



Güncel tasarım standartlarına göre soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin eğilme dayanımlarının hesabı

Calculation of flexural strength of cold formed steel sections according to current design standards

Yakup Bölükbaş^{*,1} 

¹ Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray Türkiye

Öz

Son yıllarda soğuk şekil verilmiş çelik elemanların gerek taşıyıcı gerekse tamamlayıcı yapı elemanı olarak kullanımı oldukça popüler hale gelmiştir. Bu elemanların, imalat özelliği gereği ince et kalınlıklarına ($t \leq 6$ mm) sahip olması bu elemanların tasarımında burkulma ve burulma dayanımlarını kritik hale getirmektedir. Bu çalışmada ülkemiz inşaat sektöründe kullanıma sunulan tırnaklı C profillerin eğilme dayanımı TS EN 1993-1-3, AISI S100-16 ve DSM ile hesaplanacaktır. Seçilen 72 adet profilin bu tasarım yöntemleri ile dayanımları belirlendikten sonra aralarında karşılaştırılma yapılmış ve yöntemlerin performansı test edilmiştir. Yöntemler arasında oluşan farklar grafik üzerinde gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Soğukta şekil verilmiş çelik, Eğilme elemanı, Efektif genişlik metodu, Doğrudan dayanım metodu

1 Giriş

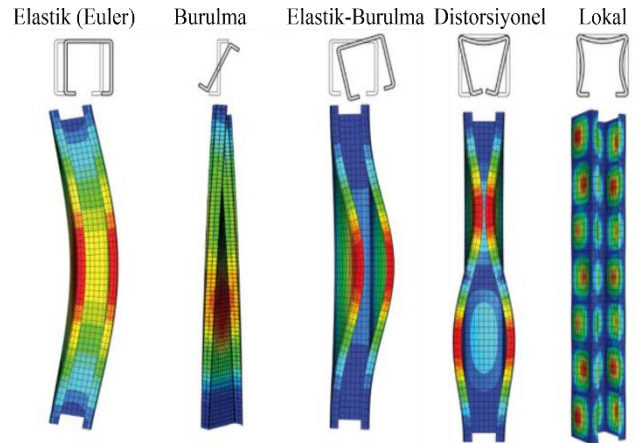
Son yıllarda soğukta şekil verilmiş çelik kesitler gerek taşıyıcı gerekse tamamlayıcı yapı elemanı olarak kullanımı oldukça popüler hale gelmiştir. Bu elemanlar, kısa açıklıklarda yapısal çeliğe göre yüksek taşıma gücü-ağırlık oranına sahip olmaları, kesit şeklinde sağladıkları esneklik ve kolay montaj imkânı ile tercih edilmektedir. Diğer taraftan, soğuk şekil verilmiş çelik elemanların imalat özelliği gereği ince et kalınlığına ($t \leq 6$ mm) sahip olması bu kesitlerin yük etkisi altında akma gerilmelerinin çok daha düşük seviyesinde burkulmasına sebep olmaktadır. Lokal burkulma deformasyonu gösteren bu elemanlar çoğu zaman göçme durumuna gelmez ve yük taşımaya devam eder. Burkulma sonrası davranış adı verilen bu olgu soğuk şekil verilmiş kesitler için ana tasarım kriteridir. Ayrıca soğukta şekil verilmiş bu kesitler çoğu zaman açık profillerden (C, U vb.) oluşmaktadır. Bu durum elemanların tasarımında burkulma ve burulma dayanımlarını kritik hale getirmektedir. Soğuk şekil verilmiş çelik elemanlar lokal, global ve distorsiyonel burkulma tiplerini ya da bu burkulma tiplerinin etkileşimini birlikte gösterebilirler. Lokal ve distorsiyonel burkulmalar kesit üzerindeki elemanların (başlık, gövde ya da tırnak) deformasyonu iken global burkulma elastik burkulma ya da burulmalı burkulma olarak

Abstract

In recent years, using cold-formed steel members as structural and complementary structural elements has become very popular. The fact that these elements have thin wall thicknesses ($t \leq 6$ mm) due to their manufacturing characteristics makes the buckling and torsional strengths critical in designing these elements. In this study, the flexural strength of clawed C profiles used in the construction industry in our country will be calculated with TS EN 1993-1-3, AISI S100-16, and DSM. After determining the strengths of 72 selected profiles with these design methods, a comparison was made between them, and the performance of the methods was tested. The differences between the methods are shown on the graph.

Keywords: Cold formed steel, Bending element, Effective width Method, Direct strength method

ortaya çıkmaktadır. Şekil 1’de bu burkulma şekilleri kesit üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 1. Soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin burkulma tipleri [1]

Günümüzde soğuk şekil verilmiş çelik elemanların tasarımında iki yöntem öne çıkmaktadır. Bu yöntemlerden ilki; ince levhaların burkulma davranışını modelleyebilmek

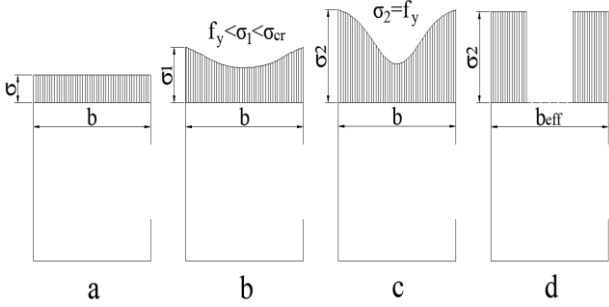
* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / ybolukbas@aksaray.edu.tr (Y. Bölükbaş)

Geliş / Received: 02.06.2023 Kabul / Accepted: 20.10.2023 Yayınlanma / Published: 15.01.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1309045

amacıyla von Karman tarafından geliştirilen ve daha sonra Winter tarafından soğuk şekil verilmiş çelik elemanlar için yenilenen Efektif Genişlik Metodudur (Effective Width Method, EWM) [2, 3]. Diğerisi ise görece daha yeni bir metot olan Doğrudan Dayanım Metodudur (Direct Strength Method, DSM) [4]. EWM hemen hemen tüm ülke standartlarında kullanılmaktadır. Ancak DSM; Amerikan, Kanada ve Avustralya standartlarında kullanılmasına rağmen Avrupa ve ülkemiz standartlarında kullanılmamaktadır [5-7].

Yük altındaki soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin basınç gerilmeleri etkisindeki başlık ve gövde üzerindeki gerilme dağılımı yüklemenin ilk anlarında (Şekil 2a) düzgün olarak dağılmaktadır. Ancak artan yükler kesit ortasında lokal burkulma deformasyonu oluşturması (Şekil 2b) kesit ortasındaki gerilmenin sabit kalmasına ve artan elemanların kesit köşelerindeki lifler tarafından taşınmasıyla eleman yük taşımaya devam eder. Bu gerilme durumu kesit köşesindeki liflerin akma gerilmesine ulaşmasına kadar devam eder (Şekil 2c). EWM kesit üzerindeki düzgün olmayan bu dağılımı dikkate almak yerine daha kolay modellenecek şekilde dağılımın kesit ortasında kalan bölümü çıkararak, köşelerde düzgün gerilme durumunu ele alır. Böylece kesitin genişliği efektif olarak yeni belirlenen genişlik olur (Şekil 2d).

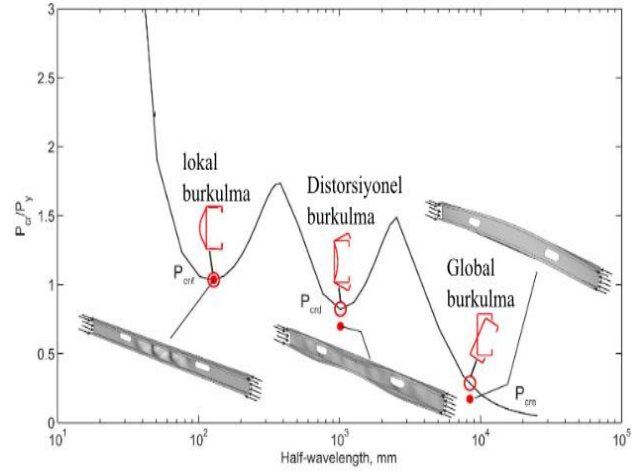


Şekil 2. Efektif gerilme konsepti [8]

Efektif genişlik metodunda kesiti oluşturan elemanların tek tek burkulma sonrası gerilme dağılımını hesaplanması amaçlanmaktadır. Ancak kesit şeklinin karmaşıklaşmasıyla (tırnaklı C, Z ve omega) bu hesaplamalar giderek daha hantal hale gelmektedir. Her bir kesit parçasının için tek tek efektif genişliğin hesaplanması ve kesit köşelerindeki gerilme aktarımının hesaplanmasında oluşan zorluklar araştırmacıları alternatif çözüm arayışına itmiştir. Bu araştırmalar sonucunda Schafer ve Peköz tarafından Doğrudan dayanım metodu (DSM) ortaya atılmıştır [4]. Bu yaklaşım kesiti oluşturan elemanların tek tek burkulma durumuna bakmak yerine kesitin tümü için geçerli dayanım eğrileri oluşturmayı amaçlamaktadır. Soğuk şekil verilmiş çelik kesitlerde oluşan hâkim burkulma modlarının her biri için kritik burkulma gerilmeleri sonlu elemanlar ya da sonlu şerit yöntemi ile tahmin edilerek kesitin taşıma gücü hesaplanmaktadır (Şekil 3).

Her iki yöntemde soğuk şekil verilmiş çelik elemanların tasarımında iyi sonuçlar verse de özellikle distorsiyonel burkulma davranışının etkili olduğu kesitlerde DSM daha iyi sonuç verdiği yapılan araştırmalar sonucunda ortaya konulmuştur. Ayrıca kesitin tüm burkulma modlarını ve bu

modlar arasındaki etkileşimi tahmin etmede DSM daha tutarlı sonuçlar verdiği belirtilmektedir [9].



Şekil 3. Karakteristik burkulma eğrisi [9]

Literatürde eğilme etkisindeki soğukta şekil verilmiş çelik elemanlar ile ilgili çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Bunların arasında tasarım yöntemlerini karşılaştıran çalışmaların bir kısmı incelenmiştir. Bu alanda önemli çalışmada Yu ve Schafer eğilme etkisindeki C ve Z kesitlerin lokal burkulma davranışını incelemek amacıyla 2003 yılında yapılmıştır. Araştırmacılar 4,9 m açıklığa kirişler üzerinde 4 nokta eğilme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Bu testlerde elemanların yanal burulmalı burkulma ve distorsiyonel burkulma yapması önlenmiş ve sadece lokal burkulma davranışı elde edilmiştir. Deneylerde değişen gövde yüksekliği-kalınlık oranı ve gövde yüksekliği-başlık genişliği oranlarına sahip elemanlar test edilmiştir. Çalışma sonucunda deneysel veriler ile tasarım yöntemleri karşılaştırılmıştır. Araştırmacılar AISI (1996), S136 (1994) ve NAS (2001) standartlarının taşıma gücü tahmininin deneysel sonuçlar ile tutarlı olduğu vurgulanmıştır. Ancak özellikle narin gövdelerdeki kesitler EWM ile yapılan tahminlerin aşırı güvenli tarafta kaldığını belirten araştırmacılar DSM'nin dayanım tahmininin tüm kesitlerde deney sonuçları ile daha tutarlı olduğu belirlenmiştir. Araştırmacıların yaptığı diğer çalışmada ise benzer bir deney sadece distorsiyonel burkulma davranışı için tasarlanan kesitler üzerinde yapılmıştır. Bu çalışmada ise değişen gövde kalınlık oranı ve başlık kalınlık oranları ile elemanlar test edilmiştir. Çalışma sonucunda EWM kullanan Amerikan ve Kanada standartlarının taşıma gücü tahminlerinin test sonuçlarına göre %8 ile %15 oranında fark olduğu Avrupa standardında ise bu oranın %4 olduğu görülmüştür. DSM kullanılan hesaplamalarda ise fark %2 olduğu görülmüştür [10, 11]. Bir diğer çalışmada soğuk şekil verilmiş çelik elemanlar üzerine yapılan çalışma sonuçlarını derleyerek DSM yönteminin performansını gözlemlemiştir. Araştırmacı DSM yönteminin brüt enine kesit özelliklerini kullandığını, ancak elemanın elastik burkulma davranışının doğru bir şekilde hesaplanması gerektiğini belirtmiştir. Bunun için sonlu şerit yöntemi veya genelleştirilmiş kiriş teorisi gibi sayısal yöntemlerin, gerekli burkulma davranışını hesaplamada en iyi seçim olduğunu belirtmiştir [12]. 2009

yılında yapılan çalışmada ise lokal-global burkulma etkileşiminden etkilenen soğuk şekil verilmiş çelik kolon elemanlarına yönelik son çalışmalar derlenmiştir. Ayrıca çalışmada bu elemanların dayanım tahmin için kullanılan EWM ve DSM yöntemlerini tek ve birleştirilmiş bir çözüm yöntemi önerilmiştir [12]. Batista'nın 2010 yılında yaptığı çalışmada ise yeni geliştirilen efektif kesit yönteminin (Effective Section Method) hakim diğer iki yöntem ile karşılaştırılması yapılmıştır [13,14]. Dinis ve Camotim yaptıkları çalışmada lokla-distorsiyonel burkulma modu etkileşiminden etkilenen, düzgün ana eksen burkulmasına maruz kalan, soğuk şekillendirilmiş çelik tırnaklı kanal kirişlerinin burkulma sonrası davranışına ilişkin sayısal bir araştırmayı sunmuştur [15]. Bir diğer çalışmada C kesit ve bu kesit kullanılarak oluşturulan I ve R kesitlere sahip soğukta şekil verilmiş çelik kirişlerin ortam sıcaklığındaki yapısal davranışı üzerine, geniş bir deneysel test programı ve sonlu eleman analiz sonuçlarına dayanan bir araştırma çalışması sunulmaktadır. İlk olarak, kirişlerin göçme yüklerini ve göçme modlarını değerlendirmek için dört noktali eğilme testi yapılmıştır. Daha sonra deneysel sonuçlarla karşılaştırmak için uygun bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiş ve kirişlerin kalınlık, yükseklik ve uzunluğunun yapısal davranışı üzerindeki etkisini araştırmak için parametrik bir çalışma yapılmıştır [16]. Anbarasu yaptığı çalışmada farklı kesit geometrisine ve akma gerilmesine sahip 60 elemanın sayısal parametrik çalışması yapılmıştır. Sonlu elemanlar analizinden ve Doğrudan dayanım metodu (DSM) ile elde edilen nihai dayanımların karşılaştırılmasına dayanarak tırnaklı C kesitler için alternatif tasarım denklemi önermiştir [17]. Diğer çalışmada eğilme etkisi altında soğuk şekillendirilmiş basit mesnetli kirişlerin burkulması ve burkulma modlarında karşılaştırılması ile ilgili sayısal sonuçları verilmiştir [18]. Fan ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada ise 8 adet paslanmaz çelik tırnaklı C kirişin burulmalı burkulma kapasitesi testleri gerçekleştirilmiş ve her numunenin mekanik performansı ve göçme modları ortaya konmuştur. ABAQUS yazılımı kullanılarak her numunenin sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve sayısal simülasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak, sonlu eleman modelinin doğruluğu incelenmiştir. Doğrulanmış sonlu eleman modeli kullanılarak bir parametrik analiz yapılmıştır. [19].

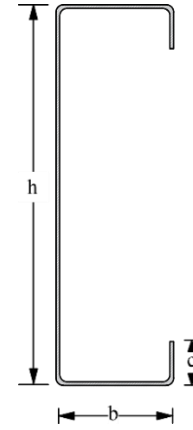
Soğuk şekil verilmiş çelik elemanların kesit şekillerinin oluşturulmasında sunulan esneklik, bu elemanların tasarımında toptan bir çözüm üretmeyi zorlaştırmaktadır. Uluslararası literatürde bu alanda çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Ancak ulusal düzeyde bu elemanların tasarım yöntemlerini irdeleyen çalışma sayısı oldukça azdır. Ülkemizde bulunan çelik firmalarının piyasaya sundukları soğukta şekil verilmiş çelik C kesitlerin tasarım yöntemleri üzerine yapılan çalışmalar hem ulusal literatüre hem de sektöre önemli katkılar sunacaktır.

Bu çalışmada ülkemiz inşaat sektöründe kullanıma sunulan tırnaklı C profillerin eğilme dayanımı TS EN 1993-1-3, AISI S100-16 ve DSM ile hesaplanacaktır. Seçilen 72 adet profilin bu tasarım yöntemleri ile dayanımları hesaplandıktan sonra aralarında karşılaştırılma yapılmış ve

yöntemlerin tahmin gücü test edilmiştir. Yöntemler arasında oluşan tahmin farkları grafik üzerinde gösterilmiştir.

2 Materyal ve metot

Çalışmada incelenecek kesitler, ülkemizde bulunan çelik firmalarının sektöre sunduğu tırnaklı C profillerden seçilmiştir. Profillerin kesit ölçüleri 4 farklı gruba ayrılmıştır. Gövde yüksekliklerine göre belirlenen gruptaki profiller kendi aralarında kalınlık ve tırnak genişliği bakımından değişiklikler göstermektedir. Bu şekilde değişken kesit kalınlığı, gövde yüksekliği, başlık ve tırnak genişliği kapsayan 72 adet profil seçilmiştir. Çalışma için seçilen profillerin kesit ölçüleri Tablo 1'de verilmiştir. Burada profil isimlendirmesi C100.50.15.1,5 şeklinde yapılmış ve bu isimlendirme 100 mm gövde yüksekliğine (h), 50 mm başlık genişliğine (b), 15 mm tırnak genişliğine (c) ve 1.5 mm kalınlığa (t) sahip C kesiti ifade etmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Çalışmada kullanılan kesit özellikleri.

Tüm kesitlerde çelik sınıfı imalatçı firma kataloğuna göre S275 çelik sınıfı olarak alınmıştır. Bu sebeple kesitlerin akma dayanımı 275 MPa, kopma dayanımları ise 430 MPa olarak alınmıştır. Elastisite modülü TS EN 1993-1-3'e göre 205 GPa olarak alınmıştır. Kesitlerin eğilme tasarımı yapılacağından açıklık 1000 mm olarak seçilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan profillerin kesit ölçüleri

	Profil ismi	h (mm)	b (mm)	c (mm)	t (mm)	r (mm)
I. Grup	C100.50.15.1,5	100	50	15	1.5	2.0
	C100.50.15.2,0	100	50	15	2.0	2.0
	C100.50.15.2,5	100	50	15	2.5	2.0
	C100.60.15.1,5	100	60	15	1.5	2.0
	C100.60.15.2,0	100	60	15	2.0	2.0
	C100.60.15.2,5	100	60	15	2.5	2.0
	C100.70.15.1,5	100	70	15	1.5	2.0
	C100.70.15.2,0	100	70	15	2.0	2.0
	C100.70.15.2,5	100	70	15	2.5	2.0
	C100.50.25.1,5	100	50	25	1.5	2.0
	C100.50.25.2,0	100	50	25	2.0	2.0
	C100.50.25.2,5	100	50	25	2.5	2.0
	C100.60.25.1,5	100	60	25	1.5	2.0
	C100.60.25.2,0	100	60	25	2.0	2.0
	C100.60.25.2,5	100	60	25	2.5	2.0
	C100.70.25.1,5	100	70	25	1.5	2.0
	C100.70.25.2,0	100	70	25	2.0	2.0
	C100.70.25.2,5	100	70	25	2.5	2.0

Tablo 2.(Devam) Çalışmada kullanılan profillerin kesit ölçüleri

2. Grup	C150.70.20.1,5	150	70	20	1.5	2.0
	C150.70.20.2,0	150	70	20	2.0	2.0
	C150.70.20.2,5	150	70	20	2.5	2.0
	C150.80.20.1,5	150	80	20	1.5	2.0
	C150.80.20.2,0	150	80	20	2.0	2.0
	C150.80.20.2,5	150	80	20	2.5	2.0
	C150.90.20.1,5	150	90	20	1.5	2.0
	C150.90.20.2,0	150	90	20	2.0	2.0
	C150.90.20.2,5	150	90	20	2.5	2.0
	C150.70.30.1,5	150	70	30	1.5	2.0
	C150.70.30.2,0	150	70	30	2.0	2.0
	C150.70.30.2,5	150	70	30	2.5	2.0
	C150.80.30.1,5	150	80	30	1.5	2.0
	C150.80.30.2,0	150	80	30	2.0	2.0
	C150.80.30.2,5	150	80	30	2.5	2.0
3. Grup	C150.90.30.1,5	150	90	30	1.5	2.0
	C150.90.30.2,0	150	90	30	2.0	2.0
	C150.90.30.2,5	150	90	30	2.5	2.0
	C200.90.30.1,5	200	90	30	1.5	2.0
	C200.90.30.2,0	200	90	30	2.0	2.0
	C200.90.30.2,5	200	90	30	2.5	2.0
	C200.100.30.1,5	200	100	30	1.5	2.0
	C200.100.30.2,0	200	100	30	2.0	2.0
	C200.100.30.2,5	200	100	30	2.5	2.0
	C200.110.30.1,5	200	110	30	1.5	2.0
	C200.110.30.2,0	200	110	30	2.0	2.0
	C200.110.30.2,5	200	110	30	2.5	2.0
	C200.90.50.1,5	200	90	50	1.5	2.0
	C200.90.50.2,0	200	90	50	2.0	2.0
	C200.90.50.2,5	200	90	50	2.5	2.0
4. Grup	C200.100.50.1,5	200	100	50	1.5	2.0
	C200.100.50.2,0	200	100	50	2.0	2.0
	C200.100.50.2,5	200	100	50	2.5	2.0
	C200.110.50.1,5	200	110	50	1.5	2.0
	C200.110.50.2,0	200	110	50	2.0	2.0
	C200.110.50.2,5	200	110	50	2.5	2.0
	C250.120.50.1,5	250	120	50	1.5	2.0
	C250.120.50.2,0	150	120	50	2.0	2.0
	C250.120.50.2,5	150	120	50	2.5	2.0
	C250.130.50.1,5	250	120	50	1.5	2.0
	C250.130.50.2,0	150	120	50	2.0	2.0
	C250.130.50.2,5	150	120	50	2.5	2.0
	C250.140.50.1,5	250	120	50	1.5	2.0
	C250.140.50.2,0	150	120	50	2.0	2.0
	C250.140.50.2,5	150	120	50	2.5	2.0
C250.120.70.1,5	250	120	70	1.5	2.0	
C250.120.70.2,0	150	120	70	2.0	2.0	
C250.120.70.2,5	150	120	70	2.5	2.0	
C250.130.70.1,5	250	120	70	1.5	2.0	
C250.130.70.2,0	150	120	70	2.0	2.0	
C250.130.70.2,5	150	120	70	2.5	2.0	
C250.140.70.1,5	250	120	70	1.5	2.0	
C250.140.70.2,0	150	120	70	2.0	2.0	
C250.140.70.2,5	150	120	70	2.5	2.0	

2.1 TS EN 1993-1-3 (Eurocode 3)

Standart soğuk şekil verilmiş çelik elemanların eğilme dayanımı hesaplanırken iki farklı durumu incelemektedir. Bu iki durum için hesaplanan dayanımlardan en küçük olan moment kesitin moment dayanımı olarak belirlenir.

2.1.1 Basınç başlığının akma durumu (Elastik burkulma):

Bu durumda kesitin moment dayanımı ($M_{c,Rd}$) aşağıdaki şekilde hesaplanır. Burada kesitin Efektif genişlik metodu ile elde edilen efektif kesit özellikleri kullanılmaktadır.

$$M_{c,Rd} = \begin{cases} \frac{W_{eff} f_{yb}}{\gamma_{M0}}, & W_{eff} < W_{el} \\ \frac{f_{yb} W_{el} + (W_{pl} - W_{el}) A \left(1 - \frac{\lambda_{e0}}{\lambda_{e0max}}\right)}{\gamma_{M0}}, & W_{eff} = W_{el} \end{cases} \quad (1)$$

Burada W_{eff} efektif kesit modülü, W_{el} elastik kesit modülü, W_{pl} plastik kesit modülü, f_{yb} kesitin akma dayanımı, λ_{e0} minimum narinlik, λ_{e0max} maksimum narinliği temsil etmektedir.

2.1.2 Yanal burulmalı burkulma durumu:

Eğilme durumundaki kesitin yanal burulmalı burkulma dayanımı ($M_{b,Rd}$) için TS EN 1993-1-1 bölüm 6.3.2.2'de verilen denklem kullanılır.

$$M_{b,Rd} = X_{LT} \frac{W_{eff} f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (2)$$

$$X_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + (\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2)^{0.5}} \leq 1 \quad (3)$$

$$\phi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (4)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (5)$$

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{L^2} \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 G I_t}{\pi^2 E I_z}} \quad (6)$$

Burada X_{LT} azaltma faktörü, λ_{LT} boyutsuz narinlik, ϕ_{LT} azaltma faktörü tanımlamak için katsayı, α_{LT} kusur katsayısı, M_{cr} kritik burkulma momenti, C_1 moment faktörü, E elastisite modülü, I_z zayıf eksen atalet momenti, L burkulma boyu, I_w çarpılma katsayısı, G kayma modülü, I_t St. Venant burulma sabitini temsil etmektedir.

2.2 AISI S100-16

Bu standart soğuk şekil verilmiş çelik elemanların eğilme dayanımını üç farklı durum üzerinden değerlendirmektedir. Bu üç durum için hesaplanan momentlerden en küçüğü elemanın eğilme dayanımı olarak belirlenir.

2.2.1 Akma ve yanal burulmalı burkulma durumu:

Kesitin yanal burulmalı burkulma ve akma davranışında gösterdiği eğilme dayanımı (M_{ne}) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır. Sunulan denklemler tek ya da çift simetrik eksene sahip profiller için verilmiştir.

$$M_{ne} = S_f F_n \leq M_y \quad (7)$$

$$F_n = \begin{cases} F_n = F_y, & F_{cre} \geq 2.78 F_y \\ \frac{10}{9} F_y \left(1 - \frac{10 F_y}{36 F_{cre}}\right), & 2.78 F_y > F_{cre} > 0.56 F_y \\ F_{cre}, & F_{cre} \leq 0.56 F_y \end{cases} \quad (8)$$

$$F_{cre} = \frac{C_0 r_0 A}{S_f} \sqrt{\sigma_{ey} \sigma_t} \quad (9)$$

$$\sigma_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{K_y L_y}{r_y}\right)^2} \quad (10)$$

$$\sigma_t = \frac{1}{A r_0^2} \left[GJ + \frac{\pi^2 E C_w}{(K_t L_t)^2} \right] \quad (11)$$

Burada S_f elastik kesit modülü, F_n nominal gerilme, M_y akma momenti, F_y akma dayanımı, F_{cre} kritik elastik yanal burulmalı burkulma gerilmesi, C_o moment faktörü, r_0 polar atalet momenti, A kesit brüt alanı, σ_{ey} eğilmeli burkulma dayanımı, σ_t burulmalı burkulma dayanımını temsil etmektedir.

2.2.2 Lokal burkulma durumu:

Kesitin lokal burkulma durumu için eğilme dayanımı (M_{nl}) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır. Burada kesitin efektif özellikleri EWM ile hesaplanmaktadır.

$$M_{nl} = S_e F_n \leq S_{et} F_y \quad (12)$$

Burada S_e efektif kesit modülü, F_n nominal gerilme, F_y akma dayanımı, S_{et} çekme başlığına göre efektif kesit modülünü temsil etmektedir.

2.2.3 Distorsiyonel burkulma durumu:

Kesitin distorsiyonel burkulma durumu için eğilme dayanımı (M_{nd}) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$M_{nd} = \begin{cases} M_y, & \lambda_d \leq 0.673 \\ \left[1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right] \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y, & \lambda_d > 0.673 \end{cases} \quad (13)$$

Burada $\lambda_d = \sqrt{(M_y/M_{crd})}$ şeklinde hesaplanır. M_{crd} kritik distorsiyonel burkulma momenti sonlu elemanlar ya da sonlu şerit metodu kullanan analiz yöntemleri ile hesaplanır. Çalışmada CUFSM yazılımı kullanılmıştır [20].

2.3 Doğrudan Dayanım Metodu (DSM)

Bu yöntem Amerikan AISI S100-16 standardının içinde yer almaktadır. Bu yöntem soğukta şekil verilmiş çelik elemanların eğilme dayanımını üç farklı durumdan inceler. Burada akma ve yanal burkulma durumu AISI S100-16'da verilen şekilde kullanılmaktadır. Ancak lokal ve distorsiyonel burkulma durumu ise aşağıda verilmiştir.

2.3.1 Lokal burkulma durumu:

Kesitin lokal burkulma durumu için eğilme dayanımı (M_{nl}) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$M_{nl} = \begin{cases} M_{ne}, & \lambda_l \leq 0.776 \\ \left[1 - 0.15 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} M_{ne}, & \lambda_l > 0.776 \end{cases} \quad (14)$$

Burada $\lambda_l = \sqrt{(M_y/M_{crl})}$ şeklinde hesaplanır. M_{crl} kritik lokal burkulma momenti sonlu elemanlar ya da sonlu şerit metodu kullanan analiz yöntemleri ile hesaplanır. Çalışmada CUFSM yazılımı kullanılmıştır.

2.3.2 Distorsiyonel burkulma durumu:

Kesitin distorsiyonel burkulma durumu için eğilme dayanımı (M_{nd}) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$M_{nd} = \begin{cases} M_y, & \lambda_d \leq 0.673 \\ \left[1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right] \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y, & \lambda_d > 0.673 \end{cases} \quad (15)$$

Burada $\lambda_d = \sqrt{(M_y/M_{crd})}$ şeklinde hesaplanır. M_{crd} kritik distorsiyonel burkulma momenti sonlu elemanlar ya da sonlu şerit metodu kullanan analiz yöntemleri ile hesaplanır. Çalışmada CUFSM yazılımı kullanılmıştır.

3 Bulgular ve tartışma

Belirlenen 72 adet soğukta şekil verilmiş çelik profillerin eğilme dayanımı her üç tasarım yaklaşımı ile hesaplanmıştır. Elde edilen dayanım değerleri her bir profil için karşılaştırılmıştır. Ayrıca tasarım yöntemi kesitlerin göçme modu tahminleri de karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Tablo-2'de verilmiştir. Tabloda bulunan burkulma modları isimlendirilirken; LTB yanal burulmalı burkulma, F eğilmeli burkulma ve L lokal burkulma modunu temsil etmektedir. Sonuçlarda soğuk şekil verilmiş çelik elemanların tasarımında ülkemizde kullanılan TS EN 1993-1-3, Amerikan standardı AISI S100-16 ve DSM ile hesaplanan dayanımları verilmiştir. Tablo incelendiğinde TS EN 1993-1-3 eğilme dayanımı tahmininde AISI S100'e göre en fazla %10 farklılık gösterirken (Şekil 5) DSM yöntemi ile ise bu fark %14 seviyesinde olduğu görülmektedir (Şekil 6). Özellikler büyük gövde yüksekliğine sahip kesitlerde (C200, C250) bu fark büyük değerlere ulaşmaktadır. Burkulma modu tahmininde TS EN 1993-1-3 standardının diğer iki standarda göre farklılık göstermektedir. AISI S100 ile DSM arasında burkulma modu tahmini yakın görünse de özellikle etkileşimli modlarda tahminler arasında farklar oluşmaktadır. Dayanım tahmininde ise AISI S100 ile DSM arasında maksimum %17 fark görülmüştür (Şekil 7).

Kesitlerin eğilme dayanımları tahminleri incelendiğinde Şekil 5-7 tasarım yöntemler arasındaki tahmin farkının anlaşılmasını kolay hale getirmek amacıyla hazırlanmıştır. Şekil 5 incelendiğinde TS EN 1993-3-1 standardı kesit gövde narinliği arttıkça AISI S100'e göre daha yüksek moment değerleri tahmin etmiştir. İki standardın hesapladığı moment değerleri arasında en fazla %14 fark oluşmuştur. Ancak TS EN 1993-3-1 ile DSM arasındaki moment dayanım tahminleri incelendiğinde (Şekil 6) ise DSM gövde narinliği arttıkça daha güvenli tarafta moment değerleri hesaplamıştır. AISI ve DSM arasındaki moment dayanımları arasında ise DSM'nin büyük oranda güvenli tarafta moment değerleri hesapladığı görülmektedir (Şekil 7).

4 Sonuçlar

Ülkemizde soğuk şekil verilmiş çelik elemanların tasarımında kullanılan TS EN 1993-3-1 standardının C kesit şekline sahip eğilme elemanlarının tasarımında nasıl kullanıldığı kısaca açıklanmıştır. Ayrıca bu elemanların tasarımında kullanılan Amerikan standardı AISI S100-16 ve bu standardın önerdiği diğer tasarım yöntemi olan doğrudan dayanım metodunun hesaplama adımlarına kısaca

değirilmiştir. Ülkemiz çelik sektöründe kullanıma sunulan profillerden seçilen 72 adet soğuk şekil verilmiş çelik elemanın eğilme dayanımları yukarıda belirtilen üç tasarım yöntemi ile hesaplanmıştır. Çalışmanın son kısmında ise her üç yöntem ile hesaplanan dayanımlar ve burkulma modu tahminleri karşılaştırılmıştır.

Burkulma modları tahminleri karşılaştırıldığında, TS EN 1993-3-1 yapısı gereği kesitin elastik burkulma ya da yanal burulmalı burkulma yapması durumunu kontrol etmekte. Bu sebeple AISI S100 ve DSM' nin lokal burkulma olarak tahmin ettiği modu Eğilme burkulması olarak tahmin ettiği görülmektedir. Seçilen kesitlerin gövde yükseklikleri-kesit kalınlıkları oranı (gövde narinliği) arttıkça lokal burkulma modu hâkim olurken, küçük gövde narinliklerinde yanal burulmalı burkulma ve lokal-yanal burulmalı burkulma etkileşimi görülmektedir. Tasarım yapısı gereği DSM her bir burkulma modu için kritik gerilme hesapladığından burkulma modu tahminleri daha keskindir.

Bu sonuçlar ışığında soğuk şekil verilmiş çelik C elemanların gövde narinliği yüksek kesitlerde TS EN 1993-3-1 ile DSM yöntemi kullanılarak kontrol yapılması eleman güvenliği açısından fayda sağlayacaktır. Ancak düşük gövde narinliklerinde (C100, C150) tüm yöntemler birbirine yakın sonuçlar vermiştir.

Soğukta şekil verilmiş elemanlar doğaları gereği çok sayıda kesit şekline sahip olabilir. Bu sebeple her kesit şeklinin ve farklı malzeme özelliklerinin eleman davranışına olan etkisini belirlemek hem literatüre hem de sektöre önemli katkılar sağlamaktadır. Bu tür kesitler için özellikle Amerikan standartlarında sektör paydaşları için uygulamaya yönelik kesti taşıma gücü tabloları oluşturularak, bu tür kesitlerin karmaşık tasarım hesaplamaları yapmadan bir ön veri seti ortaya çıkarılmaktadır. Ülkemizde bu şekilde çalışmaların yapılmasının gerekli olduğu aşikardır.

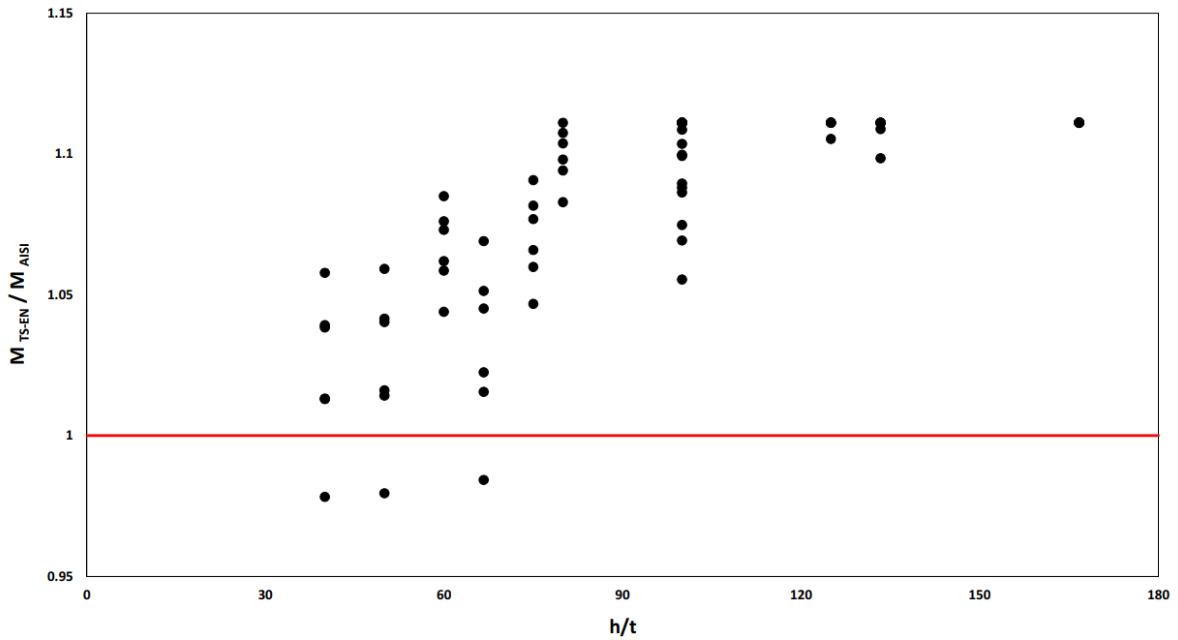
Gelecekte yapılacak çalışmalarda, soğukta şekil verilmiş çelik elemanların deneysel, torik ve numerik çalışmalar yapılması planlanmaktadır.

Tablo 2. Hesaplama sonucunda elde edilen moment değerleri

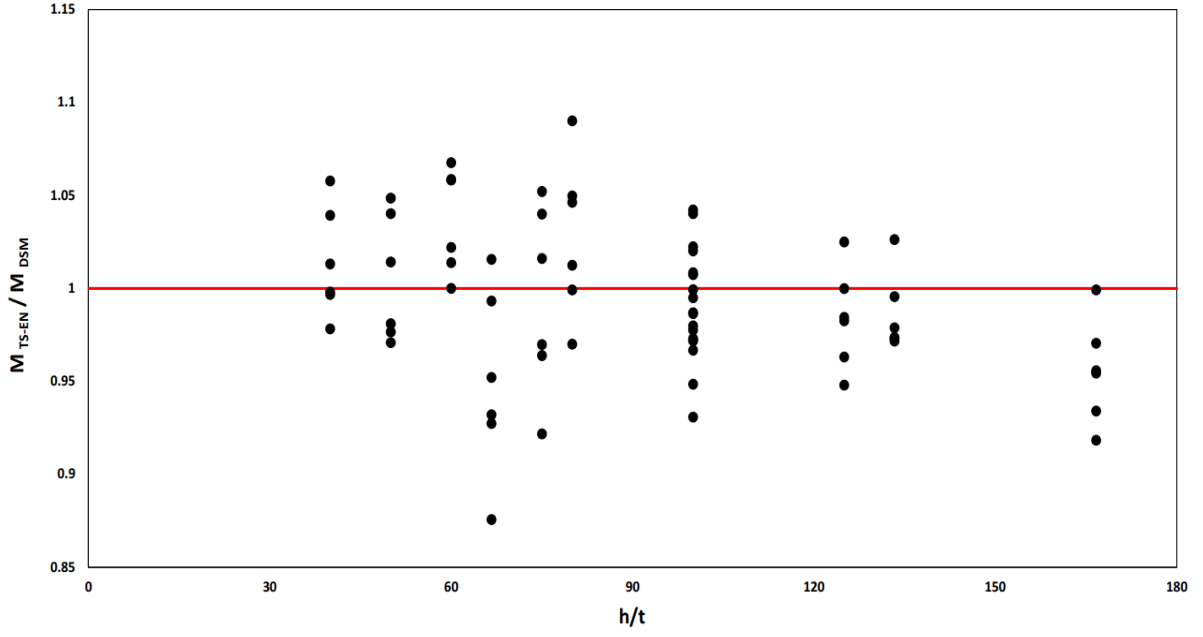
Profil ismi	TS EN 1993-3-1		AISI S100-16		DSM	
	Moment Dayanımı (kNm)	Mod.	Moment Dayanımı (kNm)	Mod.	Moment Dayanımı (kNm)	Mod.
C100.50.15.1,5	2.627	LTB	2.669	L	2.759	L+LTB
C100.50.15.2,0	3.54	LTB	3.614	L	3.625	L+LTB
C100.50.15.2,5	4.367	LTB	4.464	L	4.464	L+LTB
C100.60.15.1,5	2.911	LTB	2.847	L	3.123	L+LTB
C100.60.15.2,0	4.032	LTB	3.968	L	4.11	L+LTB
C100.60.15.2,5	5.078	LTB	5.013	L	5.088	L+LTB
C100.70.15.1,5	3.05	LTB	2.901	L	3.483	L+LTB
C100.70.15.2,0	4.461	LTB	4.283	L	4.595	L+LTB
C100.70.15.2,5	5.652	LTB	5.443	L	5.671	L+LTB
C100.50.25.1,5	2.941	LTB	2.896	L+LTB	2.896	L+LTB
C100.50.25.2,0	3.862	LTB	3.808	L+LTB	3.808	L+LTB
C100.50.25.2,5	4.757	LTB	4.695	L+LTB	4.695	L+LTB
C100.60.25.1,5	3.24	LTB	3.1	L	3.262	L+LTB
C100.60.25.2,0	4.466	LTB	4.293	L+LTB	4.293	L+LTB
C100.60.25.2,5	5.506	LTB	5.298	L+LTB	5.298	L+LTB
C100.70.25.1,5	3.344	LTB	3.128	L	3.606	L
C100.70.25.2,0	5.011	LTB	4.731	L+LTB	4.779	L+LTB
C100.70.25.2,5	6.242	LTB	5.901	L+LTB	5.901	L+LTB
C150.70.20.1,5	5.408	LTB	5.124	L	5.81	L
C150.70.20.2,0	7.852	LTB	7.501	L	7.55	L
C150.70.20.2,5	9.932	LTB	9.514	L	9.718	L+LTB
C150.80.20.1,5	5.577	LTB	5.189	L	5.88	L
C150.80.20.2,0	8.328	LTB	7.813	L	8.587	L+LTB
C150.80.20.2,5	10.777	LTB	10.148	L	10.63	L+LTB
C150.90.20.1,5	5.694	LTB	5.226	L	5.89	L
C150.90.20.2,0	8.582	LTB	7.934	L	9.31	L+LTB
C150.90.20.2,5	11.541	LTB	10.725	L	11.54	L+LTB
C150.70.30.1,5	5.772	LTB	5.398	L	5.904	L
C150.70.30.2,0	8.617	LTB	8.13	L	8.19	L+LTB
C150.70.30.2,5	10.733	LTB	10.139	L+LTB	10.139	L+LTB
C150.80.30.1,5	5.888	LTB	5.42	L+LTB	6.059	L
C150.80.30.2,0	9.066	LTB	8.419	L+LTB	8.922	L+LTB
C150.80.30.2,5	11.798	LTB	10.995	L+LTB	11.051	L+LTB
C150.90.30.1,5	5.956	LTB	5.416	L+LTB	6.126	L

Tablo 2. (Devam) Hesaplama sonucunda elde edilen moment değerleri

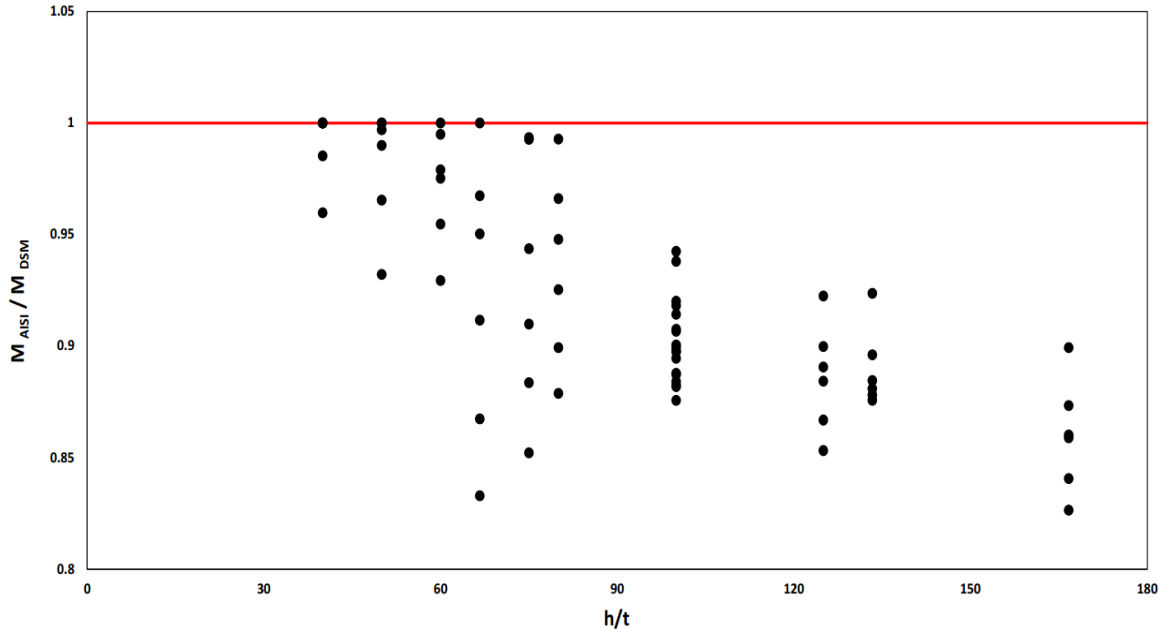
C150.90.30.2,0	9.306	LTB	8.532	L+LTB	9.655	L+LTB
C150.90.30.2,5	12.66	LTB	11.668	L+LTB	11.964	L+LTB
C200.90.30.1,5	8.378	F+LTB	7.627	L	8.622	L
C200.90.30.2,0	13.457	F+LTB	12.368	L	13.734	L
C200.90.30.2,5	18.106	F+LTB	16.72	L	17.306	L+LTB
C200.100.30.1,5	8.479	F+LTB	7.647	L	8.709	L
C200.100.30.2,0	13.739	F+LTB	12.498	L	13.921	L
C200.100.30.2,5	18.758	F+LTB	17.144	L	18.528	L+LTB
C200.110.30.1,5	8.508	F+LTB	7.657	L	8.743	L
C200.110.30.2,0	13.965	F+LTB	12.597	L	14.036	L
C200.110.30.2,5	19.158	F+LTB	17.357	L	19.75	L+LTB
C200.90.50.1,5	8.864	F+LTB	7.978	L	8.637	L
C200.90.50.2,0	14.336	F+LTB	12.99	L	13.783	L
C200.90.50.2,5	19.858	F+LTB	18.085	L	18.216	L+LTB
C200.100.50.1,5	8.835	F+LTB	7.952	L	8.874	L
C200.100.50.2,0	14.518	F+LTB	13.066	L	14.2	L
C200.100.50.2,5	20.404	F+LTB	18.424	L	19.438	L+LTB
C200.110.50.1,5	8.797	F+LTB	7.917	L	8.987	L
C200.110.50.2,0	14.567	F+LTB	13.11	L	14.459	L
C200.110.50.2,5	20.643	F+LTB	18.579	L	20.66	L+LTB
C250.120.50.1,5	11.447	F	10.302	L	11.994	L
C250.120.50.2,0	19.034	F	17.131	L	19.371	L
C250.120.50.2,5	27.802	F	25.022	L	27.82	L
C250.130.50.1,5	11.37	F	10.233	L	12.172	L
C250.130.50.2,0	18.96	F	17.064	L	19.685	L
C250.130.50.2,5	27.872	F	25.084	L	28.254	L
C250.140.50.1,5	11.265	F	10.138	L	12.267	L
C250.140.50.2,0	18.834	F	16.95	L	19.867	L
C250.140.50.2,5	27.852	F	25.067	L	28.625	L
C250.120.70.1,5	11.707	F	10.537	L	11.717	L
C250.120.70.2,0	19.485	F	17.536	L	19.01	L
C250.120.70.2,5	28.5	F	25.65	L	27.347	L
C250.130.70.1,5	11.654	F	10.488	L	12.008	L
C250.130.70.2,0	19.445	F	17.5	L	19.448	L
C250.130.70.2,5	28.608	F	25.748	L	28.042	L
C250.140.70.1,5	11.599	F	10.439	L	12.136	L
C250.140.70.2,0	19.393	F	17.545	L	19.7	L
C250.140.70.2,5	28.681	F	25.813	L	28.442	L



Şekil 4. M_{TS-EN} / M_{AISI} gövde narınlığına göre değişimi



Şekil 5. M_{TS-EN} / M_{DSM} gövde narinliğine göre değişimi



Şekil 6. M_{AIS1} / M_{DSM} gövde narinliğine göre değişimi

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı: (iThenticate): %5

Kaynaklar

- [1] K. Piyawat, C. Ramseyer and T.H.K. Kang, Development of an axial load capacity equation for doubly symmetric built-up cold-formed sections, Journal of Structural Engineering, 139(2), 789-803, 2013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000780](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000780)
- [2] T. Von Karman, E.E. Sechler and L. H. Donnell, The strength of thin plates in compression. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 54(2), 53-56, 1932. <https://doi.org/10.1115/1.4021738>
- [3] G. Winter, Strength of thin steel compression flanges, Transactions of the American Society of Civil Engineers, 112(1), 527-554, 1947. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006092>
- [4] B.W. Schafer and T. Peköz, Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions. 14th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, pp 69-76, St. Louis, Missouri U.S.A, October 15-16, 1998.
- [5] TS EN 1993-1-3, Çelik yapıların projelendirilmesi- Bölüm 1-3: Genel kurallar- Soğukta biçimlendirilmiş

- ince ölçülü elemanlar ve saçla kaplama için. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2007.
- [6] AISI S100-16, North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. American Iron and Steel Institute, Washington, DC, 2016.
- [7] EN 1993-1-3 (2006) (English): Eurocode 3: Design of steel structures- Part 1-3: General rules- Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. 2006, The European Union Per Regulation: Brussels.
- [8] D. Dubina, V. Ungureanu and R. Landolfo, Design of Cold-formed Steel Structures: Eurocode 3: Design of Steel Structures, European Convention for Constructional Steelwork, 2012.
- [9] C.D.Moen and B. W. Schafer, Direct Strength Method for Design of Cold-Formed Steel Columns with Holes, Journal of structural engineering, 137(5), 559-570, 2011. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000310](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000310)
- [10] B.W. Schafer, Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design. Journal of Constructional Steel Research, 64(7-8), 766-778, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.01.022>
- [11] C. Yu and B.W. Schafer, Local buckling tests on cold-formed steel beams, Journal of structural engineering, 129(12),1596-1606,2003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:12\(1596\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:12(1596))
- [12] C. Yu and B.W. Schafer, Distortional buckling tests on cold-formed steel beams. Journal of structural engineering,132(4),515-528,2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:4\(515\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:4(515))
- [13] E.D. Batista, Local-global buckling interaction procedures for the design of cold-formed columns: Effective width and direct method integrated approach. Thin-Walled Structures, 47(11), 1218-1231, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2009.04.004>
- [14] E.D. Batista, Effective section method: A general direct method for the design of steel cold-formed members under local-global buckling interaction. Thin-Walled Structures, 48(4-5), 345-356, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2009.11.003>
- [15] P.B. Dinis and D. Camotim, Local/distortional mode interaction in cold-formed steel lipped channel beams. Thin-Walled Structures, 48(10-11), 771-785, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.01.005>
- [16] L. Laim, J.P.C. Rodrigues, and L.S. da Silva, Experimental and numerical analysis on the structural behaviour of cold-formed steel beams. Thin-Walled Structures,72,1-13,2013. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.06.008>
- [17] M. Anbarasu, Local-distortional buckling interaction on cold-formed steel lipped channel beams. Thin-Walled Structures, 98, 351-359, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.10.003>
- [18] A.D. Martins et al., Distortional failure of cold-formed steel beams under uniform bending: Behaviour, strength and DSM design. Thin-Walled Structures, 118,196-213,2017. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.04.009>
- [19] S.G. Fan et al., Experimental study and numerical simulation analysis of distortional buckling capacity of stainless steel lipped C-section beams. Engineering Structures,250,2022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113428>
- [20] Johns Hopkins University, CUFSM (version 5.04) Finite strip elastic buckling analysis program, <http://www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm/> , 2020.

