứng là

$$M_u = C \left(\frac{M_{crl}}{M_y} \right)^{0,4} \left(\frac{M_{crl}}{M_y} \right)^{0,4} M_y$$

$$1,468 \quad 0,0243 \quad \frac{1,144}{3,465}^{0,4} \quad \frac{1,144}{3,465}^{0,4} \quad 3,465 \quad 3,231kN.m$$

Có thể thấy rằng công thức hiệu chỉnh vẫn giữ được tính đơn giản của DSM khi so sánh với EWM. Lời giải sử dụng EWM với sự hỗ trợ của chương trình C# trong Mục 4.1.6 cho thấy cần sử dụng 32 công thức để hoàn thành bài toán. Tuy nhiên, bốn vòng lặp, mỗi vòng lặp liên quan đến 28 công thức, cuối cùng tạo ra 116 phép tính. Khối lượng công việc này lớn hơn đáng kể so với 22 phép tính tương ứng với 22 công thức ở trên. Đây chính là ưu điểm của công thức đề xuất trong luận án.

Lời giải EWM cho giá trị độ bền $M_u = 2,889 \text{ kN.m}$. Như vậy, kết quả tính theo công thức đề xuất cao hơn giá trị tính theo EWM, chênh lệch 11,8%.

4.8. Nhận xét chương

CHƯƠNG 4 đề xuất biểu thức DSM mới để tính toán độ bền của cầu kiện thành mỏng tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng nén. Oey và Papangelis đã chỉ ra sự an toàn quá mức của công thức DSM hiện hành khi áp dụng cho dạng cầu kiện này và đưa ra những cải tiến. Tuy nhiên, công thức đề xuất trong luận án mở rộng phạm vi áp dụng tới các kích thước tiết diện tổng quát hơn. Công thức đề xuất có một số ưu điểm sau:

Phù hợp cho nhiều loại vật liệu, bao gồm cả thép cán nguội và cán nóng; đồng thời đáp ứng tốt kết quả thí nghiệm sử dụng thép không gỉ.

Phù hợp với các tiết diện có tỷ lệ mặt cắt lên đến 2,5, nhờ đó có thể áp dụng cho tiết diện mũ và tiết diện chữ C cánh rộng trong tương lai.

Độ chính xác được cải thiện đáng kể. Độ tương đồng trung bình là 0,95 và hệ số biến thiên là 0,11. Cả hai giá trị này đều tốt hơn công thức DSM hiện hành (0,70 và 0,20) và biểu thức của Oey và Papangelis (1,11 và 0,20).

Kết hợp tỷ lệ tiết diện (B/H) vào công thức DSM, cho phép mô tả chính xác hơn ứng xử của cấu kiện chịu uốn quanh trục không đối xứng.

Công thức đề xuất có thể áp dụng để xác định độ bền uốn quanh trục không đối xứng cho xà gồ mái và xà gồ tường trong các kết cấu nhà xưởng như một phần của độ bền kết hợp. Công thức này cũng liên quan đến cột tiết diện chữ C chịu lực nén và uốn hai phương trong nhà nhiều tầng. Ngoài ra, công thức có thể được áp dụng cho dầm tiết diện mũ. Sự phát triển nhanh chóng của các tòa nhà nhiều tầng trên thế giới sử dụng kết cấu thép tạo hình nguội sẽ tạo điều kiện cho ứng dụng của dầm chữ C cánh rộng, một lĩnh vực mà công thức đề xuất sẽ có vai trò quan trọng.

Sự phụ thuộc của độ bền uốn quanh trục không đối xứng vào tỷ lệ kích thước tiết diện đã được quan sát gián tiếp trong các nghiên cứu trước đây, chẳng hạn như các nghiên cứu của Degtyarev [59] và Glauz [80]. Điều này cho thấy rằng tỷ lệ kích thước tiết diện có thể là một yếu tố quan trọng trong việc nghiên cứu độ bền của loại cấu kiện này.

Tiết diện mũ có ứng xử tương tự tiết diện chữ C khi chịu uốn quanh trục không đối xứng, vì thế các công thức xác định hệ số mất ổn định và độ bền đề xuất có thể áp dụng cho loại tiết diện này.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết luận

Nhận thấy những mặt hạn chế của công thức độ bền tính theo phương pháp DSM trong tiêu chuẩn AISI S100 khi áp dụng cho tiết diện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén, luận án đã tiến hành nghiên cứu để đề xuất cải tiến độ chính xác của công thức. Một phương pháp xác định hệ số mất ổn định cục bộ của toàn bộ tiết diện (phương pháp Độ cứng biên RSM) đã được xây dựng ở CHƯƠNG 3 kết hợp với công thức thực hành dạng đóng giúp tính toán mô men tới hạn của toàn bộ tiết diện, một trong những giá trị đầu vào cần thiết của công thức tính toán độ bền theo DSM. Phương pháp RSM được phát triển từ phương pháp Hệ số chống xoay của Bleich, với ba cải tiến chính, bao gồm: i) sử dụng hàm độ võng tổng quát dạng chuỗi lũy thừa thay cho các hàm cụ thể; ii) bổ sung độ cứng kháng uốn (k_v) trong mặt phẳng của các tấm thành phần; iii) đưa ra khái niệm “Bộ phận tăng cứng” có thể bao gồm nhiều bản tăng cứng và dùng quy trình lặp để tính toán độ cứng của bộ phận tăng cứng. Nhờ các cải tiến trên, phương pháp RSM đã được mở rộng cho các cấu kiện có tiết diện và hình thức chịu lực phức tạp, bao gồm cấu kiện tiết diện chữ C chịu uốn.

Mô men tới hạn của toàn bộ tiết diện đã được tính toán theo công thức thực hành được luận án đề xuất ở CHƯƠNG 3 dựa trên kết quả tính toán theo phương pháp RSM. Phân tích phần tử hữu hạn trong ABAQUS đã được sử dụng để tính toán độ bền của 1440 tiết diện sử dụng thép các bon cán nóng và thép cán nguội. Nhờ đó, mối quan hệ giữa độ bền và mô men tới hạn được đánh giá và các điều chỉnh cho công thức DSM hiện hành đã được đề xuất để nâng cao độ chính xác khi áp dụng cho các cấu kiện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén. Công thức DSM đề xuất đã được kiểm chứng với nhiều số liệu thí nghiệm và mô phỏng khác nhau.

Trong quá trình thực hiện, luận án đã thu được một số kết quả như sau:

Những đóng góp mới của luận án

1. Xây dựng phương pháp giải tích mới (RSM) để giải quyết bài toán mất ổn định đàn hồi cục bộ của toàn bộ tiết diện. Phương pháp RSM có thể áp dụng cho các tiết diện hở dạng bản thép gấp liên tục với sai số rất nhỏ, khoảng 2% so với các kết

quả giải tích và mô phỏng số bằng các phương pháp khác đã được công bố, mở đường cho việc áp dụng phương pháp giải tích cho các dạng tiết diện phức tạp chịu lực tổng quát trong thực tế.

2. Xây dựng công thức thực hành để xác định hệ số mất ổn định của cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén. Ưu điểm so với các công thức đã được đề xuất trước đây bao gồm: hình thức đơn giản hơn; độ chính xác cao hơn (sai số lớn nhất giảm khoảng 2 lần khi so sánh với công thức hiện có của Ding và Ahdab [63]); phạm vi ứng dụng rộng hơn; xét được nhiều yếu tố hơn; giảm sự phụ thuộc vào phần mềm chuyên dụng.

3. Đề xuất công thức độ bền mới theo DSM để áp dụng cho cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén. Công thức cải tiến thiết lập mối quan hệ của độ bền với tỷ lệ tiết diện B/H , nhờ đó đạt được độ chính xác cao hơn đáng kể (tăng 1,36 lần) so với công thức DSM hiện hành.

Hướng nghiên cứu tiếp theo của luận án

Mở rộng công thức DSM đề xuất cho các dạng hình học và vật liệu khác, trong đó bao gồm các hợp kim.

Mở rộng công thức DSM đề xuất cho cấu kiện thép chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu kéo. Sự phát triển độ bền của trường hợp chịu lực này khác với trường hợp bản bụng chịu nén do mất ổn định méo là dạng mất ổn định chủ đạo.

Kiến nghị

Nghiên cứu trong luận án cũng như nhiều nghiên cứu khác đã chỉ ra rằng công thức DSM hiện hành còn tồn tại bất cập khi áp dụng cho cấu kiện chịu uốn quanh trục không đối xứng. Do đó, đơn vị biên soạn tiêu chuẩn có thể xem xét các đề xuất của luận án để cải thiện độ chính xác của công thức DSM hiện hành.

Ngoài ra, đề xuất của luận án về công thức độ bền trong luận án cho tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục bất đối xứng đã được kiểm chứng với các dữ liệu thí nghiệm cũng như một lượng lớn số liệu mô phỏng, vì vậy có đủ độ tin cậy để các kỹ sư kết cấu và các nhà thiết kế áp dụng cho kết cấu thép tạo hình nguội trong thực tế.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham, *Enhanced strength prediction of cold-formed lipped channels bent about asymmetrical axis*, Journal of Constructional Steel Research, 2025, Vol. 236. Elsevier B.V. ISSN 0143-974X. **SCIE Q1**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109941>
2. 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. Elsevier B.V. ISSN 0143-974X. **SCIE Q1**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109647>
3. 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. Elsevier B.V. ISSN 2590-1230. **ESCI Q1**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104935>
4. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham, *Global Buckling Strength of Girts with Inner Flange in Compression*. Civil Engineering Journal, 2024. Vol. 10. Salehan Institute of Higher Education. ISSN 2676-6957. **Scopus Q1**. DOI: <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-11-05>
5. 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. ASV Publishing House. ISSN 2587-9618. **Scopus Q3**. DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-4-23-30>
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 Nature. ISSN 2366-2557. **Scopus**. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-0399-9_62

7. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham. *Calculation Guide of Cold-Formed Channel Girts by AISI S100 Using DSM Analytical Solution*. in *Proceedings of the 7th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering and Structures, CIGOS 2024*. 2024. Ho Chi Minh City, Vietnam. Springer Nature. ISSN 2366-2557. **Scopus**. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1972-3_20
8. 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 *7th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering and Structures, CIGOS 2024*. 2024. Ho Chi Minh City, Vietnam. Springer Nature. ISSN 2366-2557. **Scopus**. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1972-3_18
9. Vu, H.H. *Accurate model for simply supported plates*. In *XXVII International Scientific Conference on Advance in Civil Engineering “Construction the Formation of Living Environment” (FORM-2024)*. 2024. E3S Web of Conferences. ISSN 2267-1242. **Scopus**. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453303002>
10. Hoàng V.H. *Kiểm tra độ bền uốn kết hợp của thép tạo hình nguội theo tiêu chuẩn AISI S100 (AISI S100 to check cold-formed flexural members for biaxial bending strength)*. Tạp chí xây dựng. 2024. Số 4. ISSN 2734-9888.
11. Hoàng, V.H., N.T.T. Hương. *Độ bền của cấu kiện chữ C tạo hình nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng theo các phương pháp của Tiêu chuẩn AISI S100 (Ultimate strength of flexural cold-formed channel members subjected to asymmetrical axis bending using AISI S100 methods)*. Tạp chí xây dựng. 2025. Số 11. ISSN 2734-9888.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

1. Anh, V.Q. (2022), *Kết cấu thép tạo hình nguội (Cold-formed structure)*, Nhà xuất bản Xây dựng.
2. Kiên, Đ.Đ. (2022), *Thiết kế kết cấu thép thành mỏng tạo hình nguội (Cold-formed structure design)*, Nhà xuất bản xây dựng.
3. Lê, A.T. (2010), *Ổn định cục bộ thép hộp và ứng dụng tính toán dàn thép ống*, Master, Trường đại học xây dựng, (in English: T.A Le, Local buckling of RHS and the application to RHS truss, Hanoi University of Civil Engineering).
4. Quốc, C.Đ.T. and B.H. Cường (2024), "Công thức xác định ứng suất ổn định cục bộ của thép hộp chữ nhật chịu nén đúng tâm (Formulas determining the local critical stress of rectangular hollow sections under axial compression)", *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng, ĐHXDHN*, (Vol. 18 (4V)), 73-83.
5. Quốc, C.Đ.T. and B.H. Cường (2024), "Nghiên cứu 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)", *Tạp chí khoa học công nghệ xây dựng - Viện khoa học công nghệ xây dựng (IBST)*, (Vol. 2).
6. Sơn, N.H. (2021), *Kết cấu thép tạo hình nguội thiết kế theo tiêu chuẩn Châu Âu (Cold-formed structure design to Eurocode)*, Nhà xuất bản Xây dựng.

Tiếng nước ngoài

Tiếng Anh

7. *Cold-formed member type. Beams and Columns*. [cited 2024 Aug. 28]; Available from: <https://www.mcelroymetal.com/cold-formed-steel-buildings>.
8. *Cold-formed member type. Composite slab*. [cited 2024 Aug. 28]; Available from: <https://xaydung329.com/vi/cai-tao-nha-xuong>.

9. *Cold-formed member type. Girt and wall panel.* [cited 2024 Aug. 28]; Available from: <https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRKYQ8rCz-oWRQylMr8btk-7l-29wz4RRqDntHelsj3tChnjZz->.
10. *Cold-formed member type. Purlin and roof desk.* [cited 2024 Aug. 28]; Available from: <https://in.onduline.com/en/homeowner/roofing-products/roof-support/onduline-lightweight-purlins>.
11. *Cold-formed structure. Low-rise building frame.* [cited 2024 Aug. 28]; Available from: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/stud-wall>.
12. *Cold-formed structure. Storage rack.* [cited 2024 Aug. 28]; Available from: <https://tongkhogiake.com/cap-nhat-mau-va-bang-gia-ke-pallet-moi-nhat-2023>.
13. *Cold-formed structure. Strusses.* [cited 2024 Aug. 28]; Available from: <https://www.kcse.com/analyzing-cold-formed-steel-roof-trusses-for-blast-loading/>.
14. *Cold-formed structure. Warehouse frame.* [cited 2024 Aug. 28]; Available from: <https://es.pinterest.com/pin/827958712724462034/>.
15. *Forming machine. Bending break.* [cited 2024 Aug. 28]; Available from: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=nq7L6ebTG60>.
16. *Forming machine. Press break.* [cited 2024 Aug. 28]; Available from: <https://alyfabrication.com/spotlight-on-our-specialties-exploring-recuperators-canal-bundles-gas-coolers-and-preheaters-at-aly-fabrication/>.
17. *Forming machine. Roll-forming.* [cited 2024 Aug. 28]; Available from: <https://www.roofingsheetrollformingmachine.com/sale-10788007-notch-punching-steel-door-frame-roll-forming-machine-with-45-degree-cut.html>.
18. *Thesis's subject application. Channel girt.* [cited 2025 July, 10]; Available from: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/42/C_section_girts_bolted_to_plate_cleats_welded_to_a_portal_column.jpg.

19. *Thesis's subject application. Channel purlin.* [cited 2024 July, 10]; Available from: https://frisomat.com/app/uploads/2023/06/Frisomat-cold-formed-steel-industrial-buildings_3.jpg.
20. *Thesis's subject application. Top hat girt.* [cited 2025 July, 10]; Available from: <https://www.rollforming.co.nz/asset/312.jpeg>.
21. *Thesis's subject application. Top hat purlin.* [cited 2025 July, 10]; Available from: <https://www.rollforming.co.nz/asset/302.jpeg>.
22. , *THIN-WALL-2 specification*, University of Sydney.
23. Acharya, V.V. (1997), *Cold Formed Steel Hat Sections in Bending with Multiple Intermediate Longitudinal Stiffeners*, Master's Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada, .
24. Acharya, V.V. and R.M. Schuster (1998), "Bending Tests of Hat Sections with Multiple Longitudinal Stiffeners", in *14th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, University of Missouri-Rolla.
25. Ádány, S. and B.W. Schafer (2008), "A full modal decomposition of thin-walled, single branched open cross-section members via the constrained finite strip method", *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, (Vol. 64 (1)), 12-29.
26. Ahdab, M.D., et al. (2022), "Local buckling expressions for lipped channels", in *Annual Stability Conference Structural Stability Research Council*, Denver, Colorado.
27. AISI (2010), *ANSI/AISC 360-10, Specification for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction.
28. AISI (1996), *AISI S100 Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members - 1996 Edition*.
29. AISI (2006), *Direct Strength Method (DSM) Design Guide, Design Guide 06-1*, American Iron and Steel Institute, Washington, DC.
30. AISI (2013), *Cold-Formed Steel Design Manual*, American Iron and Steel Institute, Washington, DC.

31. AISI (2016), *AISI S100-16 North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 2016 Edition*, American Iron and Steel Institute.
32. AISI (2016), *Commentary on North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*, American Iron and Steel Institute.
33. Allen, H.G. and P.S. Bulson (1980), *Background to Buckling*, McGraw-Hill Book Company.
34. Arrayago, I., E. Real, and L. Gardner (2015), "Description of stress–strain curves for stainless steel alloys", *Materials & Design*, (Vol. 87), 540-552.
35. ASTM (1998), *ASTM A 36/A 36M - 97a Standard Specification for Carbon Structural Steel*, ASTM International.
36. ASTM (2007), *ASTM A 572/A 572M – 07 Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel*, ASTM International.
37. Basaglia, C. and D. Camotim (2013), "Enhanced Generalised Beam Theory Buckling Formulation to Handle Transverse Load Application Effects", *International Journal of Solids and Structures*, (Vol. 50(3-4)), 531-547.
38. Baur, S.W. and R.A. LaBoube (2001), "Behavior of complex hat shape cold-formed steel members", in *Proceedings of Structural Stability Research Council*, Ft. Lauderdale, FL, 403-417.
39. Bebiano, R., N. Silvestre, and D. Camotim (2007), "GBT Formulation to Analyze the Buckling Behavior of Thin-Walled Members Subjected to Non-Uniform Bending", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, (Vol. 7(1)), 23-54.
40. Bebiano, R., N. Silvestre, and D. Camotim (2010), *GBT User manual*, Technical University of Lisbon.
41. Bebiano, R., D. Camotim, and R. Gonçalves (2014), "GBTUL 2.0 – A New/Improved Version of the GBT-Based Code for the Buckling Analysis of Cold-Formed Steel Members", in *Proceedings of the 22nd International*

- Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures (St. Louis, 5-6/11)*, Missouri University of Science and Technology, 1-19.
42. Bebiano, R., R. Gonçalves, and D. Camotim (2015), "A Cross-Section Analysis Procedure to Rationalise and Automate the Performance of GBT-Based Structural Analyses", *ThinWalled Structures*, (Vol. 92), 29-47.
 43. Bernard, E.S. (1993), *Flexural Behavior of Cold-Formed Profiled Steel Decking*, Ph.D. Thesis, University of Sydney, Australia.
 44. Bleich, F. (1952), *Buckling Strength of Metal Structures*, McGraw-Hill, New York.
 45. Bulson, P.S. (1970), *The Stability of Flat Plates*, Chatto and Windus, London.
 46. Bureau, A., et al. (2022), "Revision of EN 1993-1-1 – Design rules for structural analysis, cross-sectional resistance and member buckling", *Steel Construction*, (Vol.15), (4).
 47. Camotim, D., et al. (2008), "GBT-Based Buckling Analysis of Thin-Walled Members with Non-Standard Support Conditions", *Thin-Walled Structures*, (Vol. 46(7-9)), 800-815.
 48. CEN (2024), *EN 1993-1-3 Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*.
 49. Chajes, A. (1974), *Principles of Structural Stability*, Prentice Hall College Div, Englewood Cliffs, NJ.
 50. Cheung, Y.K. and L.G. Tham (1998), *Finite Strip Method*, CRC Press.
 51. Chilver, A.H. (1953), "A Generalised Approach to the Local Instability of Certain Thin-Walled Struts", *The Aeronautical Quarterly*, (Vol. 4).
 52. Cohen, J.M. (1987), *Local Buckling Behavior of Plate Elements*, Department of Structural Engineering Report, Cornell University, Ithaca, NY.
 53. Cook, R.D., D.S. Malkus, and M.E. Plesha (1989), *Concepts and Applications of Finite Element Analysis. Third Edition*, John Wiley & Sons.
 54. Corporation, N.S. (2020), *Hot-rolled steel sheets and coils*.

55. Davies, J.M., P. Leach, and D. Heinz (1994), "Second-Order Generalised Beam Theory", *Journal of Constructional Steel Research, Elsevier*, (Vol. 31 (2-3)), 221-242.
56. Davies, J.M. and C. Jiang (1996), "Design of Thin-Walled Beams for Distortional Buckling", in *Proceedings of the Thirteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, University of Missouri-Rolla, Rolla, MO, 141-154.
57. Davies, J.M., C. Jiang, and V. Ungureanu (1998), "Buckling Mode Interaction in Cold-Formed Steel Columns and Beams", in *Proceedings of the Fourteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, University of Missouri-Rolla, Rolla, MO, 53-68.
58. de Miranda Batista, E. (2010), "Effective section method: A general direct method for the design of steel cold-formed members under local–global buckling interaction", *Thin-Walled Struct.*, (Vol. 48 (4)), 345–356.
59. Degtyarev, V.V. (2020), "Computational study of elastic buckling and post-buckling strength of steel decks in bending", in *Proceedings of the Annual Stability Conference. Structural Stability Research Council*, Atlanta, GA.
60. Desmond, T.P. (1977), *The Behavior and Design of Thin-Walled Compression Elements with Longitudinal Stiffeners*, Ph.D. Thesis), Cornell University, Ithaca, NY.
61. Desmond, T.P., G. Winter, and T. Pekoz (1981), "Edge Stiffeners for Thin-Walled Members", *Journal of the Structural Division, ASCE*.
62. Desmond, T.P., G. Winter, and T. Pekoz (1981), "Intermediate Stiffeners for Thin-Walled Members", *Journal of the Structural Division, ASCE*, (Vol. 107), (4).
63. Ding, C. and B.W. Schafer (2023), "Analytical Equations for Critical Local Buckling Stress of Lipped Channels", in *Cold-formed steel research consortium report series CFSRC R-2023-02*.

64. Dlubal. <https://www.dlubal.com/en/cross-section-properties/series-top-hat-macsteel>. [cited 2024 Nov. 14th].
65. E., M.M. and P. Teoman (1994), "Experiments on Lipped Channel Flexural Members", in *12th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, Saint Louis, Missouri, University of Missouri--Rolla.
66. El Mahi, A. (1985), *Behavior of unstiffened elements in bending*, M. S. Thesis, University of Strathclyde, Glasgow, UK.
67. Ellifritt, D., B. Glover, and J. Hren (1997), *Distortional Buckling of Channels and Zees Not Attached to Sheathing*, American Iron and Steel Institute, AISI, Washington, DC.
68. Elzein, A. (1991), "Plate Stability by Boundary Element Method", *Springer-Verlag, NY*.
69. Enjily, V. (1985), *The Inelastic Post Buckling Behavior of Cold-Formed Sections*, Ph.D Dissertation, Oxford Polytechnic, UK.
70. Fan, S., et al. (2019), "Stainless steel lipped C-section beams: Numerical modeling and development of design rules", *Journal of Constructional Steel Research*, (Vol. 152), 29-41.
71. Fan, S., et al. (2021), "Research on local buckling capacity of lipped C-section stainless steel beams under weak axis bending", *Structures*, (Vol. 33), 3570-3587.
72. Fieber, A., L. Gardner, and L. Macorini (2019), "Formulae for determining elastic local buckling half-wavelengths of structural steel cross-sections", *Journal of Constructional Steel Research*, (Vol. 159), 493-506.
73. Forming, R.D. <https://www.rollerdie.com/roll-forming/standard-tooling-library/hat-sections/>. [cited 2024 Nov. 14th].
74. Gardner, L. and X. Yun (2018), "Description of stress-strain curves for cold-formed steels", *Construction and Building Materials*, (Vol. 189), 527–538.

75. Gardner, L., A. Fieber, and L. Macorini (2019), "Formulae for Calculating Elastic Local Buckling Stresses of Full Structural Cross-sections", *Structures*, (Vol. 17), (3), 2-20.
76. Georgantzia, E., et al. (2022), "Design of aluminum alloy channel sections under minor axis bending", *Thin-Walled Structures*, (Vol. 174).
77. Glauz, R.S. (2016), "Quantitative Determination of Elastic Buckling Modes for Cold-Formed Steel Members", in *Proceedings of the 2016 Annual Stability Conference*, Orlando, FL, Structural Stability Research Council.
78. Glauz, R.S. (2017), "Flexural-torsional buckling of general cold-formed steel columns with unequal unbraced lengths", *Thin-Walled Structures*, (Vol. 119), 946-955.
79. Glauz, R.S. (2020), "Distortional Buckling of Cold-Formed Steel Flanges under Stress Gradient", *Journal of Structural Engineering*, (Vol. 146), (9).
80. Glauz, R.S. and B.W. Schafer (2022), "Modifications to the Direct Strength Method of cold-formed steel design for members unsymmetric about the axis of bending", *Thin-Walled Structures*, (Vol. 173).
81. H.N.Hill (1944), *Determination of Stress-strain Relations from Offset Yield Strength Values. Technical Note No.927*, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, DC.
82. Hancock, G.J., T.M. Murray, and D.S. Ellifritt (2001), *Cold-Formed Steel Structures to the AISI Specification* Marcell-Dekker, New York, NY.
83. Harik, I.E., X. Liu, and R. Ekambaram (1991), "Elastic Stability of Plates With Varying Rigidities", *Computers and Structures*, (Vol. 38 (2)), 161-168.
84. Höglund, T. (1980), "Design of Trapezoidal Sheeting Provided with Stiffeners in the Flanges and Webs", *Swedish Council for Building Research D28*, Stockholm, Sweden.
85. Institution, T.B.S. (1998), *BS 5950-5:1998 Structural use of steelwork in building. Code of practice for design of cold formed thin gauge sections*.

86. James, B.W. (1935), "Principal Effects of Axial Load on Moment Distribution Analysis of Rigid Structures", *NACA Tech. Note 534*.
87. James H. Johnson, j. and R.G. Noel (1953), "Critical Bending Stress for Flat Rectangular Plates Supported Along All Edges and Elastically Restrained Against Rotation Along the Unloaded Compression Edge", *Journal of the Aeronautical Sciences*, (Vol. 20), 535.
88. Jayabalan, P. (1989), *Behavior of Non-uniformly Compressed Thin Unstiffened elements. Ph.D. Thesis*, Indian Institute of Technology, Madras.
89. Joint Standards Australia/Standards New Zealand Committee BD-082, C.-f.S.S. (2018), *AS/NZS 4600:2018 Cold-formed steel structures*, Standards Australia Limited and The Crown in right of New Zealand, administered by the New Zealand Standards Executive.
90. Kalyanaraman, V. (1979), "Local Buckling of Cold-Formed Steel Members", in *4th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, University of Missouri - Rolla, Steel Structures.
91. Kalyanaraman, V. and P. Jayabalan (1994), "Local Buckling of Stiffened and Unstiffened Elements under Nonuniform Compression", in *12th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, St. Louis, Missouri, Steel Structures.
92. Kang, J.H. and A.W. Leissa (2005), "Exact solutions for the buckling of rectangular plates having linearly varying in-plane loading on two opposite simply supported edges", *International Journal of Solids and Structures*, (Vol. 42), (14), 4220-4238.
93. Kármán, T.v., E.E. Sechler, and L.H. Donnell (1932), "The Strength of Thin Plates in Compression", *Transactions, ASME*, (Vol. 54).
94. Kollbrunner, C.F. and G. Herrmann (1948), "Elastic stability of non-uniformly compressed plates", *T.K.V.S.B., Mitt. Nr. 1, Verlag Leemann, Zürich*.

95. König, J. (1978), "Transversally Loaded Thin-Walled C-Shaped Panels with Intermediate Stiffeners", *Swedish Council for Building Research D7, Stockholm, Sweden*.
96. Kroll, W.D., G. Fisher, and G. Heimerl (1943), *Charts for calculation of the critical stress for local instability of columns with I-, Z-, channel and rectangular-tube sections. Report No. 429*, National Advisory Committee for Aeronautics.
97. LaBoube, R.A. and W. Yu (1978), "Structural Behavior of Beam Webs Subjected to Bending Stress", in *Civil Engineering Study Structural Series 78-1, Department of Civil Engineering, University of Missouri-Rolla, Rolla, MO*, .
98. LaBoube, R.A., M.-Y. Shan, and W.-W. Yu (1994), "Bending and Shear Behavior of Web Elements with Openings", in *12th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, Saint Louis, Missouri, University of Missouri--Rolla.
99. Lapira, L., L. Gardner, and M.A. Wadee (2023), "Elastic local buckling formulae for thin-walled I-sections subjected to shear and direct stresses", *Thin-Walled Structures*, (Vol. 182).
100. Lau, S.C.W. and G.J. Hancock (1987), "Distortional buckling formulas for channel columns", *Journal of Structural Engineering*, (Vol. 113, No. 5).
101. Lazzari, J.A. and E.M. Batista (2021), "Finite Strip Method Computer Application for Buckling Analysis of Thin-Walled Structures with Arbitrary Cross-Sections", *REM - International Engineering Journal*, (Vol. 74), (3), 337-344.
102. Lazzari, J.A.d. <https://sites.google.com/coc.ufri.br/fstr>. [cited 2025 Mar. 6th].
103. Li, Z. and B.W. Schafer (2010), "Application of the Finite Strip Method in Cold-Formed Steel Member Design", *Journal of Constructional Steel Research, Elsevier*, (Vol. 66 (8-9)), 971-980.

104. Li, Z. and B.W. Schafer (2010), "Buckling Analysis of Cold-Formed Steel Members With General Boundary Conditions Using CUFSM: Conventional and Constrained Finite Strip Methods", in *Proceedings of the 20th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, St. Louis, MO.
105. Li, Z. and B.W. Schafer (2011), *Local and Distortional Elastic Buckling Loads and Moments for SSMA Stud Sections. Tech Note G103-11*, Cold-Formed Steel Engineers Institute.
106. Li, Z., et al. (2013), "Review: Constrained Finite Strip Method Developments and Applications in Cold-Formed Steel Design", *Thin-Walled Structures*.
107. Lundquist, E.E. (1939), "Local instability of centrally loaded columns of channel section and Z-section", *NACA, Tech. Note 722*.
108. Lundquist, E.E. (1939), "Local instability of symmetrical rectangular tubes under axial compression", *NACA, Tech. Note 686*.
109. Lundquist, E.E. and E.Z. Stowell (1941), "Critical Compressive Stress for Flat Rectangular Plates Supported Along all Edges and Elastically Restrained Against Rotation Along the Unloaded Edges, Special Report 189", *NACA-SR-189*.
110. Lundquist, E.E. and E.Z. Stowell (1942), "Critical Compressive Stress for Flat Rectangular Plates Supported Along All Edges and Elastically Restrained Against Rotation along the Unloaded Edges", *NACA-TR-733*.
111. Lundquist, E.E. and E.Z. Stowell (1942), "Critical Compressive Stress for Outstanding Flanges", *NACA-TR-734*.
112. Lundquist, E.E., E.Z. Stowell, and E. Schuette (1945), *Principles of Moment Distribution Applied to Stability of Structures Composed of Bars or Plates. Report No. 809*, NACA.
113. Lysaght (2014), *SupaPurlins®*, *SupaZeds®* & *SupaCees® Design and installation guide for building professionals*.

114. Lysaght (2017), *Zeds, and Cees User's guide for design and installation professionals*.
115. Ma, S. and J. Papangelis (2023), "Distortional buckling of cold-formed steel channels under minor axis bending", in *Ninth International Conference on Thin-walled Structures – ICTWS2023*, Sydney, Australia.
116. Ma, S. and J. Papangelis (2025), "Distortional buckling of cold-formed steel channels bent about the minor axis", *Thin-Walled Structures*, (Vol. 210).
117. Marsh, C. (1997), "Influence of bend radii on local buckling in cold-formed shapes", *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, (Vol. 123), (12), 1686-1689.
118. Moreyra, M.E. (1993), *The Behavior of Cold-Formed Lipped Channels under Bending*, M.S. Thesis, Cornell University, Ithaca, NY.
119. Moreyra, M.E. and T. Pekoz (1994), "Finite Element Studies on Lipped Channel Flexural Members", in *12th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, Saint Louis, Missouri, University of Missouri-Rolla.
120. Nuttayasakul, N. and W.S. Easterling (2003), "Cold-formed steel flexural members undergoing distortional and Euler buckling", in *Proceedings of Structural Stability Research Council*, Baltimore, MD, 339-355.
121. Oey, O. and J. Papangelis (2021), "Behavior of cold-formed steel channels bent about the minor axis", *Thin-Walled Structures*, (Vol. 164).
122. Papangelis, J.P. and G.J. Hancock (1995), "Computer Analysis of Thin-Walled Structural Members", *Computers and Structures*, (Vol 56, No 1), 157-176.
123. Pham, C.H. and G.J. Hancock (2008), *Shear buckling of thin-walled channel sections with intermediate web stiffener*, The University of Sydney, Australia.
124. Phung, N. and W. Yu (1978), *Structural Behavior of Longitudinally Reinforced Beam Webs. Civil Engineering Study Structural Series 78-6*, Department of Civil Engineering, University of Missouri-Rolla, Rolla, MO.

125. Quach, W.M. and J.F. Huang (2014), "Two-Stage Stress-Strain Models for Light-Gauge Steels", *Advances in Structural Engineering*, (Vol. 17), (Issue 7), 937–949.
126. Quoc, C.D.T., B.H. Cuong, and H.N. Duc (2024), "Formulas determining the critical stress of I-shaped members under bending", *Journal of Science and Technology in Civil Engineering, HUCE*.
127. R.P. Papazian, R.M. Schuster, and M. Sommerstein (1994), "Multiple stiffened deck profiles", in *Twelfth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, Saint Louis, Missouri, University of Missouri-Rolla.
128. Raebel, C.H. and D. Gwozdz (2018), "Comparison of Experimental and Numerical Results for Flexural Capacity of Light-Gage Steel Roof Deck", in *International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*.
129. Raebel, C.H. and D. Gwozdz (2020), *Experimental and Numerical Comparison of Flexural Capacity of Light Gage Cold-Formed Steel Roof Deck*, Milwaukee School of Engineering.
130. Ramberg, W. and W.R. Osgood (1943), *Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters. Technical Note No.902*, National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, DC.
131. Rasmussen, K.J.R. (2003), "Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys", *Journal of Constructional Steel Research*, (Vol. 59), (Issue 1), 47-61.
132. Rhodes, J. (1985), *Final Report on Unstiffened Elements*, University of Strathclyde, Glasgow, UK.
133. Rogers, C.A. and R.M. Schuster (1995), *Interaction Buckling of Flange, Edge Stiffener and Web of C-Sections in Bending, Research into Cold Formed Steel, Final report of phase II of CSSBI/IRAP project of CSSBI/IRAP Project*, Department of Civil Engineering, University of Waterloo, Ontario, Canada.
134. Schafer, B. <https://www.ce.jhu.edu/cufsm/>. [cited 2025 Mar. 8th].

135. Schafer, B. and C. Yu (2002), *Test Verification of the Effect of Stress Gradient on Webs of Cee and Zee Sections*. Research report RP02-5, American Iron and Steel Institute.
136. Schafer, B.W. <https://jscholarship.library.jhu.edu/items/9b0be172-e358-4c41-b83f-7122c76979ac>. [cited 2024 Dec. 30th].
137. Schafer, B.W. and T. Pekoz (1998), "Computational modeling of cold-formed steel: characterizing geometric imperfections and residual stresses", *Journal of Constructional Steel Research*, (Vol. 47), (3), 193–210.
138. Schafer, B.W. and T. Pekoz (1998), "Direct Strength Prediction of Cold-formed Steel Members Using Numerical Elastic Buckling Solutions", *14th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*. 4., 69-76.
139. Schafer, B.W. and T. Pekoz (1999), "Laterally braced cold-formed steel flexural members with edge-stiffened flanges", *Journal of Structural Engineering*, (Vol. 125, No. 2).
140. Schafer, B.W. (2002), "Local, Distortional, and Euler Buckling of Thin-Walled Columns", *Journal of Structural Engineering*, (Vol. 128, No. 3).
141. Schafer, B.W. and S. Ádány (2006), "Buckling Analysis of Cold-Formed Steel Members Using CUFSM: Conventional and Constrained Finite Strip Methods", in *Proceedings of the Eighteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, Orlando, FL.
142. Schafer, B.W., Z. Li, and C.D. Moen (2010), "Computational modeling of cold-formed steel", *Thin-Walled Structures*, (Vol. 48), (Issues 10–11), 752-762.
143. Schafer, B.W. and R.S. Glauz (2023), "A Novel Functional Form for the Application of the Direct Strength Method", in *Ninth International Conference on THIN-WALLED STRUCTURES - ICTWS2023*, Sydney, Australia.
144. Schuette, E.H. and McCulloch (1947), "Charts for the Minimum-Weight Design of Multiweb Wings in Bending. Tech. Note No. 1323", *J. C., N.A.C.A.*

145. Schuster, R.M. (1992), *Testing of Perforated C-Stud Sections in Bending, Report for the Canadian Sheet Steel Building Institute*, University of Waterloo, Ontario, Canada.
146. Seif, M. and B. Schafer (2010), "Local buckling of structural steel shapes", *Journal of Constructional Steel Research*, (66), (10), 1232–1247.
147. SFIA (2018), *Technical Guide for Cold-Formed Steel Framing Products*, S.F.I. Association, Editor.
148. Shan, M., R.A. LaBoube, and W. Yu (1994), *Behavior of Web Elements with Openings Subjected to Bending, Shear and the Combination of Bending and Shear*, *Civil Engineering Study Structural Series 94:2*, Department of Civil Engineering, University of Missouri-Rolla, Rolla, MO.
149. Shan, M.Y., R.A. LaBoube, and W.W. Yu (1996), "Bending and Shear Behavior of Web Elements with Openings", *Journal of Structural Engineering*, (Vol. 122), (Issue 8), 854 - 859.
150. Silvestre, N. and D. Camotim (2002), "First-Order Generalised Beam Theory for Arbitrary Orthotropic Materials", *Thin-Walled Structures*, Elsevier, (Vol. 40), 755-789.
151. Silvestre, N. and D. Camotim (2002), "Second-Order Generalised Beam Theory for Arbitrary Orthotropic Materials", *Thin-Walled Structures*, Elsevier, (Vol. 40), 791-820.
152. SIMULIA (2011), *Abaqus/CAE User's Manual*, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
153. Standards, B.o.I. (1982), *Code of practice for use of cold-formed light gauge steel structural members in general building construction*.
154. Stowell, E.Z. and E.E. Lundquist (1939), "Local instability of columns with I-, Z-, channel, and rectangular-tube sections", *NACA, Tech. Note 743*.
155. Sutter, K. (1959), *The local buckling of aluminum plate elements*, The Aluminum Development Association.

156. Systèmes, D.
<https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.5/books/gsx/default.htm?startat=ch05s02.html>. [cited 2024 Dec. 8th].
157. Teng, J.G., J. Yao, and Y. Zhao (2003), "Distortional buckling of channel beam-columns", *Thin-Walled Structures*, (Vol. 41), (7).
158. Timoshenko, S. (1959), *Theory of plates and shells. Second Edition*, McGraw-Hill, Inc.
159. Timoshenko, S.P. and J.M. Gere (1961), *Theory of Elastic Stability - Second Edition*, McGraw-Hill International Book Company.
160. Trahair, N.S., et al. (2008), *The behavior and design of steel structures to EC3 - 4th edition*, Taylor & Francis.
161. Tubecon (2023), *Tubecon top hat section catalog*.
162. Vieira, L., R. Gonçalves, and D. Camotim (2019), "Local buckling of RHS members with small-to-large corner radii subject to combinations of axial force and biaxial bending", in *Structural Stability Research Council Annual Stability Conference 2019, SSRC 2019*, St. Louis, Missouri, Structural Stability Research Council (SSRC), 708-733.
163. Vieira, L., R. Gonçalves, and D. Camotim (2019), "On the influence of the rounded corners on the local stability of RHS members under axial force and biaxial bending", *Thin-Walled Structures*, (Vol. 144).
164. Vieiraa, L., R. Gonçalvesb, and D. Camotim (2018), "On the local buckling of RHS members under axial force and biaxial bending", *Thin-Walled Structures*, (129), 10–19.
165. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham (2023), "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*, Springer, 675–683.

166. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham (2024), "Calculation Guide of Cold-Formed Channel Girts by AISI S100 Using DSM Analytical Solution", in *Proceedings of the 7th International Conference on Geotechnics, Civil Engineering and Structures, CIGOS 2024*, Ho Chi Minh City, Vietnam.
167. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham (2024), "Convergence study on asymmetrically flexural problem of cold-formed channel sections", *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, (Vol. 20), (4), 23-30.
168. Vu, H.H., Q.A. Vu, and C.H. Pham (2025), "Local buckling coefficients for thin-walled lipped channels under bending about asymmetrical axis", *Results in Engineering*, (Vol. 26).
169. Wang, S.T. and Y.L. Tien (1975), "Buckling of Plates and Beam Sections under Stress Gradient", in *3rd International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*.
170. Willis, C.T. and B. Wallace (1990), "Behavior of cold-formed steel purlins under gravity loading", *Journal of Structural Engineering*, (Vol. 116), (8).
171. Winter, G. (1946), "Strength of Thin Steel Compression Flanges", *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, (Vol. 112, No. 1).
172. Winter, G. (1946), *Tests on Light Beams of Cold-Formed Steel, Forty-fifth Progress Report*, Cornell University, Ithaca, NY, (Unpublished).
173. Winter, G. (1947), "Strength of Thin Steel Compression Flanges", *Bulletin No. 35/3, 1947, Cornell University Engineering Experiment Station, Ithaca, N.Y.*
174. Winter, G. (1948), "Performance of Thin Steel Compression Flanges", in *Third Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineering*, Liege, 137-148.
175. Winter, G. (1949), "Performance of Compression Plates as Parts of Structural Members", *Research, Engineering Structures Supplement: (Colston Papers)*, (Vol. II), p. 49. .

176. Winter, G. (1956), "Discussion of Design of Light Weight Steel Structures", in *Fifth Congress of the International Association for Bridge and Structural Engineering*, Lisbon, 481-485.
177. Winter, G. (1959), "Cold-Formed, Light Gage Steel Construction", *Journal of the Structural Division, ASCE*, (Vol. 85).
178. Winter, G. (1970), *Commentary on the 1968 Edition of the Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*, American Iron and Steel Institute, New York, NY.
179. Yiu, F. and T. Pekoz (2000), "Design of Cold-formed Steel Plain Channels", in *15th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, University of Missouri-Rolla.
180. Yiu, F. and T. Peköz (2001), *Design of Cold-Formed Steel Plain Channels. Research Report RP01-2*, American Iron and Steel Institute.
181. Yu, C. and B.W. Schafer (2006), "Stress Gradient Effect on the Buckling of Thin Plates", in *17th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, University of Missouri--Rolla.
182. Yu, C. and B.W. Schafer (2007), "Simulation of cold-formed steel beams in local and distortional buckling with applications to the direct strength method", *Journal of Constructional Steel Research*, (Volume 63), (Issue 5), 581-59.
183. Yu, W.-W. and R.A. LaBoube (2010), *Cold-Formed Steel Design. Fourth edition*, John Wiley & Sons, Inc.
184. Yu, W.-W., R.A. LaBoube, and H. Chen (2020), *Cold-Formed Steel Design. Fifth edition*, John Wiley & Sons, Inc.
185. Yu, W.W. and R.A. LaBoube (1978), *Webs for cold-formed steel flexural members structural behavior of beam webs subjected to bending stress*, Center for Cold-Formed Steel Structures Library.
186. Yun, X. and L. Gardner (2017), "Stress-strain curves for hot-rolled steels", *Journal of Constructional Steel Research*, (Vol. 133), 36-46.

187. Zeinoddini, V. and B.W. Schafer (2010), "Impact of Corner Radius on Cold-formed Steel Member Strength", in *20th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, St. Louis, Missouri, Missouri University of Science and Technology.
188. Ziemian, R.D. (2010), *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures, 6th Edition*, John Wiley & Sons, Inc.
189. Zienkiewicz, O.C. and R.L. Taylor (1989), *The Finite Element Method: Volume 1 Basic Formulations and Linear Problems. Fourth Edition*, McGraw Hill.
190. Zienkiewicz, O.C. and R.L. Taylor (1991), *The Finite Element Method: Volume 2 Solid and Fluid Mechanics Dynamics and Non-Linearity. Fourth Edition*, McGraw-Hill.

Tiếng Đức

191. Hartmann, F. (1934), "Die Berechnung von T-Gurten auf Ausbeulung", *Der Stahlbau*, (7).
192. Nölke, K. (1936.), *Der Baningenieur (The Railway Engineer)*, (Vol. 17), 111.
193. Schardt, R. and W. Schrade (1982), *Kaltprofil-Pfetten. Bericht Nr. 1*, Institut Für Statik, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, Germany.
194. Schardt, R. (1989), "Verallgemeinerte Technische Biegetheorie (Generalized Beam Theory)", *Springer-Verlag, Berlin*.

Tiếng Nga

195. (2016), *СП 260.1325800.2016 Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования (SP 260.1325800.2016 Cold-formed thin-walled steel profile and galvanized corrugated plate constructions. Design rules)*, Ministry of construction and housing and communal services of the Russian Federation.

Tiếng Nhật

196. 日本建築学会 (1985), 軽鋼構造設計施工指針. 同解説 SI単位版 (*Light Steel Structure Design and Construction Guidelines and Commentary SI Unit*).

Tiếng Trung

197. 中华人民共和国国家标准 (2002), *GB 50018-2002* 冷弯薄壁型钢结构技术规范 (*Technical Code of Cold-formed Thin-wall Steel Structure*).

PHỤ LỤC

Phụ lục A. Các vấn đề lý thuyết

A.1. Các dạng mất ổn định gốc

A.1.1. Mất ổn định cục bộ

Mất ổn định cục bộ là trạng thái mất ổn định mà giao tuyến giữa các phần tử vẫn là đường thẳng và góc giữa các phần tử không thay đổi.

Mất ổn định cục bộ liên quan đến sự biến dạng đáng kể của tiết diện, nhưng biến dạng này chỉ liên quan đến hiện tượng xoay, không phải chuyển vị tịnh tiến, của các phần tử tại các mép gấp, như thể hiện trong Hình 1.9. Nửa bước sóng mất ổn định cục bộ (L_{crl}) nhỏ hơn kích thước đặc trưng lớn nhất của cấu kiện. Vì nửa bước sóng mất ổn định cục bộ ngắn nên rất khó tránh khỏi, do vậy nói chung mất ổn định cục bộ phải luôn được xem xét.

A.1.2. Mất ổn định méo

Mất ổn định méo là hiện tượng mất ổn định liên quan đến các thay đổi về hình dạng tiết diện còn lại sau khi loại trừ mất ổn định cục bộ.

Mất ổn định méo liên quan đến cả chuyển dịch tịnh tiến và xoay tại các mép gấp của cấu kiện. Mất ổn định méo liên quan đến hiện tượng méo của một phần tiết diện trong khi phần kế cận thể hiện như vật rắn. Ví dụ, bản cánh bẻ móc của tiết diện chữ C có mép trong Hình 1.9 chủ yếu phản ứng như một vật rắn trong khi bản bụng bị biến dạng. Mất ổn định méo có nửa bước sóng (L_{crl}) nằm giữa với mất ổn định cục bộ và mất ổn định tổng thể. Nửa bước sóng của mất ổn định méo thường lớn hơn nhiều lần so với kích thước đặc trưng lớn nhất cấu kiện. Tuy nhiên, L_{crl} vẫn phụ thuộc nhiều vào cả tải trọng và hình dạng của tiết diện. Đối với một số cấu kiện, mất ổn định méo có thể không xảy ra. Bố trí giằng ngang là giải pháp hiệu quả để làm chậm quá trình mất ổn định méo và nhờ đó tăng độ bền của cấu kiện.

A.1.3. Mất ổn định tổng thể

Mất ổn định tổng thể là hiện tượng mất ổn định không liên quan đến biến dạng của tiết diện. Mất ổn định tổng thể bao gồm các dạng sau:

Mất ổn định uốn: dạng mất ổn định mà cấu kiện chịu nén bị lệch theo phương ngang nhưng không bị xoắn hoặc thay đổi hình dạng tiết diện.

Mất ổn định xoắn: dạng mất ổn định mà cấu kiện chịu nén bị xoắn quanh tâm cắt của của tiết diện.

Mất ổn định uốn-xoắn: dạng mất ổn định mà cấu kiện chịu nén bị uốn cong và xoắn đồng thời nhưng hình dạng tiết diện không thay đổi.

Mất ổn định ngang-xoắn: dạng mất ổn định của cấu kiện chịu uốn liên quan đến hiện tượng chuyển dịch ngang ra khỏi mặt phẳng uốn xảy ra đồng thời với xoắn quanh tâm cắt của tiết diện.

Nửa bước sóng của hiện tượng mất ổn định tổng thể bằng với chiều dài không giằng (L_x , L_y , hoặc L_t). Bố trí các thanh giằng ngang rất có hiệu quả trong việc ngăn cản mất ổn định tổng thể và giúp tăng độ bền của cấu kiện.

A.2. Các phương pháp xác định mô men tới hạn

Theo phương pháp DSM, độ bền liên quan chặt chẽ với mô men tới hạn (mô men gây mất ổn định). Do đó, để thiết lập công thức DSM, trước tiên cần lựa chọn phương pháp xác định mô men tới hạn. Các mục sau sẽ đề cập đến các phương pháp xác định mô men tới hạn. Sau đó tiến hành so sánh và chọn ra phương pháp phù hợp áp dụng trong luận án.

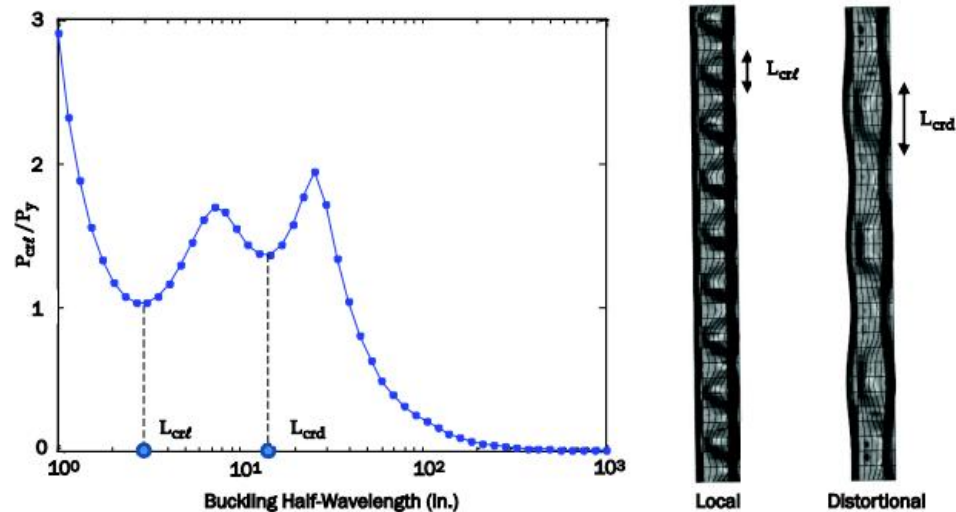
A.2.1. Các phương pháp số

Phần sau đây trình bày chi tiết (so với nội dung giới thiệu ở Mục 1.6.2) các phương pháp số được chấp thuận trong tiêu chuẩn AISI S100 [31] và AS/NZS 4600 [89].

a) Phương pháp Dải hữu hạn (FSM)

Phương pháp Dải hữu hạn là phương pháp số sử dụng các dải chịu uốn để rời rạc hóa tiết diện cấu kiện thép tạo hình nguội. Đối với mô hình dầm đơn giản, sử dụng phương pháp Dải hữu hạn để phân tích mất ổn định sẽ hình thành nên đường cong chữ ký cho phép xác định tải trọng hoặc mô men tới hạn đàn hồi của trạng thái mất ổn định cục bộ, mất ổn định méo và mất ổn định tổng thể yêu cầu bởi DSM. Mỗi dạng mất ổn định sẽ bao gồm biến dạng cụ thể và một nửa bước sóng mất ổn định, giúp mô tả đầy đủ về dạng mất ổn định đang xét. Ví dụ về đường cong đặc trưng của thép chữ C bẻ móc chịu nén thuần túy được thể hiện trong Hình A.1 và Hình A.2.

Phân tích dải hữu hạn là biến thể của phương pháp Phần tử hữu hạn. Đối với bài toán mất ổn định đàn hồi của cấu kiện thép tạo hình nguội, đây là một trong những phương pháp hiệu quả và phổ biến nhất. Cheung và Tham (1998) [50] giải thích lý thuyết cơ bản trong khi Hancock và cộng sự (2001) [82] và Ádány và Schafer (2006) [141] hướng dẫn cụ thể cách sử dụng phương pháp này để giải bài toán mất ổn định. Hancock và các cộng sự đã tiên phong trong việc sử dụng phân tích dải hữu hạn để giải bài toán mất ổn định của các cấu kiện thép tạo hình nguội và đã chứng minh một cách thuyết phục tiềm năng quan trọng của phân tích dải hữu hạn trong cả thiết kế và nghiên cứu ứng xử của loại cấu kiện này.

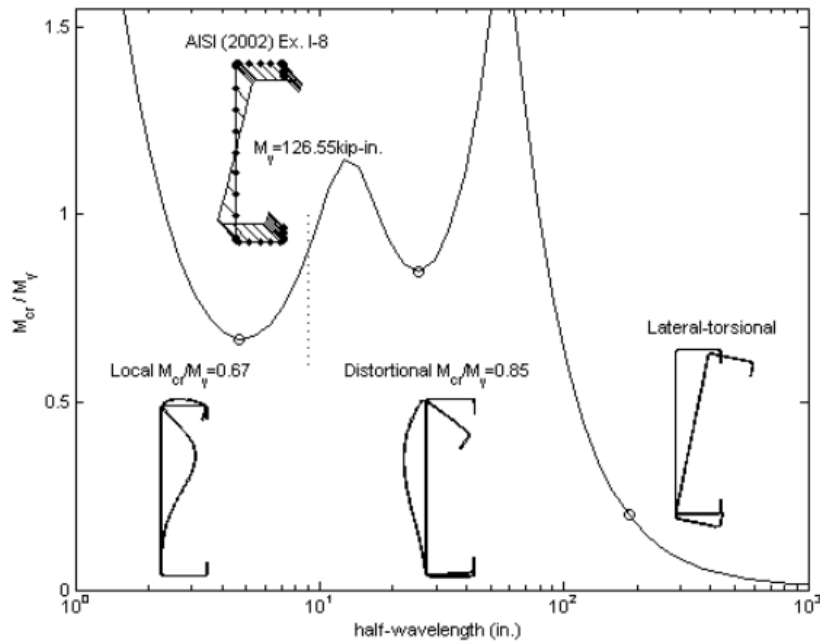


Hình A.1 Đường cong chữ ký sau khi phân tích dải hữu hạn cho tiết diện chữ C chịu nén [32]

Các biến thể của phương pháp Dải hữu hạn cũng đã được nghiên cứu cho trạng thái chịu cắt, điều kiện biên tổng quát, các cấu kiện bị đục lỗ, các cấu kiện có thành phần phụ thêm. Đồng thời các mô đun xác định tự động kiểu mất ổn định (cục bộ, méo, tổng thể) cũng đang được xây dựng. Ngoài ra còn có các trường hợp đặc biệt khác.

AISI đã tài trợ cho nhiều nghiên cứu, một trong số đó đã thúc đẩy sự phát triển của chương trình miễn phí, CUFSM, sử dụng phương pháp Dải hữu hạn để giải bài toán mất ổn định đàn hồi của tất cả các loại tiết diện thép tạo hình nguội. Chương trình này được đặt tại www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm và có thể chạy trên cả hai nền

tăng Windows và Mac. Hướng dẫn và ví dụ có sẵn trực tuyến tại cùng một địa chỉ trên. Một số chương trình khác cung cấp các giải pháp tương tự bao gồm THIN-WALL (Hancock, [122]) và CFS. Steel Smart System sử dụng phiên bản nhúng của CUFSM.



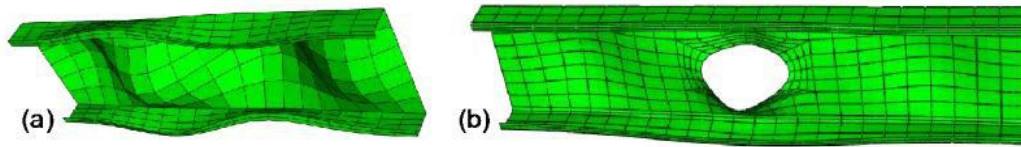
Hình A.2 Ví dụ về phân tích mất ổn định bằng phương pháp Dải hữu hạn [32]

b) Phương pháp Phần tử hữu hạn (FEM)

Các mô hình phần tử hữu hạn của các cấu kiện thép tạo hình nguội phát triển từ các phần tử dạng tấm hoặc vỏ có khả năng cung cấp lời giải cho bài toán mất ổn định cục bộ, mất ổn định méo và mất ổn định tổng thể. Các dạng mất ổn định minh họa trong Hình 1.9 được tạo ra từ phân tích trị riêng của phương pháp Phần tử hữu hạn. Cấu kiện phức tạp, như cấu kiện bị đục lỗ (Hình A.3b), cấu kiện có điều kiện biên tổng quát, cấu kiện có các bộ phận kết cấu bổ sung, v.v. đều có thể được phân tích thông qua mô hình phần tử hữu hạn.

Nhìn chung, cấu kiện càng phức tạp thì việc sử dụng các mô hình phần tử hữu hạn càng thể hiện được tính ưu việt. Tuy nhiên, việc phân loại dạng mất ổn định thành mất ổn định cục bộ, mất ổn định méo và mất ổn định tổng thể để có thể sử dụng với DSM thường phải thực hiện một cách chủ quan bằng mắt thường. Một mô hình phần tử hữu hạn điển hình có thể yêu cầu đánh giá trực quan trên dưới 100 dạng mất ổn

định để tìm ra dạng cơ bản. Các dạng mất ổn định thường là dạng kết hợp giữa vài dạng cơ bản, ví dụ như trong Hình A.3a, làm tăng thêm độ phức tạp cho công tác nhận dạng. Đối với mô hình phần tử hữu hạn, không tồn tại giải pháp tương đương với đường cong chữ ký trong phân tích dải hữu hạn.



(a) Dạng mất ổn định hỗn hợp giữa cục bộ và méo

(b) Bất ổn định của cấu kiện bị đục lỗ

Hình A.3 Mất ổn định của cấu kiện chữ C chịu nén sử dụng phương pháp Phần tử hữu hạn [32]

Hầu hết các tài liệu về phần tử hữu hạn đều chứa thông tin chi tiết về các phần tử hữu hạn cho tấm và vỏ mỏng thích hợp với công tác mô hình hóa các cấu kiện thép thành mỏng tạo hình nguội (ví dụ: Cook và cộng sự (1989) [53] hoặc Zienkiewicz và Taylor (1989, 1991) [189][190]). Do phương pháp Phần tử hữu hạn sử dụng các hàm dạng tuyến tính hoặc đa thức, số lượng phần tử để đảm bảo độ chính xác có thể rất đáng kể và nghiên cứu về tính hội tụ của lưới chia có thể phải được tiến hành, đặc biệt là đối với hiện tượng mất ổn định cục bộ. Nhiều phần mềm thương mại dựa trên phương pháp Phần tử hữu hạn có khả năng dự đoán chính xác hiện tượng mất ổn định đàn hồi của các cấu kiện thép tạo hình nguội, bao gồm ABAQUS, ANSYS, MARC và MSC NASTRAN...

c) Phương pháp dầm tổng quát (GBT)

Lý thuyết Dầm tổng quát nâng cấp phần tử dầm chuẩn thông các kiểu biến dạng của tiết diện tương tự với dạng mất ổn định cục bộ và dạng mất ổn định méo, qua đó có thể cung cấp lời giải cho bài toán mất ổn định để kết hợp với DSM. Lý thuyết Dầm tổng quát có khả năng tạo ra đường cong chữ ký như trong Hình A.1. Trong thực tế ứng dụng, phương pháp này tương đương với phương pháp Dải hữu hạn, mặc dù nhìn chung sử dụng ít bậc tự do hơn.

Các biến thể của lý thuyết Dầm tổng quát đã có thể áp dụng cho nhiều loại cấu kiện chịu các loại tải trọng khác nhau cũng như có thể xét đến biến dạng cắt... Lý

thuyết Dầm tổng quát ban đầu được phát triển bởi Schardt (1989) [194], được phổ biến bởi Davies và cộng sự (1994) [55], được ứng dụng bởi Davies và Jiang (1996, 1998) [56][57] và được nâng cấp bởi Silvestre và Camotim (2002) [150][151], Bebiano và cộng sự. (2007, 2015) [39][42], Camotim et al. (2008) [47] và Basaglia và Camotim (2013) [37].

Nghiên cứu về lý thuyết Dầm tổng quát vẫn đang được tiến hành. Phương pháp này có khả năng phân biệt rõ các dạng mất ổn định khác nhau, do đó dễ áp dụng. Nhóm của Giáo sư Camotim tại Đại học Lisbon đã phát triển chương trình GBTUL và đưa vào sử dụng để phân tích bài toán mất ổn định dựa trên lý thuyết Dầm tổng quát. Phiên bản 2 có thể được sử dụng để phân tích các tiết diện bất kỳ (tuy vậy không được có góc uốn) và có thể xử lý các điều kiện tải trọng và gối tựa tổng quát (Bebiano và cộng sự 2014) [41].

d) Các phương pháp khác

Mọi phương pháp số kết hợp lý thuyết tảm đều có khả năng cung cấp lời giải cho bài toán mất ổn định của cấu kiện thép tạo hình nguội. Ví dụ, ngoài các phương pháp phân tích dải hữu hạn, phân tích phần tử hữu hạn và lý thuyết Dầm tổng quát, các phương pháp sai phân hữu hạn và phương pháp phần tử biên đều đã được sử dụng thành công (ví dụ: Harik và cộng sự, 1991 [83], Elzein, 1991 [68]). Ngoài ra, các công thức trong Mục 2.3 của tiêu chuẩn AISI S100 [31] có thể được tổng quát hóa và áp dụng dưới dạng các giải pháp số.

Các phần tử dầm được sử dụng trong phần mềm phân tích kết cấu thông thường không có khả năng mô tả biến dạng của tiết diện và do đó không phản ánh được hiện tượng mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo. Các phần tử dầm này cũng không xét đến hiện tượng vênh của tiết diện và do đó không có khả năng mô phỏng chính xác hiện tượng mất ổn định xoắn, uốn-xoắn hoặc ngang-xoắn. Chúng cũng không xét đến bản chất chịu xoắn của tiết diện mà tâm cắt và trọng tâm không trùng nhau, do đó cần thận trọng khi áp dụng đối với các tiết diện đối xứng đơn trục và tiết diện không đối xứng.

A.2.2. Công thức giải tích của tiêu chuẩn AISI S100-16

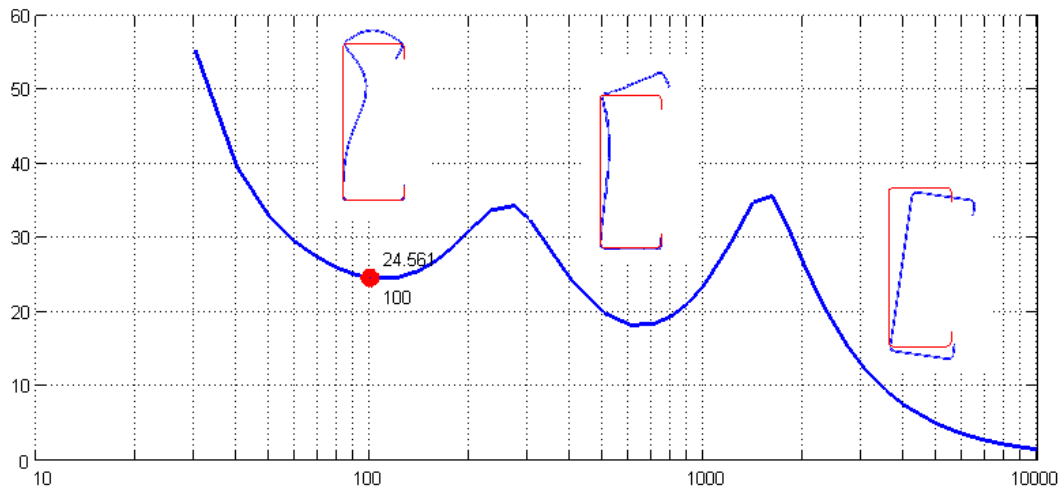
Tiêu chuẩn AISI S100 [31] cung cấp các công thức giải tích xác định ứng suất tới hạn của các tiết diện thép tạo hình nguội điển hình. Các công thức giải tích khác

có thể được tìm thấy trong tài liệu hướng dẫn của SSRC (Ziemian, 2010) [188], Hướng dẫn thiết kế bằng phương pháp Cường độ trực tiếp (AISI, 2006) [29], cũng như các tài liệu tham khảo khác (Allen và Bulson, 1980 [33]; Chajes, 1974 [49]; và Timoshenko và Gere, 1961 [159]). Việc sử dụng các công thức giải tích để xác định ứng suất tới hạn cần tuân thủ điều kiện về “giải pháp kỹ thuật khả dụng” trong Chương A của Tiêu chuẩn AISI S100 [31].

Một số công thức giải tích tương đối phức tạp do tiết diện không đối xứng và do bản chất thành mỏng của các cấu kiện thép tạo hình nguội. Nhìn chung, các phương pháp số, như được trình bày chi tiết trong các phần trên và trong Mục 2.2 của tiêu chuẩn AISI S100 [31], có thể cung cấp lời giải tương đối chính xác cho mọi loại tiết diện, với điều kiện biên và tải trọng bất kỳ, do đó được khuyến nghị ưu tiên sử dụng. Ngoài ra, đối với các tiết diện thông thường, các lời giải của bài toán mất ổn định đàn hồi cũng được lập thành bảng trong Sổ tay thiết kế thép tạo hình nguội của AISI (AISI, 2013) [30] và trong Báo cáo kỹ thuật của CFSEI G103-11 (Li và Schafer, 2011) [105].

A.3. Nhận diện dạng mất ổn định

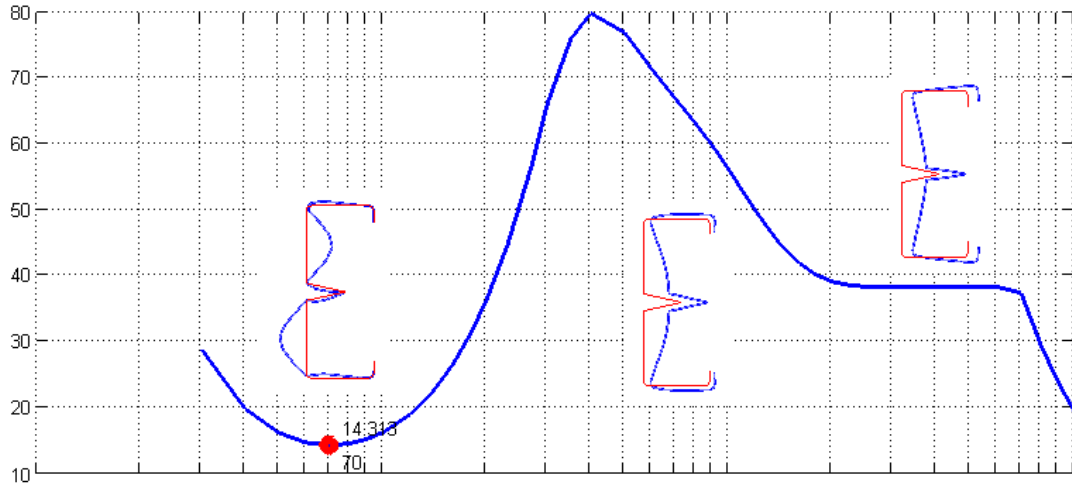
A.3.1. Nhận diện trong mô hình dải hữu hạn



Hình A.4 Đường cong chữ ký của phương pháp Dải hữu hạn

Phân tích dải hữu hạn được sử dụng phổ biến để dự đoán hiện tượng mất ổn định và trong một số trường hợp, việc nhận diện các dạng mất ổn định là khá dễ dàng. Ví dụ, trong Hình A.4, mất ổn định cục bộ là giá trị cực tiểu đầu tiên, mất ổn định

méo là giá trị cực tiểu thứ hai và mất ổn định tổng thể là nhánh đi xuống cuối cùng của đường cong chữ ký. Đây là trường hợp lý tưởng. Một ví dụ khác trên Hình A.5 cho thấy rằng việc nhận diện dạng mất ổn định ngay từ đường cong chữ ký đôi khi không thực hiện được.



Hình A.5 Ví dụ khác về phân tích mất ổn định với FSM

Đường cong chữ ký của phân tích dải hữu hạn có thể không có cực tiểu rõ ràng. Ví dụ, mất ổn định méo trong Hình A.5 rất khó xác định. Các định nghĩa cơ bản trong Mục 1.6.1 về nửa bước sóng và biến dạng của tiết diện có thể dùng để xác định các dạng mất ổn định một cách thủ công, tuy nhiên, kết quả có thể mang tính chủ quan. Trong một số trường hợp, $K_x L_x \neq K_y L_y \neq K_t L_t$, hoặc $KL < L_{crd}$, sẽ dễ dàng hơn nếu sử dụng phân tích dải hữu hạn để xác định mất ổn định cục bộ và mất ổn định méo, trong khi mất ổn định tổng thể được xác định thông qua phương pháp giải tích.

Phương pháp Dải hữu hạn đã được cải tiến cho phép xác định dạng mất ổn định một cách tự động hoàn toàn, từ đó hình thành nên phương pháp Dải hữu hạn ràng buộc (Ádány và Schafer, 2008) [25]. Phương pháp này đã được áp dụng để nhận diện dạng mất ổn định cho các cấu kiện thép tạo hình nguội trong nghiên cứu của Li và Schafer (2010) [103], là cơ sở để xây dựng các bảng tra cho tiết diện chữ C bẻ móc trong CFSEI Tech Note G103-11 (Li và Schafer, 2011) [105] và được sử dụng trong phần mềm phân tích dải hữu hạn miễn phí CUFSM (Li và Schafer, 2010) [104]. Phương pháp này vẫn có những hạn chế và đang được tiếp tục được phát triển (Li và cộng sự, 2013) [106]. Một nghiên cứu khác đã chỉ ra rằng phân tích biên độ mất ổn

định có thể được sử dụng để nhận diện các dạng mất ổn định (Glauz, 2016) [77]. Nghiên cứu này thông qua quá trình chia tách biến dạng của tiết diện và định lượng hóa biên độ mất ổn định để phân loại các dạng mất ổn định.

A.3.2. Nhận diện trong mô hình phần tử tấm hữu hạn

Phần tử tấm hữu hạn là một công cụ mạnh mẽ và linh hoạt để xây dựng mô hình và tính toán bài toán mất ổn định đàn hồi. Tuy nhiên, mô hình phần tử tấm hữu hạn không cung cấp công cụ để nhận diện các dạng mất ổn định. Do đó, quá trình này có thể mang tính chủ quan, tiêu tốn thời gian và khó tự động hóa. Nhìn chung, các dạng mất ổn định được sắp xếp theo ứng suất tới hạn từ nhỏ nhất đến lớn nhất và người dùng phải tự đánh giá bằng mắt. Quá trình nhận diện trực quan sử dụng các định nghĩa trong Mục 1.6.1, vì thế có thể khá chủ quan. Đặc biệt, quá trình này thường khó khăn do mô hình trong phần tử hữu hạn là một hình ba chiều.

Cách nhận diện nhanh trong mô hình phần tử tấm hữu hạn là tìm dạng mất ổn định nhỏ nhất có các đặc điểm tương tự như định nghĩa. Ví dụ, chuyển vị ngang của giao tuyến giữa bản cánh và bản bụng sẽ liên quan đến mất ổn định méo. Trong một số trường hợp, biến dạng của tiết diện không rõ ràng (ví dụ: mất ổn định cục bộ của các bản thép có chiều dày lớn). Khi đó có thể sử dụng các cận cho trước trong Mục 2.2.3 của tài liệu Hướng dẫn tiêu chuẩn AISI S100 [32]. Cụ thể, nếu dạng mất ổn định đang xét có ứng suất tới hạn lớn hơn cận quy định của một dạng gốc (ví dụ dạng gốc mất ổn định cục bộ có $P_{cr1} = 1,66P_y$), thì các dạng mất ổn định sau không cần nhận diện theo dạng gốc đó nữa.

Các nghiên cứu nâng cấp mô hình phần tử tấm hữu hạn và cho phép nhận diện tự động đang được phát triển (Li et al., 2013) [106]. Phương pháp biến dạng (Glauz, 2016) [77] giới thiệu trong Mục A.3.1 cũng có thể được áp dụng cho các mô hình phần tử hữu hạn.

A.3.3. Nhận diện trong mô hình lý thuyết Dầm tổng quát

Công tác nhận diện các dạng mất ổn định trong các mô hình dầm tổng quát là khá trực tiếp. Người dùng có thể lựa chọn các dạng gốc sử dụng trong mô hình và sau đó thông qua tỷ lệ đóng góp của các dạng gốc để nhận diện dạng mất ổn định.

A.4. Cách xác định hệ số chống xoay và hệ số mất ổn định trong phương pháp Hệ số chống xoay của Bleich

A.4.1. Xác định hệ số chống xoay

Hệ số chống xoay là một cách thể hiện khác của độ cứng chống xoay. Bleigh [44] đã xác định gần đúng hệ số này cho thép hộp, chữ I, chữ Z, chữ T, chữ C không bẻ móc và các thép góc một cách gián tiếp. Đầu tiên, tác giả bỏ qua ứng suất nén dọc trong các tấm tăng cứng. Sau khi tính được hệ số chống xoay, tác động của ứng suất nén này sẽ được xem xét thông qua một thừa số nhân vào hệ số chống xoay vừa xác định.

Phần sau sẽ thảo luận bài toán xác định hệ số chống xoay của bản cánh thép chữ C. Bản cánh được coi là tựa khớp trên ba cạnh và cạnh còn lại tự do.

a) Hệ số chống xoay khi bỏ qua ứng suất nén dọc

Do giả định $\sigma_x = 0$ nên số hạng cuối cùng của Công thức (2.20) biến mất. Sử dụng $\bar{w}$, D' và t_c để biểu thị hàm độ võng, độ cứng kháng uốn và độ dày của tấm tăng cứng, trong đó

$$D' = \frac{Et_c^3}{12} \quad (A.1)$$

Ta có

$$D' \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial x^4} - 2 \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \bar{w}}{\partial y^4} = 0 \quad (A.2)$$

Độ võng $\bar{w}$ có thể được biểu thị theo dạng tổng quát

$$\bar{w} = C_1 \sinh \frac{y}{y_0} + C_2 \cosh \frac{y}{y_0} + C_3 y \sinh \frac{y}{y_0} + C_4 y \cosh \frac{y}{y_0} \quad (A.3)$$

trong đó C_1 đến C_4 là hằng số được xác định bởi các điều kiện biên cho trước đã nêu ở trên.

Giải phương trình trên và sử dụng

$$- \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0 \quad (A.4)$$

suy ra biểu thức cho góc xoay của tấm tăng cứng như sau

$$- \frac{1}{2D'^2} \frac{3 \cosh^2 \frac{c}{b}}{3 \sinh \frac{c}{b} \cosh \frac{c}{b}} \frac{1}{c/b} M_y$$

$$\frac{c}{2D'^2} M_y \quad (A.5)$$

trong đó

Đối với bản bụng, giả thiết rằng tiết diện chữ C có nửa bước sóng mất ổn định λ bằng với bề rộng b (trên thực tế, tỷ lệ λ/b không phải là hằng số), góc xoay của tấm tăng cứng sẽ bằng

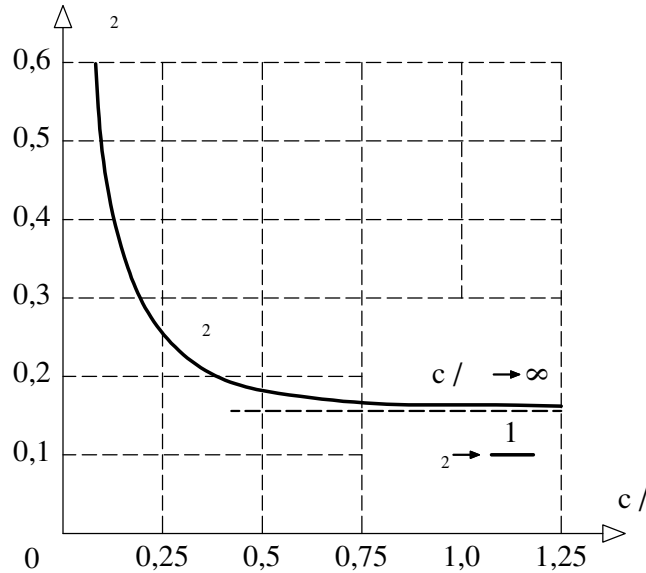
$$- \frac{b}{D'^2} \frac{c}{b} M_y \quad (A.6)$$

Do đó, hệ số chống xoay

$$2 \frac{t^3}{t_c^3} = \frac{c}{b} \quad (A.7)$$

trong đó

$$\frac{c}{b} = \frac{1}{2} \frac{3 \cosh^2 \frac{c/b}{3 \sinh \frac{c/b} \cosh \frac{c/b}}{c/b} \frac{1}{c/b}} \quad (A.8)$$



Hình A.6 Hệ số chống xoay

Đặc điểm biến thiên của hệ số chống xoay ζ có thể được biểu thị thông qua hàm ρ_2 , như thể hiện trong Hình A.6, trong đó hoành độ c/λ chính là c/b vì $\lambda = b$.

b) *Ảnh hưởng của ứng suất nén dọc*

Hệ số r được sử dụng để xem xét gần đúng ảnh hưởng của ứng suất nén tới độ cứng của tấm tăng cứng. Biểu thức của hệ số này được xây dựng sao cho nó trở thành vô hạn nếu bản cánh và bản bụng bị mất ổn định đồng thời khi chúng được xem xét là các tấm tựa khớp quanh chu vi.

$$r = \frac{1}{1 - 9,4t^2c^2/t_c^2b^2} \quad (\text{A.9})$$

Cuối cùng khi nhân vào hệ số chống xoay ở trên thu được

$$2\frac{t^3}{t_c^3} - 2\frac{c}{b} \frac{1}{1 - 9,4t^2c^2/t_c^2b^2} \quad (\text{A.10})$$

Phạm vi áp dụng của công thức này là $9,4t^2c^2/t_c^2b^2 < 1$. Khi số hạng $9,4t^2c^2/t_c^2b^2$ lớn hơn 1, bản cánh sẽ là tấm yếu hơn bị mất ổn định trước và được tăng cứng bởi bản bụng.

Đối với bản cánh của tiết diện chữ C (xem Hình 2.9b), giả sử bước sóng $\lambda = \infty$, ta có

$$\frac{t^3}{t_c^3} \frac{c}{b} \frac{1}{1 - 0,106t^2c^2/t_c^2b^2} \quad (\text{A.11})$$

áp dụng khi $0,106t^2c^2/t_c^2b^2 < 1$.

A.4.2. Xác định hệ số mất ổn định

Nghiệm tổng quát của phương trình (2.19) là

$$w = \sin \frac{n}{a} x \left[C_1 \cosh \beta_1 y + C_2 \sinh \beta_1 y + C_3 \cos \beta_2 y + C_4 \sin \beta_2 y \right] \quad (\text{A.12})$$

thỏa mãn các điều kiện biên tựa khớp tại các cạnh $x = 0$ và $x = a$, tức độ võng w và mô men M_x bằng 0.

Trong biểu thức trên,

n – số nửa sóng theo phương x

$$\beta_1 = \frac{n}{a} \sqrt{1 - \frac{t^3}{t_c^3} \frac{c}{b} \frac{1}{1 - 0,106t^2c^2/t_c^2b^2}} \quad (\text{A.13})$$

$$\beta_2 = \frac{n}{a} \sqrt{1 - \frac{t^3}{t_c^3} \frac{c}{b} \frac{1}{1 - 0,106t^2c^2/t_c^2b^2}}$$

và

$$D = \frac{c^2 t}{n} \frac{a}{n} \quad (A.14)$$

trong đó

D – độ cứng của tấm, xem Công thức (2.18)

σ_{cr} – ứng suất tới hạn

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{b^2} \frac{n^2 D}{t} = \frac{E}{12} \frac{t^2}{b^2} k \quad (A.15)$$

k – hệ số mất ổn định

$$k = \frac{n^2}{2} \quad (A.16)$$

α – tỷ lệ các cạnh

$$\frac{a}{b} \quad (A.17)$$

Các hằng số C_1 đến C_4 được xác định sao cho các điều kiện biên tại hai cạnh dọc được thỏa mãn. Các trường hợp đặc biệt của điều kiện biên sẽ được thảo luận trong phần sau.

a) *Trường hợp I: Tấm tựa khớp trên các cạnh b , ngàm đàn hồi trên các cạnh a*

Gốc tọa độ được đặt ở điểm giữa cạnh trái của tấm như thể hiện trong Hình A.7. Giả thiết rằng độ cứng chống xoay giống nhau trên cả hai cạnh dọc, độ võng w tương ứng với giá trị nhỏ nhất của σ_c là một hàm đối xứng theo y , và các số hạng $C_2 \sinh \frac{1}{2}y$ và $C_4 \sin \frac{1}{2}y$ trong Công thức (A.12) bị triệt tiêu. Do đó, phương trình trở thành

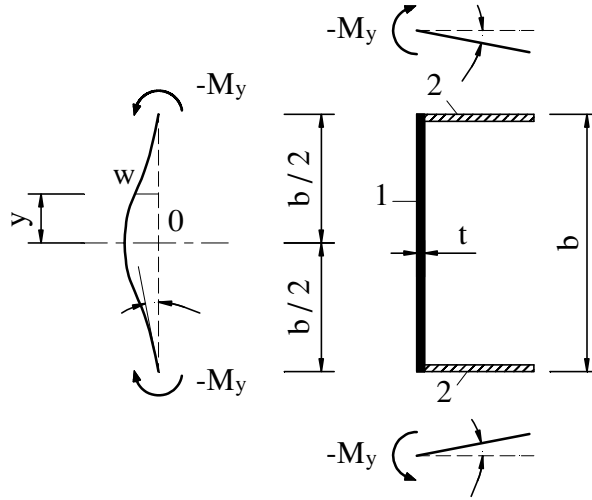
$$w = \sin \frac{n x}{a} \left[C_1 \cosh \frac{1}{2}y + C_3 \cos \frac{1}{2}y \right] \quad (A.18)$$

điều kiện biên tại các cạnh dọc a được sử dụng để xác định hằng số C_1 và C_3

$$w_y \Big|_{y = \frac{b}{2}} = 0 \quad (A.19)$$

và

$$w_y \Big|_{y = \frac{b}{2}} = -w_y \Big|_{y = \frac{b}{2}} \quad (A.20)$$



Hình A.7 Tấm tựa khớp trên các cạnh b , ngàm đàn hồi trên các cạnh a

1 – Tấm mắt ổn định

2 – Tấm tăng cứng

Biểu thức (A.20) tương đương với

$$\frac{w}{y} - \frac{b}{2} - \frac{^2w}{y^2} \Big|_{y=\frac{b}{2}} = 0 \quad (\text{A.21})$$

Các công thức (A.18) và (A.21) hình thành nên hệ hai phương trình tuyến tính của C_1 và C_3 . Bằng cách cho định thức của hệ phương trình này bằng không, ta thu được phương trình ổn định

$$\sqrt{1} \tanh \frac{n}{2} \sqrt{1} - \sqrt{1} \tan \frac{n}{2} \sqrt{1} - \frac{n}{2} = 0 \quad (\text{A.22})$$

Giải phương trình này sẽ cho giá trị của μ^2 theo α/n . Đơn giản hóa mối quan hệ này bằng biểu thức sau

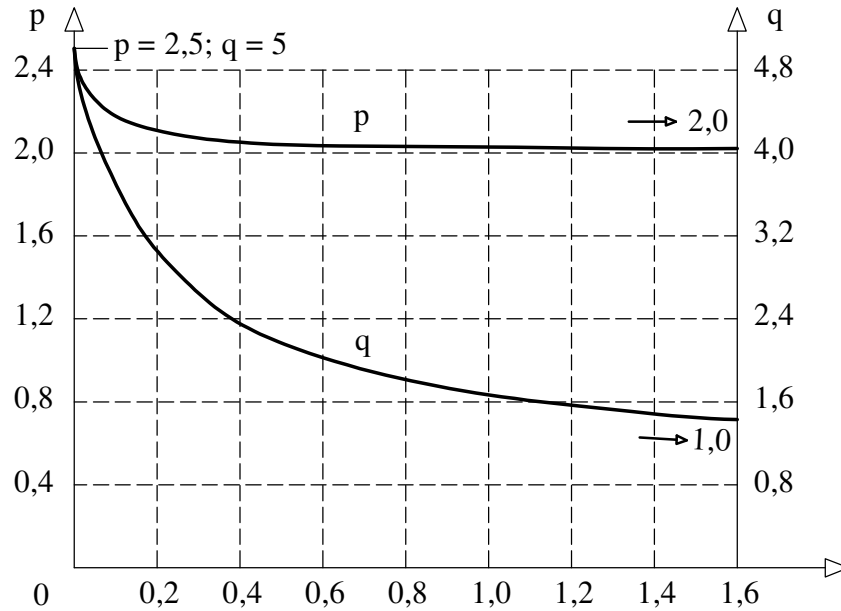
$$1 - p \frac{^2}{n} - q \frac{^4}{n} = 0 \quad (\text{A.23})$$

Người ta đã chứng minh được rằng biểu thức gần đúng (A.23) có sai số nhỏ hơn 1% so với các giá trị chính xác.

Các giá trị của p và q phụ thuộc vào ζ . Các giá trị này được tính toán và lập thành biểu đồ thực hành, như thể hiện trong Hình A.8.

Từ đó hệ số mất ổn định có thể xác định theo

$$k = \frac{n^2}{p} - q \frac{2}{n} \quad (A.24)$$



Hình A.8 Giá trị của p và q theo ζ (Trường hợp I)

Khi $\zeta > 1,6$, tính p và q theo công thức

$$\begin{aligned} p &= 2 \frac{0,047}{0,73} \\ q &= 1 \frac{0,7}{0,077} \end{aligned} \quad (A.25)$$

Hệ số mất ổn định nhỏ nhất $k_{\min}$

$$k_{\min} = p - 2\sqrt{q} \quad (A.26)$$

Tỷ lệ hai cạnh tương ứng với hệ số mất ổn định nhỏ nhất là

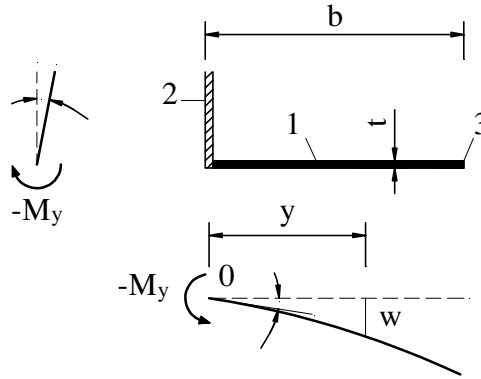
$$\frac{n}{\sqrt[4]{q}} \quad (A.27)$$

b) Trường hợp II: Tấm tựa khớp trên các cạnh b , ngàm đàn hồi ở một cạnh a và tự do ở cạnh a còn lại

Sử dụng hệ tọa độ sau: trục x trùng với cạnh a tựa khớp và trục y trùng với cạnh trái của tấm, như được thể hiện trong Hình A.9. Do tấm không đối xứng qua trục x nên phải sử dụng nghiệm tổng quát của phương trình vi phân (A.3).

Các điều kiện biên dùng để xác định bốn hằng số C_1 đến C_4

$$\begin{aligned} \text{Khi } y = 0: \quad w = 0 \quad \text{và} \quad \dots \\ \text{Khi } y = b: \quad M_y = 0 \quad \text{và} \quad Q_y = \dots \end{aligned} \quad (\text{A.28})$$



Hình A.9 Tấm ngàm đàn hồi ở một cạnh a và tự do ở cạnh a còn lại

1 – Tấm mất ổn định 2 – Tấm tăng cứng 3 – Cạnh tự do

Tương tự như trường hợp I, ứng suất tối hạn σ_{cr} có thể được biểu thị dưới dạng

$$\sigma_{cr} = \frac{E}{12} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \left(\frac{n}{p} + \frac{q}{n} \right)^2 \quad (\text{A.29})$$

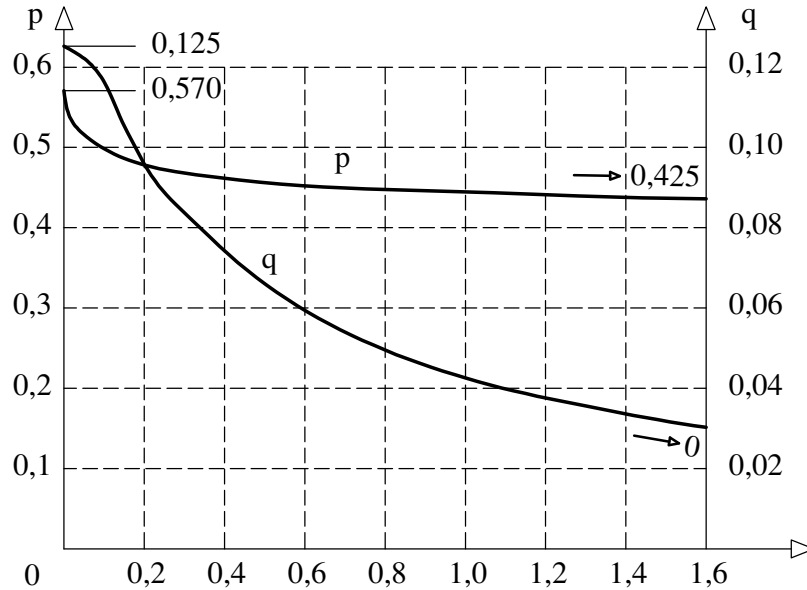
Hệ số mất ổn định k và giá trị nhỏ nhất $k_{\min}$ vẫn sử dụng các công thức (A.24) và (A.26) nhưng khác nhau về giá trị của p và q như được thể hiện trong Hình A.10.

Khi $\zeta > 1,6$, tính p và q theo các công thức sau

$$\begin{aligned} p &= 0,425 \frac{0,016}{0,025} \\ q &= \frac{0,061}{0,43} \end{aligned} \quad (\text{A.30})$$

Các điều kiện ổn định cho Trường hợp I và II như (A.22) đã được Lundquist và Stowell [109-111] tính toán rất chính xác.

Lundquist và Stowell sử dụng một hệ số chống xoay khác $\varepsilon = 2/\zeta$. Các giá trị của hệ số mất ổn định k trong Công thức (A.29) được trình bày trong các bài báo của Lundquist và Stowell dưới dạng biểu đồ và bảng tra [109-111]. So sánh cho thấy các đường cong p và q trong Hình A.8 và Hình A.10 tính ra k với sai số nhỏ hơn 1%.



Hình A.10 Giá trị của p và q theo ζ (Trường hợp II)

A.5. Phương pháp giải bài toán mất ổn định khi xem xét tiết diện như một tổng thể

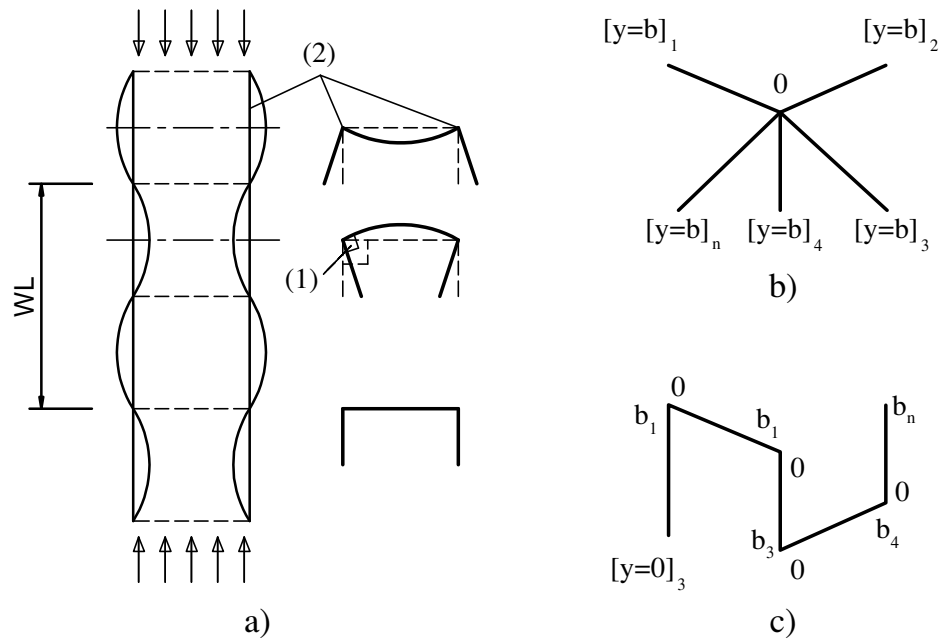
Bulson (1970) [45] đã thảo luận về vấn đề ổn định cục bộ của tiết diện cấu tạo từ các tấm phẳng, hay còn gọi là tổ hợp tấm. Tác giả đã thiết lập được hệ phương trình ổn định tổng quát của tổ hợp tấm chịu ứng suất nén đều.

Khi một vài tấm phẳng được liên kết theo các cạnh dọc để tạo nên cấu kiện thành mỏng, cấu kiện đó có thể bị “mất ổn định cục bộ” khi các tấm thành phần bị mất ổn định. Các đặc điểm sau đây thường được quan sát thấy khi mất ổn định xảy ra. Các đặc điểm này cũng là các giả thiết khi áp dụng phương pháp của Bulson.

Giao tuyến giữa các tấm thành phần vẫn giữ nguyên là đường thẳng;

Góc giữa các tấm liên kề không bị thay đổi trong quá trình mất ổn định;

Các bước sóng mất ổn định của tất cả các tấm là như nhau.



Hình A.11 Mất ổn định cục bộ của các tiết diện thành mỏng

WL – Chiều dài bước sóng

(1) – Góc giữa các tấm không đổi

(2) – Giao tuyến vẫn giữ là đường thẳng

Vẫn có một số ngoại lệ. Ví dụ, khi góc giữa hai tấm quá nhỏ, giao tuyến của chúng có thể bị biến dạng. Tiết diện với độ dày tấm thành phần thay đổi lớn có thể thiếu tính liên tục tại giao tuyến. Tuy nhiên, với việc tiết diện thành mỏng sử dụng hiện nay đều được tạo thành từ một tấm thép duy nhất, các giả thiết nêu trên đều có thể chấp nhận được và được minh họa trong Hình A.11a.

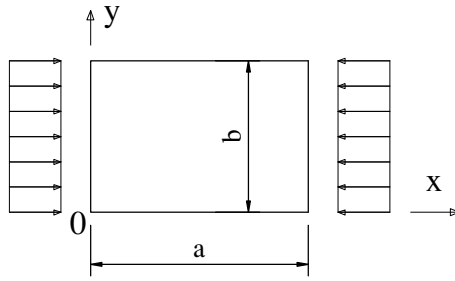
Có hai hình thức tiết diện. Một là tiết diện gồm nhiều tấm thép có chung một giao tuyến (Hình A.11b), được gọi là kiểu tiết diện "hoa thị". Loại tiết diện thứ hai bao gồm các tấm nối tiếp nhau (thường được tạo thành từ một tấm thép duy nhất), được gọi là tiết diện "nối tiếp" (Hình A.11a, c). Phương pháp của Bulson sử dụng hàm đặc trưng của từng tấm đơn lẻ. Các tấm này được phân thành hai loại, tức là tấm có gờ và tấm không có gờ. Ký hiệu sử dụng ở các mục sau cho một tấm là một đầu $y = 0$ và đầu còn lại là $y = b$, như thể hiện trong Hình A.11b và Hình A.11c.

A.5.1. Ổn định của tấm chữ nhật không có gờ chịu nén đều với các cạnh chịu tải tựa khớp

a) Các cạnh dọc $y = 0, y = b$ tựa khớp

Phương trình cân bằng là phương trình (2.19) với các điều kiện biên

$$w_{y=0,b} = 0 \quad \text{và} \quad \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad \text{tại } y=0,b \quad (\text{A.31})$$



Hình A.12 Tấm chữ nhật chịu nén

Đối với tấm tựa khớp trên các cạnh gia tải, giả sử rằng tấm bị mất ổn định thành m nửa sóng hình sin dọc theo phương của tải trọng, nghiệm của phương trình vi phân (2.19) là

$$w = \sin \frac{m x}{a} [A_1 \cosh y + A_2 \sinh y + A_3 \cos y + A_4 \sin y] \quad (\text{A.32})$$

với

$$\sqrt{\frac{m^2 - 2}{a^2}} = \sqrt{\frac{t m^2 - 2}{D a^2}} \quad (\text{A.33})$$

Sử dụng các điều kiện biên (A.31) và đặt định thức bằng không ta có

$$S = S \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ r^2 & 0 & s^2 & 0 \\ r^2 \cosh p & r^2 \sinh p & s^2 \cos q & s^2 \sin q \\ \cosh p & \sinh p & \cos q & \sin q \end{vmatrix} = 0 \quad (\text{A.34})$$

với

$$\frac{p}{q} = \frac{b}{b} \sqrt{\frac{m^2}{k^2} - \frac{m^2}{b^2}} \quad (\text{A.35})$$

$$\frac{r^2}{s^2} = \frac{p^2}{q^2} \mp \frac{m^2}{b^2} \quad (\text{A.36})$$

và

$$\frac{a}{b} \quad (\text{A.37})$$

Giải phương trình (A.34) sẽ thu được mối quan hệ giữa hệ số mất ổn định k và tỷ lệ hai cạnh ϕ

$$k = \frac{m^2}{2} - \frac{2}{m^2} \quad (\text{A.38})$$

hoặc có thể được thể hiện dưới dạng tổng quát

$$k = \frac{C_1}{2} - C_2^2 - C_3 \quad (\text{A.39})$$

Trong Công thức (A.34), $(S)S$ được gọi là hàm đặc trưng. Dạng ma trận của $(S)S$ là ma trận vuông bậc bốn nằm trong định thức của ma trận tổng của tổ hợp tám.

Ứng suất tới có thể được xác định từ mối quan hệ

$$k = \frac{tb^2}{2D} \quad (\text{A.40})$$

b) *Cạnh dọc $y = 0$ tựa khớp, $y = b$ tự do*

Tương tự, chúng ta có được hàm đặc trưng cho các tấm có cạnh dọc $y = 0$ tựa khớp, $y = b$ tự do như sau

$$S F \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ r^2 & 0 & s^2 & 0 \\ r^2 \cosh p & r^2 \sinh p & s^2 \cos q & s^2 \sin q \\ ps^2 \sinh p & ps^2 \cosh p & qr^2 \sin q & qr^2 \cos q \end{vmatrix} \quad (\text{A.41})$$

$$r^2 - s^2 - qr^4 \sinh p \cos q - ps^4 \cosh p \sin q$$

c) *Tám chữ nhật chịu nén đều với các điều kiện biên khác nhau*

Hàm đặc trưng của các điều kiện biên và các trường hợp chịu tải khác được trình bày trong tài liệu [45] và trong Bảng A.1.

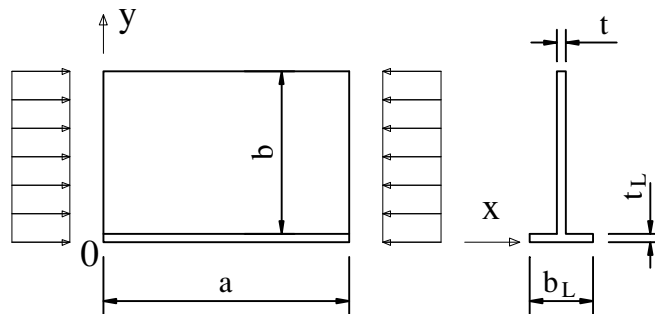
Bảng A.1 Hàm đặc trưng của các điều kiện biên khác

Điều kiện biên	Hàm đặc trưng			
Hai cạnh tựa khớp	$S \ S$	$r^2 \ s^2$	$\sinh p \sin q$	0
Hai cạnh ngàm	$B \ B$	$2pq \ 1$	$\cosh p \cos q$	$p^2 \ q^2 \sinh p \sin q$
Một cạnh ngàm, một cạnh tựa khớp	$B \ S$	$r^2 \ s^2$	$q \sinh p \cos q$	$p \cosh p \sin q$
Một cạnh ngàm, một cạnh tự do	$B \ F$	$2pqr^2s^2$	$pq \ r^4 \ s^4$	$\cosh p \cos q$ $q^2r^4 \ p^2s^4 \sinh p \sin q$
Một cạnh tựa khớp, một cạnh tự do	$S \ F$	$r^2 \ s^2$	$qr^4 \sinh p \cos q$	$ps^4 \cosh p \sin q$
Hai cạnh ngàm đàn hồi	Thể hiện dưới dạng ma trận [45]			

Trong bảng trên, S, B và F lần lượt đại diện cho tựa khớp, ngàm cứng và tự do. Ký hiệu trọng dấu ngoặc tham chiếu đến các điều kiện tại cạnh $y = 0$, tương ứng với điều kiện biên đầu tiên trong cột 1.

A.5.2. Sự mất ổn định của các tấm chữ nhật có gờ

Vấn đề ổn định của các tấm chữ nhật có gờ được Bleich giới thiệu trong tài liệu [44].

**Hình A.13 Tấm chữ nhật có gờ**

Khi phân tích ảnh hưởng của gờ đối với tính ổn định, trước tiên giả thiết gờ có độ cứng kháng xoắn không đáng kể, do đó mép của tấm có thể xoay tự do trong quá trình mất ổn định. Tuy nhiên, độ võng của tấm tại giao tuyến với gờ bị hạn chế

bởi độ cứng kháng uốn của gờ. Giả thiết độ cứng kháng xoắn không đáng kể là hợp lý nếu tấm được bẻ móc theo góc vuông, tức gờ có tiết diện chữ nhật hẹp.

Tấm tựa khớp tại $y = 0$, có gờ tại $y = b$

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ r^2 & 0 & s^2 & 0 & 0 \\ r^2 \cosh p & r^2 \sinh p & s^2 \cos q & s^2 \sin q & 0 \\ \cosh p & \sinh p & \cos q & \sin q & 1 \\ ps^2 \sinh p & ps^2 \cosh p & qr^2 \sin q & qr^2 \cos q & R \end{vmatrix} F = 0 \quad (\text{A.42})$$

hoặc

$$S \quad F \quad S \quad S \quad R \quad F \quad 0 \quad (\text{A.43})$$

hoặc

$$\frac{F}{S} \quad S \quad R \quad F \quad 0 \quad (\text{A.44})$$

với

$$R \quad F \quad \frac{b^3}{Da^2} \quad \frac{EI}{a^2} \quad \bar{A} \quad R \quad (\text{A.45})$$

Trong trường hợp gờ có cùng độ dày với tấm

$$R \quad F \quad \frac{b_L^4}{b^2} \quad \frac{b_L^2}{t} \quad 1 \quad k^2 \quad (\text{A.46})$$

Các nghiên cứu cho đến nay mới chỉ xem xét các gờ đối xứng, nghĩa là trục trung hòa của gờ nằm trong mặt phẳng tấm. Hiện tại, các phân tích sâu hơn chưa được mở rộng cho các trường hợp khác.

Tài liệu của Bulson chỉ xây dựng biểu đồ cho $b/t = 20$, do đó ít có tác dụng trong thực tế.

A.5.3. Ổn định của tiết diện nổi tiếp

Xét tấm thành phần thứ r_{th} . Để các cạnh $[y = 0]_r$ và $[y = b]_r$ vẫn thẳng

$$\begin{aligned} w_{y=0}_r &= 0 \\ w_{y=b}_r &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.47})$$

Để góc giữa các tấm thứ r_{th} và $(r + 1)_{th}$ không thay đổi

$$\frac{w}{y_{y=b_r}} - \frac{w}{y_{y=0_{r+1}}} = 0 \quad (A.48)$$

Điều kiện cân bằng mô men quanh $[0_x]_r$

$$D \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \Big|_{y=b_r} - D \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \Big|_{y=0_{r+1}} = 0 \quad (A.49)$$

Mỗi biểu thức trên tạo ra $(n - 1)$ phương trình. Hai điều kiện biên dọc theo mỗi cạnh $(y = 0)_1$ và $(y = b)_n$ tạo ra thêm bốn phương trình nữa, tổng cộng sẽ có $4n$ phương trình tuyến tính. Giả sử rằng số tấm $n = 3$, sẽ sinh ra mười hai phương trình sắp xếp như sau

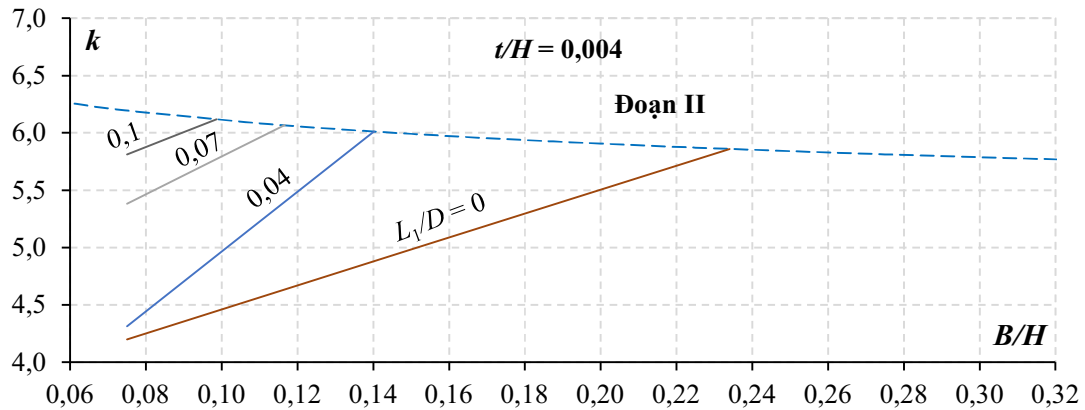
$$\begin{array}{cccccccccccccc} a_1 & b_1 & c_1 & d_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & {}_1A_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 & d_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & {}_1A_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 & d_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & {}_1A_3 \\ a_4 & b_4 & c_4 & d_4 & e_4 & f_4 & g_4 & h_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & {}_1A_4 \\ a_5 & b_5 & c_5 & d_5 & e_5 & f_5 & g_5 & h_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & {}_2A_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_6 & f_6 & g_6 & h_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & {}_2A_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_7 & f_7 & g_7 & h_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & {}_2A_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_8 & f_8 & g_8 & h_8 & j_8 & k_8 & l_8 & m_8 & {}_2A_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_9 & f_9 & g_9 & h_9 & j_9 & k_9 & l_9 & m_9 & {}_3A_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & j_{10} & k_{10} & l_{10} & m_{10} & {}_3A_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & j_{11} & k_{11} & l_{11} & m_{11} & {}_3A_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & j_{12} & k_{12} & l_{12} & m_{12} & {}_3A_4 \end{array} \quad 0 \quad (A.50)$$

Hàng 4 và 9 thể hiện góc giữa các tấm liền kề không đổi. Hàng 5 và 8 biểu diễn sự cân bằng của mô men tại giao tuyến. Định thức có thể được triển khai theo các định thức con bậc bốn hoặc hàm đặc trưng. Có thể chứng minh rằng bài toán mất ổn định của tiết diện nối tiếp có thể được biểu thị theo các hàm ổn định của tấm tựa khớp và tấm ngàm cứng. Chilver [51] đã giải quyết chi tiết bài toán tiết diện nối tiếp.

Phụ lục B. Các bảng biểu và đồ thị

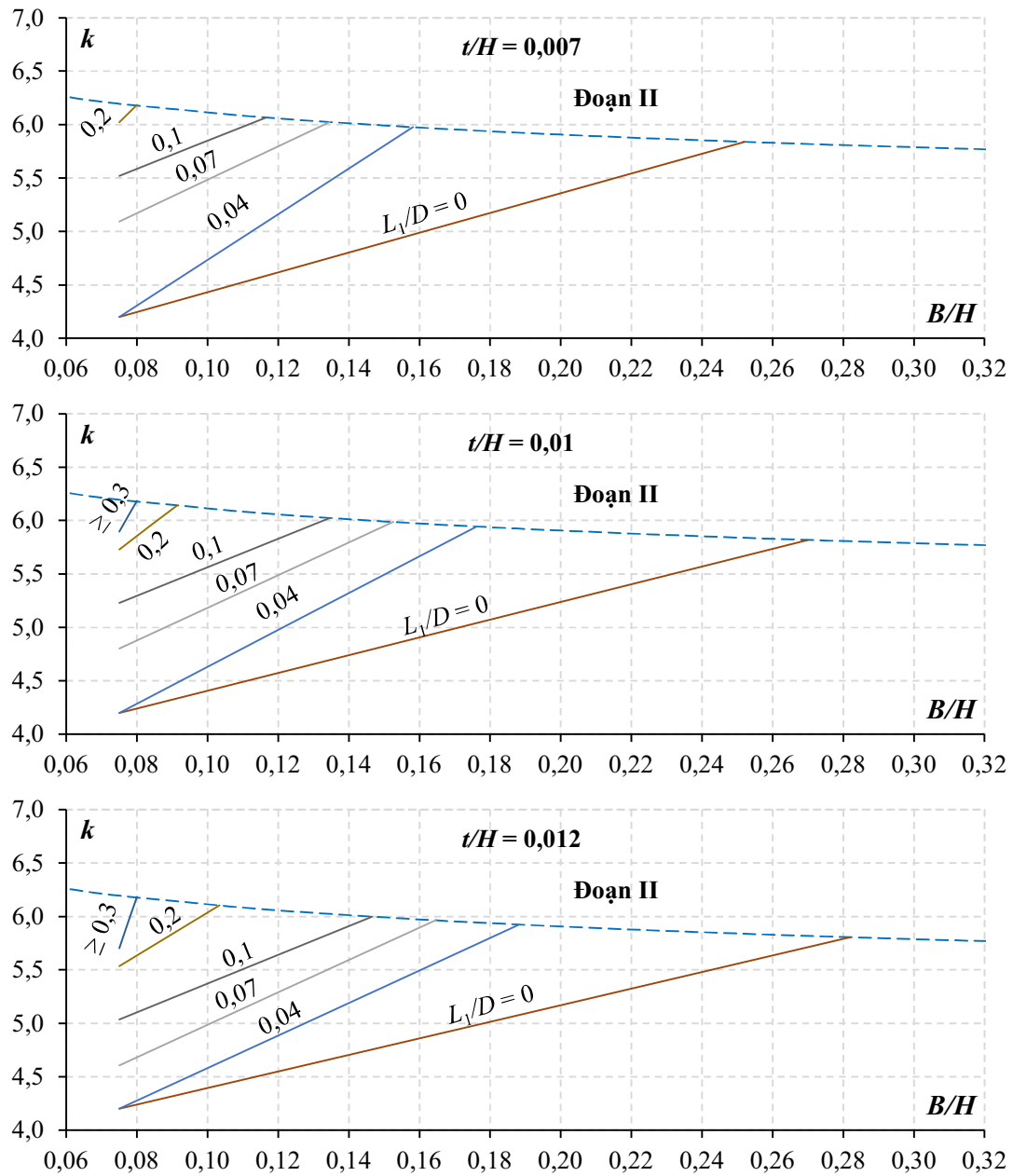
B.1. Đồ thị tra hệ số mất ổn định của cấu kiện chữ C chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén

Các công thức xác định hệ số mất ổn định trong Bảng 3.3 được thể hiện bằng các biểu đồ ở Hình B.1, trong đó Hình B.1a chứa các biểu đồ cho đoạn đầu tiên và Hình B.1b là biểu đồ cho đoạn thứ hai và thứ ba. Khi thực hành, trước tiên sử dụng các tỷ lệ t/H và L_1/H và các biểu đồ trong Hình B.1a để xác định giới hạn trên μ_{B0} , tức hoành độ của điểm giao nhau giữa đường thẳng của đoạn đầu tiên và đường cong của đoạn thứ hai (đường đứt nét). Cho phép tiến hành nội suy. Nếu tỷ lệ B/H nhỏ hơn μ_{B0} , các biểu đồ trong Hình B.1a được sử dụng để xác định hệ số mất ổn định. Ngược lại, Hình B.1b sẽ được sử dụng. Ví dụ, giả sử $t/H = 0,004$ và $L_1/H = 0,04$, tra biểu đồ đầu tiên trong Hình B.1a thu được $\mu_{B0} = 0,14$. Khi $B/H = 0,1$, tức nhỏ hơn 0,14, biểu đồ đầu tiên trong Hình B.1a được tái sử dụng cho ra hệ số mất ổn định là 5,2. Trong trường hợp khác, khi $B/H = 0,8$, tức lớn hơn 0,14, biểu đồ trong Hình B.1b được sử dụng và cho ra hệ số mất ổn định là 5,65.



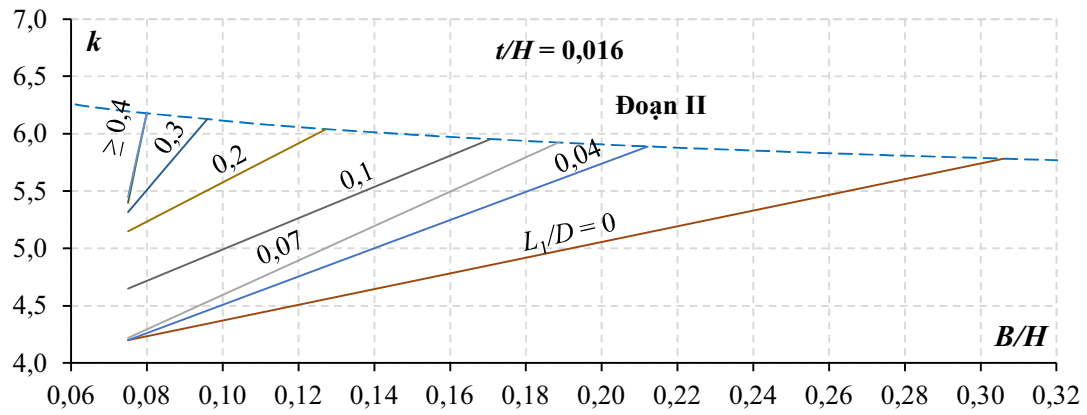
a) Hệ số mất ổn định của đoạn I

Hình B.1 Đồ thị tra hệ số mất ổn định (Phần 1)

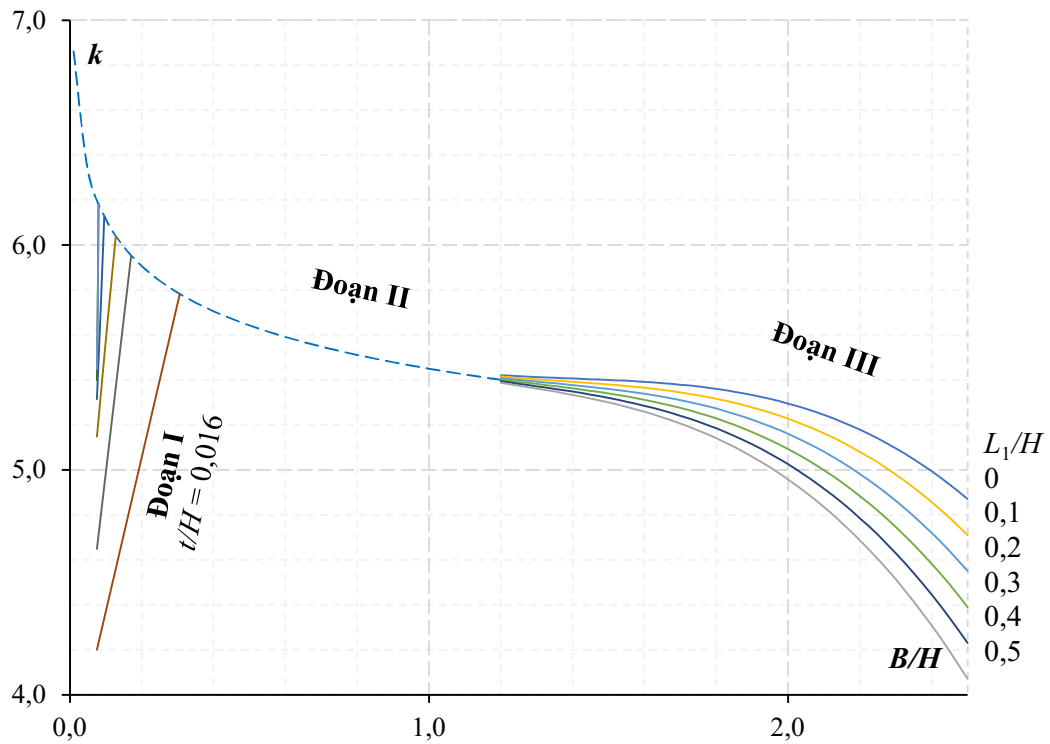


a) Hệ số mất ổn định của đoạn I

Hình B.1 Đồ thị tra hệ số mất ổn định (Phần 2)



a) Hệ số mất ổn định của đoạn I



b) Hệ số mất ổn định của đoạn II và III

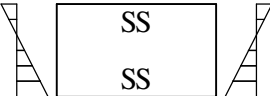
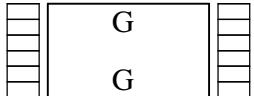
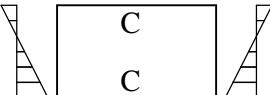
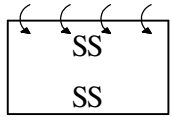
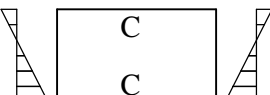
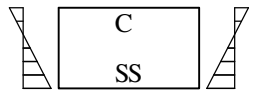
Hình B.1 Đồ thị tra hệ số mất ổn định

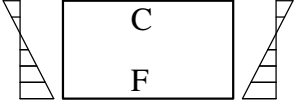
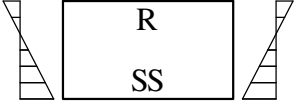
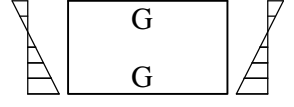
B.2. Các bảng thống kê**Bảng B.1 Tỷ lệ khối lượng xà gò**

Thứ tự	Tổng khối lượng kết cấu thép (không bao gồm tấm lợp)	Xà gò mái và xà gò tường	
	Tấn	Khối lượng Tấn	Tỷ lệ phần trăm %
1	405,3	178,9	44,1
2	245,1	64,0	26,1
3	166,4	68,2	41,0
4	84,3	33,4	39,7
5	219,5	94,8	43,2
6	366,0	111,6	30,5
7	60,8	18,3	30,1
8	540,2	44,0	8,1
9	21,6	4,1	19,0
10	160,0	18,0	11,3
11	8,0	2,0	25,0
12	10,7	5,0	46,4
13	1749,3	676,7	38,7
14	589,7	343,2	58,2
15	525,1	118,5	22,6
16	274,6	125,8	45,8
17	494,2	178,6	36,1
18	3,1	1,6	51,5
19	960,9	291,1	30,3
20	135,9	46,5	34,2
21	181,9	63,3	34,8

Thứ tự	Tổng khối lượng kết cấu thép (không bao gồm tấm lợp)	Xà gồ mái và xà gồ tường	
	Tấn	Khối lượng Tấn	Tỷ lệ phần trăm %
22	180,1	62,7	34,8
23	38,4	14,5	37,8
24	38,1	13,6	35,5
25	38,1	13,6	35,5
26	9,0	3,4	38,5
27	8,4	2,7	32,1
28	933,1	277,8	29,8
29	159,4	55,6	34,9
30	157,5	55,1	35,0
31	26,5	9,8	37,2
32	17,9	6,9	38,5
33	8,4	2,7	32,1
34	783,9	243,6	31,1
35	17,9	6,9	38,5
36	168,2	52,0	30,9
37	147,5	48,6	32,9
38	113,8	32,6	28,6
		Trung bình	34,2

Bảng B.2 Các hàm độ võng

Điều kiện biên	Các hàm độ võng $f(y)$
Timoshenko [159]  (Nghiem xấp xỉ)	$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin \frac{n y}{b}$
Timoshenko [159]  (Nghiem chính xác)	$C_1 e^{-y} + C_2 e^y + C_3 \cos y + C_4 \sin y$
Timoshenko [159]  (Nghiem xấp xỉ)	$\sum_{n=1}^{\infty} a_n \left(1 - \cos \frac{2n y}{b} \right)$
Timoshenko [158]  (Nghiem chính xác)	$A \sinh \frac{y}{a} + B \cosh \frac{y}{a} + C \frac{y}{a} \sinh \frac{y}{a} + D \frac{y}{a} \cosh \frac{y}{a}$
Nölke [192]  (Nghiem xấp xỉ)	$\sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n \cos \frac{p_n y}{b} + B_n \cosh \frac{p_n y}{b} + C_n \sin \frac{p_n y}{b} + D_n \sinh \frac{p_n y}{b} \right]$ trong đó p_n là nghiệm của phương trình $\cos p_n \cosh p_n = 1$
Kollbrunner [94]  (Nghiem xấp xỉ)	$\sum_{n=1}^{\infty} \left[B_n \cos \frac{p_n y}{b} + D_n \sin \frac{p_n y}{b} + \cosh \frac{p_n y}{b} + \sinh \frac{p_n y}{b} \right]$ trong đó p_n là nghiệm của phương trình $\tan p_n = \tanh p_n$

Điều kiện biên	Các hàm độ võng $f(y)$
Nölke [192]  (Nghiệm xấp xỉ)	$\sum_{n=1} B_n \cos \frac{p_n y}{b} \cosh \frac{p_n y}{b} + D_n \sin \frac{p_n y}{b} \sinh \frac{p_n y}{b}$ trong đó p_n là nghiệm của phương trình $\cos p_n \cosh p_n = 0$
Bulson [45]  (Nghiệm xấp xỉ)	$A \frac{y}{b}$
Johnson [87] Schuette [144]  (Nghiệm xấp xỉ)	$\sum_{n=1} A_n \sin \frac{n y}{b}$
Jae Hoon Kang [92]  (Nghiệm chính xác)	$\sum_{p=0} C_p y^p$

Ghi chú:

G – Biên tổng quát

SS – Tựa khớp

F – Tự do

C – Ngàm

R – Tựa đàn hồi

“Nghiệm chính xác” được xác định từ hàm độ võng chính xác, tức hàm thỏa mãn phương trình vi phân cân bằng. “Nghiệm xấp xỉ” biểu thị độ võng sử dụng hàm xấp xỉ áp dụng bởi phương pháp năng lượng.

Bảng B.3 Công thức đề xuất tính toán độ bền của các cấu kiện chịu uốn quanh trục yếu và trục không đối xứng

Tác giả	Năm	Loại tiết diện	Biểu thức đề xuất									
Nuttayasa- kul và Easterling [120]	2003	Tiết diện mũ phức hợp (Hình 1.8b)	Tương tác với mất ổn định méo									
			M_{nd}	$\frac{M_{crl}}{M_y}$	0,7	M_y						
Fan và cộng sự [70]	2019	Thép không gỉ Chữ C Bản bụng chịu nén (Hình 1.8a)	Khi l	0,28								
			M_{nl}	$1,52M_y$								
			Khi l	0,28								
			M_{nl}	1,71	0,48	$\frac{M_{crl}}{M_y}^{0,225}$	$\frac{M_{crl}}{M_y}^{0,225}$	M_y				
Do ổn định cục bộ (tiết diện trong Hình 1.8e)												
			Khi l	0,5	$\sqrt{0,25} a^{\frac{1}{2}}$							
			M_{nl}	M_y								
Degtyarev [59]	2020	Tôn sàn Uốn quanh trục yếu (Hình 1.8e,f)	Khi $0,5$	$\sqrt{0,25} a^{\frac{1}{2}}$	l	3,517						
			M_{nl}	1	a	$\frac{M_{crl}}{M_y}$	$\frac{M_{crl}}{M_y}$	M_y				
			a	0,16	0,004	y_c/d	3,94	0				
				1,53	y_c/d	2,21	0,2					
			y_c, d xem Hình 1.8e									
			Do ổn định méo (tiết diện trong Hình 1.8f)									

Tác giả	Năm	Loại tiết diện	Biểu thức đề xuất			
			Khi d	0,82		
			M_{nd}	M_y		
			Khi 0,82	d	1,373	
			M_{nd}	1	0,22	$\frac{M_{crl}}{M_y} \frac{M_{crl}}{M_y} M_y$
Oey và Papangelis [121]	2021	Thép chữ C Bản bụng chịu nén (Hình 1.8a)	Khi l	2,170		
			M_{nl}	1,4	$\frac{0,4}{2,17} \frac{M_{crl}}{M_y}$	$M_y^{0,5}$
			Khi l	2,170		
			M_{nl}	1	1,6	$\frac{M_{crl}}{M_y} \frac{M_{crl}}{M_y} M_y^{0,4}$
Georgan-tzia và cộng sự [76]	2022	Chữ C nhôm không bẻ móc Bản bụng chịu kéo hoặc nén (Hình 1.8c,d)	Độ bền theo phương pháp Bề rộng hữu hiệu dỏ			
			Đặt theo chiều “u” (Hình 1.8d)			
			$M_{pred,pl}$	eff_w	2	$0,2t_f b_e B e_{cc2} 0,5b_e x_p$
			$\frac{2}{3} c t_f c^2$	$\frac{2}{3} c t_f b_g^2$	2	$0,2t_f b_p b_g 0,5b_p$
			$0,2t_w D$	$2t_f x_p$	$0,5t_w$	
			Đặt theo chiều “n” (Hình 1.8c)			
			$M_{pred,pl}$	eff_w	$\frac{4}{3}$	$0,2t_f b_g^2 2 0,2t_f b_{pt} b_g 0,5b_{pt}$
			2	$0,2t_f b_{pc} b_g$	$0,5b_{pc}$	
			$0,2t_w D$	$2t_f x_p$	$0,5t_w$	
			Chi tiết xem [76]			
Glauz và Schafer [80]	2022	Các loại tiết diện	Cấu kiện chịu uốn			
			M_{nl}	$k_s M_y$	$\frac{1}{1}$	$\frac{0,1}{0,55} \frac{s}{l} \frac{l^2}{s}$
			Với $\alpha_s = d_s / d, \beta_s = 2y_c / d$			

Tác giả	Năm	Loại tiết diện	Biểu thức đề xuất						
Chi tiết xem [80]									
Ma và Papangelis [115]	2023	Thép chữ C Bản bụng chịu kéo (Hình 1.8a)	Khi	d	0,485				
				M_{nd}	M_y				
			Khi	d	0,485				
				M_{nd}	1	0,41	$\frac{M_{crd}}{M_y}^{0,36}$	$\frac{M_{crd}}{M_y}^{0,81}$	M_y

Bảng B.4 Các biểu thức xác định hệ số mất ổn định của tiết diện chữ C chịu uốn quanh trục yếu

Tác giả	Năm	Loại tiết diện	Công thức đề xuất
AISI S100 [31]	Đến nay	Tầm đơn	$k = 4$
Yiu F. và T. Peköz [180]	2001	Chữ C không bẻ móc	Bản bụng chịu nén $k_f = \frac{4,5119}{2} \frac{6,5345}{0,2064}$ Chữ C không bẻ móc $k_w = 2k_f$ khi $1 \leq t_f / t_w \leq 10$ Bản bụng chịu kéo $k_f = \frac{0,1451}{1,2555}$ khi $1 \leq t_f / t_w \leq 10$
Seif M. và B. Schafer [146]	2010	Chữ C không bẻ móc	Bản bụng chịu nén $\frac{1}{k_w} = \frac{0,8}{2} \frac{t_w}{t_f}^2$ khi $1,44 \leq t_f / t_w \leq 10,01$ Bản bụng chịu kéo $k_f = \frac{6}{2} \frac{t_w}{t_f}^{2,4}$ khi $1,44 \leq t_f / t_w \leq 10,01$
Gardner [75]	2019	Chữ C không bẻ móc	khi $\phi < 1$, bản cánh mất ổn định trước $0,05 \frac{t_f}{t_w} \leq 1 \leq 0,5 \frac{t_w}{t_f}$ khi $\phi \geq 1$, bản bụng mất ổn định trước

Tác giả	Năm	Loại tiết diện	Công thức đề xuất
Ahdab và cộng sự [26]	2022	Chữ C bề móc	$\frac{t_f}{t_w} 0,4 \frac{0,3}{2}$
			Bản bụng chịu kéo và nén đều như nhau
			Bản bụng chịu nén
			$k_{\min} 5,62; 24^2$
			khi 0 12 và 0 L_1/B 0,4
			Bản bụng chịu kéo
			$k 16,41 \frac{L_1}{B}^2 10,41 \frac{L_1}{B} \frac{H}{L_1}^{0,8769 \frac{L_1}{B} 0,3558}$
			0,5581
			khi 0 50 và 0,1 L_1/B 0,4
			hoặc
Ding và cộng sự [63]	2023	Chữ C bề móc	$k_{\min} 0,89; 4 \frac{1}{3} \frac{1}{1} \frac{L_1}{B}^2$
			khi 0,1 L_1/B 0,4
			Bản bụng chịu nén
			$k_4 \frac{1,36}{1} \frac{0,014}{0,12} \frac{0,012}{0,012}^2$
			khi 1,2 22
			Bản bụng chịu kéo
			$k k_1 k_2$
			$k_1 4 \frac{0,8}{1} \frac{0,758}{0,533} \frac{0,234}{0,09} \frac{b}{b}^2 \frac{b}{b}^2$
			0 b 2,75
			$k_2 4 \frac{b}{b} 11 \frac{2,75}{b} \frac{6}{6}$
			13 b 6
			khi 2,5 b 11,1 và 0,07 0,77

trong đó

$$\frac{H}{B} \quad \text{và} \quad b = \frac{1}{\dots}$$

tỷ số ứng suất

$$\frac{f_2}{f_1} \quad \text{và} \quad 0 \dots 1$$

$\sigma_{cr,cs}$ – ứng suất tới hạn đàn hồi cục bộ của toàn bộ tiết diện

$\sigma_{cr,p}^{SS}, \sigma_{cr,p}^F$ – ứng suất tới hạn đàn hồi cục bộ tấm mỏng tựa khớp và ngàm cứng theo các cạnh dọc

$$\frac{\sigma_{cr,p}^{SS}}{\sigma_{cr,w}^{SS}}$$

$\sigma_{cr,f}^{SS}, \sigma_{cr,w}^{SS}$ – ứng suất tới hạn đàn hồi cục bộ bản cánh và bản bụng tựa khớp theo các cạnh dọc

Phụ lục C. Kết quả tính toán và mô phỏng

C.1. Hệ số mất ổn định xác định bằng phương pháp RSM dùng để xây dựng công thức thực hành

k_{ABQ} – Hệ số mất ổn định thu được từ mô phỏng số trong ABAQUS (sử dụng kích thước bao ngoài H)

k_{RSM} – Hệ số mất ổn định tính toán theo phương pháp RSM (sử dụng kích thước tim h)

k_{Cal} – Hệ số mất ổn định tính toán theo phương pháp RSM sau khi quy đổi sang kích thước bao ngoài H

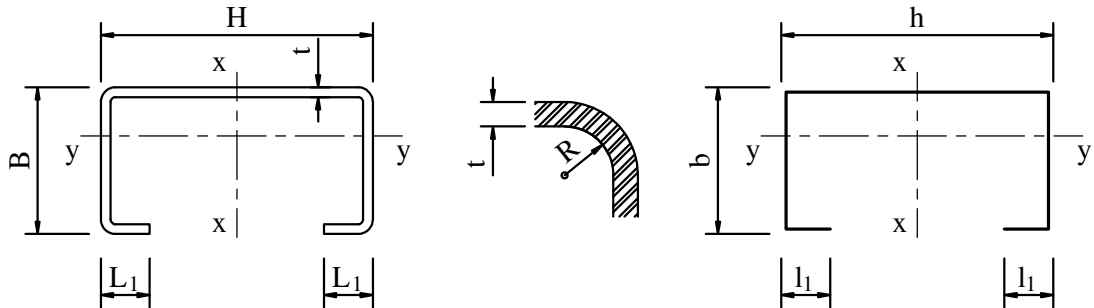
$$k_{Cal} = k_{RSM} \frac{H}{h}^2 = k_{RSM} \frac{H}{H} \frac{H}{t}^2 \quad (C.1)$$

ID – Số thứ tự

Bán kính góc uốn $R = 0$ và hệ số Poát $\nu = 0,3$.

Đơn vị của H, B, L_1, t, R là mm.

Giá trị trung bình của tỷ số k_{RSM}/k_{ABQ} là 1,002, hệ số biến thiên COV là 2,2%.



Bảng C.1 Hệ số mất ổn định theo RSM dùng để xây dựng công thức thực hành

ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cal}	ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cal}
1	200	15	0	0,7	4,550	4,530	4,562	789	200	100	40	0,8	5,837	5,576	5,621
2	200	15	10	0,7	5,520	6,017	6,059	790	200	100	60	0,8	5,840	5,573	5,618
3	200	15	20	0,7	6,494	6,380	6,425	791	200	100	80	0,8	5,839	5,568	5,613
4	200	15	30	0,7	6,640	6,431	6,476	792	200	100	90	0,8	5,838	5,566	5,610
5	200	15	40	0,7	6,697	6,448	6,494	793	200	100	0	0,9	5,802	5,582	5,632
6	200	15	60	0,7	6,743	6,460	6,506	794	200	100	10	0,9	5,807	5,583	5,633
7	200	15	80	0,7	6,760	6,463	6,509	795	200	100	20	0,9	5,809	5,579	5,629

ID	H	B	L ₁	t	k _{ABQ}	k _{RSM}	k _{Cal}	ID	H	B	L ₁	t	k _{ABQ}	k _{RSM}	k _{Cal}
8	200	15	90	0,7	6,765	6,463	6,509	796	200	100	30	0,9	5,813	5,577	5,627
9	200	15	0	0,8	4,525	4,515	4,551	797	200	100	40	0,9	5,817	5,576	5,626
10	200	15	10	0,8	5,316	5,883	5,930	798	200	100	60	0,9	5,819	5,573	5,623
11	200	15	20	0,8	6,426	6,357	6,408	799	200	100	80	0,9	5,818	5,569	5,619
12	200	15	30	0,8	6,609	6,424	6,476	800	200	100	90	0,9	5,817	5,566	5,616
13	200	15	40	0,8	6,679	6,445	6,497	801	200	100	0	1	5,790	5,581	5,638
14	200	15	60	0,8	6,736	6,460	6,512	802	200	100	10	1	5,794	5,583	5,639
15	200	15	80	0,8	6,758	6,464	6,516	803	200	100	20	1	5,796	5,579	5,635
16	200	15	90	0,8	6,764	6,464	6,516	804	200	100	30	1	5,800	5,577	5,633
17	200	15	0	0,9	4,502	4,498	4,539	805	200	100	40	1	5,803	5,576	5,632
18	200	15	10	0,9	5,154	5,743	5,795	806	200	100	60	1	5,806	5,573	5,629
19	200	15	20	0,9	6,352	6,330	6,387	807	200	100	80	1	5,805	5,569	5,625
20	200	15	30	0,9	6,574	6,415	6,473	808	200	100	90	1	5,803	5,567	5,623
21	200	15	40	0,9	6,659	6,442	6,500	809	200	100	0	1,2	5,776	5,581	5,649
22	200	15	60	0,9	6,728	6,459	6,518	810	200	100	10	1,2	5,779	5,582	5,649
23	200	15	80	0,9	6,754	6,464	6,523	811	200	100	20	1,2	5,781	5,579	5,646
24	200	15	90	0,9	6,761	6,465	6,524	812	200	100	30	1,2	5,785	5,578	5,645
25	200	15	0	1	4,479	4,478	4,523	813	200	100	40	1,2	5,788	5,577	5,644
26	200	15	10	1	5,023	5,608	5,665	814	200	100	60	1,2	5,791	5,574	5,641
27	200	15	20	1	6,235	6,299	6,362	815	200	100	80	1,2	5,789	5,569	5,636
28	200	15	30	1	6,534	6,405	6,469	816	200	100	90	1,2	5,787	5,567	5,634
29	200	15	40	1	6,636	6,438	6,503	817	200	100	0	1,5	5,771	5,581	5,665
30	200	15	60	1	6,717	6,459	6,524	818	200	100	10	1,5	5,772	5,582	5,666
31	200	15	80	1	6,749	6,465	6,531	819	200	100	20	1,5	5,775	5,579	5,663
32	200	15	90	1	6,757	6,466	6,532	820	200	100	30	1,5	5,779	5,578	5,662
33	200	15	0	1,2	4,432	4,431	4,485	821	200	100	40	1,5	5,781	5,577	5,661
34	200	15	10	1,2	4,823	5,381	5,446	822	200	100	60	1,5	5,781	5,574	5,658
35	200	15	20	1,2	5,963	6,222	6,297	823	200	100	80	1,5	5,778	5,570	5,654
36	200	15	30	1,2	6,442	6,378	6,455	824	200	100	90	1,5	5,777	5,567	5,651
37	200	15	40	1,2	6,579	6,426	6,504	825	200	100	0	1,9	5,776	5,580	5,688
38	200	15	60	1,2	6,689	6,456	6,535	826	200	100	10	1,9	5,774	5,581	5,689

ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cal}	ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cal}
39	200	15	80	1,2	6,732	6,465	6,544	827	200	100	20	1,9	5,778	5,579	5,686
40	200	15	90	1,2	6,744	6,467	6,546	828	200	100	30	1,9	5,780	5,578	5,685
41	200	15	0	1,5	4,354	4,338	4,404	829	200	100	40	1,9	5,781	5,577	5,684
42	200	15	10	1,5	4,618	5,128	5,206	830	200	100	60	1,9	5,781	5,574	5,681
43	200	15	20	1,5	5,564	6,068	6,160	831	200	100	80	1,9	5,779	5,570	5,677
44	200	15	30	1,5	6,256	6,323	6,419	832	200	100	90	1,9	5,777	5,568	5,675
45	200	15	40	1,5	6,471	6,400	6,497	833	200	100	0	2,4	5,792	5,580	5,716
46	200	15	60	1,5	6,630	6,449	6,547	834	200	100	10	2,4	5,784	5,580	5,717
47	200	15	80	1,5	6,693	6,463	6,561	835	200	100	20	2,4	5,787	5,578	5,715
48	200	15	90	1,5	6,710	6,466	6,564	836	200	100	30	2,4	5,789	5,578	5,714
49	200	15	0	1,9	4,227	4,227	4,308	837	200	100	40	2,4	5,791	5,578	5,714
50	200	15	10	1,9	4,424	4,880	4,974	838	200	100	60	2,4	5,792	5,575	5,711
51	200	15	20	1,9	5,162	5,791	5,903	839	200	100	80	2,4	5,789	5,571	5,707
52	200	15	30	1,9	5,897	6,217	6,337	840	200	100	90	2,4	5,788	5,569	5,705
53	200	15	40	1,9	6,288	6,349	6,471	841	200	100	0	3	5,812	5,578	5,749
54	200	15	60	1,9	6,519	6,431	6,555	842	200	100	10	3	5,797	5,579	5,751
55	200	15	80	1,9	6,611	6,456	6,580	843	200	100	20	3	5,802	5,578	5,749
56	200	15	90	1,9	6,637	6,462	6,587	844	200	100	30	3	5,805	5,577	5,748
57	200	20	0	0,7	4,866	4,792	4,826	845	200	100	40	3	5,807	5,578	5,749
58	200	20	10	0,7	6,092	6,127	6,170	846	200	100	60	3	5,808	5,576	5,747
59	200	20	20	0,7	6,484	6,292	6,336	847	200	100	80	3	5,806	5,572	5,743
60	200	20	30	0,7	6,554	6,320	6,364	848	200	100	90	3	5,805	5,569	5,740
61	200	20	40	0,7	6,584	6,332	6,376	849	200	100	0	3,2	5,817	5,579	5,762
62	200	20	60	0,7	6,611	6,340	6,384	850	200	100	10	3,2	5,802	5,579	5,762
63	200	20	80	0,7	6,621	6,343	6,387	851	200	100	20	3,2	5,807	5,577	5,760
64	200	20	90	0,7	6,624	6,343	6,387	852	200	100	30	3,2	5,810	5,578	5,761
65	200	20	0	0,8	4,843	4,784	4,822	853	200	100	40	3,2	5,813	5,578	5,761
66	200	20	10	0,8	5,929	6,069	6,118	854	200	100	60	3,2	5,814	5,576	5,758
67	200	20	20	0,8	6,454	6,282	6,333	855	200	100	80	3,2	5,812	5,572	5,754
68	200	20	30	0,8	6,541	6,318	6,369	856	200	100	90	3,2	5,811	5,570	5,752
69	200	20	40	0,8	6,578	6,331	6,382	857	200	120	0	0,7	5,820	5,546	5,585

ID	H	B	L ₁	t	k _{ABQ}	k _{RSM}	k _{Cal}	ID	H	B	L ₁	t	k _{ABQ}	k _{RSM}	k _{Cal}
70	200	20	60	0,8	6,610	6,341	6,392	858	200	120	10	0,7	5,807	5,537	5,576
71	200	20	80	0,8	6,622	6,344	6,395	859	200	120	20	0,7	5,805	5,528	5,567
72	200	20	90	0,8	6,625	6,344	6,395	860	200	120	30	0,7	5,804	5,523	5,562
73	200	20	0	0,9	4,824	4,775	4,818	861	200	120	40	0,7	5,803	5,518	5,557
74	200	20	10	0,9	5,778	6,006	6,060	862	200	120	60	0,7	5,800	5,510	5,549
75	200	20	20	0,9	6,420	6,271	6,327	863	200	120	80	0,7	5,796	5,503	5,542
76	200	20	30	0,9	6,526	6,315	6,372	864	200	120	90	0,7	5,794	5,500	5,539
77	200	20	40	0,9	6,571	6,330	6,387	865	200	120	0	0,8	5,788	5,546	5,591
78	200	20	60	0,9	6,608	6,342	6,399	866	200	120	10	0,8	5,776	5,537	5,582
79	200	20	80	0,9	6,622	6,345	6,402	867	200	120	20	0,8	5,772	5,528	5,573
80	200	20	90	0,9	6,626	6,346	6,403	868	200	120	30	0,8	5,771	5,523	5,568
81	200	20	0	1	4,806	4,765	4,813	869	200	120	40	0,8	5,770	5,518	5,563
82	200	20	10	1	5,642	5,938	5,998	870	200	120	60	0,8	5,766	5,510	5,555
83	200	20	20	1	6,383	6,258	6,321	871	200	120	80	0,8	5,762	5,503	5,548
84	200	20	30	1	6,510	6,311	6,374	872	200	120	90	0,8	5,760	5,500	5,545
85	200	20	40	1	6,562	6,329	6,393	873	200	120	0	0,9	5,767	5,546	5,597
86	200	20	60	1	6,606	6,342	6,406	874	200	120	10	0,9	5,754	5,537	5,587
87	200	20	80	1	6,623	6,346	6,410	875	200	120	20	0,9	5,750	5,528	5,578
88	200	20	90	1	6,627	6,347	6,411	876	200	120	30	0,9	5,748	5,523	5,573
89	200	20	0	1,2	4,774	4,742	4,800	877	200	120	40	0,9	5,747	5,518	5,568
90	200	20	10	1,2	5,405	5,796	5,866	878	200	120	60	0,9	5,743	5,511	5,561
91	200	20	20	1,2	6,299	6,226	6,301	879	200	120	80	0,9	5,739	5,503	5,553
92	200	20	30	1,2	6,471	6,300	6,376	880	200	120	90	0,9	5,736	5,500	5,550
93	200	20	40	1,2	6,541	6,325	6,401	881	200	120	0	1	5,752	5,546	5,602
94	200	20	60	1,2	6,599	6,343	6,420	882	200	120	10	1	5,740	5,537	5,593
95	200	20	80	1,2	6,622	6,348	6,425	883	200	120	20	1	5,735	5,529	5,585
96	200	20	90	1,2	6,628	6,349	6,426	884	200	120	30	1	5,733	5,523	5,579
97	200	20	0	1,5	4,726	4,701	4,773	885	200	120	40	1	5,732	5,519	5,575
98	200	20	10	1,5	5,105	5,595	5,680	886	200	120	60	1	5,728	5,511	5,567
99	200	20	20	1,5	6,075	6,162	6,255	887	200	120	80	1	5,723	5,503	5,559
100	200	20	30	1,5	6,382	6,278	6,373	888	200	120	90	1	5,720	5,500	5,556

ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cat}	ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cat}
101	200	20	40	1,5	6,488	6,316	6,412	889	200	120	0	1,2	5,736	5,546	5,613
102	200	20	60	1,5	6,577	6,342	6,438	890	200	120	10	1,2	5,723	5,537	5,604
103	200	20	80	1,5	6,612	6,349	6,445	891	200	120	20	1,2	5,718	5,529	5,596
104	200	20	90	1,5	6,622	6,351	6,447	892	200	120	30	1,2	5,716	5,523	5,590
105	200	20	0	1,9	4,655	4,628	4,717	893	200	120	40	1,2	5,713	5,519	5,586
106	200	20	10	1,9	4,877	5,378	5,482	894	200	120	60	1,2	5,709	5,511	5,578
107	200	20	20	1,9	5,756	6,049	6,166	895	200	120	80	1,2	5,704	5,504	5,571
108	200	20	30	1,9	6,257	6,235	6,355	896	200	120	90	1,2	5,701	5,500	5,567
109	200	20	40	1,9	6,406	6,296	6,417	897	200	120	0	1,5	5,729	5,545	5,629
110	200	20	60	1,9	6,535	6,337	6,459	898	200	120	10	1,5	5,714	5,537	5,621
111	200	20	80	1,9	6,587	6,349	6,471	899	200	120	20	1,5	5,710	5,529	5,613
112	200	20	90	1,9	6,602	6,352	6,474	900	200	120	30	1,5	5,707	5,523	5,607
113	200	20	0	2,4	4,552	4,498	4,608	901	200	120	40	1,5	5,705	5,519	5,603
114	200	20	10	2,4	4,676	5,165	5,291	902	200	120	60	1,5	5,701	5,511	5,595
115	200	20	20	2,4	5,396	5,863	6,006	903	200	120	80	1,5	5,695	5,504	5,588
116	200	20	30	2,4	5,983	6,157	6,307	904	200	120	90	1,5	5,692	5,500	5,584
117	200	20	40	2,4	6,273	6,257	6,410	905	200	120	0	1,9	5,732	5,545	5,652
118	200	20	60	2,4	6,454	6,325	6,479	906	200	120	10	1,9	5,717	5,537	5,644
119	200	20	80	2,4	6,530	6,345	6,500	907	200	120	20	1,9	5,712	5,529	5,636
120	200	20	90	2,4	6,552	6,350	6,505	908	200	120	30	1,9	5,710	5,523	5,630
121	200	20	0	3	4,329	4,329	4,462	909	200	120	40	1,9	5,708	5,519	5,626
122	200	20	10	3	4,479	4,929	5,080	910	200	120	60	1,9	5,704	5,511	5,618
123	200	20	20	3	5,056	5,595	5,767	911	200	120	80	1,9	5,698	5,504	5,610
124	200	20	30	3	5,650	6,023	6,208	912	200	120	90	1,9	5,695	5,501	5,607
125	200	20	40	3	6,009	6,188	6,378	913	200	120	0	2,4	5,747	5,545	5,681
126	200	20	60	3	6,322	6,299	6,492	914	200	120	10	2,4	5,730	5,537	5,673
127	200	20	80	3	6,427	6,334	6,528	915	200	120	20	2,4	5,726	5,529	5,664
128	200	20	90	3	6,457	6,342	6,536	916	200	120	30	2,4	5,723	5,524	5,659
129	200	20	0	3,2	4,257	4,257	4,397	917	200	120	40	2,4	5,721	5,519	5,654
130	200	20	10	3,2	4,416	4,840	4,999	918	200	120	60	2,4	5,717	5,512	5,647
131	200	20	20	3,2	4,971	5,499	5,679	919	200	120	80	2,4	5,712	5,505	5,640

ID	H	B	L ₁	t	<i>k</i> _{ABQ}	<i>k</i> _{RSM}	<i>k</i> _{Cal}	ID	H	B	L ₁	t	<i>k</i> _{ABQ}	<i>k</i> _{RSM}	<i>k</i> _{Cal}
132	200	20	30	3,2	5,547	5,967	6,163	920	200	120	90	2,4	5,709	5,501	5,636
133	200	20	40	3,2	5,917	6,157	6,359	921	200	120	0	3	5,768	5,544	5,714
134	200	20	60	3,2	6,271	6,287	6,493	922	200	120	10	3	5,750	5,537	5,707
135	200	20	80	3,2	6,385	6,328	6,535	923	200	120	20	3	5,746	5,529	5,699
136	200	20	90	3,2	6,418	6,338	6,545	924	200	120	30	3	5,744	5,524	5,694
137	200	25	0	0,7	5,158	5,029	5,065	925	200	120	40	3	5,743	5,520	5,690
138	200	25	10	0,7	6,240	6,104	6,147	926	200	120	60	3	5,739	5,512	5,681
139	200	25	20	0,7	6,412	6,198	6,242	927	200	120	80	3	5,733	5,505	5,674
140	200	25	30	0,7	6,454	6,219	6,262	928	200	120	90	3	5,730	5,502	5,671
141	200	25	40	0,7	6,475	6,229	6,273	929	200	120	0	3,2	5,776	5,544	5,726
142	200	25	60	0,7	6,495	6,237	6,281	930	200	120	10	3,2	5,757	5,537	5,719
143	200	25	80	0,7	6,502	6,239	6,283	931	200	120	20	3,2	5,753	5,529	5,711
144	200	25	90	0,7	6,504	6,239	6,283	932	200	120	30	3,2	5,751	5,524	5,705
145	200	25	0	0,8	5,135	5,024	5,065	933	200	120	40	3,2	5,750	5,520	5,701
146	200	25	10	0,8	6,180	6,074	6,123	934	200	120	60	3,2	5,747	5,512	5,693
147	200	25	20	0,8	6,396	6,194	6,244	935	200	120	80	3,2	5,741	5,505	5,686
148	200	25	30	0,8	6,446	6,218	6,268	936	200	120	90	3,2	5,738	5,502	5,683
149	200	25	40	0,8	6,471	6,229	6,279	937	200	160	0	0,7	5,762	5,484	5,522
150	200	25	60	0,8	6,493	6,238	6,288	938	200	160	10	0,7	5,744	5,471	5,509
151	200	25	80	0,8	6,501	6,240	6,290	939	200	160	20	0,7	5,736	5,459	5,498
152	200	25	90	0,8	6,503	6,240	6,290	940	200	160	30	0,7	5,729	5,450	5,489
153	200	25	0	0,9	5,116	5,019	5,065	941	200	160	40	0,7	5,722	5,442	5,480
154	200	25	10	0,9	6,093	6,041	6,096	942	200	160	60	0,7	5,711	5,427	5,465
155	200	25	20	0,9	6,379	6,189	6,245	943	200	160	80	0,7	5,702	5,415	5,453
156	200	25	30	0,9	6,439	6,216	6,272	944	200	160	90	0,7	5,697	5,410	5,448
157	200	25	40	0,9	6,468	6,229	6,285	945	200	160	0	0,8	5,726	5,484	5,528
158	200	25	60	0,9	6,493	6,239	6,295	946	200	160	10	0,8	5,708	5,471	5,515
159	200	25	80	0,9	6,502	6,241	6,297	947	200	160	20	0,8	5,699	5,459	5,503
160	200	25	90	0,9	6,504	6,241	6,297	948	200	160	30	0,8	5,691	5,450	5,494
161	200	25	0	1	5,101	5,014	5,064	949	200	160	40	0,8	5,685	5,442	5,486
162	200	25	10	1	5,993	6,005	6,066	950	200	160	60	0,8	5,673	5,427	5,471

ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cal}	ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cal}
163	200	25	20	1	6,361	6,182	6,244	951	200	160	80	0,8	5,663	5,415	5,459
164	200	25	30	1	6,432	6,215	6,277	952	200	160	90	0,8	5,658	5,410	5,454
165	200	25	40	1	6,464	6,229	6,291	953	200	160	0	0,9	5,701	5,484	5,533
166	200	25	60	1	6,493	6,239	6,302	954	200	160	10	0,9	5,683	5,471	5,520
167	200	25	80	1	6,503	6,242	6,305	955	200	160	20	0,9	5,674	5,459	5,509
168	200	25	90	1	6,506	6,243	6,306	956	200	160	30	0,9	5,666	5,451	5,500
169	200	25	0	1,2	5,075	5,000	5,060	957	200	160	40	0,9	5,659	5,442	5,492
170	200	25	10	1,2	5,810	5,928	6,000	958	200	160	60	0,9	5,646	5,427	5,476
171	200	25	20	1,2	6,319	6,165	6,240	959	200	160	80	0,9	5,636	5,415	5,464
172	200	25	30	1,2	6,415	6,210	6,285	960	200	160	90	0,9	5,631	5,410	5,459
173	200	25	40	1,2	6,457	6,228	6,303	961	200	160	0	1	5,684	5,484	5,539
174	200	25	60	1,2	6,494	6,241	6,316	962	200	160	10	1	5,666	5,472	5,527
175	200	25	80	1,2	6,507	6,244	6,319	963	200	160	20	1	5,656	5,460	5,515
176	200	25	90	1,2	6,510	6,245	6,320	964	200	160	30	1	5,648	5,451	5,505
177	200	25	0	1,5	5,041	4,977	5,052	965	200	160	40	1	5,641	5,442	5,497
178	200	25	10	1,5	5,566	5,808	5,896	966	200	160	60	1	5,628	5,428	5,483
179	200	25	20	1,5	6,233	6,133	6,226	967	200	160	80	1	5,617	5,415	5,470
180	200	25	30	1,5	6,374	6,200	6,294	968	200	160	90	1	5,612	5,410	5,465
181	200	25	40	1,5	6,436	6,224	6,318	969	200	160	0	1,2	5,664	5,484	5,550
182	200	25	60	1,5	6,490	6,242	6,336	970	200	160	10	1,2	5,645	5,472	5,538
183	200	25	80	1,5	6,510	6,247	6,341	971	200	160	20	1,2	5,635	5,460	5,526
184	200	25	90	1,5	6,516	6,248	6,342	972	200	160	30	1,2	5,626	5,451	5,516
185	200	25	0	1,9	4,994	4,937	5,032	973	200	160	40	1,2	5,619	5,442	5,508
186	200	25	10	1,9	5,333	5,662	5,771	974	200	160	60	1,2	5,606	5,428	5,494
187	200	25	20	1,9	6,079	6,076	6,193	975	200	160	80	1,2	5,594	5,415	5,481
188	200	25	30	1,9	6,311	6,179	6,298	976	200	160	90	1,2	5,589	5,410	5,476
189	200	25	40	1,9	6,400	6,215	6,335	977	200	160	0	1,5	5,653	5,483	5,566
190	200	25	60	1,9	6,477	6,241	6,361	978	200	160	10	1,5	5,634	5,472	5,555
191	200	25	80	1,9	6,508	6,249	6,369	979	200	160	20	1,5	5,623	5,460	5,542
192	200	25	90	1,9	6,517	6,250	6,370	980	200	160	30	1,5	5,614	5,451	5,533
193	200	25	0	2,4	4,926	4,873	4,992	981	200	160	40	1,5	5,606	5,442	5,525

ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cal}	ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cal}
194	200	25	10	2,4	5,109	5,509	5,644	982	200	160	60	1,5	5,593	5,428	5,511
195	200	25	20	2,4	5,818	5,983	6,129	983	200	160	80	1,5	5,581	5,416	5,498
196	200	25	30	2,4	6,206	6,141	6,291	984	200	160	90	1,5	5,575	5,410	5,492
197	200	25	40	2,4	6,331	6,198	6,349	985	200	160	0	1,9	5,654	5,483	5,588
198	200	25	60	2,4	6,444	6,237	6,389	986	200	160	10	1,9	5,635	5,472	5,577
199	200	25	80	2,4	6,490	6,249	6,401	987	200	160	20	1,9	5,624	5,460	5,565
200	200	25	90	2,4	6,503	6,252	6,404	988	200	160	30	1,9	5,614	5,450	5,555
201	200	25	0	3	4,799	4,767	4,913	989	200	160	40	1,9	5,606	5,443	5,547
202	200	25	10	3	4,904	5,353	5,517	990	200	160	60	1,9	5,592	5,428	5,533
203	200	25	20	3	5,527	5,844	6,023	991	200	160	80	1,9	5,580	5,416	5,521
204	200	25	30	3	5,983	6,077	6,263	992	200	160	90	1,9	5,574	5,410	5,514
205	200	25	40	3	6,220	6,165	6,354	993	200	160	0	2,4	5,666	5,483	5,616
206	200	25	60	3	6,377	6,227	6,418	994	200	160	10	2,4	5,647	5,472	5,605
207	200	25	80	3	6,445	6,246	6,437	995	200	160	20	2,4	5,635	5,461	5,594
208	200	25	90	3	6,464	6,251	6,443	996	200	160	30	2,4	5,626	5,451	5,584
209	200	25	0	3,2	4,764	4,722	4,877	997	200	160	40	2,4	5,617	5,442	5,575
210	200	25	10	3,2	4,843	5,303	5,477	998	200	160	60	2,4	5,603	5,428	5,561
211	200	25	20	3,2	5,439	5,792	5,982	999	200	160	80	2,4	5,590	5,416	5,549
212	200	25	30	3,2	5,904	6,050	6,248	1000	200	160	90	2,4	5,584	5,410	5,542
213	200	25	40	3,2	6,176	6,151	6,352	1001	200	160	0	3	5,685	5,482	5,650
214	200	25	60	3,2	6,349	6,222	6,426	1002	200	160	10	3	5,667	5,473	5,640
215	200	25	80	3,2	6,424	6,244	6,448	1003	200	160	20	3	5,655	5,461	5,628
216	200	25	90	3,2	6,445	6,250	6,455	1004	200	160	30	3	5,645	5,451	5,618
217	200	30	0	0,7	5,383	5,227	5,263	1005	200	160	40	3	5,636	5,442	5,609
218	200	30	10	0,7	6,233	6,050	6,093	1006	200	160	60	3	5,621	5,428	5,595
219	200	30	20	0,7	6,331	6,112	6,155	1007	200	160	80	3	5,608	5,416	5,582
220	200	30	30	0,7	6,362	6,129	6,172	1008	200	160	90	3	5,602	5,410	5,576
221	200	30	40	0,7	6,379	6,138	6,181	1009	200	160	0	3,2	5,692	5,482	5,661
222	200	30	60	0,7	6,396	6,146	6,189	1010	200	160	10	3,2	5,674	5,473	5,652
223	200	30	80	0,7	6,402	6,148	6,191	1011	200	160	20	3,2	5,662	5,460	5,639
224	200	30	90	0,7	6,403	6,148	6,191	1012	200	160	30	3,2	5,652	5,451	5,630

ID	H	B	L ₁	t	<i>k</i> _{ABQ}	<i>k</i> _{RSM}	<i>k</i> _{Cal}	ID	H	B	L ₁	t	<i>k</i> _{ABQ}	<i>k</i> _{RSM}	<i>k</i> _{Cal}
225	200	30	0	0,8	5,361	5,224	5,266	1013	200	160	40	3,2	5,643	5,443	5,621
226	200	30	10	0,8	6,196	6,033	6,082	1014	200	160	60	3,2	5,628	5,428	5,606
227	200	30	20	0,8	6,320	6,109	6,158	1015	200	160	80	3,2	5,615	5,416	5,594
228	200	30	30	0,8	6,355	6,129	6,178	1016	200	160	90	3,2	5,609	5,410	5,588
229	200	30	40	0,8	6,374	6,139	6,188	1017	200	200	0	0,7	5,708	5,427	5,465
230	200	30	60	0,8	6,392	6,147	6,196	1018	200	200	10	0,7	5,692	5,416	5,454
231	200	30	80	0,8	6,399	6,149	6,198	1019	200	200	20	0,7	5,682	5,404	5,442
232	200	30	90	0,8	6,400	6,149	6,198	1020	200	200	30	0,7	5,673	5,393	5,431
233	200	30	0	0,9	5,345	5,221	5,268	1021	200	200	40	0,7	5,665	5,383	5,421
234	200	30	10	0,9	6,158	6,013	6,067	1022	200	200	60	0,7	5,650	5,366	5,404
235	200	30	20	0,9	6,310	6,107	6,162	1023	200	200	80	0,7	5,637	5,351	5,389
236	200	30	30	0,9	6,350	6,128	6,184	1024	200	200	90	0,7	5,631	5,344	5,382
237	200	30	40	0,9	6,371	6,139	6,194	1025	200	200	0	0,8	5,670	5,427	5,471
238	200	30	60	0,9	6,391	6,148	6,203	1026	200	200	10	0,8	5,653	5,416	5,460
239	200	30	80	0,9	6,398	6,150	6,205	1027	200	200	20	0,8	5,642	5,404	5,448
240	200	30	90	0,9	6,399	6,151	6,206	1028	200	200	30	0,8	5,633	5,393	5,437
241	200	30	0	1	5,333	5,217	5,269	1029	200	200	40	0,8	5,624	5,384	5,428
242	200	30	10	1	6,119	5,992	6,052	1030	200	200	60	0,8	5,608	5,366	5,409
243	200	30	20	1	6,300	6,103	6,164	1031	200	200	80	0,8	5,595	5,351	5,394
244	200	30	30	1	6,346	6,127	6,189	1032	200	200	90	0,8	5,588	5,344	5,387
245	200	30	40	1	6,370	6,140	6,202	1033	200	200	0	0,9	5,643	5,427	5,476
246	200	30	60	1	6,391	6,149	6,211	1034	200	200	10	0,9	5,626	5,416	5,465
247	200	30	80	1	6,399	6,151	6,213	1035	200	200	20	0,9	5,615	5,404	5,453
248	200	30	90	1	6,401	6,152	6,214	1036	200	200	30	0,9	5,605	5,393	5,442
249	200	30	0	1,2	5,316	5,209	5,272	1037	200	200	40	0,9	5,596	5,384	5,433
250	200	30	10	1,2	6,012	5,946	6,018	1038	200	200	60	0,9	5,580	5,366	5,415
251	200	30	20	1,2	6,278	6,093	6,167	1039	200	200	80	0,9	5,566	5,351	5,400
252	200	30	30	1,2	6,338	6,125	6,199	1040	200	200	90	0,9	5,559	5,344	5,393
253	200	30	40	1,2	6,367	6,139	6,213	1041	200	200	0	1	5,624	5,427	5,482
254	200	30	60	1,2	6,394	6,151	6,225	1042	200	200	10	1	5,607	5,416	5,471
255	200	30	80	1,2	6,403	6,153	6,227	1043	200	200	20	1	5,596	5,404	5,459

ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cat}	ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cat}
256	200	30	90	1,2	6,405	6,154	6,228	1044	200	200	30	1	5,585	5,393	5,448
257	200	30	0	1,5	5,298	5,195	5,273	1045	200	200	40	1	5,576	5,384	5,438
258	200	30	10	1,5	5,825	5,874	5,963	1046	200	200	60	1	5,560	5,366	5,420
259	200	30	20	1,5	6,232	6,076	6,168	1047	200	200	80	1	5,545	5,351	5,405
260	200	30	30	1,5	6,319	6,120	6,212	1048	200	200	90	1	5,538	5,344	5,398
261	200	30	40	1,5	6,360	6,138	6,231	1049	200	200	0	1,2	5,601	5,427	5,493
262	200	30	60	1,5	6,397	6,152	6,245	1050	200	200	10	1,2	5,584	5,416	5,482
263	200	30	80	1,5	6,410	6,156	6,249	1051	200	200	20	1,2	5,572	5,404	5,470
264	200	30	90	1,5	6,414	6,157	6,250	1052	200	200	30	1,2	5,561	5,393	5,459
265	200	30	0	1,9	5,279	5,172	5,271	1053	200	200	40	1,2	5,552	5,384	5,449
266	200	30	10	1,9	5,637	5,781	5,892	1054	200	200	60	1,2	5,535	5,366	5,431
267	200	30	20	1,9	6,164	6,044	6,160	1055	200	200	80	1,2	5,520	5,351	5,416
268	200	30	30	1,9	6,289	6,110	6,227	1056	200	200	90	1,2	5,512	5,344	5,409
269	200	30	40	1,9	6,347	6,134	6,252	1057	200	200	0	1,5	5,587	5,427	5,510
270	200	30	60	1,9	6,398	6,153	6,271	1058	200	200	10	1,5	5,570	5,416	5,498
271	200	30	80	1,9	6,419	6,159	6,277	1059	200	200	20	1,5	5,558	5,404	5,486
272	200	30	90	1,9	6,424	6,160	6,278	1060	200	200	30	1,5	5,547	5,394	5,476
273	200	30	0	2,4	5,241	5,135	5,261	1061	200	200	40	1,5	5,537	5,384	5,466
274	200	30	10	2,4	5,462	5,680	5,819	1062	200	200	60	1,5	5,519	5,366	5,448
275	200	30	20	2,4	6,033	5,991	6,137	1063	200	200	80	1,5	5,503	5,351	5,432
276	200	30	30	2,4	6,234	6,089	6,238	1064	200	200	90	1,5	5,496	5,344	5,425
277	200	30	40	2,4	6,315	6,126	6,275	1065	200	200	0	1,9	5,586	5,427	5,532
278	200	30	60	2,4	6,390	6,153	6,303	1066	200	200	10	1,9	5,569	5,416	5,521
279	200	30	80	2,4	6,419	6,161	6,311	1067	200	200	20	1,9	5,556	5,404	5,508
280	200	30	90	2,4	6,428	6,163	6,313	1068	200	200	30	1,9	5,545	5,394	5,498
281	200	30	0	3	5,156	5,078	5,234	1069	200	200	40	1,9	5,535	5,384	5,488
282	200	30	10	3	5,289	5,578	5,749	1070	200	200	60	1,9	5,516	5,366	5,470
283	200	30	20	3	5,813	5,911	6,092	1071	200	200	80	1,9	5,500	5,351	5,454
284	200	30	30	3	6,142	6,053	6,239	1072	200	200	90	1,9	5,492	5,344	5,447
285	200	30	40	3	6,255	6,109	6,297	1073	200	200	0	2,4	5,596	5,426	5,559
286	200	30	60	3	6,360	6,149	6,338	1074	200	200	10	2,4	5,579	5,416	5,549

ID	H	B	L ₁	t	k _{ABQ}	k _{RSM}	k _{Cal}	ID	H	B	L ₁	t	k _{ABQ}	k _{RSM}	k _{Cal}
287	200	30	80	3	6,405	6,162	6,351	1075	200	200	20	2,4	5,566	5,404	5,536
288	200	30	90	3	6,417	6,164	6,353	1076	200	200	30	2,4	5,554	5,394	5,526
289	200	30	0	3,2	5,132	5,055	5,221	1077	200	200	40	2,4	5,543	5,384	5,516
290	200	30	10	3,2	5,231	5,546	5,728	1078	200	200	60	2,4	5,524	5,366	5,497
291	200	30	20	3,2	5,746	5,882	6,075	1079	200	200	80	2,4	5,507	5,351	5,482
292	200	30	30	3,2	6,098	6,039	6,237	1080	200	200	90	2,4	5,500	5,344	5,475
293	200	30	40	3,2	6,230	6,101	6,301	1081	200	200	0	3	5,613	5,426	5,593
294	200	30	60	3,2	6,346	6,147	6,349	1082	200	200	10	3	5,597	5,416	5,582
295	200	30	80	3,2	6,396	6,161	6,363	1083	200	200	20	3	5,584	5,405	5,571
296	200	30	90	3,2	6,410	6,165	6,367	1084	200	200	30	3	5,572	5,394	5,560
297	200	35	0	0,7	5,540	5,375	5,413	1085	200	200	40	3	5,561	5,384	5,549
298	200	35	10	0,7	6,193	5,991	6,033	1086	200	200	60	3	5,541	5,366	5,531
299	200	35	20	0,7	6,256	6,035	6,077	1087	200	200	80	3	5,524	5,351	5,515
300	200	35	30	0,7	6,281	6,050	6,093	1088	200	200	90	3	5,516	5,344	5,508
301	200	35	40	0,7	6,297	6,059	6,102	1089	200	200	0	3,2	5,620	5,425	5,603
302	200	35	60	0,7	6,313	6,067	6,110	1090	200	200	10	3,2	5,604	5,417	5,595
303	200	35	80	0,7	6,318	6,069	6,112	1091	200	200	20	3,2	5,590	5,405	5,582
304	200	35	90	0,7	6,319	6,069	6,112	1092	200	200	30	3,2	5,578	5,394	5,571
305	200	35	0	0,8	5,518	5,373	5,416	1093	200	200	40	3,2	5,567	5,384	5,561
306	200	35	10	0,8	6,168	5,980	6,028	1094	200	200	60	3,2	5,547	5,366	5,542
307	200	35	20	0,8	6,246	6,034	6,082	1095	200	200	80	3,2	5,530	5,351	5,527
308	200	35	30	0,8	6,273	6,050	6,099	1096	200	200	90	3,2	5,522	5,344	5,519
309	200	35	40	0,8	6,290	6,059	6,108	1097	200	240	0	0,7	5,658	5,375	5,413
310	200	35	60	0,8	6,306	6,068	6,117	1098	200	240	10	0,7	5,642	5,363	5,401
311	200	35	80	0,8	6,312	6,070	6,119	1099	200	240	20	0,7	5,632	5,351	5,389
312	200	35	90	0,8	6,313	6,070	6,119	1100	200	240	30	0,7	5,622	5,341	5,378
313	200	35	0	0,9	5,503	5,371	5,420	1101	200	240	40	0,7	5,613	5,330	5,367
314	200	35	10	0,9	6,143	5,968	6,022	1102	200	240	60	0,7	5,596	5,310	5,348
315	200	35	20	0,9	6,238	6,032	6,086	1103	200	240	80	0,7	5,580	5,292	5,329
316	200	35	30	0,9	6,268	6,050	6,104	1104	200	240	90	0,7	5,573	5,284	5,321
317	200	35	40	0,9	6,286	6,060	6,115	1105	200	240	0	0,8	5,616	5,375	5,418

ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cat}	ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cat}
318	200	35	60	0,9	6,303	6,069	6,124	1106	200	240	10	0,8	5,601	5,363	5,406
319	200	35	80	0,9	6,309	6,071	6,126	1107	200	240	20	0,8	5,590	5,352	5,395
320	200	35	90	0,9	6,310	6,071	6,126	1108	200	240	30	0,8	5,580	5,341	5,384
321	200	35	0	1	5,492	5,369	5,423	1109	200	240	40	0,8	5,570	5,330	5,372
322	200	35	10	1	6,118	5,954	6,014	1110	200	240	60	0,8	5,552	5,310	5,353
323	200	35	20	1	6,231	6,030	6,090	1111	200	240	80	0,8	5,536	5,292	5,335
324	200	35	30	1	6,265	6,050	6,111	1112	200	240	90	0,8	5,529	5,284	5,327
325	200	35	40	1	6,284	6,060	6,121	1113	200	240	0	0,9	5,588	5,375	5,424
326	200	35	60	1	6,302	6,070	6,131	1114	200	240	10	0,9	5,572	5,363	5,412
327	200	35	80	1	6,309	6,072	6,133	1115	200	240	20	0,9	5,561	5,352	5,401
328	200	35	90	1	6,310	6,072	6,133	1116	200	240	30	0,9	5,550	5,341	5,389
329	200	35	0	1,2	5,477	5,364	5,429	1117	200	240	40	0,9	5,540	5,330	5,378
330	200	35	10	1,2	6,067	5,925	5,997	1118	200	240	60	0,9	5,522	5,310	5,358
331	200	35	20	1,2	6,218	6,024	6,097	1119	200	240	80	0,9	5,505	5,292	5,340
332	200	35	30	1,2	6,261	6,049	6,122	1120	200	240	90	0,9	5,497	5,284	5,332
333	200	35	40	1,2	6,283	6,061	6,134	1121	200	240	0	1	5,567	5,375	5,429
334	200	35	60	1,2	6,304	6,071	6,145	1122	200	240	10	1	5,552	5,363	5,417
335	200	35	80	1,2	6,312	6,073	6,147	1123	200	240	20	1	5,540	5,352	5,406
336	200	35	90	1,2	6,313	6,074	6,148	1124	200	240	30	1	5,529	5,341	5,394
337	200	35	0	1,5	5,465	5,355	5,436	1125	200	240	40	1	5,519	5,330	5,383
338	200	35	10	1,5	5,961	5,879	5,968	1126	200	240	60	1	5,500	5,310	5,364
339	200	35	20	1,5	6,193	6,014	6,105	1127	200	240	80	1	5,483	5,292	5,346
340	200	35	30	1,5	6,252	6,047	6,138	1128	200	240	90	1	5,475	5,284	5,337
341	200	35	40	1,5	6,282	6,061	6,153	1129	200	240	0	1,2	5,543	5,374	5,439
342	200	35	60	1,5	6,310	6,073	6,165	1130	200	240	10	1,2	5,527	5,363	5,428
343	200	35	80	1,5	6,320	6,076	6,168	1131	200	240	20	1,2	5,515	5,352	5,417
344	200	35	90	1,5	6,322	6,076	6,168	1132	200	240	30	1,2	5,504	5,341	5,405
345	200	35	0	1,9	5,454	5,341	5,444	1133	200	240	40	1,2	5,493	5,330	5,394
346	200	35	10	1,9	5,814	5,818	5,930	1134	200	240	60	1,2	5,473	5,310	5,375
347	200	35	20	1,9	6,156	5,994	6,110	1135	200	240	80	1,2	5,456	5,292	5,356
348	200	35	30	1,9	6,240	6,041	6,157	1136	200	240	90	1,2	5,447	5,284	5,348

ID	H	B	L ₁	t	<i>k_{ABQ}</i>	<i>k_{RSM}</i>	<i>k_{Cal}</i>	ID	H	B	L ₁	t	<i>k_{ABQ}</i>	<i>k_{RSM}</i>	<i>k_{Cal}</i>
349	200	35	40	1,9	6,281	6,060	6,177	1137	200	240	0	1,5	5,527	5,374	5,456
350	200	35	60	1,9	6,318	6,075	6,192	1138	200	240	10	1,5	5,511	5,363	5,445
351	200	35	80	1,9	6,332	6,079	6,196	1139	200	240	20	1,5	5,499	5,352	5,433
352	200	35	90	1,9	6,335	6,079	6,196	1140	200	240	30	1,5	5,487	5,341	5,422
353	200	35	0	2,4	5,441	5,319	5,449	1141	200	240	40	1,5	5,476	5,330	5,410
354	200	35	10	2,4	5,669	5,751	5,892	1142	200	240	60	1,5	5,456	5,310	5,391
355	200	35	20	2,4	6,096	5,961	6,107	1143	200	240	80	1,5	5,437	5,292	5,372
356	200	35	30	2,4	6,213	6,028	6,176	1144	200	240	90	1,5	5,429	5,284	5,364
357	200	35	40	2,4	6,270	6,056	6,203	1145	200	240	0	1,9	5,523	5,374	5,478
358	200	35	60	2,4	6,322	6,076	6,224	1146	200	240	10	1,9	5,508	5,364	5,468
359	200	35	80	2,4	6,342	6,081	6,230	1147	200	240	20	1,9	5,495	5,352	5,455
360	200	35	90	2,4	6,348	6,083	6,232	1148	200	240	30	1,9	5,483	5,340	5,443
361	200	35	0	3	5,407	5,286	5,448	1149	200	240	40	1,9	5,472	5,330	5,432
362	200	35	10	3	5,535	5,684	5,858	1150	200	240	60	1,9	5,451	5,310	5,413
363	200	35	20	3	5,974	5,912	6,093	1151	200	240	80	1,9	5,432	5,292	5,394
364	200	35	30	3	6,162	6,007	6,192	1152	200	240	90	1,9	5,423	5,283	5,385
365	200	35	40	3	6,240	6,046	6,232	1153	200	240	0	2,4	5,531	5,373	5,505
366	200	35	60	3	6,314	6,075	6,261	1154	200	240	10	2,4	5,516	5,364	5,495
367	200	35	80	3	6,344	6,083	6,270	1155	200	240	20	2,4	5,503	5,352	5,483
368	200	35	90	3	6,353	6,085	6,272	1156	200	240	30	2,4	5,490	5,340	5,471
369	200	35	0	3,2	5,398	5,273	5,445	1157	200	240	40	2,4	5,479	5,330	5,460
370	200	35	10	3,2	5,496	5,663	5,849	1158	200	240	60	2,4	5,457	5,310	5,440
371	200	35	20	3,2	5,924	5,894	6,087	1159	200	240	80	2,4	5,438	5,292	5,422
372	200	35	30	3,2	6,141	5,998	6,195	1160	200	240	90	2,4	5,428	5,283	5,412
373	200	35	40	3,2	6,227	6,041	6,239	1161	200	240	0	3	5,547	5,373	5,538
374	200	35	60	3,2	6,308	6,074	6,273	1162	200	240	10	3	5,533	5,364	5,529
375	200	35	80	3,2	6,342	6,084	6,283	1163	200	240	20	3	5,519	5,352	5,516
376	200	35	90	3,2	6,352	6,086	6,286	1164	200	240	30	3	5,506	5,341	5,504
377	200	40	0	0,7	5,656	5,478	5,517	1165	200	240	40	3	5,494	5,330	5,493
378	200	40	10	0,7	6,146	5,934	5,976	1166	200	240	60	3	5,472	5,310	5,473
379	200	40	20	0,7	6,190	5,967	6,008	1167	200	240	80	3	5,452	5,292	5,455

ID	H	B	L ₁	t	k _{ABQ}	k _{RSM}	k _{Cal}	ID	H	B	L ₁	t	k _{ABQ}	k _{RSM}	k _{Cal}
380	200	40	30	0,7	6,213	5,981	6,023	1168	200	240	90	3	5,442	5,283	5,445
381	200	40	40	0,7	6,227	5,990	6,032	1169	200	240	0	3,2	5,553	5,372	5,548
382	200	40	60	0,7	6,242	5,998	6,040	1170	200	240	10	3,2	5,539	5,364	5,540
383	200	40	80	0,7	6,247	6,000	6,042	1171	200	240	20	3,2	5,525	5,352	5,528
384	200	40	90	0,7	6,248	6,000	6,042	1172	200	240	30	3,2	5,512	5,341	5,516
385	200	40	0	0,8	5,635	5,476	5,520	1173	200	240	40	3,2	5,500	5,330	5,504
386	200	40	10	0,8	6,125	5,926	5,974	1174	200	240	60	3,2	5,477	5,310	5,484
387	200	40	20	0,8	6,179	5,967	6,015	1175	200	240	80	3,2	5,457	5,291	5,465
388	200	40	30	0,8	6,202	5,981	6,029	1176	200	240	90	3,2	5,448	5,283	5,456
389	200	40	40	0,8	6,218	5,991	6,039	1177	200	300	0	0,7	5,582	5,296	5,333
390	200	40	60	0,8	6,233	5,999	6,047	1178	200	300	10	0,7	5,568	5,283	5,320
391	200	40	80	0,8	6,238	6,001	6,049	1179	200	300	20	0,7	5,556	5,270	5,307
392	200	40	90	0,8	6,239	6,001	6,049	1180	200	300	30	0,7	5,545	5,257	5,294
393	200	40	0	0,9	5,621	5,475	5,525	1181	200	300	40	0,7	5,535	5,245	5,282
394	200	40	10	0,9	6,107	5,919	5,972	1182	200	300	60	0,7	5,514	5,221	5,258
395	200	40	20	0,9	6,171	5,965	6,019	1183	200	300	80	0,7	5,495	5,198	5,235
396	200	40	30	0,9	6,196	5,982	6,036	1184	200	300	90	0,7	5,486	5,186	5,223
397	200	40	40	0,9	6,212	5,991	6,045	1185	200	300	0	0,8	5,538	5,296	5,339
398	200	40	60	0,9	6,228	5,999	6,053	1186	200	300	10	0,8	5,523	5,283	5,326
399	200	40	80	0,9	6,233	6,001	6,055	1187	200	300	20	0,8	5,511	5,270	5,313
400	200	40	90	0,9	6,234	6,002	6,056	1188	200	300	30	0,8	5,500	5,257	5,299
401	200	40	0	1	5,611	5,474	5,529	1189	200	300	40	0,8	5,489	5,245	5,287
402	200	40	10	1	6,090	5,910	5,969	1190	200	300	60	0,8	5,468	5,221	5,263
403	200	40	20	1	6,166	5,964	6,024	1191	200	300	80	0,8	5,448	5,198	5,240
404	200	40	30	1	6,192	5,982	6,042	1192	200	300	90	0,8	5,439	5,186	5,228
405	200	40	40	1	6,209	5,992	6,052	1193	200	300	0	0,9	5,507	5,295	5,343
406	200	40	60	1	6,226	6,001	6,061	1194	200	300	10	0,9	5,492	5,283	5,331
407	200	40	80	1	6,231	6,002	6,062	1195	200	300	20	0,9	5,480	5,270	5,318
408	200	40	90	1	6,232	6,002	6,062	1196	200	300	30	0,9	5,468	5,257	5,305
409	200	40	0	1,2	5,598	5,471	5,537	1197	200	300	40	0,9	5,457	5,245	5,293
410	200	40	10	1,2	6,056	5,890	5,961	1198	200	300	60	0,9	5,435	5,221	5,268

ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cat}	ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cat}
411	200	40	20	1,2	6,157	5,960	6,032	1199	200	300	80	0,9	5,415	5,198	5,245
412	200	40	30	1,2	6,189	5,981	6,053	1200	200	300	90	0,9	5,405	5,186	5,233
413	200	40	40	1,2	6,208	5,992	6,064	1201	200	300	0	1	5,485	5,295	5,349
414	200	40	60	1,2	6,226	6,002	6,074	1202	200	300	10	1	5,470	5,283	5,336
415	200	40	80	1,2	6,232	6,004	6,076	1203	200	300	20	1	5,458	5,270	5,323
416	200	40	90	1,2	6,233	6,005	6,077	1204	200	300	30	1	5,446	5,257	5,310
417	200	40	0	1,5	5,590	5,465	5,548	1205	200	300	40	1	5,434	5,245	5,298
418	200	40	10	1,5	6,000	5,859	5,948	1206	200	300	60	1	5,412	5,221	5,274
419	200	40	20	1,5	6,142	5,954	6,045	1207	200	300	80	1	5,391	5,198	5,250
420	200	40	30	1,5	6,186	5,980	6,070	1208	200	300	90	1	5,381	5,186	5,238
421	200	40	40	1,5	6,209	5,993	6,083	1209	200	300	0	1,2	5,457	5,295	5,359
422	200	40	60	1,5	6,232	6,004	6,095	1210	200	300	10	1,2	5,443	5,283	5,347
423	200	40	80	1,5	6,239	6,007	6,098	1211	200	300	20	1,2	5,430	5,270	5,334
424	200	40	90	1,5	6,241	6,006	6,097	1212	200	300	30	1,2	5,417	5,257	5,321
425	200	40	0	1,9	5,586	5,456	5,561	1213	200	300	40	1,2	5,405	5,245	5,309
426	200	40	10	1,9	5,911	5,818	5,930	1214	200	300	60	1,2	5,382	5,221	5,284
427	200	40	20	1,9	6,123	5,941	6,056	1215	200	300	80	1,2	5,361	5,198	5,261
428	200	40	30	1,9	6,183	5,976	6,091	1216	200	300	90	1,2	5,351	5,186	5,249
429	200	40	40	1,9	6,214	5,993	6,108	1217	200	300	0	1,5	5,439	5,295	5,376
430	200	40	60	1,9	6,242	6,006	6,121	1218	200	300	10	1,5	5,424	5,283	5,363
431	200	40	80	1,9	6,253	6,009	6,124	1219	200	300	20	1,5	5,411	5,270	5,350
432	200	40	90	1,9	6,255	6,010	6,125	1220	200	300	30	1,5	5,398	5,257	5,337
433	200	40	0	2,4	5,581	5,442	5,575	1221	200	300	40	1,5	5,385	5,245	5,325
434	200	40	10	2,4	5,800	5,773	5,914	1222	200	300	60	1,5	5,362	5,220	5,299
435	200	40	20	2,4	6,090	5,921	6,065	1223	200	300	80	1,5	5,340	5,197	5,276
436	200	40	30	2,4	6,173	5,969	6,115	1224	200	300	90	1,5	5,329	5,186	5,265
437	200	40	40	2,4	6,214	5,991	6,137	1225	200	300	0	1,9	5,433	5,294	5,396
438	200	40	60	2,4	6,253	6,007	6,153	1226	200	300	10	1,9	5,418	5,283	5,385
439	200	40	80	2,4	6,268	6,012	6,159	1227	200	300	20	1,9	5,404	5,270	5,372
440	200	40	90	2,4	6,272	6,013	6,159	1228	200	300	30	1,9	5,391	5,257	5,358
441	200	40	0	3	5,565	5,421	5,587	1229	200	300	40	1,9	5,378	5,244	5,345

ID	H	B	L ₁	t	<i>k</i> _{ABQ}	<i>k</i> _{RSM}	<i>k</i> _{Cal}	ID	H	B	L ₁	t	<i>k</i> _{ABQ}	<i>k</i> _{RSM}	<i>k</i> _{Cal}
442	200	40	10	3	5,693	5,727	5,903	1230	200	300	60	1,9	5,354	5,220	5,321
443	200	40	20	3	6,035	5,888	6,069	1231	200	300	80	1,9	5,331	5,197	5,297
444	200	40	30	3	6,147	5,956	6,139	1232	200	300	90	1,9	5,320	5,185	5,285
445	200	40	40	3	6,204	5,985	6,169	1233	200	300	0	2,4	5,438	5,293	5,423
446	200	40	60	3	6,258	6,008	6,192	1234	200	300	10	2,4	5,424	5,283	5,412
447	200	40	80	3	6,279	6,015	6,199	1235	200	300	20	2,4	5,409	5,270	5,399
448	200	40	90	3	6,285	6,016	6,200	1236	200	300	30	2,4	5,396	5,257	5,386
449	200	40	0	3,2	5,561	5,413	5,591	1237	200	300	40	2,4	5,383	5,244	5,372
450	200	40	10	3,2	5,662	5,713	5,900	1238	200	300	60	2,4	5,358	5,220	5,348
451	200	40	20	3,2	6,015	5,876	6,069	1239	200	300	80	2,4	5,334	5,197	5,324
452	200	40	30	3,2	6,135	5,950	6,145	1240	200	300	90	2,4	5,323	5,185	5,312
453	200	40	40	3,2	6,197	5,982	6,178	1241	200	300	0	3	5,451	5,292	5,455
454	200	40	60	3,2	6,257	6,008	6,204	1242	200	300	10	3	5,438	5,283	5,445
455	200	40	80	3,2	6,281	6,015	6,212	1243	200	300	20	3	5,423	5,270	5,432
456	200	40	90	3,2	6,288	6,017	6,214	1244	200	300	30	3	5,409	5,257	5,418
457	200	45	0	0,7	5,739	5,544	5,583	1245	200	300	40	3	5,395	5,244	5,405
458	200	45	10	0,7	6,100	5,882	5,923	1246	200	300	60	3	5,369	5,220	5,380
459	200	45	20	0,7	6,134	5,907	5,949	1247	200	300	80	3	5,345	5,196	5,356
460	200	45	30	0,7	6,154	5,920	5,962	1248	200	300	90	3	5,334	5,184	5,343
461	200	45	40	0,7	6,168	5,930	5,971	1249	200	300	0	3,2	5,456	5,292	5,466
462	200	45	60	0,7	6,182	5,937	5,978	1250	200	300	10	3,2	5,443	5,283	5,456
463	200	45	80	0,7	6,187	5,939	5,980	1251	200	300	20	3,2	5,428	5,270	5,443
464	200	45	90	0,7	6,188	5,939	5,980	1252	200	300	30	3,2	5,414	5,257	5,429
465	200	45	0	0,8	5,718	5,543	5,588	1253	200	300	40	3,2	5,400	5,244	5,416
466	200	45	10	0,8	6,081	5,876	5,924	1254	200	300	60	3,2	5,374	5,219	5,390
467	200	45	20	0,8	6,121	5,907	5,955	1255	200	300	80	3,2	5,350	5,196	5,366
468	200	45	30	0,8	6,142	5,921	5,969	1256	200	300	90	3,2	5,338	5,184	5,354
469	200	45	40	0,8	6,156	5,930	5,977	1257	200	350	0	0,7	5,516	5,223	5,260
470	200	45	60	0,8	6,170	5,938	5,985	1258	200	350	10	0,7	5,501	5,208	5,245
471	200	45	80	0,8	6,175	5,940	5,987	1259	200	350	20	0,7	5,488	5,193	5,230
472	200	45	90	0,8	6,176	5,939	5,986	1260	200	350	30	0,7	5,475	5,177	5,214

ID	H	B	L ₁	t	k _{ABQ}	k _{RSM}	k _{Cal}	ID	H	B	L ₁	t	k _{ABQ}	k _{RSM}	k _{Cal}
473	200	45	0	0,9	5,704	5,543	5,593	1261	200	350	40	0,7	5,463	5,161	5,198
474	200	45	10	0,9	6,067	5,871	5,925	1262	200	350	60	0,7	5,438	5,131	5,167
475	200	45	20	0,9	6,112	5,906	5,960	1263	200	350	80	0,7	5,414	5,099	5,134
476	200	45	30	0,9	6,134	5,921	5,975	1264	200	350	90	0,7	5,402	5,083	5,118
477	200	45	40	0,9	6,149	5,931	5,984	1265	200	350	0	0,8	5,470	5,223	5,265
478	200	45	60	0,9	6,163	5,939	5,992	1266	200	350	10	0,8	5,455	5,208	5,250
479	200	45	80	0,9	6,168	5,940	5,993	1267	200	350	20	0,8	5,441	5,193	5,235
480	200	45	90	0,9	6,169	5,940	5,993	1268	200	350	30	0,8	5,428	5,177	5,219
481	200	45	0	1	5,695	5,542	5,598	1269	200	350	40	0,8	5,415	5,161	5,203
482	200	45	10	1	6,053	5,865	5,924	1270	200	350	60	0,8	5,390	5,130	5,172
483	200	45	20	1	6,107	5,905	5,965	1271	200	350	80	0,8	5,366	5,099	5,140
484	200	45	30	1	6,130	5,921	5,981	1272	200	350	90	0,8	5,352	5,083	5,123
485	200	45	40	1	6,145	5,930	5,990	1273	200	350	0	0,9	5,437	5,222	5,269
486	200	45	60	1	6,160	5,939	5,998	1274	200	350	10	0,9	5,422	5,208	5,255
487	200	45	80	1	6,164	5,941	6,000	1275	200	350	20	0,9	5,408	5,193	5,240
488	200	45	90	1	6,165	5,941	6,000	1276	200	350	30	0,9	5,395	5,177	5,224
489	200	45	0	1,2	5,684	5,540	5,607	1277	200	350	40	0,9	5,381	5,161	5,208
490	200	45	10	1,2	6,029	5,852	5,923	1278	200	350	60	0,9	5,356	5,130	5,177
491	200	45	20	1,2	6,099	5,903	5,975	1279	200	350	80	0,9	5,331	5,099	5,145
492	200	45	30	1,2	6,126	5,921	5,993	1280	200	350	90	0,9	5,317	5,083	5,129
493	200	45	40	1,2	6,142	5,932	6,003	1281	200	350	0	1	5,413	5,222	5,275
494	200	45	60	1,2	6,158	5,941	6,012	1282	200	350	10	1	5,399	5,208	5,261
495	200	45	80	1,2	6,163	5,942	6,013	1283	200	350	20	1	5,384	5,192	5,244
496	200	45	90	1,2	6,164	5,942	6,013	1284	200	350	30	1	5,371	5,177	5,229
497	200	45	0	1,5	5,679	5,536	5,620	1285	200	350	40	1	5,357	5,161	5,213
498	200	45	10	1,5	5,991	5,830	5,918	1286	200	350	60	1	5,331	5,130	5,182
499	200	45	20	1,5	6,091	5,899	5,988	1287	200	350	80	1	5,306	5,099	5,150
500	200	45	30	1,5	6,124	5,920	6,010	1288	200	350	90	1	5,292	5,082	5,133
501	200	45	40	1,5	6,144	5,932	6,022	1289	200	350	0	1,2	5,384	5,222	5,285
502	200	45	60	1,5	6,163	5,942	6,032	1290	200	350	10	1,2	5,369	5,208	5,271
503	200	45	80	1,5	6,169	5,944	6,034	1291	200	350	20	1,2	5,354	5,192	5,255

ID	H	B	L ₁	t	<i>k_{ABQ}</i>	<i>k_{RSM}</i>	<i>k_{Cal}</i>	ID	H	B	L ₁	t	<i>k_{ABQ}</i>	<i>k_{RSM}</i>	<i>k_{Cal}</i>
504	200	45	90	1,5	6,170	5,945	6,035	1292	200	350	30	1,2	5,340	5,177	5,240
505	200	45	0	1,9	5,679	5,530	5,637	1293	200	350	40	1,2	5,326	5,161	5,224
506	200	45	10	1,9	5,947	5,802	5,914	1294	200	350	60	1,2	5,300	5,129	5,191
507	200	45	20	1,9	6,082	5,890	6,004	1295	200	350	80	1,2	5,274	5,098	5,159
508	200	45	30	1,9	6,126	5,918	6,032	1296	200	350	90	1,2	5,260	5,082	5,143
509	200	45	40	1,9	6,151	5,932	6,047	1297	200	350	0	1,5	5,363	5,221	5,300
510	200	45	60	1,9	6,174	5,944	6,058	1298	200	350	10	1,5	5,348	5,208	5,287
511	200	45	80	1,9	6,182	5,947	6,061	1299	200	350	20	1,5	5,333	5,192	5,271
512	200	45	90	1,9	6,184	5,947	6,061	1300	200	350	30	1,5	5,318	5,176	5,255
513	200	45	0	2,4	5,682	5,521	5,656	1301	200	350	40	1,5	5,304	5,161	5,239
514	200	45	10	2,4	5,874	5,770	5,911	1302	200	350	60	1,5	5,277	5,130	5,207
515	200	45	20	2,4	6,065	5,877	6,020	1303	200	350	80	1,5	5,250	5,098	5,175
516	200	45	30	2,4	6,126	5,914	6,059	1304	200	350	90	1,5	5,237	5,081	5,158
517	200	45	40	2,4	6,158	5,931	6,076	1305	200	350	0	1,9	5,354	5,220	5,321
518	200	45	60	2,4	6,188	5,946	6,091	1306	200	350	10	1,9	5,340	5,208	5,308
519	200	45	80	2,4	6,199	5,950	6,095	1307	200	350	20	1,9	5,325	5,192	5,292
520	200	45	90	2,4	6,202	5,950	6,095	1308	200	350	30	1,9	5,309	5,176	5,276
521	200	45	0	3	5,677	5,508	5,677	1309	200	350	40	1,9	5,295	5,160	5,260
522	200	45	10	3	5,794	5,739	5,915	1310	200	350	60	1,9	5,266	5,129	5,228
523	200	45	20	3	6,034	5,855	6,035	1311	200	350	80	1,9	5,239	5,097	5,195
524	200	45	30	3	6,116	5,905	6,086	1312	200	350	90	1,9	5,225	5,081	5,178
525	200	45	40	3	6,159	5,928	6,110	1313	200	350	0	2,4	5,357	5,219	5,347
526	200	45	60	3	6,200	5,947	6,129	1314	200	350	10	2,4	5,343	5,207	5,334
527	200	45	80	3	6,216	5,952	6,134	1315	200	350	20	2,4	5,327	5,191	5,318
528	200	45	90	3	6,220	5,953	6,135	1316	200	350	30	2,4	5,312	5,176	5,303
529	200	45	0	3,2	5,677	5,502	5,683	1317	200	350	40	2,4	5,297	5,160	5,286
530	200	45	10	3,2	5,771	5,729	5,917	1318	200	350	60	2,4	5,267	5,129	5,254
531	200	45	20	3,2	6,022	5,847	6,039	1319	200	350	80	2,4	5,239	5,096	5,220
532	200	45	30	3,2	6,110	5,902	6,095	1320	200	350	90	2,4	5,225	5,080	5,204
533	200	45	40	3,2	6,157	5,927	6,122	1321	200	350	0	3	5,368	5,218	5,378
534	200	45	60	3,2	6,202	5,946	6,141	1322	200	350	10	3	5,355	5,207	5,367

ID	H	B	L ₁	t	<i>k</i> _{ABQ}	<i>k</i> _{RSM}	<i>k</i> _{Cal}	ID	H	B	L ₁	t	<i>k</i> _{ABQ}	<i>k</i> _{RSM}	<i>k</i> _{Cal}
535	200	45	80	3,2	6,220	5,953	6,148	1323	200	350	20	3	5,338	5,191	5,351
536	200	45	90	3,2	6,225	5,954	6,149	1324	200	350	30	3	5,322	5,175	5,334
537	200	50	0	0,7	5,796	5,586	5,625	1325	200	350	40	3	5,307	5,159	5,318
538	200	50	10	0,7	6,058	5,834	5,875	1326	200	350	60	3	5,277	5,127	5,285
539	200	50	20	0,7	6,086	5,855	5,896	1327	200	350	80	3	5,248	5,095	5,251
540	200	50	30	0,7	6,105	5,867	5,908	1328	200	350	90	3	5,233	5,079	5,234
541	200	50	40	0,7	6,118	5,875	5,917	1329	200	350	0	3,2	5,372	5,218	5,389
542	200	50	60	0,7	6,131	5,882	5,924	1330	200	350	10	3,2	5,360	5,207	5,378
543	200	50	80	0,7	6,136	5,884	5,926	1331	200	350	20	3,2	5,343	5,191	5,361
544	200	50	90	0,7	6,137	5,884	5,926	1332	200	350	30	3,2	5,327	5,175	5,345
545	200	50	0	0,8	5,775	5,585	5,630	1333	200	350	40	3,2	5,311	5,159	5,328
546	200	50	10	0,8	6,040	5,831	5,878	1334	200	350	60	3,2	5,281	5,128	5,296
547	200	50	20	0,8	6,071	5,855	5,902	1335	200	350	80	3,2	5,251	5,095	5,262
548	200	50	30	0,8	6,090	5,867	5,914	1336	200	350	90	3,2	5,237	5,078	5,244
549	200	50	40	0,8	6,103	5,875	5,922	1337	200	400	0	0,7	5,441	5,134	5,170
550	200	50	60	0,8	6,117	5,883	5,931	1338	200	400	10	0,7	5,425	5,116	5,151
551	200	50	80	0,8	6,121	5,884	5,932	1339	200	400	20	0,7	5,410	5,095	5,130
552	200	50	90	0,8	6,122	5,884	5,932	1340	200	400	30	0,7	5,388	5,074	5,109
553	200	50	0	0,9	5,761	5,585	5,635	1341	200	400	40	0,7	5,356	5,052	5,087
554	200	50	10	0,9	6,027	5,827	5,880	1342	200	400	60	0,7	5,290	5,005	5,040
555	200	50	20	0,9	6,061	5,855	5,908	1343	200	400	80	0,7	5,225	4,953	4,988
556	200	50	30	0,9	6,081	5,867	5,920	1344	200	400	90	0,7	5,193	4,925	4,960
557	200	50	40	0,9	6,094	5,876	5,929	1345	200	400	0	0,8	5,393	5,134	5,176
558	200	50	60	0,9	6,108	5,884	5,938	1346	200	400	10	0,8	5,377	5,116	5,157
559	200	50	80	0,9	6,112	5,885	5,939	1347	200	400	20	0,8	5,361	5,095	5,136
560	200	50	90	0,9	6,113	5,885	5,939	1348	200	400	30	0,8	5,338	5,074	5,114
561	200	50	0	1	5,752	5,583	5,639	1349	200	400	40	0,8	5,306	5,051	5,092
562	200	50	10	1	6,015	5,823	5,882	1350	200	400	60	0,8	5,240	5,004	5,044
563	200	50	20	1	6,055	5,854	5,913	1351	200	400	80	0,8	5,175	4,953	4,993
564	200	50	30	1	6,075	5,867	5,926	1352	200	400	90	0,8	5,143	4,925	4,965
565	200	50	40	1	6,089	5,876	5,935	1353	200	400	0	0,9	5,359	5,134	5,180

ID	H	B	L ₁	t	<i>k_{ABQ}</i>	<i>k_{RSM}</i>	<i>k_{Cal}</i>	ID	H	B	L ₁	t	<i>k_{ABQ}</i>	<i>k_{RSM}</i>	<i>k_{Cal}</i>
566	200	50	60	1	6,102	5,884	5,943	1354	200	400	10	0,9	5,343	5,116	5,162
567	200	50	80	1	6,107	5,886	5,946	1355	200	400	20	0,9	5,327	5,095	5,141
568	200	50	90	1	6,107	5,886	5,946	1356	200	400	30	0,9	5,303	5,074	5,119
569	200	50	0	1,2	5,742	5,583	5,650	1357	200	400	40	0,9	5,271	5,051	5,097
570	200	50	10	1,2	5,996	5,814	5,884	1358	200	400	60	0,9	5,205	5,004	5,049
571	200	50	20	1,2	6,048	5,853	5,924	1359	200	400	80	0,9	5,140	4,952	4,997
572	200	50	30	1,2	6,070	5,868	5,939	1360	200	400	90	0,9	5,107	4,924	4,969
573	200	50	40	1,2	6,085	5,877	5,948	1361	200	400	0	1	5,334	5,133	5,185
574	200	50	60	1,2	6,099	5,885	5,956	1362	200	400	10	1	5,318	5,116	5,167
575	200	50	80	1,2	6,103	5,887	5,958	1363	200	400	20	1	5,302	5,095	5,146
576	200	50	90	1,2	6,104	5,887	5,958	1364	200	400	30	1	5,278	5,073	5,124
577	200	50	0	1,5	5,739	5,580	5,665	1365	200	400	40	1	5,246	5,051	5,102
578	200	50	10	1,5	5,970	5,798	5,886	1366	200	400	60	1	5,180	5,004	5,054
579	200	50	20	1,5	6,042	5,850	5,939	1367	200	400	80	1	5,115	4,952	5,002
580	200	50	30	1,5	6,069	5,868	5,957	1368	200	400	90	1	5,082	4,924	4,974
581	200	50	40	1,5	6,086	5,878	5,967	1369	200	400	0	1,2	5,302	5,133	5,195
582	200	50	60	1,5	6,102	5,887	5,977	1370	200	400	10	1,2	5,287	5,116	5,177
583	200	50	80	1,5	6,107	5,889	5,979	1371	200	400	20	1,2	5,269	5,094	5,155
584	200	50	90	1,5	6,108	5,889	5,979	1372	200	400	30	1,2	5,247	5,073	5,134
585	200	50	0	1,9	5,742	5,577	5,684	1373	200	400	40	1,2	5,214	5,051	5,112
586	200	50	10	1,9	5,941	5,778	5,889	1374	200	400	60	1,2	5,148	5,003	5,064
587	200	50	20	1,9	6,039	5,844	5,957	1375	200	400	80	1,2	5,082	4,951	5,011
588	200	50	30	1,9	6,073	5,867	5,980	1376	200	400	90	1,2	5,050	4,923	4,983
589	200	50	40	1,9	6,094	5,878	5,991	1377	200	400	0	1,5	5,279	5,132	5,209
590	200	50	60	1,9	6,113	5,889	6,003	1378	200	400	10	1,5	5,263	5,115	5,192
591	200	50	80	1,9	6,120	5,891	6,005	1379	200	400	20	1,5	5,246	5,094	5,171
592	200	50	90	1,9	6,121	5,891	6,005	1380	200	400	30	1,5	5,224	5,072	5,149
593	200	50	0	2,4	5,750	5,570	5,706	1381	200	400	40	1,5	5,191	5,050	5,127
594	200	50	10	2,4	5,909	5,756	5,897	1382	200	400	60	1,5	5,124	5,003	5,079
595	200	50	20	2,4	6,032	5,834	5,977	1383	200	400	80	1,5	5,058	4,950	5,025
596	200	50	30	2,4	6,078	5,864	6,007	1384	200	400	90	1,5	5,026	4,922	4,997

ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cal}	ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cal}
597	200	50	40	2,4	6,104	5,878	6,022	1385	200	400	0	1,9	5,268	5,130	5,229
598	200	50	60	2,4	6,129	5,890	6,034	1386	200	400	10	1,9	5,253	5,115	5,213
599	200	50	80	2,4	6,137	5,894	6,038	1387	200	400	20	1,9	5,235	5,093	5,191
600	200	50	90	2,4	6,139	5,894	6,038	1388	200	400	30	1,9	5,215	5,072	5,169
601	200	50	0	3	5,754	5,560	5,731	1389	200	400	40	1,9	5,181	5,049	5,146
602	200	50	10	3	5,854	5,734	5,910	1390	200	400	60	1,9	5,114	5,001	5,097
603	200	50	20	3	6,017	5,820	5,998	1391	200	400	80	1,9	5,047	4,949	5,044
604	200	50	30	3	6,078	5,858	6,038	1392	200	400	90	1,9	5,014	4,920	5,015
605	200	50	40	3	6,112	5,877	6,058	1393	200	400	0	2,4	5,268	5,130	5,255
606	200	50	60	3	6,144	5,892	6,073	1394	200	400	10	2,4	5,254	5,114	5,238
607	200	50	80	3	6,157	5,896	6,077	1395	200	400	20	2,4	5,235	5,093	5,217
608	200	50	90	3	6,160	5,897	6,078	1396	200	400	30	2,4	5,217	5,071	5,194
609	200	50	0	3,2	5,755	5,557	5,739	1397	200	400	40	2,4	5,183	5,048	5,172
610	200	50	10	3,2	5,837	5,727	5,915	1398	200	400	60	2,4	5,114	5,000	5,122
611	200	50	20	3,2	6,010	5,814	6,004	1399	200	400	80	2,4	5,047	4,947	5,068
612	200	50	30	3,2	6,077	5,855	6,047	1400	200	400	90	2,4	5,013	4,918	5,038
613	200	50	40	3,2	6,113	5,876	6,068	1401	200	400	0	3	5,276	5,127	5,285
614	200	50	60	3,2	6,148	5,892	6,085	1402	200	400	10	3	5,263	5,113	5,269
615	200	50	80	3,2	6,162	5,897	6,091	1403	200	400	20	3	5,244	5,092	5,248
616	200	50	90	3,2	6,165	5,897	6,091	1404	200	400	30	3	5,225	5,070	5,225
617	200	60	0	0,7	5,856	5,621	5,661	1405	200	400	40	3	5,193	5,046	5,201
618	200	60	10	0,7	5,992	5,756	5,797	1406	200	400	60	3	5,124	4,998	5,151
619	200	60	20	0,7	6,012	5,769	5,810	1407	200	400	80	3	5,054	4,945	5,097
620	200	60	30	0,7	6,028	5,779	5,819	1408	200	400	90	3	5,020	4,916	5,067
621	200	60	40	0,7	6,039	5,786	5,827	1409	200	400	0	3,2	5,280	5,127	5,295
622	200	60	60	0,7	6,050	5,792	5,833	1410	200	400	10	3,2	5,267	5,113	5,280
623	200	60	80	0,7	6,054	5,793	5,834	1411	200	400	20	3,2	5,248	5,092	5,259
624	200	60	90	0,7	6,055	5,792	5,833	1412	200	400	30	3,2	5,228	5,070	5,236
625	200	60	0	0,8	5,834	5,620	5,666	1413	200	400	40	3,2	5,198	5,047	5,212
626	200	60	10	0,8	5,972	5,755	5,802	1414	200	400	60	3,2	5,128	4,998	5,162
627	200	60	20	0,8	5,993	5,770	5,816	1415	200	400	80	3,2	5,058	4,944	5,106

ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cat}	ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cat}
628	200	60	30	0,8	6,009	5,779	5,825	1416	200	400	90	3,2	5,024	4,915	5,076
629	200	60	40	0,8	6,019	5,786	5,832	1417	200	450	0	0,7	5,297	5,013	5,048
630	200	60	60	0,8	6,030	5,792	5,838	1418	200	450	10	0,7	5,264	4,984	5,019
631	200	60	80	0,8	6,034	5,793	5,839	1419	200	450	20	0,7	5,223	4,951	4,986
632	200	60	90	0,8	6,035	5,793	5,839	1420	200	450	30	0,7	5,182	4,915	4,950
633	200	60	0	0,9	5,820	5,620	5,671	1421	200	450	40	0,7	5,140	4,877	4,911
634	200	60	10	0,9	5,958	5,753	5,805	1422	200	450	60	0,7	5,054	4,787	4,821
635	200	60	20	0,9	5,980	5,770	5,822	1423	200	450	80	0,7	4,899	4,684	4,717
636	200	60	30	0,9	5,996	5,779	5,831	1424	200	450	90	0,7	4,825	4,628	4,660
637	200	60	40	0,9	6,007	5,787	5,839	1425	200	450	0	0,8	5,246	5,012	5,052
638	200	60	60	0,9	6,018	5,793	5,845	1426	200	450	10	0,8	5,215	4,984	5,024
639	200	60	80	0,9	6,021	5,794	5,846	1427	200	450	20	0,8	5,173	4,951	4,991
640	200	60	90	0,9	6,022	5,793	5,845	1428	200	450	30	0,8	5,132	4,915	4,955
641	200	60	0	1	5,811	5,620	5,677	1429	200	450	40	0,8	5,090	4,876	4,915
642	200	60	10	1	5,948	5,751	5,809	1430	200	450	60	0,8	5,007	4,787	4,826
643	200	60	20	1	5,972	5,769	5,827	1431	200	450	80	0,8	4,860	4,684	4,721
644	200	60	30	1	5,988	5,780	5,838	1432	200	450	90	0,8	4,786	4,626	4,663
645	200	60	40	1	5,999	5,787	5,845	1433	200	450	0	0,9	5,211	5,012	5,057
646	200	60	60	1	6,010	5,793	5,851	1434	200	450	10	0,9	5,179	4,983	5,028
647	200	60	80	1	6,013	5,794	5,852	1435	200	450	20	0,9	5,138	4,950	4,995
648	200	60	90	1	6,014	5,794	5,852	1436	200	450	30	0,9	5,097	4,914	4,959
649	200	60	0	1,2	5,801	5,619	5,687	1437	200	450	40	0,9	5,055	4,876	4,920
650	200	60	10	1,2	5,934	5,746	5,815	1438	200	450	60	0,9	4,972	4,787	4,830
651	200	60	20	1,2	5,963	5,768	5,838	1439	200	450	80	0,9	4,832	4,682	4,725
652	200	60	30	1,2	5,979	5,780	5,850	1440	200	450	90	0,9	4,759	4,626	4,668
653	200	60	40	1,2	5,991	5,788	5,858	1441	200	450	0	1	5,185	5,011	5,061
654	200	60	60	1,2	6,002	5,794	5,864	1442	200	450	10	1	5,154	4,983	5,033
655	200	60	80	1,2	6,006	5,795	5,865	1443	200	450	20	1	5,113	4,950	5,000
656	200	60	90	1,2	6,006	5,795	5,865	1444	200	450	30	1	5,072	4,914	4,964
657	200	60	0	1,5	5,800	5,618	5,704	1445	200	450	40	1	5,030	4,875	4,924
658	200	60	10	1,5	5,919	5,738	5,825	1446	200	450	60	1	4,947	4,786	4,835

ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cal}	ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cal}
659	200	60	20	1,5	5,958	5,767	5,855	1447	200	450	80	1	4,812	4,682	4,729
660	200	60	30	1,5	5,977	5,780	5,867	1448	200	450	90	1	4,739	4,625	4,672
661	200	60	40	1,5	5,990	5,788	5,876	1449	200	450	0	1,2	5,152	5,010	5,070
662	200	60	60	1,5	6,002	5,795	5,883	1450	200	450	10	1,2	5,122	4,983	5,043
663	200	60	80	1,5	6,006	5,796	5,884	1451	200	450	20	1,2	5,081	4,949	5,009
664	200	60	90	1,5	6,006	5,796	5,884	1452	200	450	30	1,2	5,039	4,913	4,972
665	200	60	0	1,9	5,806	5,616	5,725	1453	200	450	40	1,2	4,998	4,874	4,933
666	200	60	10	1,9	5,907	5,727	5,838	1454	200	450	60	1,2	4,915	4,784	4,842
667	200	60	20	1,9	5,960	5,764	5,875	1455	200	450	80	1,2	4,786	4,680	4,737
668	200	60	30	1,9	5,983	5,779	5,891	1456	200	450	90	1,2	4,714	4,623	4,679
669	200	60	40	1,9	5,997	5,789	5,900	1457	200	450	0	1,5	5,128	5,008	5,084
670	200	60	60	1,9	6,012	5,797	5,909	1458	200	450	10	1,5	5,099	4,982	5,058
671	200	60	80	1,9	6,016	5,798	5,910	1459	200	450	20	1,5	5,057	4,948	5,023
672	200	60	90	1,9	6,016	5,798	5,910	1460	200	450	30	1,5	5,015	4,912	4,987
673	200	60	0	2,4	5,819	5,613	5,750	1461	200	450	40	1,5	4,974	4,872	4,946
674	200	60	10	2,4	5,895	5,716	5,856	1462	200	450	60	1,5	4,891	4,782	4,855
675	200	60	20	2,4	5,964	5,759	5,900	1463	200	450	80	1,5	4,767	4,677	4,748
676	200	60	30	2,4	5,993	5,779	5,920	1464	200	450	90	1,5	4,695	4,620	4,690
677	200	60	40	2,4	6,010	5,789	5,930	1465	200	450	0	1,9	5,115	5,006	5,102
678	200	60	60	2,4	6,027	5,798	5,939	1466	200	450	10	1,9	5,088	4,981	5,077
679	200	60	80	2,4	6,033	5,800	5,942	1467	200	450	20	1,9	5,046	4,947	5,043
680	200	60	90	2,4	6,034	5,800	5,942	1468	200	450	30	1,9	5,004	4,910	5,005
681	200	60	0	3	5,833	5,608	5,780	1469	200	450	40	1,9	4,962	4,871	4,964
682	200	60	10	3	5,884	5,704	5,879	1470	200	450	60	1,9	4,878	4,780	4,872
683	200	60	20	3	5,966	5,752	5,928	1471	200	450	80	1,9	4,758	4,674	4,764
684	200	60	30	3	6,003	5,776	5,954	1472	200	450	90	1,9	4,686	4,616	4,705
685	200	60	40	3	6,025	5,789	5,966	1473	200	450	0	2,4	5,114	5,004	5,126
686	200	60	60	3	6,046	5,800	5,978	1474	200	450	10	2,4	5,089	4,979	5,101
687	200	60	80	3	6,054	5,802	5,980	1475	200	450	20	2,4	5,046	4,945	5,066
688	200	60	90	3	6,055	5,802	5,980	1476	200	450	30	2,4	5,003	4,908	5,028
689	200	60	0	3,2	5,838	5,606	5,790	1477	200	450	40	2,4	4,961	4,868	4,987

ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cal}	ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cal}
690	200	60	10	3,2	5,881	5,701	5,888	1478	200	450	60	2,4	4,876	4,777	4,893
691	200	60	20	3,2	5,966	5,749	5,937	1479	200	450	80	2,4	4,758	4,669	4,783
692	200	60	30	3,2	6,005	5,774	5,964	1480	200	450	90	2,4	4,686	4,610	4,723
693	200	60	40	3,2	6,029	5,789	5,979	1481	200	450	0	3	5,120	5,000	5,153
694	200	60	60	3,2	6,052	5,800	5,990	1482	200	450	10	3	5,098	4,977	5,130
695	200	60	80	3,2	6,060	5,803	5,993	1483	200	450	20	3	5,054	4,943	5,094
696	200	60	90	3,2	6,062	5,803	5,993	1484	200	450	30	3	5,011	4,906	5,057
697	200	80	0	0,7	5,873	5,615	5,654	1485	200	450	40	3	4,967	4,865	5,015
698	200	80	10	0,7	5,911	5,650	5,689	1486	200	450	60	3	4,881	4,773	4,919
699	200	80	20	0,7	5,921	5,652	5,691	1487	200	450	80	3	4,764	4,664	4,807
700	200	80	30	0,7	5,930	5,656	5,695	1488	200	450	90	3	4,691	4,604	4,745
701	200	80	40	0,7	5,937	5,659	5,698	1489	200	450	0	3,2	5,123	4,999	5,163
702	200	80	60	0,7	5,942	5,660	5,700	1490	200	450	10	3,2	5,102	4,977	5,140
703	200	80	80	0,7	5,944	5,659	5,698	1491	200	450	20	3,2	5,058	4,942	5,104
704	200	80	90	0,7	5,944	5,657	5,697	1492	200	450	30	3,2	5,014	4,905	5,066
705	200	80	0	0,8	5,849	5,614	5,659	1493	200	450	40	3,2	4,970	4,865	5,024
706	200	80	10	0,8	5,886	5,649	5,694	1494	200	450	60	3,2	4,883	4,771	4,927
707	200	80	20	0,8	5,895	5,652	5,697	1495	200	450	80	3,2	4,767	4,662	4,815
708	200	80	30	0,8	5,904	5,656	5,701	1496	200	450	90	3,2	4,694	4,602	4,753
709	200	80	40	0,8	5,910	5,659	5,704	1497	200	500	0	0,7	5,065	4,807	4,841
710	200	80	60	0,8	5,915	5,661	5,706	1498	200	500	10	0,7	5,002	4,751	4,785
711	200	80	80	0,8	5,917	5,659	5,705	1499	200	500	20	0,7	4,908	4,686	4,719
712	200	80	90	0,8	5,917	5,658	5,703	1500	200	500	30	0,7	4,816	4,616	4,649
713	200	80	0	0,9	5,832	5,614	5,665	1501	200	500	40	0,7	4,726	4,542	4,574
714	200	80	10	0,9	5,868	5,648	5,699	1502	200	500	60	0,7	4,554	4,386	4,417
715	200	80	20	0,9	5,878	5,652	5,703	1503	200	500	80	0,7	4,395	4,227	4,257
716	200	80	30	0,9	5,886	5,656	5,707	1504	200	500	90	0,7	4,320	4,148	4,178
717	200	80	40	0,9	5,892	5,659	5,710	1505	200	500	0	0,8	5,016	4,805	4,844
718	200	80	60	0,9	5,897	5,661	5,712	1506	200	500	10	0,8	4,962	4,751	4,789
719	200	80	80	0,9	5,898	5,659	5,711	1507	200	500	20	0,8	4,868	4,686	4,723
720	200	80	90	0,9	5,898	5,658	5,710	1508	200	500	30	0,8	4,777	4,615	4,652

ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cal}	ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cal}
721	200	80	0	1	5,821	5,614	5,670	1509	200	500	40	0,8	4,688	4,540	4,577
722	200	80	10	1	5,856	5,648	5,705	1510	200	500	60	0,8	4,520	4,384	4,419
723	200	80	20	1	5,866	5,652	5,709	1511	200	500	80	0,8	4,363	4,225	4,259
724	200	80	30	1	5,874	5,656	5,713	1512	200	500	90	0,8	4,289	4,147	4,180
725	200	80	40	1	5,880	5,659	5,716	1513	200	500	0	0,9	4,981	4,804	4,848
726	200	80	60	1	5,885	5,661	5,718	1514	200	500	10	0,9	4,933	4,750	4,793
727	200	80	80	1	5,886	5,659	5,716	1515	200	500	20	0,9	4,841	4,685	4,728
728	200	80	90	1	5,886	5,658	5,715	1516	200	500	30	0,9	4,750	4,614	4,656
729	200	80	0	1,2	5,810	5,614	5,682	1517	200	500	40	0,9	4,662	4,539	4,581
730	200	80	10	1,2	5,842	5,647	5,715	1518	200	500	60	0,9	4,495	4,383	4,422
731	200	80	20	1,2	5,852	5,652	5,720	1519	200	500	80	0,9	4,340	4,224	4,262
732	200	80	30	1,2	5,860	5,657	5,725	1520	200	500	90	0,9	4,267	4,146	4,184
733	200	80	40	1,2	5,866	5,660	5,728	1521	200	500	0	1	4,956	4,803	4,852
734	200	80	60	1,2	5,871	5,662	5,730	1522	200	500	10	1	4,913	4,749	4,797
735	200	80	80	1,2	5,872	5,660	5,729	1523	200	500	20	1	4,821	4,684	4,731
736	200	80	90	1,2	5,872	5,659	5,728	1524	200	500	30	1	4,731	4,613	4,660
737	200	80	0	1,5	5,807	5,613	5,698	1525	200	500	40	1	4,644	4,538	4,584
738	200	80	10	1,5	5,832	5,644	5,729	1526	200	500	60	1	4,478	4,382	4,426
739	200	80	20	1,5	5,844	5,652	5,737	1527	200	500	80	1	4,324	4,222	4,265
740	200	80	30	1,5	5,853	5,657	5,742	1528	200	500	90	1	4,251	4,144	4,186
741	200	80	40	1,5	5,860	5,661	5,746	1529	200	500	0	1,2	4,922	4,801	4,859
742	200	80	60	1,5	5,865	5,662	5,748	1530	200	500	10	1,2	4,887	4,748	4,806
743	200	80	80	1,5	5,866	5,661	5,746	1531	200	500	20	1,2	4,795	4,682	4,739
744	200	80	90	1,5	5,866	5,660	5,745	1532	200	500	30	1,2	4,706	4,611	4,667
745	200	80	0	1,9	5,815	5,612	5,720	1533	200	500	40	1,2	4,619	4,536	4,591
746	200	80	10	1,9	5,831	5,641	5,749	1534	200	500	60	1,2	4,455	4,379	4,432
747	200	80	20	1,9	5,847	5,651	5,760	1535	200	500	80	1,2	4,302	4,219	4,270
748	200	80	30	1,9	5,856	5,657	5,766	1536	200	500	90	1,2	4,231	4,141	4,191
749	200	80	40	1,9	5,863	5,661	5,770	1537	200	500	0	1,5	4,896	4,797	4,870
750	200	80	60	1,9	5,870	5,664	5,773	1538	200	500	10	1,5	4,863	4,746	4,818
751	200	80	80	1,9	5,871	5,662	5,771	1539	200	500	20	1,5	4,777	4,680	4,751

ID	H	B	L ₁	t	<i>k_{ABQ}</i>	<i>k_{RSM}</i>	<i>k_{Cal}</i>	ID	H	B	L ₁	t	<i>k_{ABQ}</i>	<i>k_{RSM}</i>	<i>k_{Cal}</i>
752	200	80	90	1,9	5,870	5,661	5,770	1540	200	500	30	1,5	4,688	4,608	4,678
753	200	80	0	2,4	5,828	5,612	5,749	1541	200	500	40	1,5	4,602	4,533	4,602
754	200	80	10	2,4	5,835	5,638	5,775	1542	200	500	60	1,5	4,438	4,375	4,441
755	200	80	20	2,4	5,856	5,650	5,788	1543	200	500	80	1,5	4,286	4,215	4,279
756	200	80	30	2,4	5,867	5,657	5,795	1544	200	500	90	1,5	4,215	4,137	4,200
757	200	80	40	2,4	5,875	5,661	5,799	1545	200	500	0	1,9	4,882	4,793	4,886
758	200	80	60	2,4	5,883	5,665	5,803	1546	200	500	10	1,9	4,850	4,743	4,835
759	200	80	80	2,4	5,884	5,663	5,802	1547	200	500	20	1,9	4,768	4,676	4,766
760	200	80	90	2,4	5,884	5,662	5,801	1548	200	500	30	1,9	4,679	4,604	4,693
761	200	80	0	3	5,844	5,610	5,782	1549	200	500	40	1,9	4,593	4,528	4,615
762	200	80	10	3	5,844	5,635	5,808	1550	200	500	60	1,9	4,429	4,370	4,454
763	200	80	20	3	5,869	5,647	5,820	1551	200	500	80	1,9	4,278	4,209	4,290
764	200	80	30	3	5,883	5,656	5,829	1552	200	500	90	1,9	4,207	4,130	4,210
765	200	80	40	3	5,893	5,662	5,835	1553	200	500	0	2,4	4,876	4,787	4,904
766	200	80	60	3	5,902	5,665	5,839	1554	200	500	10	2,4	4,848	4,739	4,855
767	200	80	80	3	5,903	5,664	5,838	1555	200	500	20	2,4	4,768	4,672	4,786
768	200	80	90	3	5,903	5,663	5,837	1556	200	500	30	2,4	4,679	4,599	4,712
769	200	80	0	3,2	5,850	5,609	5,793	1557	200	500	40	2,4	4,592	4,523	4,633
770	200	80	10	3,2	5,847	5,633	5,818	1558	200	500	60	2,4	4,428	4,363	4,469
771	200	80	20	3,2	5,873	5,646	5,831	1559	200	500	80	2,4	4,276	4,202	4,305
772	200	80	30	3,2	5,888	5,656	5,841	1560	200	500	90	2,4	4,205	4,123	4,224
773	200	80	40	3,2	5,898	5,662	5,847	1561	200	500	0	3	4,878	4,780	4,926
774	200	80	60	3,2	5,908	5,666	5,851	1562	200	500	10	3	4,853	4,735	4,881
775	200	80	80	3,2	5,910	5,665	5,851	1563	200	500	20	3	4,775	4,667	4,810
776	200	80	90	3,2	5,910	5,664	5,850	1564	200	500	30	3	4,685	4,593	4,734
777	200	100	0	0,7	5,850	5,581	5,621	1565	200	500	40	3	4,598	4,516	4,655
778	200	100	10	0,7	5,855	5,583	5,622	1566	200	500	60	3	4,432	4,355	4,488
779	200	100	20	0,7	5,858	5,579	5,618	1567	200	500	80	3	4,279	4,192	4,321
780	200	100	30	0,7	5,863	5,577	5,616	1568	200	500	90	3	4,207	4,113	4,239
781	200	100	40	0,7	5,866	5,576	5,615	1569	200	500	0	3,2	4,880	4,777	4,934
782	200	100	60	0,7	5,869	5,573	5,612	1570	200	500	10	3,2	4,855	4,734	4,889

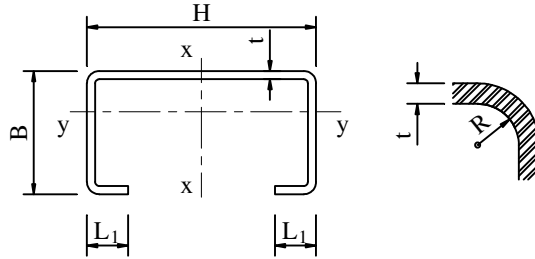
ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cat}	ID	H	B	L ₁	t	k_{ABQ}	k_{RSM}	k_{Cat}
783	200	100	80	0,7	5,869	5,568	5,607	1571	200	500	20	3,2	4,778	4,665	4,818
784	200	100	90	0,7	5,868	5,566	5,605	1572	200	500	30	3,2	4,688	4,591	4,742
785	200	100	0	0,8	5,821	5,582	5,627	1573	200	500	40	3,2	4,600	4,514	4,662
786	200	100	10	0,8	5,826	5,583	5,628	1574	200	500	60	3,2	4,434	4,352	4,494
787	200	100	20	0,8	5,829	5,579	5,624	1575	200	500	80	3,2	4,280	4,189	4,326
788	200	100	30	0,8	5,833	5,577	5,622	1576	200	500	90	3,2	4,209	4,110	4,245

C.2. Kết quả mô phỏng độ bền bằng ABAQUS

ID – Số thứ tự

Hệ số Poát xng $\nu = 0,3$.

Đơn vị sử dụng gồm: H, B, L_1, t, R (mm), F_y, F_u (MPa), M_u (kN.m)



Loại thép	F_y	F_u
Cán nguội	350	420
	450	480
	500	520
	550	550
Cán nóng	250	400
	345	450

Bảng C.2 Kết quả mô phỏng độ bền của cầu kiện sử dụng thép cán nguội

ID	H	B	L_1	t	R	F_y	M_u	ID	H	B	L_1	t	R	F_y	M_u
1	100	20	14	0,8	3	350	0,198	577	250	50	10	0,8	3	350	0,656
2	100	20	6	0,8	3	450	0,164	578	250	50	20	0,8	3	450	0,929
3	100	20	10	0,8	3	500	0,227	579	250	50	20	0,8	3	500	1,002
4	100	20	6	0,8	3	550	0,19	580	250	50	30	0,8	3	550	1,107
5	100	20	12	1	3	350	0,237	581	250	50	25	1	3	350	1,139
6	100	20	14	1	3	450	0,314	582	250	50	10	1	3	450	1,098
7	100	20	6	1	3	500	0,221	583	250	50	15	1	3	500	1,291
8	100	20	6	1	3	550	0,235	584	250	50	25	1	3	550	1,568
9	100	20	10	1,2	3	350	0,261	585	250	50	10	1,2	3	350	1,125
10	100	20	10	1,2	3	450	0,317	586	250	50	25	1,2	3	450	1,808
11	100	20	14	1,2	3	500	0,415	587	250	50	30	1,2	3	500	2,017
12	100	20	6	1,2	3	550	0,277	588	250	50	35	1,2	3	550	2,182
13	100	20	6	1,5	3	350	0,247	589	250	50	15	1,5	3	350	1,663
14	100	20	6	1,5	3	450	0,297	590	250	50	20	1,5	3	450	2,264
15	100	20	10	1,5	3	500	0,427	591	250	50	20	1,5	3	500	2,466
16	100	20	6	1,5	3	550	0,341	592	250	50	30	1,5	3	550	3,01
17	100	20	6	1,9	4	350	0,298	593	250	50	30	1,9	4	350	2,839
18	100	20	8	1,9	4	450	0,415	594	250	50	30	1,9	4	450	3,478
19	100	20	6	1,9	4	500	0,389	595	250	50	35	1,9	4	500	4,017

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
20	100	20	8	1,9	4	550	0,472	596	250	50	15	1,9	4	550	2,987
21	100	20	14	2,4	4	350	0,584	597	250	50	15	2,4	4	350	2,669
22	100	20	12	2,4	4	450	0,643	598	250	50	10	2,4	4	450	2,733
23	100	20	12	2,4	4	500	0,698	599	250	50	20	2,4	4	500	4,066
24	100	20	8	2,4	4	550	0,575	600	250	50	15	2,4	4	550	3,769
25	100	20	12	3	5	350	0,62	601	250	50	20	3	5	350	3,737
26	100	20	14	3	5	450	0,826	602	250	50	20	3	5	450	4,547
27	100	20	14	3	5	500	0,897	603	250	50	20	3	5	500	4,955
28	100	20	10	3	5	550	0,754	604	250	50	25	3	5	550	5,903
29	100	20	12	3,2	5	350	0,644	605	250	50	20	3,2	5	350	3,975
30	100	20	14	3,2	5	450	0,868	606	250	50	20	3,2	5	450	4,828
31	100	20	12	3,2	5	500	0,849	607	250	50	25	3,2	5	500	5,948
32	100	20	14	3,2	5	550	0,985	608	250	50	15	3,2	5	550	4,803
33	100	50	16	0,8	3	350	0,704	609	250	125	15	0,8	3	350	2,158
34	100	50	16	0,8	3	450	0,857	610	250	125	30	0,8	3	450	2,357
35	100	50	4	0,8	3	500	0,729	611	250	125	35	0,8	3	500	2,544
36	100	50	4	0,8	3	550	0,777	612	250	125	15	0,8	3	550	2,783
37	100	50	8	1	3	350	0,817	613	250	125	30	1	3	350	3,431
38	100	50	16	1	3	450	1,169	614	250	125	40	1	3	450	4,067
39	100	50	10	1	3	500	1,142	615	250	125	35	1	3	500	4,332
40	100	50	16	1	3	550	1,363	616	250	125	40	1	3	550	4,396
41	100	50	18	1,2	3	350	1,237	617	250	125	35	1,2	3	350	4,849
42	100	50	10	1,2	3	450	1,313	618	250	125	45	1,2	3	450	5,784
43	100	50	18	1,2	3	500	1,663	619	250	125	25	1,2	3	500	5,866
44	100	50	14	1,2	3	550	1,66	620	250	125	15	1,2	3	550	5,883
45	100	50	18	1,5	3	350	1,615	621	250	125	40	1,5	3	350	7,223
46	100	50	18	1,5	3	450	1,994	622	250	125	45	1,5	3	450	8,738
47	100	50	12	1,5	3	500	1,944	623	250	125	40	1,5	3	500	9,194
48	100	50	16	1,5	3	550	2,253	624	250	125	15	1,5	3	550	8,643
49	100	50	12	1,9	4	350	1,855	625	250	125	15	1,9	4	350	8,751
50	100	50	10	1,9	4	450	2,172	626	250	125	40	1,9	4	450	12,61

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
51	100	50	12	1,9	4	500	2,497	627	250	125	15	1,9	4	500	11,56
52	100	50	16	1,9	4	550	2,906	628	250	125	35	1,9	4	550	13,81
53	100	50	18	2,4	4	350	2,697	629	250	125	35	2,4	4	350	14,05
54	100	50	16	2,4	4	450	3,198	630	250	125	15	2,4	4	450	14,53
55	100	50	16	2,4	4	500	3,499	631	250	125	40	2,4	4	500	19,21
56	100	50	8	2,4	4	550	3,027	632	250	125	10	2,4	4	550	15,99
57	100	50	10	3	5	350	2,751	633	250	125	20	3	5	350	16,22
58	100	50	16	3	5	450	3,941	634	250	125	10	3	5	450	17,82
59	100	50	18	3	5	500	4,509	635	250	125	25	3	5	500	22,82
60	100	50	10	3	5	550	3,903	636	250	125	45	3	5	550	28,35
61	100	50	14	3,2	5	350	3,258	637	250	125	10	3,2	5	350	15,63
62	100	50	12	3,2	5	450	3,787	638	250	125	25	3,2	5	450	22,56
63	100	50	16	3,2	5	500	4,586	639	250	125	25	3,2	5	500	24,66
64	100	50	16	3,2	5	550	4,865	640	250	125	30	3,2	5	550	27,43
65	100	100	4	0,8	3	350	1,425	641	250	250	40	0,8	3	350	4,775
66	100	100	12	0,8	3	450	1,827	642	250	250	20	0,8	3	450	5,292
67	100	100	18	0,8	3	500	2,018	643	250	250	35	0,8	3	500	5,821
68	100	100	18	0,8	3	550	2,133	644	250	250	15	0,8	3	550	5,897
69	100	100	6	1	3	350	2,079	645	250	250	40	1	3	350	7,2
70	100	100	12	1	3	450	2,651	646	250	250	15	1	3	450	7,931
71	100	100	6	1	3	500	2,723	647	250	250	40	1	3	500	8,951
72	100	100	6	1	3	550	2,895	648	250	250	20	1	3	550	9,083
73	100	100	16	1,2	3	350	3,008	649	250	250	30	1,2	3	350	9,83
74	100	100	18	1,2	3	450	3,69	650	250	250	10	1,2	3	450	11,01
75	100	100	10	1,2	3	500	3,769	651	250	250	25	1,2	3	500	12,23
76	100	100	6	1,2	3	550	3,868	652	250	250	25	1,2	3	550	12,88
77	100	100	14	1,5	3	350	4,081	653	250	250	20	1,5	3	350	14,37
78	100	100	12	1,5	3	450	4,882	654	250	250	25	1,5	3	450	17,26
79	100	100	14	1,5	3	500	5,396	655	250	250	15	1,5	3	500	17,93
80	100	100	12	1,5	3	550	5,685	656	250	250	45	1,5	3	550	20,13
81	100	100	6	1,9	4	350	4,94	657	250	250	45	1,9	4	350	23,04

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
82	100	100	12	1,9	4	450	6,575	658	250	250	35	1,9	4	450	26,76
83	100	100	10	1,9	4	500	7,005	659	250	250	40	1,9	4	500	28,99
84	100	100	6	1,9	4	550	7,087	660	250	250	20	1,9	4	550	29,28
85	100	100	14	2,4	4	350	7,229	661	250	250	20	2,4	4	350	31,79
86	100	100	12	2,4	4	450	8,669	662	250	250	20	2,4	4	450	38,33
87	100	100	12	2,4	4	500	9,467	663	250	250	35	2,4	4	500	43,2
88	100	100	18	2,4	4	550	10,88	664	250	250	35	2,4	4	550	46
89	100	100	14	3	5	350	9,165	665	250	250	15	3	5	350	43,5
90	100	100	18	3	5	450	11,84	666	250	250	40	3	5	450	57,72
91	100	100	12	3	5	500	12	667	250	250	10	3	5	500	56,37
92	100	100	18	3	5	550	13,8	668	250	250	30	3	5	550	65,01
93	100	100	14	3,2	5	350	9,817	669	250	250	15	3,2	5	350	47,76
94	100	100	10	3,2	5	450	11,4	670	250	250	25	3,2	5	450	60,85
95	100	100	16	3,2	5	500	13,54	671	250	250	45	3,2	5	500	70,04
96	100	100	10	3,2	5	550	13,3	672	250	250	30	3,2	5	550	71,67
97	100	150	4	0,8	3	350	2,259	673	250	375	35	0,8	3	350	7,162
98	100	150	12	0,8	3	450	2,801	674	250	375	35	0,8	3	450	8,313
99	100	150	10	0,8	3	500	2,977	675	250	375	35	0,8	3	500	8,76
100	100	150	10	0,8	3	550	3,149	676	250	375	40	0,8	3	550	9,355
101	100	150	18	1	3	350	3,548	677	250	375	20	1	3	350	10,5
102	100	150	10	1	3	450	4,081	678	250	375	15	1	3	450	12,1
103	100	150	14	1	3	500	4,489	679	250	375	35	1	3	500	13,36
104	100	150	10	1	3	550	4,675	680	250	375	30	1	3	550	13,99
105	100	150	14	1,2	3	350	4,685	681	250	375	20	1,2	3	350	14,83
106	100	150	18	1,2	3	450	5,746	682	250	375	15	1,2	3	450	17,03
107	100	150	10	1,2	3	500	5,939	683	250	375	10	1,2	3	500	18,07
108	100	150	14	1,2	3	550	6,448	684	250	375	20	1,2	3	550	19,27
109	100	150	6	1,5	3	350	6,319	685	250	375	10	1,5	3	350	21,83
110	100	150	18	1,5	3	450	8,214	686	250	375	10	1,5	3	450	25,55
111	100	150	10	1,5	3	500	8,511	687	250	375	20	1,5	3	500	27,45
112	100	150	10	1,5	3	550	9,073	688	250	375	45	1,5	3	550	30,29

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
113	100	150	10	1,9	4	350	9,212	689	250	375	25	1,9	4	350	34,17
114	100	150	14	1,9	4	450	11,53	690	250	375	40	1,9	4	450	41,44
115	100	150	10	1,9	4	500	12,11	691	250	375	30	1,9	4	500	43,47
116	100	150	8	1,9	4	550	12,76	692	250	375	10	1,9	4	550	43,98
117	100	150	10	2,4	4	350	12,68	693	250	375	15	2,4	4	350	49,49
118	100	150	10	2,4	4	450	15,41	694	250	375	25	2,4	4	450	60,84
119	100	150	18	2,4	4	500	17,9	695	250	375	45	2,4	4	500	67,76
120	100	150	14	2,4	4	550	18,69	696	250	375	35	2,4	4	550	70,31
121	100	150	12	3	5	350	16,85	697	250	375	10	3	5	350	69,42
122	100	150	16	3	5	450	21,18	698	250	375	30	3	5	450	88,45
123	100	150	14	3	5	500	23,01	699	250	375	25	3	5	500	94,15
124	100	150	12	3	5	550	24,16	700	250	375	10	3	5	550	96,49
125	100	150	12	3,2	5	350	18,15	701	250	375	15	3,2	5	350	77,96
126	100	150	10	3,2	5	450	21,97	702	250	375	45	3,2	5	450	101
127	100	150	10	3,2	5	500	23,96	703	250	375	20	3,2	5	500	102,7
128	100	150	10	3,2	5	550	25,62	704	250	375	15	3,2	5	550	108,8
129	100	200	14	0,8	3	350	3,291	705	250	500	40	0,8	3	350	9,551
130	100	200	8	0,8	3	450	3,812	706	250	500	40	0,8	3	450	11,07
131	100	200	12	0,8	3	500	4,146	707	250	500	35	0,8	3	500	11,76
132	100	200	14	0,8	3	550	4,387	708	250	500	30	0,8	3	550	12,28
133	100	200	10	1	3	350	4,761	709	250	500	25	1	3	350	14,44
134	100	200	14	1	3	450	5,787	710	250	500	35	1	3	450	16,95
135	100	200	14	1	3	500	6,212	711	250	500	45	1	3	500	18,16
136	100	200	12	1	3	550	6,52	712	250	500	20	1	3	550	18,58
137	100	200	14	1,2	3	350	6,563	713	250	500	20	1,2	3	350	20,21
138	100	200	10	1,2	3	450	7,716	714	250	500	40	1,2	3	450	23,53
139	100	200	8	1,2	3	500	8,222	715	250	500	20	1,2	3	500	25,02
140	100	200	6	1,2	3	550	8,643	716	250	500	30	1,2	3	550	26,6
141	100	200	6	1,5	3	350	9,014	717	250	500	45	1,5	3	350	31,47
142	100	200	18	1,5	3	450	11,55	718	250	500	10	1,5	3	450	35,05
143	100	200	10	1,5	3	500	11,93	719	250	500	10	1,5	3	500	37,07

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
144	100	200	8	1,5	3	550	12,61	720	250	500	30	1,5	3	550	40,58
145	100	200	8	1,9	4	350	13,05	721	250	500	25	1,9	4	350	47,03
146	100	200	10	1,9	4	450	15,9	722	250	500	10	1,9	4	450	54,07
147	100	200	10	1,9	4	500	17,22	723	250	500	35	1,9	4	500	60,05
148	100	200	6	1,9	4	550	17,97	724	250	500	20	1,9	4	550	62,01
149	100	200	12	2,4	4	350	18,78	725	250	500	25	2,4	4	350	70,83
150	100	200	18	2,4	4	450	23,7	726	250	500	40	2,4	4	450	85,48
151	100	200	16	2,4	4	500	25,37	727	250	500	35	2,4	4	500	91,84
152	100	200	12	2,4	4	550	26,57	728	250	500	35	2,4	4	550	97,38
153	100	200	12	3	5	350	25,37	729	250	500	25	3	5	350	101,9
154	100	200	14	3	5	450	31,4	730	250	500	30	3	5	450	123,6
155	100	200	16	3	5	500	34,6	731	250	500	10	3	5	500	127,7
156	100	200	16	3	5	550	36,77	732	250	500	45	3	5	550	144,6
157	100	200	18	3,2	5	350	28,51	733	250	500	20	3,2	5	350	112
158	100	200	16	3,2	5	450	34,62	734	250	500	10	3,2	5	450	131,7
159	100	200	10	3,2	5	500	36,45	735	250	500	30	3,2	5	500	148
160	100	200	12	3,2	5	550	39,33	736	250	500	20	3,2	5	550	154,1
161	100	250	16	0,8	3	350	4,235	737	250	625	25	0,8	3	350	11,82
162	100	250	4	0,8	3	450	4,727	738	250	625	40	0,8	3	450	13,98
163	100	250	8	0,8	3	500	5,138	739	250	625	20	0,8	3	500	14,48
164	100	250	12	0,8	3	550	5,496	740	250	625	25	0,8	3	550	15,36
165	100	250	12	1	3	350	6,186	741	250	625	20	1	3	350	17,86
166	100	250	10	1	3	450	7,264	742	250	625	40	1	3	450	21,3
167	100	250	16	1	3	500	7,932	743	250	625	20	1	3	500	22,16
168	100	250	12	1	3	550	8,255	744	250	625	30	1	3	550	23,54
169	100	250	16	1,2	3	350	8,608	745	250	625	45	1,2	3	350	25,95
170	100	250	14	1,2	3	450	10,09	746	250	625	10	1,2	3	450	29,13
171	100	250	18	1,2	3	500	10,84	747	250	625	20	1,2	3	500	31,17
172	100	250	16	1,2	3	550	11,63	748	250	625	15	1,2	3	550	32,75
173	100	250	14	1,5	3	350	12,32	749	250	625	15	1,5	3	350	38,43
174	100	250	8	1,5	3	450	14,51	750	250	625	10	1,5	3	450	43,72

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
175	100	250	12	1,5	3	500	15,85	751	250	625	45	1,5	3	500	48,96
176	100	250	8	1,5	3	550	16,4	752	250	625	15	1,5	3	550	49,85
177	100	250	8	1,9	4	350	17,2	753	250	625	10	1,9	4	350	58,72
178	100	250	6	1,9	4	450	20,63	754	250	625	40	1,9	4	450	69,66
179	100	250	14	1,9	4	500	22,93	755	250	625	15	1,9	4	500	73,77
180	100	250	18	1,9	4	550	24,88	756	250	625	15	1,9	4	550	77,7
181	100	250	10	2,4	4	350	24,49	757	250	625	15	2,4	4	350	89,51
182	100	250	16	2,4	4	450	30,52	758	250	625	30	2,4	4	450	108
183	100	250	16	2,4	4	500	32,83	759	250	625	25	2,4	4	500	114,5
184	100	250	10	2,4	4	550	34,28	760	250	625	10	2,4	4	550	118,6
185	100	250	10	3	5	350	33,26	761	250	625	10	3	5	350	129,1
186	100	250	16	3	5	450	41,91	762	250	625	45	3	5	450	162,7
187	100	250	14	3	5	500	45,03	763	250	625	15	3	5	500	165,7
188	100	250	16	3	5	550	48,29	764	250	625	35	3	5	550	181,5
189	100	250	18	3,2	5	350	37,87	765	250	625	40	3,2	5	350	151,5
190	100	250	14	3,2	5	450	45,35	766	250	625	25	3,2	5	450	173
191	100	250	12	3,2	5	500	48,55	767	250	625	40	3,2	5	500	193,9
192	100	250	10	3,2	5	550	50,87	768	250	625	10	3,2	5	550	196,8
193	150	30	9	0,8	3	350	0,303	769	300	60	18	0,8	3	350	0,971
194	150	30	6	0,8	3	450	0,323	770	300	60	24	0,8	3	450	1,205
195	150	30	15	0,8	3	500	0,48	771	300	60	24	0,8	3	500	1,292
196	150	30	15	0,8	3	550	0,512	772	300	60	18	0,8	3	550	1,316
197	150	30	21	1	3	350	0,544	773	300	60	30	1	3	350	1,5
198	150	30	18	1	3	450	0,633	774	300	60	12	1	3	450	1,36
199	150	30	15	1	3	500	0,644	775	300	60	12	1	3	500	1,363
200	150	30	21	1	3	550	0,768	776	300	60	30	1	3	550	2,031
201	150	30	6	1,2	3	350	0,401	777	300	60	30	1,2	3	350	1,985
202	150	30	21	1,2	3	450	0,842	778	300	60	12	1,2	3	450	1,915
203	150	30	12	1,2	3	500	0,716	779	300	60	24	1,2	3	500	2,483
204	150	30	15	1,2	3	550	0,844	780	300	60	30	1,2	3	550	2,731
205	150	30	9	1,5	3	350	0,584	781	300	60	12	1,5	3	350	2,058

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
206	150	30	12	1,5	3	450	0,828	782	300	60	12	1,5	3	450	2,505
207	150	30	12	1,5	3	500	0,901	783	300	60	18	1,5	3	500	3,098
208	150	30	9	1,5	3	550	0,824	784	300	60	36	1,5	3	550	3,981
209	150	30	12	1,9	4	350	0,83	785	300	60	30	1,9	4	350	3,702
210	150	30	21	1,9	4	450	1,368	786	300	60	36	1,9	4	450	4,815
211	150	30	12	1,9	4	500	1,097	787	300	60	36	1,9	4	500	5,237
212	150	30	9	1,9	4	550	0,997	788	300	60	24	1,9	4	550	4,812
213	150	30	9	2,4	4	350	0,899	789	300	60	36	2,4	4	350	5,239
214	150	30	15	2,4	4	450	1,42	790	300	60	36	2,4	4	450	6,427
215	150	30	21	2,4	4	500	1,885	791	300	60	36	2,4	4	500	7,01
216	150	30	18	2,4	4	550	1,813	792	300	60	18	2,4	4	550	5,503
217	150	30	21	3	5	350	1,724	793	300	60	12	3	5	350	4,015
218	150	30	12	3	5	450	1,507	794	300	60	30	3	5	450	7,447
219	150	30	21	3	5	500	2,281	795	300	60	36	3	5	500	8,876
220	150	30	15	3	5	550	1,936	796	300	60	24	3	5	550	7,715
221	150	30	18	3,2	5	350	1,655	797	300	60	12	3,2	5	350	4,278
222	150	30	12	3,2	5	450	1,595	798	300	60	30	3,2	5	450	7,963
223	150	30	18	3,2	5	500	2,179	799	300	60	30	3,2	5	500	8,682
224	150	30	18	3,2	5	550	2,284	800	300	60	12	3,2	5	550	6,005
225	150	75	18	0,8	3	350	1,219	801	300	150	30	0,8	3	350	2,286
226	150	75	15	0,8	3	450	1,405	802	300	150	30	0,8	3	450	2,322
227	150	75	18	0,8	3	500	1,544	803	300	150	48	0,8	3	500	3,178
228	150	75	15	0,8	3	550	1,596	804	300	150	48	0,8	3	550	3,38
229	150	75	9	1	3	350	1,557	805	300	150	36	1	3	350	4,272
230	150	75	9	1	3	450	1,886	806	300	150	30	1	3	450	4,899
231	150	75	21	1	3	500	2,3	807	300	150	24	1	3	500	5,102
232	150	75	6	1	3	550	2,066	808	300	150	42	1	3	550	4,64
233	150	75	27	1,2	3	350	2,476	809	300	150	12	1,2	3	350	5,379
234	150	75	21	1,2	3	450	2,85	810	300	150	54	1,2	3	450	7,043
235	150	75	24	1,2	3	500	3,158	811	300	150	30	1,2	3	500	7,314
236	150	75	24	1,2	3	550	3,358	812	300	150	18	1,2	3	550	7,38

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
237	150	75	27	1,5	3	350	3,378	813	300	150	48	1,5	3	350	9,162
238	150	75	21	1,5	3	450	3,899	814	300	150	30	1,5	3	450	10,26
239	150	75	21	1,5	3	500	4,242	815	300	150	24	1,5	3	500	10,67
240	150	75	9	1,5	3	550	3,815	816	300	150	54	1,5	3	550	12,14
241	150	75	21	1,9	4	350	4,191	817	300	150	12	1,9	4	350	11,21
242	150	75	27	1,9	4	450	5,518	818	300	150	48	1,9	4	450	16,25
243	150	75	12	1,9	4	500	4,946	819	300	150	54	1,9	4	500	17,71
244	150	75	15	1,9	4	550	5,52	820	300	150	24	1,9	4	550	16,88
245	150	75	18	2,4	4	350	5,287	821	300	150	48	2,4	4	350	19,53
246	150	75	9	2,4	4	450	5,559	822	300	150	18	2,4	4	450	19,89
247	150	75	27	2,4	4	500	7,987	823	300	150	42	2,4	4	500	25,02
248	150	75	21	2,4	4	550	7,916	824	300	150	24	2,4	4	550	24,12
249	150	75	21	3	5	350	7,004	825	300	150	30	3	5	350	23,67
250	150	75	21	3	5	450	8,602	826	300	150	30	3	5	450	29,02
251	150	75	27	3	5	500	10,18	827	300	150	18	3	5	500	28,76
252	150	75	21	3	5	550	10,05	828	300	150	48	3	5	550	37,74
253	150	75	24	3,2	5	350	7,821	829	300	150	24	3,2	5	350	24,45
254	150	75	21	3,2	5	450	9,226	830	300	150	54	3,2	5	450	36,3
255	150	75	27	3,2	5	500	10,94	831	300	150	36	3,2	5	500	35,8
256	150	75	18	3,2	5	550	10,26	832	300	150	12	3,2	5	550	31,42
257	150	150	18	0,8	3	350	2,574	833	300	300	30	0,8	3	350	5,764
258	150	150	15	0,8	3	450	2,945	834	300	300	42	0,8	3	450	6,817
259	150	150	27	0,8	3	500	3,26	835	300	300	18	0,8	3	500	6,827
260	150	150	6	0,8	3	550	3,147	836	300	300	24	0,8	3	550	7,325
261	150	150	24	1	3	350	3,897	837	300	300	30	1	3	350	8,639
262	150	150	9	1	3	450	4,301	838	300	300	30	1	3	450	10,06
263	150	150	15	1	3	500	4,744	839	300	300	54	1	3	500	10,88
264	150	150	9	1	3	550	4,863	840	300	300	18	1	3	550	10,86
265	150	150	24	1,2	3	350	5,328	841	300	300	42	1,2	3	350	12,44
266	150	150	6	1,2	3	450	5,845	842	300	300	54	1,2	3	450	14,64
267	150	150	21	1,2	3	500	6,747	843	300	300	48	1,2	3	500	15,5

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
268	150	150	9	1,2	3	550	6,76	844	300	300	48	1,2	3	550	16,32
269	150	150	27	1,5	3	350	7,826	845	300	300	48	1,5	3	350	18,84
270	150	150	27	1,5	3	450	9,416	846	300	300	12	1,5	3	450	20,39
271	150	150	6	1,5	3	500	9,164	847	300	300	54	1,5	3	500	23,53
272	150	150	9	1,5	3	550	9,964	848	300	300	24	1,5	3	550	23,81
273	150	150	15	1,9	4	350	10,5	849	300	300	36	1,9	4	350	28,15
274	150	150	15	1,9	4	450	12,81	850	300	300	24	1,9	4	450	32,11
275	150	150	27	1,9	4	500	14,7	851	300	300	30	1,9	4	500	34,78
276	150	150	21	1,9	4	550	15,3	852	300	300	12	1,9	4	550	35,45
277	150	150	21	2,4	4	350	15,07	853	300	300	24	2,4	4	350	40,93
278	150	150	18	2,4	4	450	18,07	854	300	300	24	2,4	4	450	48,94
279	150	150	21	2,4	4	500	20,14	855	300	300	48	2,4	4	500	55,23
280	150	150	18	2,4	4	550	21,11	856	300	300	48	2,4	4	550	58,33
281	150	150	24	3	5	350	20,3	857	300	300	42	3	5	350	61,33
282	150	150	18	3	5	450	23,84	858	300	300	42	3	5	450	73,99
283	150	150	12	3	5	500	24,75	859	300	300	18	3	5	500	75,05
284	150	150	12	3	5	550	26,4	860	300	300	54	3	5	550	86,91
285	150	150	15	3,2	5	350	20,39	861	300	300	30	3,2	5	350	65,91
286	150	150	24	3,2	5	450	26,8	862	300	300	24	3,2	5	450	78,46
287	150	150	27	3,2	5	500	30,14	863	300	300	54	3,2	5	500	90,68
288	150	150	27	3,2	5	550	32,19	864	300	300	30	3,2	5	550	90,8
289	150	225	15	0,8	3	350	3,904	865	300	450	24	0,8	3	350	8,642
290	150	225	15	0,8	3	450	4,523	866	300	450	48	0,8	3	450	10,06
291	150	225	15	0,8	3	500	4,833	867	300	450	30	0,8	3	500	10,52
292	150	225	27	0,8	3	550	5,256	868	300	450	12	0,8	3	550	10,81
293	150	225	18	1	3	350	5,888	869	300	450	42	1	3	350	13,32
294	150	225	27	1	3	450	7,084	870	300	450	30	1	3	450	15,32
295	150	225	24	1	3	500	7,52	871	300	450	36	1	3	500	16,35
296	150	225	21	1	3	550	7,838	872	300	450	12	1	3	550	16,11
297	150	225	9	1,2	3	350	7,824	873	300	450	12	1,2	3	350	17,93
298	150	225	6	1,2	3	450	9,096	874	300	450	54	1,2	3	450	21,84

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
299	150	225	6	1,2	3	500	9,774	875	300	450	42	1,2	3	500	23,18
300	150	225	9	1,2	3	550	10,56	876	300	450	36	1,2	3	550	24,25
301	150	225	24	1,5	3	350	12,04	877	300	450	36	1,5	3	350	28,17
302	150	225	27	1,5	3	450	14,47	878	300	450	54	1,5	3	450	33,65
303	150	225	21	1,5	3	500	15,28	879	300	450	48	1,5	3	500	35,6
304	150	225	18	1,5	3	550	16,17	880	300	450	42	1,5	3	550	37,17
305	150	225	12	1,9	4	350	16,71	881	300	450	36	1,9	4	350	43,33
306	150	225	9	1,9	4	450	19,81	882	300	450	36	1,9	4	450	50,52
307	150	225	27	1,9	4	500	22,95	883	300	450	54	1,9	4	500	55,34
308	150	225	27	1,9	4	550	24,36	884	300	450	18	1,9	4	550	55,51
309	150	225	18	2,4	4	350	24,42	885	300	450	42	2,4	4	350	65,55
310	150	225	24	2,4	4	450	30,49	886	300	450	12	2,4	4	450	73,52
311	150	225	21	2,4	4	500	32,72	887	300	450	24	2,4	4	500	81,46
312	150	225	27	2,4	4	550	35,6	888	300	450	42	2,4	4	550	88,55
313	150	225	21	3	5	350	34,6	889	300	450	36	3	5	350	94,59
314	150	225	21	3	5	450	42,28	890	300	450	42	3	5	450	114,8
315	150	225	18	3	5	500	45,23	891	300	450	54	3	5	500	125,5
316	150	225	21	3	5	550	48,93	892	300	450	12	3	5	550	123,9
317	150	225	24	3,2	5	350	38,44	893	300	450	24	3,2	5	350	102,6
318	150	225	27	3,2	5	450	47,59	894	300	450	48	3,2	5	450	129,1
319	150	225	9	3,2	5	500	47,29	895	300	450	48	3,2	5	500	139,1
320	150	225	9	3,2	5	550	50,79	896	300	450	24	3,2	5	550	141,7
321	150	300	24	0,8	3	350	5,362	897	300	600	54	0,8	3	350	11,82
322	150	300	9	0,8	3	450	6,087	898	300	600	30	0,8	3	450	13,56
323	150	300	18	0,8	3	500	6,631	899	300	600	42	0,8	3	500	14,54
324	150	300	24	0,8	3	550	7	900	300	600	12	0,8	3	550	14,8
325	150	300	9	1	3	350	7,718	901	300	600	18	1	3	350	17,47
326	150	300	24	1	3	450	9,471	902	300	600	48	1	3	450	20,44
327	150	300	21	1	3	500	10,09	903	300	600	36	1	3	500	22,05
328	150	300	27	1	3	550	10,68	904	300	600	54	1	3	550	23
329	150	300	18	1,2	3	350	11,18	905	300	600	18	1,2	3	350	24,63

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
330	150	300	21	1,2	3	450	13,31	906	300	600	48	1,2	3	450	29,5
331	150	300	18	1,2	3	500	14,12	907	300	600	36	1,2	3	500	31,03
332	150	300	6	1,2	3	550	14,39	908	300	600	18	1,2	3	550	31,94
333	150	300	9	1,5	3	350	15,99	909	300	600	42	1,5	3	350	38,44
334	150	300	6	1,5	3	450	18,85	910	300	600	48	1,5	3	450	44,08
335	150	300	24	1,5	3	500	21,31	911	300	600	12	1,5	3	500	45,62
336	150	300	27	1,5	3	550	22,68	912	300	600	24	1,5	3	550	49,27
337	150	300	6	1,9	4	350	23,02	913	300	600	42	1,9	4	350	59,69
338	150	300	9	1,9	4	450	28	914	300	600	18	1,9	4	450	67,44
339	150	300	6	1,9	4	500	29,84	915	300	600	54	1,9	4	500	74,18
340	150	300	24	1,9	4	550	33,82	916	300	600	54	1,9	4	550	78
341	150	300	18	2,4	4	350	34,85	917	300	600	48	2,4	4	350	91,48
342	150	300	27	2,4	4	450	42,78	918	300	600	36	2,4	4	450	106,6
343	150	300	24	2,4	4	500	46,24	919	300	600	42	2,4	4	500	114,2
344	150	300	24	2,4	4	550	49,15	920	300	600	30	2,4	4	550	118,7
345	150	300	21	3	5	350	49,09	921	300	600	54	3	5	350	134,4
346	150	300	9	3	5	450	57,37	922	300	600	48	3	5	450	159,8
347	150	300	27	3	5	500	65,42	923	300	600	54	3	5	500	172,4
348	150	300	15	3	5	550	67,72	924	300	600	36	3	5	550	179,2
349	150	300	12	3,2	5	350	52,62	925	300	600	36	3,2	5	350	146,7
350	150	300	15	3,2	5	450	64,8	926	300	600	54	3,2	5	450	178,7
351	150	300	9	3,2	5	500	68,2	927	300	600	48	3,2	5	500	189,3
352	150	300	18	3,2	5	550	75,24	928	300	600	36	3,2	5	550	200,6
353	150	375	21	0,8	3	350	6,747	929	300	750	48	0,8	3	350	14,87
354	150	375	21	0,8	3	450	7,81	930	300	750	12	0,8	3	450	16,53
355	150	375	12	0,8	3	500	8,199	931	300	750	48	0,8	3	500	18,14
356	150	375	21	0,8	3	550	8,769	932	300	750	24	0,8	3	550	18,16
357	150	375	27	1	3	350	10,25	933	300	750	54	1	3	350	22,69
358	150	375	18	1	3	450	11,85	934	300	750	54	1	3	450	26,23
359	150	375	24	1	3	500	12,73	935	300	750	42	1	3	500	27,64
360	150	375	15	1	3	550	13,11	936	300	750	54	1	3	550	29,36

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
361	150	375	15	1,2	3	350	14,04	937	300	750	54	1,2	3	350	31,55
362	150	375	21	1,2	3	450	16,71	938	300	750	12	1,2	3	450	35,66
363	150	375	9	1,2	3	500	17,41	939	300	750	42	1,2	3	500	38,99
364	150	375	12	1,2	3	550	18,26	940	300	750	54	1,2	3	550	41,41
365	150	375	9	1,5	3	350	20,56	941	300	750	42	1,5	3	350	48,08
366	150	375	15	1,5	3	450	24,74	942	300	750	42	1,5	3	450	55,99
367	150	375	15	1,5	3	500	26,51	943	300	750	42	1,5	3	500	59,43
368	150	375	27	1,5	3	550	28,58	944	300	750	24	1,5	3	550	61,37
369	150	375	15	1,9	4	350	31,24	945	300	750	54	1,9	4	350	75,42
370	150	375	6	1,9	4	450	36,25	946	300	750	18	1,9	4	450	84,75
371	150	375	12	1,9	4	500	39,78	947	300	750	18	1,9	4	500	90,09
372	150	375	9	1,9	4	550	41,75	948	300	750	48	1,9	4	550	98,15
373	150	375	24	2,4	4	350	46,44	949	300	750	12	2,4	4	350	111,6
374	150	375	27	2,4	4	450	56,41	950	300	750	30	2,4	4	450	132,9
375	150	375	24	2,4	4	500	60,45	951	300	750	24	2,4	4	500	140,4
376	150	375	18	2,4	4	550	63,24	952	300	750	48	2,4	4	550	151,8
377	150	375	15	3	5	350	63,48	953	300	750	30	3	5	350	168,8
378	150	375	24	3	5	450	78,78	954	300	750	36	3	5	450	199,9
379	150	375	15	3	5	500	83,19	955	300	750	24	3	5	500	211,9
380	150	375	21	3	5	550	90,07	956	300	750	42	3	5	550	227,3
381	150	375	21	3,2	5	350	69,88	957	300	750	30	3,2	5	350	188,5
382	150	375	15	3,2	5	450	84,39	958	300	750	12	3,2	5	450	219,1
383	150	375	24	3,2	5	500	93,87	959	300	750	24	3,2	5	500	237,6
384	150	375	12	3,2	5	550	96,51	960	300	750	36	3,2	5	550	254,4
385	200	40	20	0,8	3	350	0,577	961	400	80	48	0,8	3	350	1,544
386	200	40	8	0,8	3	450	0,553	962	400	80	40	0,8	3	450	1,783
387	200	40	8	0,8	3	500	0,601	963	400	80	32	0,8	3	500	1,689
388	200	40	8	0,8	3	550	0,638	964	400	80	48	0,8	3	550	1,255
389	200	40	16	1	3	350	0,749	965	400	80	48	1	3	350	2,296
390	200	40	16	1	3	450	0,913	966	400	80	24	1	3	450	2,503
391	200	40	8	1	3	500	0,788	967	400	80	32	1	3	500	2,742

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
392	200	40	8	1	3	550	0,838	968	400	80	48	1	3	550	3,005
393	200	40	12	1,2	3	350	0,841	969	400	80	48	1,2	3	350	3,123
394	200	40	8	1,2	3	450	0,896	970	400	80	24	1,2	3	450	3,359
395	200	40	24	1,2	3	500	1,429	971	400	80	24	1,2	3	500	3,62
396	200	40	8	1,2	3	550	1,034	972	400	80	40	1,2	3	550	4,091
397	200	40	12	1,5	3	350	1,08	973	400	80	24	1,5	3	350	3,823
398	200	40	8	1,5	3	450	1,126	974	400	80	40	1,5	3	450	5,18
399	200	40	8	1,5	3	500	1,226	975	400	80	32	1,5	3	500	5,392
400	200	40	12	1,5	3	550	1,514	976	400	80	32	1,5	3	550	5,686
401	200	40	12	1,9	4	350	1,33	977	400	80	40	1,9	4	350	6,048
402	200	40	8	1,9	4	450	1,359	978	400	80	40	1,9	4	450	7,349
403	200	40	12	1,9	4	500	1,771	979	400	80	48	1,9	4	500	8,196
404	200	40	12	1,9	4	550	1,879	980	400	80	48	1,9	4	550	8,702
405	200	40	8	2,4	4	350	1,403	981	400	80	32	2,4	4	350	7,638
406	200	40	16	2,4	4	450	2,328	982	400	80	24	2,4	4	450	8,369
407	200	40	12	2,4	4	500	2,182	983	400	80	48	2,4	4	500	11,62
408	200	40	20	2,4	4	550	3,022	984	400	80	16	2,4	4	550	8,478
409	200	40	12	3	5	350	2,018	985	400	80	16	3	5	350	7,481
410	200	40	16	3	5	450	2,804	986	400	80	24	3	5	450	10,61
411	200	40	20	3	5	500	3,474	987	400	80	48	3	5	500	15,42
412	200	40	24	3	5	550	4,072	988	400	80	32	3	5	550	13,81
413	200	40	16	3,2	5	350	2,47	989	400	80	48	3,2	5	350	12,45
414	200	40	16	3,2	5	450	2,985	990	400	80	32	3,2	5	450	12,79
415	200	40	20	3,2	5	500	3,686	991	400	80	24	3,2	5	500	12,37
416	200	40	12	3,2	5	550	2,963	992	400	80	40	3,2	5	550	16,38
417	200	100	20	0,8	3	350	1,7	993	400	200	56	0,8	3	350	2,735
418	200	100	8	0,8	3	450	1,861	994	400	200	40	0,8	3	450	2,326
419	200	100	32	0,8	3	500	2,226	995	400	200	40	0,8	3	500	2,326
420	200	100	32	0,8	3	550	2,326	996	400	200	24	0,8	3	550	2,111
421	200	100	36	1	3	350	2,747	997	400	200	56	1	3	350	4,768
422	200	100	8	1	3	450	2,727	998	400	200	64	1	3	450	5,413

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
423	200	100	28	1	3	500	3,334	999	400	200	24	1	3	500	6,965
424	200	100	20	1	3	550	3,386	1000	400	200	56	1	3	550	4,817
425	200	100	24	1,2	3	350	3,514	1001	400	200	32	1,2	3	350	8,142
426	200	100	12	1,2	3	450	3,844	1002	400	200	48	1,2	3	450	7,561
427	200	100	36	1,2	3	500	4,767	1003	400	200	32	1,2	3	500	9,3
428	200	100	20	1,2	3	550	4,68	1004	400	200	40	1,2	3	550	7,299
429	200	100	12	1,5	3	350	4,402	1005	400	200	32	1,5	3	350	12,12
430	200	100	36	1,5	3	450	6,37	1006	400	200	72	1,5	3	450	14,33
431	200	100	8	1,5	3	500	5,545	1007	400	200	40	1,5	3	500	15,5
432	200	100	16	1,5	3	550	6,464	1008	400	200	72	1,5	3	550	15,24
433	200	100	8	1,9	4	350	5,623	1009	400	200	32	1,9	4	350	18,32
434	200	100	28	1,9	4	450	8,641	1010	400	200	72	1,9	4	450	23,39
435	200	100	32	1,9	4	500	9,637	1011	400	200	64	1,9	4	500	24,49
436	200	100	20	1,9	4	550	9,315	1012	400	200	56	1,9	4	550	25,8
437	200	100	20	2,4	4	350	8,705	1013	400	200	40	2,4	4	350	27,69
438	200	100	28	2,4	4	450	11,62	1014	400	200	48	2,4	4	450	34,06
439	200	100	20	2,4	4	500	11,68	1015	400	200	48	2,4	4	500	36,6
440	200	100	36	2,4	4	550	14,52	1016	400	200	64	2,4	4	550	40,17
441	200	100	32	3	5	350	12,59	1017	400	200	32	3	5	350	37,11
442	200	100	32	3	5	450	15,51	1018	400	200	16	3	5	450	41,08
443	200	100	32	3	5	500	16,93	1019	400	200	48	3	5	500	52,24
444	200	100	12	3	5	550	14,33	1020	400	200	72	3	5	550	59,34
445	200	100	28	3,2	5	350	13,09	1021	400	200	24	3,2	5	350	38,7
446	200	100	36	3,2	5	450	17,35	1022	400	200	24	3,2	5	450	47,23
447	200	100	36	3,2	5	500	18,99	1023	400	200	48	3,2	5	500	57,78
448	200	100	24	3,2	5	550	17,97	1024	400	200	72	3,2	5	550	65,96
449	200	200	28	0,8	3	350	3,651	1025	400	400	48	0,8	3	350	8,064
450	200	200	28	0,8	3	450	4,228	1026	400	400	72	0,8	3	450	9,496
451	200	200	24	0,8	3	500	4,422	1027	400	400	16	0,8	3	500	9,134
452	200	200	24	0,8	3	550	4,601	1028	400	400	56	0,8	3	550	10,7
453	200	200	32	1	3	350	5,49	1029	400	400	40	1	3	350	12,16

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
454	200	200	28	1	3	450	6,241	1030	400	400	56	1	3	450	14,25
455	200	200	16	1	3	500	6,591	1031	400	400	24	1	3	500	14,74
456	200	200	36	1	3	550	7,338	1032	400	400	64	1	3	550	16,2
457	200	200	8	1,2	3	350	7,085	1033	400	400	64	1,2	3	350	17,47
458	200	200	12	1,2	3	450	8,451	1034	400	400	32	1,2	3	450	19,66
459	200	200	32	1,2	3	500	9,675	1035	400	400	16	1,2	3	500	20,43
460	200	200	36	1,2	3	550	10,23	1036	400	400	72	1,2	3	550	22,53
461	200	200	36	1,5	3	350	11,55	1037	400	400	24	1,5	3	350	25,12
462	200	200	20	1,5	3	450	13,08	1038	400	400	48	1,5	3	450	30,35
463	200	200	8	1,5	3	500	13,37	1039	400	400	56	1,5	3	500	32,3
464	200	200	28	1,5	3	550	15,18	1040	400	400	48	1,5	3	550	33,94
465	200	200	32	1,9	4	350	16,86	1041	400	400	40	1,9	4	350	39,25
466	200	200	8	1,9	4	450	18,48	1042	400	400	16	1,9	4	450	44,41
467	200	200	16	1,9	4	500	20,72	1043	400	400	24	1,9	4	500	48,03
468	200	200	36	1,9	4	550	23,42	1044	400	400	32	1,9	4	550	51,22
469	200	200	24	2,4	4	350	23,67	1045	400	400	64	2,4	4	350	62,09
470	200	200	8	2,4	4	450	26,58	1046	400	400	40	2,4	4	450	70,93
471	200	200	32	2,4	4	500	32,02	1047	400	400	72	2,4	4	500	78,19
472	200	200	28	2,4	4	550	33,72	1048	400	400	72	2,4	4	550	82,75
473	200	200	36	3	5	350	34,01	1049	400	400	72	3	5	350	92,66
474	200	200	32	3	5	450	40,71	1050	400	400	48	3	5	450	106,4
475	200	200	20	3	5	500	41,99	1051	400	400	24	3	5	500	109,3
476	200	200	12	3	5	550	42,84	1052	400	400	56	3	5	550	122,3
477	200	200	36	3,2	5	350	37,21	1053	400	400	48	3,2	5	350	100
478	200	200	20	3,2	5	450	42,12	1054	400	400	40	3,2	5	450	117,8
479	200	200	36	3,2	5	500	49,61	1055	400	400	64	3,2	5	500	131,1
480	200	200	24	3,2	5	550	50,17	1056	400	400	40	3,2	5	550	133,7
481	200	300	32	0,8	3	350	5,528	1057	400	600	32	0,8	3	350	12,04
482	200	300	20	0,8	3	450	6,303	1058	400	600	32	0,8	3	450	14,05
483	200	300	24	0,8	3	500	6,8	1059	400	600	48	0,8	3	500	15,15
484	200	300	8	0,8	3	550	6,881	1060	400	600	16	0,8	3	550	15,35

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
485	200	300	8	1	3	350	7,999	1061	400	600	24	1	3	350	17,81
486	200	300	20	1	3	450	9,627	1062	400	600	40	1	3	450	20,86
487	200	300	8	1	3	500	9,767	1063	400	600	40	1	3	500	22,61
488	200	300	32	1	3	550	11,02	1064	400	600	16	1	3	550	22,83
489	200	300	8	1,2	3	350	11,1	1065	400	600	40	1,2	3	350	25,52
490	200	300	8	1,2	3	450	12,9	1066	400	600	56	1,2	3	450	30,3
491	200	300	36	1,2	3	500	14,63	1067	400	600	56	1,2	3	500	32,09
492	200	300	12	1,2	3	550	14,55	1068	400	600	40	1,2	3	550	33,19
493	200	300	16	1,5	3	350	16,93	1069	400	600	72	1,5	3	350	40,13
494	200	300	16	1,5	3	450	19,99	1070	400	600	24	1,5	3	450	44,37
495	200	300	28	1,5	3	500	21,9	1071	400	600	16	1,5	3	500	46,92
496	200	300	28	1,5	3	550	23,29	1072	400	600	40	1,5	3	550	50,62
497	200	300	36	1,9	4	350	26,35	1073	400	600	24	1,9	4	350	59,17
498	200	300	8	1,9	4	450	29,03	1074	400	600	16	1,9	4	450	68,33
499	200	300	36	1,9	4	500	33,92	1075	400	600	32	1,9	4	500	74,46
500	200	300	28	1,9	4	550	35,24	1076	400	600	48	1,9	4	550	79,12
501	200	300	36	2,4	4	350	38,7	1077	400	600	32	2,4	4	350	91,45
502	200	300	36	2,4	4	450	46,62	1078	400	600	40	2,4	4	450	108,6
503	200	300	28	2,4	4	500	49,3	1079	400	600	40	2,4	4	500	114,1
504	200	300	8	2,4	4	550	49,4	1080	400	600	32	2,4	4	550	119
505	200	300	36	3	5	350	54,73	1081	400	600	40	3	5	350	137,4
506	200	300	20	3	5	450	63,26	1082	400	600	24	3	5	450	158,5
507	200	300	12	3	5	500	66,64	1083	400	600	72	3	5	500	178,1
508	200	300	12	3	5	550	71,18	1084	400	600	16	3	5	550	177,4
509	200	300	28	3,2	5	350	58,9	1085	400	600	40	3,2	5	350	153,6
510	200	300	24	3,2	5	450	70,8	1086	400	600	48	3,2	5	450	184,2
511	200	300	28	3,2	5	500	77,71	1087	400	600	40	3,2	5	500	195,4
512	200	300	20	3,2	5	550	80,99	1088	400	600	72	3,2	5	550	212,8
513	200	400	16	0,8	3	350	7,317	1089	400	800	24	0,8	3	350	16,01
514	200	400	20	0,8	3	450	8,576	1090	400	800	16	0,8	3	450	18,45
515	200	400	16	0,8	3	500	9,043	1091	400	800	24	0,8	3	500	19,78

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
516	200	400	32	0,8	3	550	9,711	1092	400	800	32	0,8	3	550	21,06
517	200	400	24	1	3	350	11,28	1093	400	800	56	1	3	350	24,84
518	200	400	32	1	3	450	12,77	1094	400	800	48	1	3	450	28,71
519	200	400	28	1	3	500	13,98	1095	400	800	72	1	3	500	30,59
520	200	400	32	1	3	550	14,76	1096	400	800	32	1	3	550	31,69
521	200	400	32	1,2	3	350	15,96	1097	400	800	40	1,2	3	350	34,7
522	200	400	36	1,2	3	450	18,59	1098	400	800	16	1,2	3	450	39,31
523	200	400	20	1,2	3	500	19,4	1099	400	800	48	1,2	3	500	42,93
524	200	400	36	1,2	3	550	20,57	1100	400	800	72	1,2	3	550	45,64
525	200	400	20	1,5	3	350	23,62	1101	400	800	24	1,5	3	350	52,01
526	200	400	8	1,5	3	450	26,99	1102	400	800	40	1,5	3	450	61,22
527	200	400	12	1,5	3	500	29,09	1103	400	800	48	1,5	3	500	65,36
528	200	400	36	1,5	3	550	31,83	1104	400	800	24	1,5	3	550	67,41
529	200	400	36	1,9	4	350	36,64	1105	400	800	32	1,9	4	350	80,68
530	200	400	24	1,9	4	450	42,34	1106	400	800	16	1,9	4	450	92,68
531	200	400	16	1,9	4	500	44,61	1107	400	800	40	1,9	4	500	101,1
532	200	400	8	1,9	4	550	46,5	1108	400	800	56	1,9	4	550	108,1
533	200	400	32	2,4	4	350	53,79	1109	400	800	32	2,4	4	350	125,4
534	200	400	16	2,4	4	450	62,04	1110	400	800	24	2,4	4	450	145,5
535	200	400	36	2,4	4	500	69,79	1111	400	800	40	2,4	4	500	157
536	200	400	24	2,4	4	550	72,23	1112	400	800	64	2,4	4	550	167,4
537	200	400	32	3	5	350	76,1	1113	400	800	40	3	5	350	189,7
538	200	400	16	3	5	450	88,4	1114	400	800	16	3	5	450	216,8
539	200	400	20	3	5	500	96,28	1115	400	800	48	3	5	500	239,9
540	200	400	28	3	5	550	104,5	1116	400	800	72	3	5	550	255,3
541	200	400	12	3,2	5	350	80,16	1117	400	800	32	3,2	5	350	210,7
542	200	400	20	3,2	5	450	98,79	1118	400	800	56	3,2	5	450	255
543	200	400	20	3,2	5	500	106,8	1119	400	800	64	3,2	5	500	272,2
544	200	400	16	3,2	5	550	112,6	1120	400	800	48	3,2	5	550	284,4
545	200	500	12	0,8	3	350	9,154	1121	400	1000	72	0,8	3	350	18,85
546	200	500	20	0,8	3	450	10,73	1122	400	1000	40	0,8	3	450	18,82

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
547	200	500	28	0,8	3	500	11,09	1123	400	1000	16	0,8	3	500	23,97
548	200	500	20	0,8	3	550	11,98	1124	400	1000	32	0,8	3	550	18,74
549	200	500	12	1	3	350	13,92	1125	400	1000	72	1	3	350	31,39
550	200	500	36	1	3	450	16,65	1126	400	1000	16	1	3	450	35,1
551	200	500	8	1	3	500	17,07	1127	400	1000	16	1	3	500	36,95
552	200	500	24	1	3	550	17,4	1128	400	1000	48	1	3	550	35,96
553	200	500	20	1,2	3	350	19,75	1129	400	1000	40	1,2	3	350	43,39
554	200	500	36	1,2	3	450	23,55	1130	400	1000	72	1,2	3	450	50,92
555	200	500	36	1,2	3	500	24,98	1131	400	1000	64	1,2	3	500	54,25
556	200	500	8	1,2	3	550	25,25	1132	400	1000	40	1,2	3	550	56,24
557	200	500	12	1,5	3	350	29,37	1133	400	1000	72	1,5	3	350	67,13
558	200	500	36	1,5	3	450	35,36	1134	400	1000	40	1,5	3	450	76,41
559	200	500	8	1,5	3	500	36,61	1135	400	1000	72	1,5	3	500	82,74
560	200	500	28	1,5	3	550	39,54	1136	400	1000	64	1,5	3	550	86,48
561	200	500	36	1,9	4	350	46,59	1137	400	1000	40	1,9	4	350	102,7
562	200	500	24	1,9	4	450	53,84	1138	400	1000	64	1,9	4	450	120,9
563	200	500	8	1,9	4	500	56,01	1139	400	1000	16	1,9	4	500	124,9
564	200	500	20	1,9	4	550	60,49	1140	400	1000	64	1,9	4	550	134,8
565	200	500	28	2,4	4	350	69,09	1141	400	1000	24	2,4	4	350	157,9
566	200	500	8	2,4	4	450	78,65	1142	400	1000	56	2,4	4	450	187,6
567	200	500	24	2,4	4	500	87,29	1143	400	1000	40	2,4	4	500	197,3
568	200	500	8	2,4	4	550	89,06	1144	400	1000	48	2,4	4	550	207,4
569	200	500	32	3	5	350	99,72	1145	400	1000	24	3	5	350	236,1
570	200	500	36	3	5	450	120,8	1146	400	1000	48	3	5	450	281
571	200	500	24	3	5	500	127,5	1147	400	1000	56	3	5	500	301,6
572	200	500	36	3	5	550	136	1148	400	1000	32	3	5	550	311,8
573	200	500	36	3,2	5	350	111,2	1149	400	1000	24	3,2	5	350	267
574	200	500	28	3,2	5	450	132,1	1150	400	1000	56	3,2	5	450	319,3
575	200	500	32	3,2	5	500	143,5	1151	400	1000	24	3,2	5	500	333,8
576	200	500	32	3,2	5	550	152,4	1152	400	1000	64	3,2	5	550	357,5

Bảng C.3 Kết quả mô phỏng độ bền của cầu kiện sử dụng thép cán nóng

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
1	100	20	10	1,6	3	250	0,237	145	250	50	35	1,6	3	250	1,899
2	100	20	12	1,6	3	345	0,354	146	250	50	35	1,6	3	345	2,51
3	100	20	8	2	4	250	0,244	147	250	50	35	2	4	250	2,39
4	100	20	14	2	4	345	0,464	148	250	50	35	2	4	345	3,193
5	100	20	14	2,6	4	250	0,424	149	250	50	30	2,6	4	250	2,859
6	100	20	10	2,6	4	345	0,47	150	250	50	10	2,6	4	345	2,331
7	100	20	10	3,2	5	250	0,39	151	250	50	15	3,2	5	250	2,428
8	100	20	14	3,2	5	345	0,654	152	250	50	35	3,2	5	345	5,078
9	100	50	10	1,6	3	250	1,072	153	250	125	25	1,6	3	250	5,945
10	100	50	16	1,6	3	345	1,651	154	250	125	15	1,6	3	345	7,103
11	100	50	14	2	4	250	1,465	155	250	125	10	2	4	250	6,755
12	100	50	12	2	4	345	1,887	156	250	125	35	2	4	345	11,23
13	100	50	16	2,6	4	250	1,974	157	250	125	20	2,6	4	250	10,19
14	100	50	18	2,6	4	345	2,801	158	250	125	45	2,6	4	345	16,63
15	100	50	14	3,2	5	250	2,227	159	250	125	40	3,2	5	250	15,28
16	100	50	12	3,2	5	345	2,877	160	250	125	25	3,2	5	345	17,93
17	100	100	6	1,6	3	250	2,991	161	250	250	20	1,6	3	250	14,64
18	100	100	8	1,6	3	345	4,114	162	250	250	10	1,6	3	345	17,33
19	100	100	18	2	4	250	4,453	163	250	250	40	2	4	250	21,99
20	100	100	20	2	4	345	6,11	164	250	250	35	2	4	345	27,22
21	100	100	16	2,6	4	250	5,736	165	250	250	20	2,6	4	250	29,32
22	100	100	16	2,6	4	345	7,765	166	250	250	25	2,6	4	345	39,01
23	100	100	10	3,2	5	250	6,432	167	250	250	15	3,2	5	250	36,62
24	100	100	12	3,2	5	345	9,017	168	250	250	15	3,2	5	345	48,48
25	100	150	18	1,6	3	250	6,143	169	250	375	10	1,6	3	250	22,16
26	100	150	12	1,6	3	345	7,719	170	250	375	15	1,6	3	345	27,12
27	100	150	14	2	4	250	7,894	171	250	375	30	2	4	250	33,57
28	100	150	14	2	4	345	10,44	172	250	375	25	2	4	345	40,93
29	100	150	8	2,6	4	250	10,01	173	250	375	40	2,6	4	250	52,24
30	100	150	8	2,6	4	345	13,48	174	250	375	20	2,6	4	345	62,37

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
31	100	150	10	3,2	5	250	12,56	175	250	375	20	3,2	5	250	67,33
32	100	150	12	3,2	5	345	17,45	176	250	375	45	3,2	5	345	91,18
33	100	200	6	1,6	3	250	8,24	177	250	500	30	1,6	3	250	31,3
34	100	200	18	1,6	3	345	11,39	178	250	500	15	1,6	3	345	37,23
35	100	200	10	2	4	250	11,54	179	250	500	40	2	4	250	46,92
36	100	200	10	2	4	345	15,02	180	250	500	15	2	4	345	55,19
37	100	200	20	2,6	4	250	17,18	181	250	500	35	2,6	4	250	71,57
38	100	200	18	2,6	4	345	22,17	182	250	500	35	2,6	4	345	88,76
39	100	200	14	3,2	5	250	20,59	183	250	500	30	3,2	5	250	98,27
40	100	200	10	3,2	5	345	26,84	184	250	500	15	3,2	5	345	119,4
41	100	250	10	1,6	3	250	11,21	185	250	625	40	1,6	3	250	40,09
42	100	250	18	1,6	3	345	14,58	186	250	625	45	1,6	3	345	47,25
43	100	250	18	2	4	250	15,8	187	250	625	25	2	4	250	58,09
44	100	250	10	2	4	345	19,61	188	250	625	45	2	4	345	72,61
45	100	250	8	2,6	4	250	21,23	189	250	625	15	2,6	4	250	89,44
46	100	250	18	2,6	4	345	29,25	190	250	625	25	2,6	4	345	112,1
47	100	250	14	3,2	5	250	28,01	191	250	625	35	3,2	5	250	128
48	100	250	14	3,2	5	345	37,13	192	250	625	30	3,2	5	345	160,1
49	150	30	12	1,6	3	250	0,505	193	300	60	12	1,6	3	250	1,633
50	150	30	21	1,6	3	345	0,92	194	300	60	24	1,6	3	345	2,787
51	150	30	18	2	4	250	0,757	195	300	60	36	2	4	250	3,173
52	150	30	15	2	4	345	0,922	196	300	60	36	2	4	345	4,231
53	150	30	18	2,6	4	250	0,964	197	300	60	12	2,6	4	250	2,56
54	150	30	12	2,6	4	345	1,034	198	300	60	18	2,6	4	345	4,033
55	150	30	18	3,2	5	250	1,119	199	300	60	24	3,2	5	250	4,088
56	150	30	21	3,2	5	345	1,675	200	300	60	12	3,2	5	345	4,11
57	150	75	27	1,6	3	250	2,775	201	300	150	48	1,6	3	250	8,935
58	150	75	21	1,6	3	345	3,428	202	300	150	36	1,6	3	345	10,67
59	150	75	18	2	4	250	3,144	203	300	150	12	2	4	250	9,393
60	150	75	15	2	4	345	4,011	204	300	150	30	2	4	345	14,15
61	150	75	24	2,6	4	250	4,536	205	300	150	12	2,6	4	250	12,87

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
62	150	75	15	2,6	4	345	5,323	206	300	150	24	2,6	4	345	19,01
63	150	75	21	3,2	5	250	5,32	207	300	150	18	3,2	5	250	17,13
64	150	75	9	3,2	5	345	5,768	208	300	150	42	3,2	5	345	27,59
65	150	150	12	1,6	3	250	6,505	209	300	300	42	1,6	3	250	18,68
66	150	150	15	1,6	3	345	8,653	210	300	300	48	1,6	3	345	23,22
67	150	150	27	2	4	250	9,543	211	300	300	48	2	4	250	28,55
68	150	150	12	2	4	345	11,21	212	300	300	36	2	4	345	34,24
69	150	150	24	2,6	4	250	12,68	213	300	300	12	2,6	4	250	38,02
70	150	150	18	2,6	4	345	16,14	214	300	300	12	2,6	4	345	48,82
71	150	150	21	3,2	5	250	15,44	215	300	300	18	3,2	5	250	50,9
72	150	150	9	3,2	5	345	18,57	216	300	300	48	3,2	5	345	73,76
73	150	225	18	1,6	3	250	11,42	217	300	450	24	1,6	3	250	28,28
74	150	225	24	1,6	3	345	14,58	218	300	450	54	1,6	3	345	34,7
75	150	225	21	2	4	250	15,93	219	300	450	12	2	4	250	41
76	150	225	21	2	4	345	20,34	220	300	450	18	2	4	345	49,13
77	150	225	21	2,6	4	250	22,64	221	300	450	54	2,6	4	250	68,01
78	150	225	12	2,6	4	345	28,26	222	300	450	54	2,6	4	345	84,08
79	150	225	9	3,2	5	250	26,82	223	300	450	30	3,2	5	250	90,58
80	150	225	15	3,2	5	345	37,06	224	300	450	48	3,2	5	345	116,7
81	150	300	27	1,6	3	250	16,34	225	300	600	24	1,6	3	250	38,65
82	150	300	9	1,6	3	345	19,11	226	300	600	30	1,6	3	345	46,47
83	150	300	27	2	4	250	23,15	227	300	600	48	2	4	250	58,92
84	150	300	12	2	4	345	27,58	228	300	600	30	2	4	345	69,34
85	150	300	24	2,6	4	250	33,62	229	300	600	24	2,6	4	250	89,53
86	150	300	24	2,6	4	345	43,04	230	300	600	24	2,6	4	345	110,9
87	150	300	21	3,2	5	250	43,37	231	300	600	24	3,2	5	250	125,2
88	150	300	21	3,2	5	345	56,86	232	300	600	30	3,2	5	345	156,6
89	150	375	6	1,6	3	250	19,86	233	300	750	54	1,6	3	250	49,78
90	150	375	6	1,6	3	345	24,71	234	300	750	42	1,6	3	345	58,7
91	150	375	18	2	4	250	29,09	235	300	750	36	2	4	250	73,83
92	150	375	21	2	4	345	36,84	236	300	750	36	2	4	345	85,9

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
93	150	375	9	2,6	4	250	41,92	237	300	750	18	2,6	4	250	115
94	150	375	12	2,6	4	345	53,79	238	300	750	18	2,6	4	345	139,6
95	150	375	12	3,2	5	250	55,95	239	300	750	42	3,2	5	250	167
96	150	375	21	3,2	5	345	74,27	240	300	750	48	3,2	5	345	204,7
97	200	40	16	1,6	3	250	0,925	241	400	80	16	1,6	3	250	2,87
98	200	40	12	1,6	3	345	1,1	242	400	80	32	1,6	3	345	4,626
99	200	40	24	2	4	250	1,394	243	400	80	48	2	4	250	5,465
100	200	40	12	2	4	345	1,322	244	400	80	48	2	4	345	7,083
101	200	40	12	2,6	4	250	1,258	245	400	80	16	2,6	4	250	4,697
102	200	40	20	2,6	4	345	2,181	246	400	80	16	2,6	4	345	6,297
103	200	40	16	3,2	5	250	1,686	247	400	80	32	3,2	5	250	7,46
104	200	40	12	3,2	5	345	1,996	248	400	80	32	3,2	5	345	10,04
105	200	100	36	1,6	3	250	4,694	249	400	200	64	1,6	3	250	13,25
106	200	100	12	1,6	3	345	4,832	250	400	200	16	1,6	3	345	13,94
107	200	100	16	2	4	250	4,949	251	400	200	48	2	4	250	18,03
108	200	100	12	2	4	345	6,262	252	400	200	48	2	4	345	22,87
109	200	100	8	2,6	4	250	5,885	253	400	200	56	2,6	4	250	27,08
110	200	100	24	2,6	4	345	9,775	254	400	200	48	2,6	4	345	33,83
111	200	100	32	3,2	5	250	9,919	255	400	200	32	3,2	5	250	30,95
112	200	100	36	3,2	5	345	13,8	256	400	200	24	3,2	5	345	38,82
113	200	200	32	1,6	3	250	11,28	257	400	400	72	1,6	3	250	27,18
114	200	200	20	1,6	3	345	13,55	258	400	400	56	1,6	3	345	31,72
115	200	200	36	2	4	250	15,69	259	400	400	16	2	4	250	37,96
116	200	200	20	2	4	345	18,78	260	400	400	24	2	4	345	46,15
117	200	200	20	2,6	4	250	20,18	261	400	400	32	2,6	4	250	61,77
118	200	200	36	2,6	4	345	29,05	262	400	400	32	2,6	4	345	76,01
119	200	200	28	3,2	5	250	26,86	263	400	400	24	3,2	5	250	82,68
120	200	200	16	3,2	5	345	33,16	264	400	400	64	3,2	5	345	113,8
121	200	300	8	1,6	3	250	16,4	265	400	600	40	1,6	3	250	39,73
122	200	300	12	1,6	3	345	20,56	266	400	600	64	1,6	3	345	48,63
123	200	300	16	2	4	250	23,87	267	400	600	56	2	4	250	61,26

ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u	ID	H	B	L ₁	t	R	F _y	M _u
124	200	300	20	2	4	345	30,2	268	400	600	40	2	4	345	70,31
125	200	300	16	2,6	4	250	35,22	269	400	600	24	2,6	4	250	94,78
126	200	300	32	2,6	4	345	47,3	270	400	600	72	2,6	4	345	120
127	200	300	32	3,2	5	250	49,09	271	400	600	32	3,2	5	250	135,2
128	200	300	20	3,2	5	345	61,16	272	400	600	24	3,2	5	345	165,2
129	200	400	12	1,6	3	250	22,92	273	400	800	56	1,6	3	250	54,63
130	200	400	12	1,6	3	345	28,3	274	400	800	56	1,6	3	345	65
131	200	400	12	2	4	250	33,02	275	400	800	32	2	4	250	79,57
132	200	400	32	2	4	345	42,96	276	400	800	56	2	4	345	99,19
133	200	400	8	2,6	4	250	49,05	277	400	800	72	2,6	4	250	131,1
134	200	400	12	2,6	4	345	62,55	278	400	800	24	2,6	4	345	155,9
135	200	400	20	3,2	5	250	68,98	279	400	800	16	3,2	5	250	182,6
136	200	400	20	3,2	5	345	87,02	280	400	800	48	3,2	5	345	233,1
137	200	500	24	1,6	3	250	29,91	281	400	1000	56	1,6	3	250	67,17
138	200	500	16	1,6	3	345	36,21	282	400	1000	24	1,6	3	345	79,41
139	200	500	24	2	4	250	44,13	283	400	1000	72	2	4	250	104
140	200	500	20	2	4	345	54	284	400	1000	64	2	4	345	123,6
141	200	500	24	2,6	4	250	66,49	285	400	1000	40	2,6	4	250	166,4
142	200	500	36	2,6	4	345	85,65	286	400	1000	24	2,6	4	345	198,6
143	200	500	28	3,2	5	250	91,27	287	400	1000	24	3,2	5	250	237,8
144	200	500	36	3,2	5	345	117,1	288	400	1000	24	3,2	5	345	281,4

Phụ lục D. Ví dụ tính toán

D.1. Ví dụ 1. Tiết diện C thương mại sử dụng thép các bon thấp

Đề bài

Xác định độ bền của cầu kiện chữ C dẹt nguội chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén. Cầu kiện được giằng ngang để ngăn mất ổn định tổng thể. Tiết diện của cầu kiện lấy dựa theo C25024 của Lysaght nhưng vật liệu sử dụng thép các bon cán nóng. Đặc trưng vật liệu bao gồm: giới hạn chảy $F_y = 235$ MPa, giới hạn bền $F_u = 400$ MPa, mô đun đàn hồi $E = 210000$ MPa và hệ số Poát $\nu = 0,3$.

Lời giải

Tra bảng thông số hình học do Lysaght [114] cung cấp, với tiết diện C25024 ta có: $H = 254$ mm, $B = 76$ mm, $L_1 = 20,5$ mm, $t = 2,4$ mm, $R = 5$ mm. Mô men quán tính và mô men kháng uốn quanh trục không đối xứng lần lượt là $I_y = 721000$ mm⁴ và $Z_y = 12800$ mm³. Khoảng cách từ trọng tâm tiết diện đến mặt phẳng giữa của bản bụng $x_c = 18,4$ mm. Khi đó

$$\begin{array}{l} B \quad \frac{B}{H} \quad \frac{76}{254} \quad 0,299 \quad t \quad \frac{t}{H} \quad 100 \quad \frac{2,4}{254} \quad 0,945 \\ L \quad \frac{L_1}{H} \quad \frac{20,5}{254} \quad 0,0807 \quad R \quad \frac{R}{H} \quad \frac{5}{254} \quad 0,0197 \end{array}$$

Mô men kháng uốn vùng nén tính đến mặt phẳng giữa của bản bụng

$$Z_{ycm} = \frac{I_y}{x_c} = \frac{721000}{18,4} = 39184 \text{ mm}^3$$

a) Xác định mô men tới hạn

Mô men tới hạn sẽ được xác định theo công thức đề xuất ở CHƯƠNG 3.

Hệ số C_R và C_v tính toán theo Công thức (3.83) đến (3.85).

$$C_R = 1 - 0,18 \cdot \frac{R}{34,6} = 1 - 0,18 \cdot \frac{0,0197}{34,6} = 0,997$$

Vì $\mu_B < 0,5$

$$C = 1,04 - 0,04 \cdot \frac{0,3}{0,3} = 1,04 - 0,04 = 1,0$$

Tra Bảng 3.3, ta có

$$_{B0} \quad 0,21 \quad 0,34 \quad \frac{0,4}{L} \quad 0,06 \quad t$$

$$0,21 \quad 0,34 \quad 0,0807^{0,4} \quad 0,06 \quad 0,945 \quad 0,142$$

$$\text{Vì } _{B0} \quad _B \quad 1,2$$

$$k \quad 5,45 \quad _B \quad 0,05 \quad 5,45 \quad 0,299 \quad 0,05 \quad 5,789$$

Hệ số mất ổn định được xác định theo Công thức (3.87)

$$k^* \quad C \quad C_R k \quad 1,0 \quad 1,01 \quad 5,789 \quad 5,847$$

Ứng suất tới hạn tại mặt phẳng trung bình của bản bụng được tính theo Công thức (3.86)

$$_{cr} \quad k^* \frac{E}{12 \quad 1} \frac{t}{H}^2$$

$$5,847 \quad \frac{3,142^2}{12 \quad 1} \frac{210000}{0,3^2} \frac{2,4}{254}^2 \quad 99,11 MPa$$

Mô men tới hạn bằng

$$M_{cr} \quad _{cr} Z_{ycm} \quad 99,11 \quad 39184 \quad 3,884 \quad 10^6 N.m \quad 3,884 kN.m$$

Sử dụng phần mềm ABAQUS để xác định mô men tới hạn, ta có $M_{cr} = 3,978$ kN.m. Như vậy, giá trị trên có sai số là 2,4%.

b) *Xác định độ bền uốn*

Vì cầu kiện được giằng ngang để giữ ổn định, giá trị mô men đàn hồi, M_y , sẽ được sử dụng

$$M_y \quad F_y Z_y \quad 235 \quad 12800 \quad 3008000 N.mm \quad 3,008 kN.m$$

Độ mảnh của tiết diện và giá trị giới hạn của độ mảnh bằng

$$\sqrt{\frac{M_y}{M_{cr}}} \quad \sqrt{\frac{3,008}{3,884}} \quad 0,88$$

$$_0 \quad 1,77 \quad 0,4 B/H \quad 1,77 \quad 0,4 \quad 76/254 \quad 1,65$$

Vì $\lambda < \lambda_0$ nên độ bền của tiết diện sẽ được xác định theo độ bền dẻo. Vị trí trục trung hòa dẻo (x_p) đến mặt phẳng giữa bản bụng sẽ được xác định từ điều kiện diện tích nửa trên trục trung hòa dẻo và nửa dưới bằng nhau và bằng một nửa diện tích tiết

diện. Với tiết diện có chiều dày không đổi có thể sử dụng chiều dài đường tâm tiết diện thay thế diện tích.

$$\begin{aligned} 251,6 & 2x_p & 251,6 & 2 & 73,6 & 2 & 19,3 & / 2 \\ x_p & & & & & & & 16,45 \end{aligned}$$

Trong công thức trên, góc uốn được bỏ qua và giá trị 251,6, 73,6 và 19,3 là bề rộng tính theo đường tim của bản bụng, bản cánh và bản móc.

Do $x_p < 0$ nên $x_p = 0$.

Mô men kháng dẻo và mô men bền dẻo bằng:

$$\begin{aligned} Z_p & 2 & 73,6 & 73,6 / 2 & 2 & 19,3 & 73,6 & 2,4 & 19819 \text{ mm}^3 \\ M_p & Z_p F_y & 19819 & 235 & 4,654 & 10^6 \text{ N.mm} & 4,654 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Độ bền uốn của tiết diện C25024 quanh trục không đối xứng là

$$\begin{aligned} M_u & 1 & / & 0 & M_p & / & 0 & M_y \\ 1 & 0,88/1,65 & 4,654 & 0,88/1,65 & 3,008 & 3,776 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

Sử dụng phần mềm ABAQUS để xác định độ bền, ta có $M_{cr} = 4,018 \text{ kN.m}$. Như vậy, giá trị trên thấp hơn kết quả của ABAQUS 6%. Kết quả so sánh với các phương pháp khác liệt kê dưới đây.

Phương pháp	DSM	EWM	Luận án	ABAQUS
Độ bền uốn (kN.m)	3,008	2,974	3,766	4,018
Sai số với ABAQUS	25,1%	-26%	-6%	-

D.2. Ví dụ 2. Tiết diện mũ của Yu và Laboube sử dụng thép các bon thấp

Đề bài

Xác định độ bền của thép mũ trong thí nghiệm của Yu và Laboube, mã cấu kiện thí nghiệm là H-6-1. Kích thước tiết diện $H = 316 \text{ mm}$, $B = 316 \text{ mm}$, $L_1 = 45,68 \text{ mm}$, $t = 1,28 \text{ mm}$, $R = 1,28 \text{ mm}$. Vật liệu sử dụng thép các bon cán nóng với các đặc trưng sau: giới hạn chảy $F_y = 302 \text{ MPa}$, giới hạn bền $F_u = 384 \text{ MPa}$, mô đun đàn hồi $E = 203000 \text{ MPa}$ và hệ số Poát xông $\nu = 0,3$.

Lời giải

Tiết diện của Yu và Laboube không phải là tiết diện thương mại nên không có bảng tra sẵn. Các đặc trưng hình học của tiết diện được tính toán bằng phần mềm như

sau: Mô men kháng uốn vùng nén tính đến mặt phẳng giữa của bản bụng $Z_{ycm} = 145520 \text{ mm}^3$; mô men kháng uốn (tính đến thớ xa nhất, tức thớ chịu kéo) $Z_y = 93222 \text{ mm}^3$.

$$Z_{ycm} = 145520 \text{ mm}^3$$

Khi đó

$$\begin{aligned} \mu_B &= \frac{B}{H} \frac{316}{316} = 1, \quad \mu_t = \frac{t}{H} = \frac{100}{316} = 0,316 \\ \mu_L &= \frac{L_1}{H} = \frac{45,68}{316} = 0,145, \quad \mu_R = \frac{R}{H} = \frac{1,28}{316} = 0,004 \end{aligned}$$

c) *Xác định mô men tới hạn*

Mô men tới hạn sẽ được xác định theo công thức đề xuất ở CHƯƠNG 3.

Hệ số C_R và C_v tính toán theo Công thức (3.83) đến (3.85).

$$C_R = 1 - 0,18 \mu_R = 1 - 0,18 \cdot 0,004 = 0,9992 \approx 1,0$$

Vì $\mu_B > 0,5$

$$C_v = 1,0$$

Tra Bảng 3.3, ta có

$$\begin{aligned} \mu_{B0} &= 0,21 - 0,34 \mu_L^{0,4} = 0,21 - 0,34 \cdot 0,145^{0,4} = 0,06 \\ \mu_{t0} &= 0,21 - 0,34 \mu_t^{0,4} = 0,21 - 0,34 \cdot 0,316^{0,4} = 0,077 \end{aligned}$$

Vì $\mu_{B0} > 1,2$

$$k_B = 5,45 - 0,05 \mu_{B0} = 5,45 - 0,05 \cdot 1,2 = 5,45$$

Hệ số mất ổn định được xác định theo Công thức (3.87)

$$k^* = C_v C_R k_B = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 5,45 = 5,45$$

Ứng suất tới hạn tại mặt phẳng trung bình của bản bụng được tính theo Công thức (3.86)

$$\begin{aligned} \sigma_{cr} &= k^* \frac{E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{H} \right)^2 \\ &= 5,45 \frac{3,142^2 \cdot 203000}{12 \cdot 1 \cdot 0,3^2} \left(\frac{1,28}{316} \right)^2 = 16,41 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Mô men tới hạn bằng

$$M_{cr} = F_y Z_{ycm} = 16,41 \cdot 145520 = 2,388 \cdot 10^6 \text{ N.m} = 2,388 \text{ kN.m}$$

Sử dụng phần mềm CUFSM để xác định mô men tới hạn, ta có $M_{cr} = 2,394$ kN.m. Như vậy, giá trị trên có sai số là 0,3%.

d) *Xác định độ bền uốn*

Giá trị mô men đàn hồi, M_y :

$$M_y = F_y Z_y = 302 \cdot 93222 = 28153044 \text{ N.mm} = 28,15 \text{ kN.m}$$

Độ mảnh của tiết diện và giá trị giới hạn của độ mảnh bằng

$$\lambda = \sqrt{\frac{M_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{28,15}{2,388}} = 3,433$$

$$\lambda_0 = 1,77 \cdot 0,4 B/H = 1,77 \cdot 0,4 \cdot 316/316 = 1,37$$

Vì $\lambda > \lambda_0$

$$C = 1,55 \cdot 0,22 B/H = 1,55 \cdot 0,22 \cdot 316/316 = 1,33$$

$$0,065 B/H = 0,065 \cdot 316/316 = 0,065$$

Độ bền uốn của tiết diện

$$M_u = C \cdot \frac{M_{crl}^{0,4}}{M_y^{0,4}} \cdot M_y = 1,33 \cdot 0,065 \cdot \frac{2,388^{0,4}}{28,15^{0,4}} \cdot 28,15 = 13,7 \text{ kN.m}$$

Độ bền xác định từ thí nghiệm $M_{test} = 13,96$ kN.m. Như vậy, giá trị trên thấp hơn kết quả thí nghiệm 1,9%. Kết quả so sánh với các phương pháp khác được thể hiện ở bảng dưới.

Phương pháp	DSM	EWM	Luận án	ABAQUS	Thí nghiệm
Độ bền uốn (kN.m)	9,906	13,94	13,7	14,97	13,96
Sai số với thí nghiệm	-29%	0,14%	-1,9%	7,2%	-

D.3. Ví dụ 3. Tiết diện mũ sử dụng thép cán nguội cường độ cao**Đề bài**

Xác định độ bền của cấu kiện tiết diện mũ kích thước $H = 50$ mm, $B = 125$ mm, $L_1 = 20$ mm, $t = 1,2$ mm, $R = 2,0$ mm, chịu uốn quanh trục không đối xứng với bản bụng chịu nén. Cấu kiện được giằng ngang để ngăn mất ổn định tổng thể. Đặc trưng vật liệu bao gồm: giới hạn chảy $F_y = 550$ MPa, giới hạn bền $F_u = 550$ MPa, mô đun đàn hồi $E = 200000$ MPa và hệ số Poát xôn $\nu = 0,3$.

Lời giải

Sử dụng phần mềm THIN-WALL-2 để xác định các đặc trưng hình học của tiết diện. Mô men quán tính quanh trục không đối xứng $I_y = 759150$ mm⁴. Khoảng cách từ trọng tâm tiết diện đến mặt phẳng giữa của bản bụng $x_c = 60,03$ mm.

Mô men kháng uốn vùng nén tính đến mặt phẳng giữa của bản bụng

$$Z_{ycm} = \frac{I_y}{x_c} = \frac{759150}{60,03} = 12647 \text{ mm}^3$$

Mô men kháng uốn

$$Z_y = \frac{I_y}{B \cdot x_c \cdot t / 2} = \frac{759150}{125 \cdot 60,03 \cdot 1,2 / 2} = 11905 \text{ mm}^3$$

Khi đó

$$\begin{aligned} \frac{B}{H} &= \frac{125}{50} = 2,5 & \frac{t}{H} &= \frac{1,2}{100} = 0,012 \\ \frac{L_1}{H} &= \frac{20}{50} = 0,4 & \frac{R}{H} &= \frac{2}{50} = 0,04 \end{aligned}$$

e) *Xác định mô men tới hạn*

Mô men tới hạn sẽ được xác định theo công thức đề xuất ở CHƯƠNG 3.

Hệ số C_R và C_v tính toán theo Công thức (3.83) đến (3.85).

$$C_R = 1 - 0,18 \cdot \frac{R}{34,6} = 1 - 0,18 \cdot 0,04 = 0,992$$

Vì $\mu_B > 0,5$

$$C = 1,0$$

Do $\frac{B}{H} = 2,5$, tra Bảng 3.3, ta có

$$k_b = 0,5 \quad k_B = 2,5 \quad k_{b^2} = 0,98 \quad k_{b^3} = 0,36 \quad k_L = 0,2 \quad k_{b^3} = 4,07$$

Hệ số mất ổn định được xác định theo Công thức (3.87)

$$k^* = C C_R k = 1,0 \cdot 1,048 \cdot 4,07 = 4,265$$

Ứng suất tới hạn tại mặt phẳng trung bình của bản bụng được tính theo Công thức (3.86)

$$\sigma_{cr} = k^* \frac{E}{12(1-\mu^2)} \frac{t}{H}^2$$

$$4,265 \cdot \frac{3,142^2 \cdot 200000}{12 \cdot 1 \cdot 0,3^2} \cdot \frac{1,2}{50}^2 = 444,2 \text{ MPa}$$

Mô men tới hạn bằng

$$M_{cr} = \sigma_{cr} Z_{ycm} = 444,2 \cdot 12647 = 5,618 \cdot 10^6 \text{ N.m} = 5,618 \text{ kN.m}$$

Sử dụng phần mềm THIN-WALL-2 để xác định mô men tới hạn, ta có $M_{cr} = 5,815 \text{ kN.m}$. Như vậy, giá trị trên có sai số là 3,4%.

f) *Xác định độ bền uốn*

Giá trị mô men đàn hồi, M_y :

$$M_y = F_y Z_y = 550 \cdot 11905 = 6547750 \text{ N.mm} = 6,548 \text{ kN.m}$$

Độ mảnh của tiết diện và giá trị giới hạn của độ mảnh bằng

$$\lambda = \sqrt{\frac{M_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{6,548}{5,618}} = 1,08$$

$$\lambda_0 = 1,77 \cdot 0,4 B/H = 1,77 \cdot 0,4 \cdot 125/50 = 0,77$$

Vì $\lambda > \lambda_0$

$$C = 1,55 \cdot 0,22 B/H = 1,55 \cdot 0,22 \cdot 125/50 = 1,0$$

$$0,065 B/H = 0,065 \cdot 125/50 = 0,163$$

Độ bền uốn của tiết diện quanh trục không đối xứng là

$$M_u = C \left(\frac{M_{crl}}{M_y} \right)^{0,4} \frac{M_{crl}}{M_y} M_y$$

$$1,0 \cdot 0,163 \cdot \frac{5,618}{6,548}^{0,4} \cdot \frac{5,618}{6,548}^{0,4} \cdot 6,548 = 5,215 kN.m$$

Kết quả so sánh với các phương pháp khác được thể hiện ở bảng dưới.

Phương pháp	DSM	EWM	Luận án	ABAQUS
Độ bền uốn (kN.m)	5,29	5,644	5,215	4,742
Sai số với ABAQUS	11,6%	19%	10%	-