



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 18.03.2025
Kabul Tarihi : 30.05.2025

Received Date : 18.03.2025
Accepted Date : 30.05.2025

SOĞUKTA ŞEKİL VERİLMİŞ ÇELİK GÖVDE DELİKLİ KESİTLERİN BURKULMA KAPASİTELERİNİN FARKLI YAKLAŞIMLARLA İNCELENMESİ

BUCKLING CAPACITY OF COLD-FORMED STEEL SECTIONS WITH WEB HOLES USING DIFFERENT APPROACHES

Ramazan ORUÇ¹ (ORCID: 0000-0002-1650-4145)

¹ Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ramazan Oruç, ramazanoruc@aksaray.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, gövde delikli soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin eğilme etkisi altındaki burkulma davranışını incelemektedir. Delikli kesitler, elektrik, su ve havalandırma sistemleri için gerekli boşlukları sağlamak amacıyla yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu delikler, kesitin mekanik özelliklerini ve burkulma davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu kapsamda, delik yüksekliği, delik uzunluğu ve kesit yüksekliği gibi değişkenler dikkate alınarak, CUFSM programı kullanılarak deliksiz ve delikli kesitler için elastik burkulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, farklı yaklaşımların lokal ve distorsiyonel burkulma kapasitelerini tahmin etmedeki etkinliği karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, delik yüksekliği ve delik uzunluğunun burkulma kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Özellikle delik uzunluğunun 80 mm'yi aşması durumunda, lokal burkulma kapasitesinin arttığı, ancak distorsiyonel burkulma kapasitesinin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, farklı yöntemlerin karşılaştırılması sonucunda, Moen ve Schafer tarafından geliştirilen yaklaşımının standart hesaplamalarla benzer sonuçlar verdiği, buna karşın bazı diğer yöntemlerin lokal burkulma kapasitesini yüksek, distorsiyonel burkulma kapasitesini ise düşük tahmin ettiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: CUFSM, elastik burkulma analizi, hesaplama yöntemleri, soğukta şekil verilmiş çelik.

ABSTRACT

This study examines the buckling behavior of cold-formed steel sections with web holes under bending. Perforated sections are widely used in structural applications to accommodate openings for electrical, plumbing, and ventilation systems. However, these holes significantly affect the section's mechanical properties and buckling behavior. Elastic buckling analyses were conducted for both perforated and non-perforated sections using CUFSM, considering variables such as hole height, hole length, and section height. Additionally, the effectiveness of different approaches in predicting local and distortional buckling capacities was compared. The results indicate that hole height and hole length significantly influence buckling capacity. In particular, when the hole length exceeds 80 mm, local buckling capacity increases, while distortional buckling capacity decreases. Furthermore, comparison of different methods revealed that the approach developed by Moen and Scahfer produced results similar to standart approaches, whereas some other methods tended to overestimate the local buckling capacity and underestimate the distortional buckling capacity.

Keywords: CUFSM, Elastic buckling analysis, calculation methods, cold-formed steel.

GİRİŞ

Soğukta şekil verilmiş çelik kesitler hafiflikleri, yüksek mukavemet/ağırlık oranları ve esnek üretim süreçleri nedeniyle modern mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kesitler özellikle depolama sistemleri, endüstriyel yapılar, prefabrik yapılar ve hafif çelik çerçeve sistemleri gibi birçok alanda tercih edilmektedir. Ancak, bu kesitlerin ince cidarlı olması ve karmaşık kesit geometrileri burkulma davranışlarını önemli ölçüde etkilemekte ve tasarım sürecinde dikkate alınması gerekmektedir. Soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerde burkulma global, lokal, distorsiyonel ve bu burkulma modlarının birbiri ile etkileşimi şeklinde olabilmektedir.

Yapısal verimliliği artırmak ve malzeme kullanımını optimize etmek amacıyla soğukta şekil verilmiş çelik delikli kesitler kullanılmaktadır. Bu kesitler özellikle elektrik, su ve havalandırma sistemleri için gerekli açıklıkların sağlanmasında büyük avantajlar sunmaktadır. Kesitlerde yer alan bu delikler gövde veya başlık bölgesinde bulunabilmekte ve geometrileri itibarıyla de dikdörtgen, kare ve dairesel formlarda olabilmektedir. Öte yandan, kesitlerde açılan delikler kesitin mekanik özelliklerini ve burkulma davranışını etkilemektedir. Delikler kesitin efektif alanını azaltmasıyla birlikte kesitin burkulma modlarını ve kritik burkulma yüklerini değiştirebilmektedir (Moen & Schafer, 2006; Moen & Schafer, 2008; Grey & Moen, 2011). AISI S100 standardına göre, deliklerin kesit davranışı üzerindeki etkilerine dair bazı temel kurallar benimsenmiştir. Buna göre, dikdörtgen veya uzunlamasına delikler, kare ve dairesel deliklere kıyasla lokal burkulma dayanımını daha fazla azaltmakta; gövde delikleri ise distorsiyonel burkulma dayanımını her zaman olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca, deliklerin global burkulma kapasitesini daima azalttığı ve eleman boyunca delik sayısı arttıkça yapısal dayanımın da orantılı olarak azaldığı kabul edilmektedir. Ayrıca, AISI S100, AS/NZS 4600 ve Eurocode EN 1993-1-3 gibi standartlar, soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin lokal, distorsiyonel ve global burkulma kapasitelerinin hesaplanması için yöntemler sunmaktadır. Ancak delikli kesitlerin burkulma kapasiteleri için AISI S100 ve AS/NZS 4600 standartları tarafından çözüm yöntemleri sunulurken Eurocode EN 1993-1-3 standardında böyle bir çözüm yöntemi mevcut değildir.

Soğukta şekil verilmiş delikli elemanların burkulma davranışının incelenmesi birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve günümüzde ise halen araştırmacılar tarafından etraflıca araştırılmaya devam etmektedir. Literatürde soğukta şekil verilmiş delikli elemanlar ile ilgili yapılan deneysel, nümerik ve analitik çalışmalar mevcuttur. (Moen & Schafer, 2009), delikli kolon ve kirişlerde elastik kritik global, lokal ve distorsiyonel burkulma yüklerinin hesaplanabilmesi için basitleştirilmiş bir yöntem sunmuştur. (Moen & Schafer, 2010), gövde delikli kiriş elemanlarda global, lokal ve distorsiyonel burkulma şekilleri için kritik elastik burkulma momentlerinin hesaplanmasına yönelik yaklaşımlar dikkate alınmıştır. (Yu, 2012), dairesel delikli plakaların ve C kesitli elemanların stabilitesini sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etmiştir. (Moen et. al., 2013) tarafından yapılan çalışmada gövdesinde dikdörtgen delik bulunan soğukta şekil verilmiş C kesitli eğilme elemanlarının davranışını incelemek için deneysel çalışma yürütülmüştür. (Wang & Young, 2015) gövdesi dairesel delikli yapma kesitlerin (build-up) eğilme davranışının incelenmesi amaçlanmış ve deneysel çalışmalar yürütülerek DSM yöntemi için öneriler sunulmuştur ardından (Wang & Young, 2017) bu çalışmayı parametrik analizlerle desteklemiştir. (Yuan et. al., 2017) gövdesi dairesel delikli C kesitlerin distorsiyonel burkulma davranışlarının incelenmesi için nümerik ve analitik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. (Zhao et. al., 2019) gövde delikli C kesitlerin eğilme davranışını deneysel ve nümerik olarak araştırmıştır. (Pham et. al., 2020) tarafından yürütülen çalışma ile gövdesi dikdörtgen ve kanallı delikli C kesitlerin kesme yükü etkisinin incelenmesi deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. (Chen et. al., 2020), takviyeli gövde deliklerinin C kesitlerin moment taşıma kapasitesine etkisini değerlendirirken, Chen et al. (2021) bu incelemeyi sırt sırta bağlanmış yapma C kesitler için genişletmiştir. (Fang et. al., 2021) tarafından yapılan çalışmada eksenel yük altındaki gövde delikli C kesitlerin performansının incelenmesi için derin öğrenme (deep learning) tabanlı metodoloji geliştirilmiştir. (Yu et. al., 2022) tarafından yapılan çalışma ile dairesel gövde boşluğu bulunan kiriş elemanlarda kritik başlık ve gövde distorsiyonel burkulma gerilmesinin hesaplanması için analitik çözümleri kapsamaktadır. (Dai et. al., 2022), makine öğrenmesi (machine learning) kullanarak eğilme etkisindeki gövde delikli C kesitlerin moment kapasitesini belirlemeye yönelik bir model geliştirmiştir. (Wang et. al., 2022), gövde delikli eğilme elemanlarının kesme davranışının incelenmesi deneysel ve nümerik olarak gerçekleştirilmiştir. (Qin et. al., 2023) ise delikler arası mesafe, boşluk konumu ve delik geometrisi gibi parametreleri dikkate alarak, bu elemanların distorsiyonel burkulma yüklerini analitik olarak belirlemiştir. (Wang et. al., 2024) yapılan çalışmada eğilme ve kesme etkisi altındaki soğukta şekil verilmiş çelik elemanlarda takviyeli gövde deliklerin etkisinin incelenmesi deneysel ve nümerik olarak gerçekleştirilmiştir. (Chandramohan et. al. 2024) tarafından yapılan çalışmada uzunlamasına gövde deliklerin kesme kapasitesine olan etkisinin incelenmesi için nümerik çalışma gerçekleştirilmiştir. (Chandramohan et. al. 2025) tarafından yapılan çalışma, eğilme etkisi altındaki C kesitlere takviyesiz ve takviyeli uzunlamasına gövde deliklerinin etkisinin incelenmesi deneysel ve nümerik olarak gerçekleştirilerek DSM tasarım denklemlerine önerileri kapsamaktadır.

(Oruç, 2025) tarafından yapılan çalışmada, gövde delikli C kesitlerin eğilme etkisi altındaki davranışlarının incelenmesi için deneysel ve nümerik çalışmalar gerçekleştirilmiş ve DSM tasarım denklemlerine lokal burkulma kapasitesinin belirlenebilmesi için denklemler önerilmiştir.

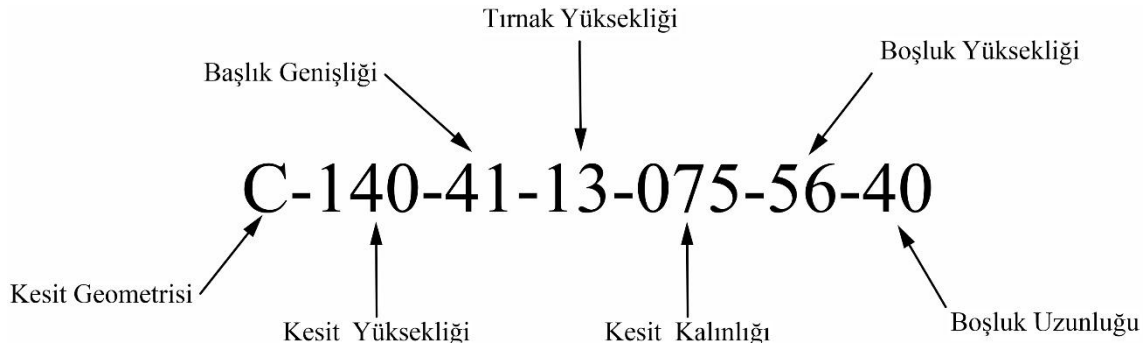
Bu çalışmanın amacı, gövdesinde delik bulunan soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin eğilme etkisi altındaki burkulma davranışlarını incelemek ve farklı hesaplama yaklaşımlarının bu kesitlerin burkulma kapasitesini tahmin etmedeki etkinliğini değerlendirmektir. Çalışma kapsamında delik yüksekliği, delik uzunluğu ve kesit yüksekliği gibi parametreler dikkate alınarak, CUFSM (Constrained and Unconstrained Finite Strip Method) programı aracılığıyla delikli ve deliksiz kesitler için elastik burkulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin burkulma davranışının doğru bir şekilde analiz edilebilmesi ve bu kesitlerin güvenli bir şekilde tasarlanabilmesi amacıyla, çeşitli standartlar ve araştırmacılar tarafından farklı hesaplama yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar, kesitlerin lokal ve distorsiyonel burkulma kapasitelerinin belirlenmesine yönelik farklı formüller sunmaktadır. Çalışmada bu yöntemler kullanılarak elde edilen lokal ve distorsiyonel burkulma kapasitesi karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

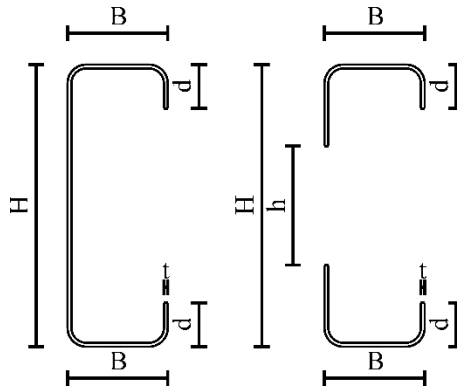
Bu çalışmada, eğilme etkisi altındaki gövde delikli soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin burkulma davranışını ve burkulma kapasitesini analiz etmek için farklı yaklaşımlar dikkate alınmıştır. Bu bölümde, kullanılan kesitlerin özellikleri, analiz yöntemi ve hesaplama yaklaşımları verilmiştir.

Deliksiz ve Delikli Elemanların Özellikleri

Çalışmada kullanılan soğukta şekil verilmiş çelik kesitler deliksiz ve delikli olmak üzere iki farklı durumda incelenmiştir. Deliksiz ve delikli elemanların isimlendirilmesi Şekil 1’de kesit özellikleri ise Şekil 2’de verilmiştir. Deliksiz elemanların kesit ölçüleri Tablo 1’de verilmiştir. Delikli kirişlerde ise delik yüksekliği ve delik uzunluğu değişkenleri dikkate alınmıştır. Delik boyutları Tablo 2’de verilmiştir. Burada delik yüksekliği 0.1H ile 0.9H arasında değişiklik gösterirken her bir delik yüksekliği için 10, 20, 40, 80, 160 ve 320 mm delik uzunluğu dikkate alınmıştır.



Şekil 1. Deliksiz Ve Delikli Elemanların İsimlendirilmesi.



Şekil 2. Deliksiz Ve Delikli Elemanların Kesit Özellikleri.

Tablo 1. Eleman Kesit Ölçüleri.

Eleman	Kesit Yüksekliği, H (mm)	Başlık Genişliği, B (mm)	Tırnak Yüksekliği, d (mm)	Kalınlık, t (mm)
C-140-41-13-075-0-0	140	41	13	0.75
C-203-41-13-075-0-0	203	41	13	0.75

Tablo 2. Delik Boyutları.

Delik Yüksekliği, h (mm)	Delik Uzunluğu, L _h (mm)
0.1H	10 20 40 80 160 320
0.2H	10 20 40 80 160 320
.	.
.	.
.	.
0.9H	10 20 40 80 160 320

CUFSM Programı

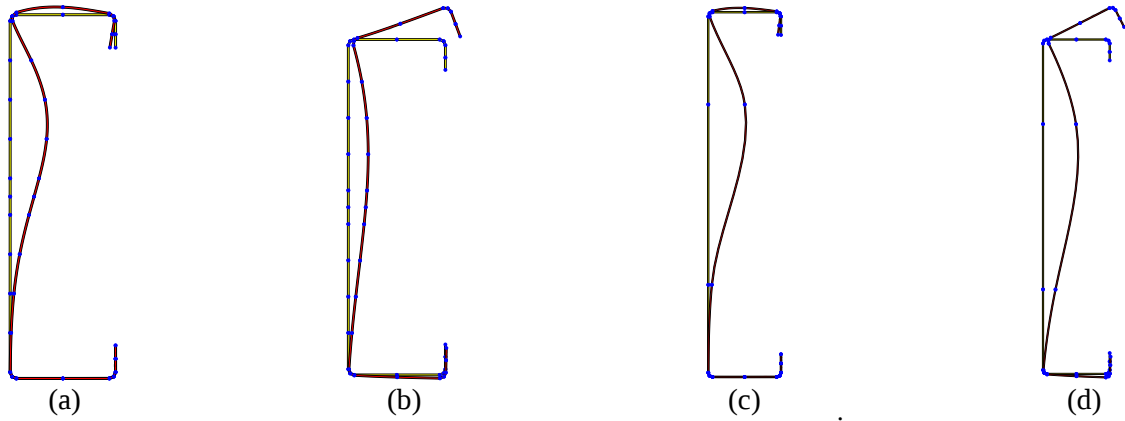
CUFSM (Constrained and Unconstrained Finite Strip Method) soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin burkulma analizlerini gerçekleştirmek için geliştirilen açık kaynak kodlu bir bilgisayar programıdır (Schafer & Adany, 2006; Li & Schafer, 2010; Jin et. al., 2024). CUFSM programı özellikle lokal ve distorsiyonel burkulma modlarının analizi için yaygın olarak kullanılmaktadır. CUFSM kesitlerin elastik burkulma davranışlarını incelemek için sonlu şerit yöntemini (Finite Strip Method) kullanmaktadır. Sonlu şerit yöntemi kesitlerin burkulma modlarını ve bu burkulma modlarına karşılık gelen kritik burkulma yüklerinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. CUFSM programının temel işlevi tanımlanan kesit geometrisinin analizini yaparak kesitin lokal, distorsiyonel ve global burkulma gibi farklı burkulma modlarının ve bu burkulma modlarına karşılık gelen kritik burkulma yüklerinin hesaplanmasını kapsamaktadır.

Çalışmada kullanılan C-140 ve C-203 kesitli elemanların CUFSM programı elastik burkulma analizleri yapılarak lokal ve distorsiyonel burkulma modları elde edilmiş (Şekil 3) ve burkulma modlarına karşılık gelen kritik elastik burkulma moment değerleri ise Şekil 4'te karakteristik burkulma eğrisinde verilmiştir. Karakteristik burkulma eğrisinde düşey eksen M_{cr}/M_y oranını ifade ederken yatay eksen ise burkulma modlarının meydana geldiği yarımdalga boylarını ifade etmektedir. Ayrıca, lokal burkulma modu, kesitin küçük dalga boylarında meydana gelirken distorsiyonel burkulma modu daha büyük dalga boylarında meydana gelmektedir.

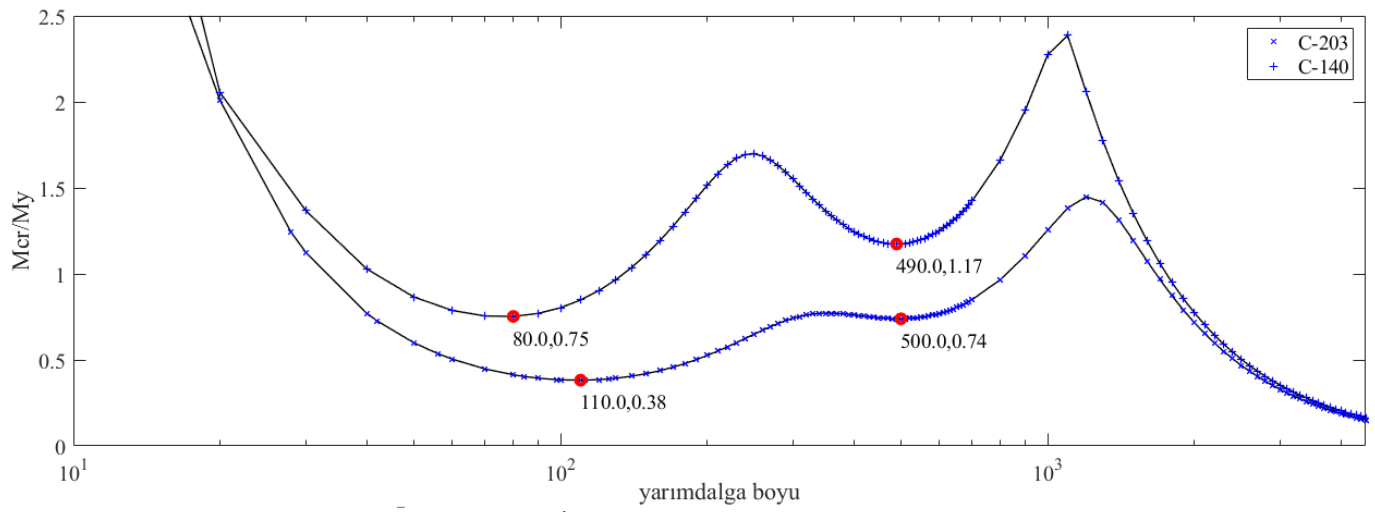
CUFSM programında deliksiz kesitlerin yanı sıra delikli kesitlerin de kesit özelliklerinin tanımlanması için kullanılabilir. Bunun için lokal burkulma ve distorsiyonel burkulma modlarının belirlenebilmesi için bir takım prosedürlerin takip edilmesi gerekmektedir (Moen & Schafer, 2008; Moen & Schafer, 2010). Delikli kesitlerde lokal burkulma modlarının elde edilebilmesi için öncelikle delik boyunca sıfır kalınlıklı eleman tanımlanması gerekmektedir (Şekil 5a). Distorsiyonel burkulma modlarının elde edilebilmesi için ise Denklem 15'te verilen azaltılmış kesit kalınlığı hesaplanarak gövde kalınlığı olarak tanımlanması gerekmektedir (Şekil 5b).

Elastik burkulma analizlerinde kullanılan kesitlerin malzeme özellikleri ise elastisite modülü 203 GPa, poisson oranı 0.3, kayma modülü 78 GPa ve akma gerilmesi 220 MPa olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca, elastik burkulma analizlerinde kesitlerin yanıl ötelemesinin sınırlandırıldığı kabulü yapılarak yanıl burulmalı burkulma davranışı dikkate alınmamıştır. Elastik burkulma analizlerinde kesitler basit mesnetli olarak tanımlanmış ve basit eğilme etkisi dikkate alınmıştır.

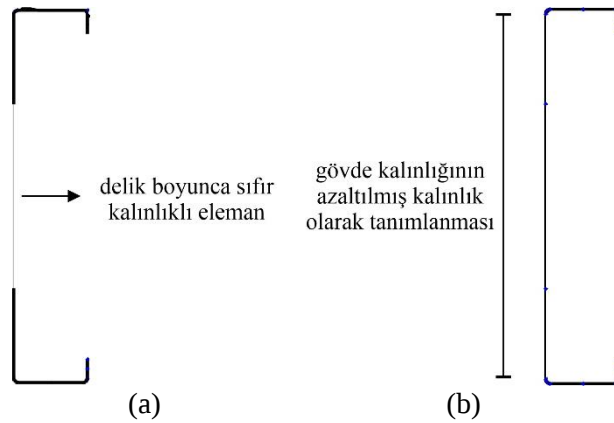
Soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin burkulma davranışını analiz etmek ve kesitlerin tasarımı için gerekli hesaplamaları yapmak için çeşitli standartlar ve araştırmacılar tarafından yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar kesitlerin lokal ve distorsiyonel burkulma kapasitelerinin belirlenmesi için farklı formüller ve yöntemler önermektedir.



Şekil 3. CUFSM Elastik Burkulma Analizi Sonucunda **a-b.** C-140 Eleman İçin Sırasıyla Lokal Burkulma Ve Distorsiyonel Burkulma **c-d.** C-203 Eleman İçin Sırasıyla Lokal Burkulma Ve Distorsiyonel Burkulma Şekli.



Şekil 4. Deliksiz Kirişler İçin Elde Edilen Karakteristik Burkulma Eğrisi.



Şekil 5. Net Kesit Özelliklerinin Tanımlanması **a.** Lokal Burkulma **b.** Distorsiyonel Burkulma.

AISI S100 ve AS/NZS 4600 yaklaşımı

Deliksiz kirişlerde lokal burkulma kapasitesinin hesaplanması için;

$$\lambda_t \leq 0.776$$

$$M_{nl} = M_{ne}$$

$$\lambda_t > 0.776$$

(1)

$$M_{nl} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} M_{ne} \quad (2)$$

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{M_{ne}}{M_{crl}}} \quad (3)$$

Burada M_{nl} lokal burkulma için nominal moment kapasitesini, M_{ne} akma ve global burkulma için nominal moment kapasitesini, M_{crl} lokal burkulma için kritik elastik moment kapasitesini ve λ_l lokal burkulma için narinlik oranını ifade etmektedir.

Distorsiyonel burkulma kapasitesi için;

$$\lambda_d \leq 0.673$$

$$M_{nd} = M_y \quad (4)$$

$$\lambda_d > 0.673$$

$$M_{nd} = \left[1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right] \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y \quad (5)$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}} \quad (6)$$

Burada M_{nd} distorsiyonel burkulma için nominal moment kapasitesini, M_y akma moment kapasitesini, M_{crd} distorsiyonel burkulma için kritik elastik moment kapasitesini ve λ_d distorsiyonel burkulma için narinlik oranını ifade etmektedir.

Delikli kirişlerde lokal burkulma kapasitesi için;

$$\lambda_l \leq 0.776$$

$$M_{nl} \leq M_{ynet} \quad (7)$$

$$\lambda_l > 0.776$$

$$M_{nl} = \left[1 - 0.15 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} \right] \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0.4} M_{ne} \quad (8)$$

M_{ynet} net kesit için akma moment kapasitesini ifade etmektedir.

Delikli kirişlerde distorsiyonel burkulma kapasitesi için;

$$\lambda_d \leq \lambda_{d1}$$

$$M_{nd} = M_{ynet} \quad (9)$$

$$\lambda_{d1} < \lambda_d \leq \lambda_{d2}$$

$$M_{nd} = M_{ynet} - \left(\frac{M_{ynet} - M_{d2}}{\lambda_{d2} - \lambda_{d1}} \right) (\lambda_d - \lambda_{d1}) \leq \left[1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} \right] \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.5} M_y \quad (10)$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}} \quad (11)$$

$$\lambda_{d1} = 0.673 \left(\frac{M_{ynet}}{M_y} \right)^3 \quad (12)$$

$$\lambda_{d2} = 0.673 \left[1.7 \left(\frac{M_y}{M_{ynet}} \right)^{2.7} - 0.7 \right] \quad (13)$$

$$M_{d2} = \left[1 - 0.22 \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right) \right] \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right) M_y \quad (14)$$

$$t_r = t \left(1 - \frac{L_h}{L_{crd}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

Burada M_{crd} delikli kiriş için kritik elastik distorsiyonel burkulma moment kapasitesini, t_r azaltılmış gövde kalınlığını, L_h delik uzunluğunu ve L_{crd} distorsiyonel burkulmanın oluştuğu yarımdalga boyunu ifade etmektedir.

Moen & Schafer, 2010 yaklaşımı

Lokal burkulma kapasitesinin hesaplanması için önerilen formülde, AISI S100 ve AS/NZS 4600 standart yaklaşımlarından farklı olarak M_{crd} değerinin hesaplanması için aşağıdaki formül önerilmiştir;

$$M_{crl} = \min(M_{crlg}, M_{crlh}) \quad (16)$$

Distorsiyonel burkulma kapasitesi için;

$$\lambda_d \leq \lambda_{d1}$$

$$M_{nd} = M_{ynet} \quad (17)$$

$$\lambda_{d1} < \lambda_d \leq \lambda_{d2}$$

$$\left[M_{ynet} - \left(\frac{M_{ynet} - M_{d2}}{\lambda_{d2} - \lambda_{d1}} \right) (\lambda_d - \lambda_{d1}) \right] \quad (18)$$

$$\lambda_d > \lambda_{d2}$$

$$\left[\left[1 - 0.22 \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.6} \right] \left(\frac{M_{crd}}{M_y} \right)^{0.6} M_y \right] \quad (19)$$

$$\lambda_d = \left(\frac{M_y}{M_{crd}} \right)^{0.5} \quad (20)$$

$$\lambda_{d1} = 0.673 \left(\frac{M_{ynet}}{M_y} \right) \quad (21)$$

$$\lambda_{d2} = 0.673 \left[1.7 \left(\frac{M_y}{M_{ynet}} \right)^{1.7} - 0.7 \right] \quad (22)$$

$$M_{d2} = \left[1 - 0.22 \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right)^{0.5} \right] \left(\frac{1}{\lambda_{d2}} \right)^{0.5} M_y \quad (23)$$

Wang & Young, 2017 yaklaşımı

Delikli kirişlerin lokal burkulma kapasitesinin hesaplanması için araştırmacılar tarafından aşağıdaki denklemler önerilmiş ancak distorsiyonel burkulma kapasitesinin hesaplanması için ise denklemler önerilmemiştir.

$$\lambda_l \leq 0.936$$

$$M_{nl} = M_{ynet} \quad (24)$$

$$\lambda_t > 0.936$$

$$M_{nl} = \left[1 - 0.04 \left(\frac{M_{crl}}{M_y} \right)^{0.32} \right] \left(\frac{M_{crl}}{M_y} \right)^{0.32} M_y \quad (25)$$

Oruç, 2025 yaklaşımı

Delikli kirişlerin lokal burkulma kapasitesinin hesaplanması için araştırmacı tarafından aşağıdaki denklemler önerilmiş ancak distorsiyonel burkulma kapasitesinin hesaplanması için ise denklemler önerilmemiştir.

$$\lambda_t \leq 0.6$$

$$M_{nl} = M_{ynet} \quad (26)$$

$$\lambda_t > 0.6$$

$$M_{nl} = \left[1 - 0.2 \left(\frac{M_{crl}}{M_y} \right)^{0.63} \right] \left(\frac{M_{crl}}{M_y} \right)^{0.63} M_y \quad (27)$$

Chandramohan et. al., 2025 yaklaşımı

Lokal burkulma moment kapasitesinin hesaplanması için;

$$\lambda_t \leq 0.776$$

$$M_{blp} = M_{be} \leq M_{ynet} \quad (28)$$

$$\lambda_t > 0.776$$

$$M_{blp} = \left[1.81 - 0.9 \left(\frac{M_{crlh}}{M_{ynet}} \right)^{0.5} \right] \left(\frac{M_{crlh}}{M_{ynet}} \right)^{0.5} M_{ynet} \quad (29)$$

Distorsiyonel burkulma moment kapasitesi için;

$$\lambda_d \leq 0.873$$

$$M_{bdp} = M_y \leq M_{ynet} \quad (30)$$

$$\lambda_t > 0.873$$

$$M_{bdp} = \left[1.2 - 0.99 \left(\frac{M_{ynet}}{M_{crdh}} \right)^{0.06} \right] M_{ynet} \quad (31)$$

BULGULAR

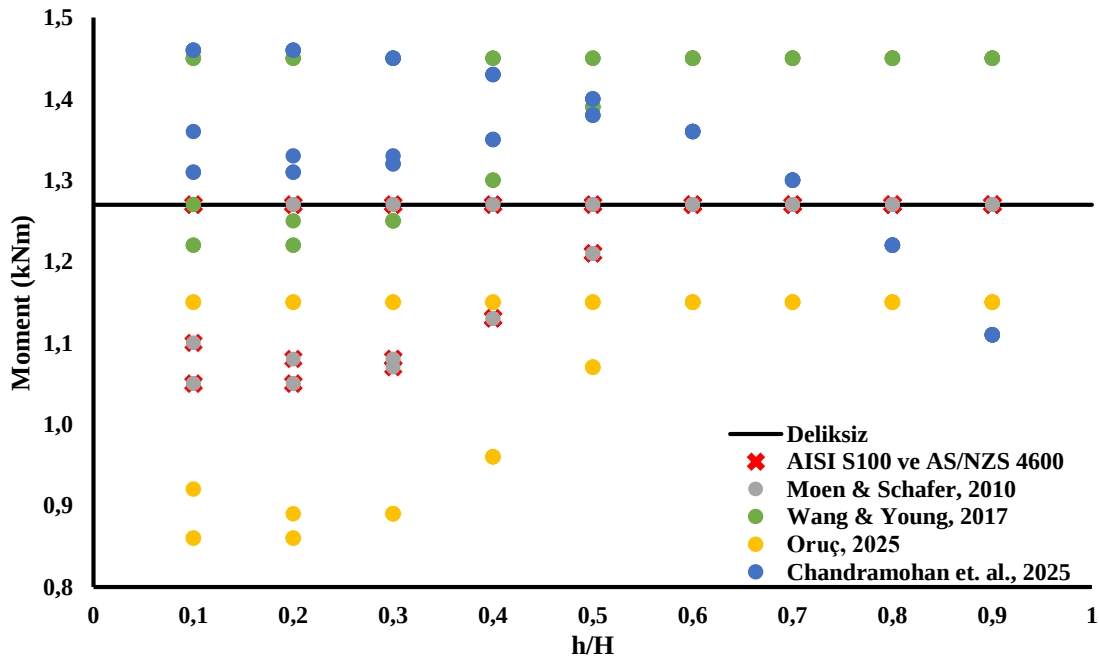
Bu çalışmada, deliksiz ve delikli soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin burkulma davranışı ve burkulma kapasiteleri incelenmiştir. Elastik burkulma analizleri CUFSM programında gerçekleştirilmiş ve farklı yaklaşımların (AISI S100, AS/NZS 4600, Moen & Schafer, Wang & Young, Oruç, Chandramohan et. al.) sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular hem deliksiz hem de delikli kesitlerin burkulma davranışı üzerinde delik boyutlarının ve kesit geometrisinin etkilerini ortaya koymaktadır.

C-140 ve C-203 kesitleri için yapılan elastik burkulma analizlerinde, deliksiz ve delikli kesitlerin lokal ve distorsiyonel burkulma kapasitesi hesaplanmıştır. Delikli kirişlerde, delik yüksekliği (h) ve delik uzunluğu (L_h) parametrelerinin burkulma davranışı üzerine etkileri incelenmiştir. Kesitler için lokal ve distorsiyonel burkulma grafikleri Şekil 6-9'da verilmiştir. Deliksiz kirişlerin burkulma kapasite hesapları AISI S100 ve AS/NZS 4600 standartlarına göre yapılmıştır. C-140 kesitinde lokal burkulma kapasitesi 1.27 kNm ve distorsiyonel burkulma kapasitesi 1.36 kNm olarak hesaplanırken C-203 kesitinde ise sırasıyla 1.69 ve 1.94 kNm olarak hesaplanmıştır.

AISI S100 ve AS/NZS 4600 standartlarına göre hesaplanan kesitlerin moment delik yüksekliğinin delik uzunluğuna oranı (h/L_h) ilişkisi Şekil 10'da verilmiştir. Kesitlerde h/L_h oranının artmasıyla moment kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca h/L_h oranının en düşük olduğu durumlarda C-140 ve C-203 kesitlerde moment taşıma kapasitesi deliksiz kiriş moment taşıma kapasitesine göre sırasıyla %17 ve %20 azalmıştır.

C-140 ve C-203 kesitli elemanlarda lokal burkulma kapasitesi incelendiğinde delik uzunluğunun 80'den büyük olduğu durumlarda delik yüksekliğinin artmasıyla moment kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. Bu durumun olası sebepleri ise dalgaboyu destek etkisi (wavelength stiffening effect) ve desteksiz şerit etkisi (unstiffened strip effect) olabilmektedir. Dalgaboyu destek etkisi delikli levhalarda, delik olmayan bölgelerde dalga boyunun artması ile kritik burkulma yükünün artması olarak tanımlanabilmektedir. Desteksiz şerit etkisi ise delikli bölgedeki burkulma durumunun desteksiz şerit gibi davranması böylelikle küçük deliklerde daha düşük kritik burkulma yükü elde edilmesi olarak tanımlanabilmektedir (Moen & Schafer, 2006; Moen & Schafer, 2008; Moen, 2009). Distorsiyonel burkulma kapasitesi ise h/H oranının artmasından etkilenmemiştir. Ancak delik uzunluğunun artması distorsiyonel burkulma kapasitesinin azalmasına neden olmuştur.

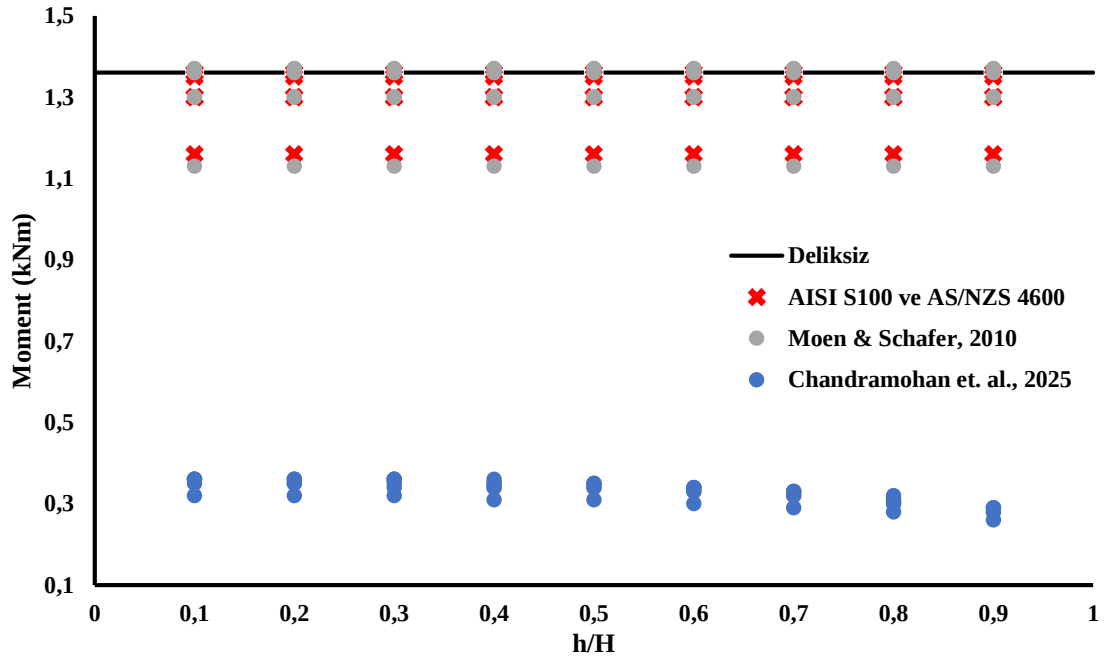
Lokal ve distorsiyonel burkulma kapasitelerinin hesaplanmasında dikkate alınan yaklaşımlar AISI S100 ve AS/NZS 4600 standart hesaplamaları ile karşılaştırıldığında Moen & Schafer, 2010 yaklaşımının lokal ve distorsiyonel burkulma kapasitelerinin hesaplanmasında standart yaklaşımı ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Chandramohan et. al., 2025 tarafından önerilen lokal burkulma denklemleri standart çözümlerine kıyasla daha yüksek sonuçlar öngörmüştür. Ancak distorsiyonel burkulma çözümleri ise oldukça düşük kalmıştır. Öte yandan yalnızca lokal burkulma hesaplama yöntemi önerilen Wang & Young, 2017 ve Oruç, 2025 çalışmalarda, Wang & Young, 2017 hesaplamalarına göre lokal burkulma kapasitesi yaklaşık olarak %15 daha fazla elde edilirken, Oruç, 2025 tarafından önerilen hesaplamalarda yaklaşık olarak %10 daha düşük olarak elde edilmektedir.



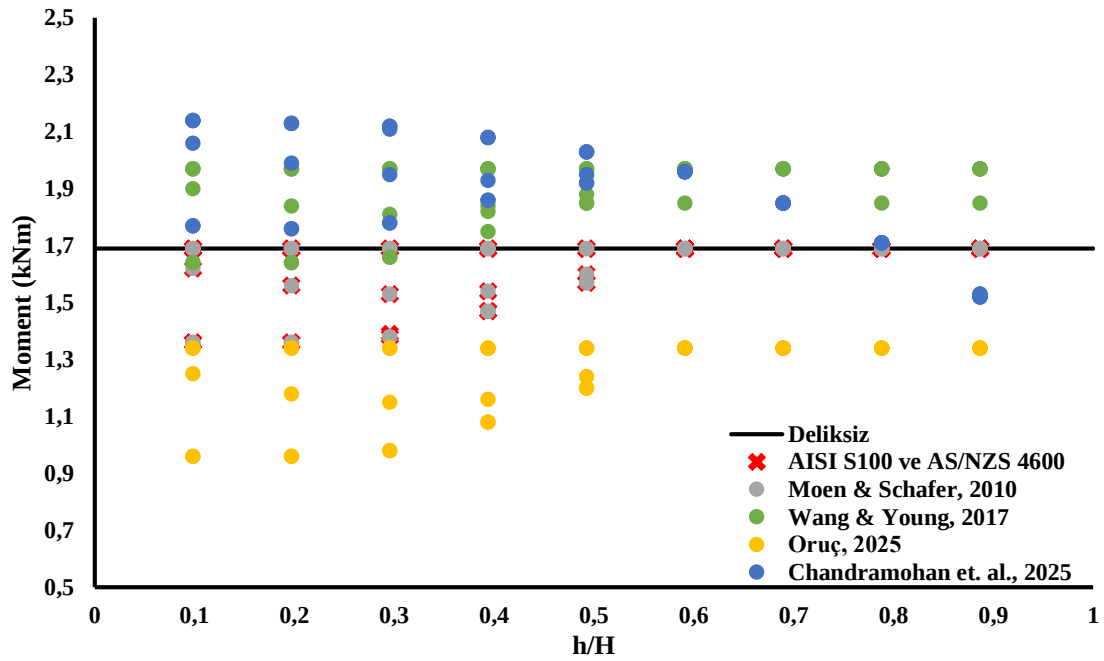
Şekil 6. C-140 Kesiti İçin Lokal Burkulma Kapasitesi.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada gövde deliksiz ve delikli soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin burkulma davranışı ve burkulma kapasitelerinin hesaplanmasını için elastik burkulma analizini ve hesaplama yöntemlerinin karşılaştırılmasını kapsamaktadır. Çalışmada değişken olarak delik yüksekliği, delik genişliği ve gövde yüksekliği farklı elemanlar dikkate alınmıştır.



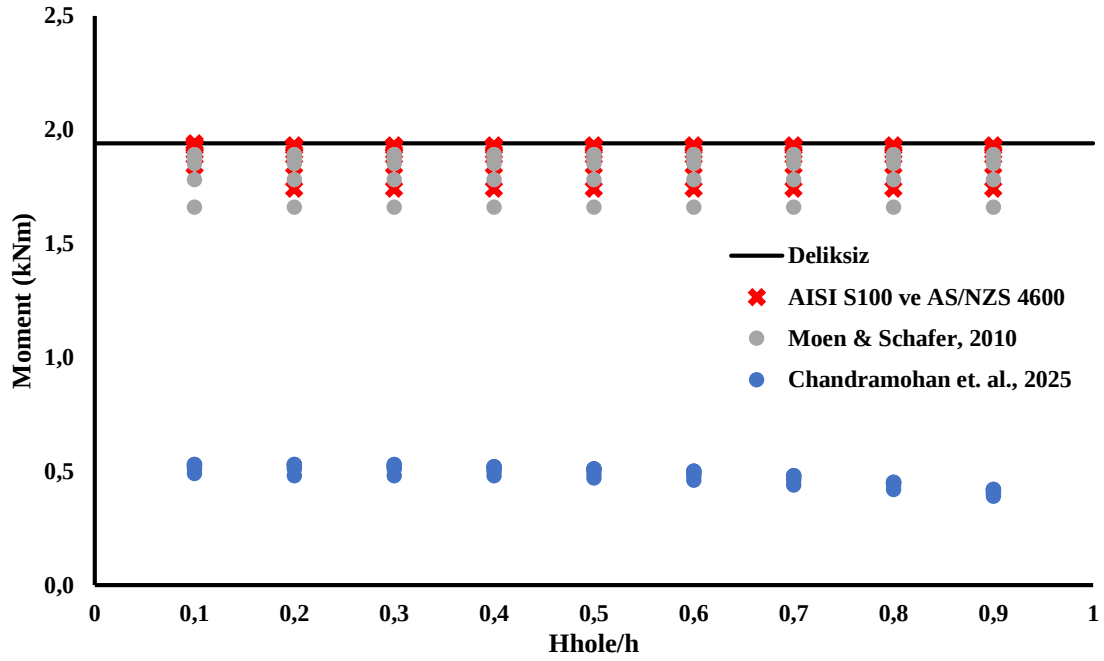
Şekil 7. C-140 Kesiti İçin Distorsiyonel Burkulma Kapasitesi.



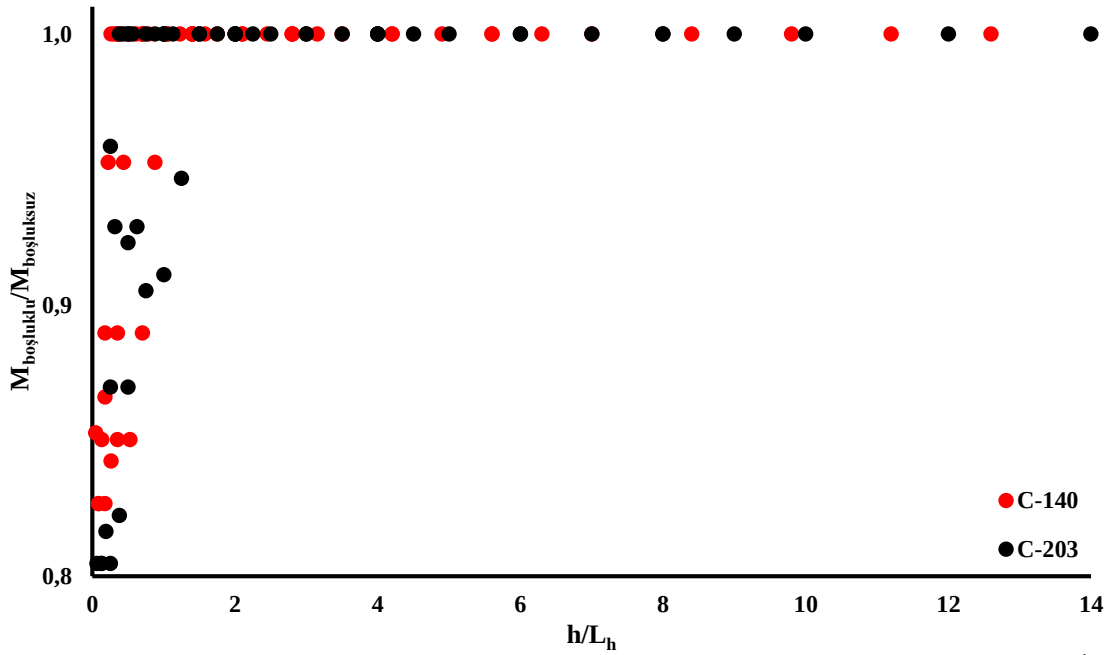
Şekil 8. C-203 Kesiti İçin Lokal Burkulma Kapasitesi.

Delikli kirişlerde delik yüksekliği ve delik uzunluğu değişkenlerinin burkulma kapasitesini etkilediği gözlemlenmiştir. Özellikle delik uzunluğunun 80 mm'den büyük olduğu durumlarda, lokal burkulma kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. Kapasitede meydana gelen artış dalgaboyu destek etkisi ve desteksiz şerit etkisi ile açıklanabilmektedir. Bu mekanizmaların kesitlerin tasarlanmasında dikkate alınması önerilmektedir.

Distorsiyonel burkulma kapasitesi ise delik yüksekliğinden etkilenmezken, delik uzunluğunun artmasıyla birlikte azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Kesitlerin tasarımında uzun deliklerin distorsiyonel burkulma kapasitesini düşürdüğü dikkate alınarak bu tür deliklerin kullanıldığı kesitlerde ek takviyeler veya alternatif delik konfigürasyonlarının değerlendirilmesi önerilmektedir.



Şekil 9. C-203 Kesiti İçin Distorsiyonel Burkulma Kapasitesi.



Şekil 10. Kesitlerde Lokal Burkulma Momenti Ve Delik Yüksekliğinin Delik Uzunluğuna Oranı İlişkisi.

Farklı yaklaşımların karşılaştırılması sonucunda, Moen & Schafer denklemlerinin standart hesaplamalarıyla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Chandramohan et. al. tarafından önerilen lokal burkulma denklemleri, standart çözümlere göre daha yüksek sonuçlar öngörmüş ancak distorsiyonel burkulma çözümleri daha düşük kalmıştır. Wang & Young tarafından önerilen lokal burkulma denklemleri ise standart çözümlere göre daha yüksek kalırken Oruç tarafından önerilen denklem ise daha düşük kaldığı tespit edilmiştir.

Gelecekteki çalışmalarda, daha farklı kesit geometrileri ve delik konfigürasyonları üzerinde araştırmalar yapılarak kapsamın genişletilmesi önerilmektedir. Ayrıca, deneysel çalışmalarla elde edilecek verilerin, analitik ve nümerik modeller ile desteklenmesi, tasarım denklemlerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Adany, S., & Schafer, B. W. (2006). Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods. In CCFSS Proceedings of International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures.
- AISI S100-16. (2020). Specifications for the cold-formed steel structural members, cold-formed steel design manual. American Iron and Steel Institute (AISI).
- Australian/New Zealand Standard (2018). Cold-formed stainless steel structures. Sydney, Australia: Standards Australia (AS/NZS 4600).
- Chandramohan, D. L., Roy, K., Fang, Z., & Lim, J. B. (2025). Moment capacity of cold-formed steel channel beams with edge-stiffened and unstiffened elongated web holes. *Thin-Walled Structures*, 206, 112605. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112605>
- Chandramohan, D. L., Roy, K., Fang, Z., Ananthi, G. B. G., & Lim, J. B. (2024). Numerical investigation of cold-formed steel channels with edge-stiffened and unstiffened elongated web holes under shear. *Thin-Walled Structures*, 196, 111472. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111472>
- Chen, B., Roy, K., Fang, Z., Uzzaman, A., Raftery, G., & Lim, J. B. (2021). Moment capacity of back-to-back cold-formed steel channels with edge-stiffened holes, un-stiffened holes, and plain webs. *Engineering Structures*, 235, 112042. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112042>
- Chen, B., Roy, K., Uzzaman, A., & Lim, J. B. (2020). Moment capacity of cold-formed channel beams with edge-stiffened web holes, un-stiffened web holes and plain webs. *Thin-Walled Structures*, 157, 107070. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107070>
- Dai, Y., Roy, K., Fang, Z., Chen, B., Raftery, G. M., & Lim, J. B. (2022). A novel machine learning model to predict the moment capacity of cold-formed steel channel beams with edge-stiffened and un-stiffened web holes. *Journal of Building Engineering*, 53, 104592. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104592>
- Eurocode. (2007). Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for coldformed members and sheeting. European Committee for Standardization.
- Fang, Z., Roy, K., Chen, B., Sham, C. W., Hajirasouliha, I., & Lim, J. B. (2021). Deep learning-based procedure for structural design of cold-formed steel channel sections with edge-stiffened and un-stiffened holes under axial compression. *Thin-Walled Structures*, 166, 108076. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108076>
- Grey, C. N., & Moen, C. D. (2011, May). Elastic buckling simplified methods for cold-formed columns and beams with edge-stiffened holes. In Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council Pittsburgh (pp. 92-103).
- Jin, S., Ádány, S., & Schafer, B. W. Constrained Finite Strip Method: kinematic-and force-based approaches. In Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council.
- Li, Z., & Schafer, B. W. (2010). Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFSM conventional and constrained finite strip methods. In Twentieth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures.
- Moen, C. D. (2009). Direct strength design of cold-formed steel members with perforations. Phd Thesis. The Johns Hopkins University, Baltimore.
- Moen, C. D., & Schafer, B. W. (2008; October). Simplified methods for predicting elastic buckling of cold-formed steel structural members with holes. In Nineteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures.
- Moen, C. D., & Schafer, B. W. (2006; October). Impact of holes on the elastic buckling of cold-formed steel columns with application to the direct strength method. In Eighteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures.
- Moen, C. D., & Schafer, B. W. (2009). Elastic buckling of cold-formed steel columns and beams with holes. *Engineering Structures*, 31(12), 2812-2824. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.07.007>

- Moen, C. D., & Schafer, B. W. (2010; November). Extending direct strength design to cold-formed steel beams with holes. In Twentieth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures.
- Moen, C. D., Schudlich, A., & von der Heyden, A. (2013). Experiments on cold-formed steel C-section joists with unstiffened web holes. *Journal of Structural Engineering*, 139(5), 695-704. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000652](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000652)
- Oruç, R. (2025, April). Influence of web holes on cold-formed steel beams: Experimental and numerical analysis. *Structures*, 74, 108471. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108471>
- Pham, D. K., Pham, C. H., Pham, S. H., & Hancock, G. J. (2020). Experimental investigation of high strength cold-formed channel sections in shear with rectangular and slotted web openings. *Journal of Constructional Steel Research*, 165, 105889. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105889>
- Qin, J., Guo, X., Liao, L., & Li, G. (2023). Analytical method for distortional buckling load of cold-formed steel members with perforated web under bending moment. *Structures*, 57, 105189. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105189>
- Wang, L., & Young, B. (2015). Beam tests of cold-formed steel built-up sections with web perforations. *Journal of Constructional Steel Research*, 115, 18-33. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.08.001>
- Wang, L., & Young, B. (2017). Design of cold-formed steel built-up sections with web perforations subjected to bending. *Thin-Walled Structures*, 120, 458-469. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.06.016>
- Wang, L., Jiang, X., Chen, Z., Luo, C., & Jiang, B. (2024). Effect of hole-edge stiffeners on the behavior of cold-formed steel members with web openings under combined bending and shear. *Structures*, 64, 106485. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106485>
- Wang, L., Li, J., Luo, C., Cao, X., & Wang, H. (2022). Experimental and numerical study on the shear behavior of web perforated cold-formed steel beams. *Structures*, 45, 2117-2136. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.10.039>
- Yu, C. (2012). Cold-formed steel flexural member with edge stiffened holes: Behavior, optimization, and design. *Journal of Constructional Steel Research*, 71, 210-218. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.09.008>
- Yu, N. T., Kim, B., Huang, X. H., Yuan, W. B., Ye, R., Wu, L., & Le, J. J. (2022). Analytical solution for flange/web distortional buckling of cold-formed steel beams with circular web perforations. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 29(24), 3463-3473. <https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1902594>
- Yuan, W. B., Yu, N. T., & Li, L. Y. (2017). Distortional buckling of perforated cold-formed steel channel-section beams with circular holes in web. *International Journal of Mechanical Sciences*, 126, 255-260. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.04.001>
- Zhao, J., Sun, K., Yu, C., & Wang, J. (2019). Tests and direct strength design on cold-formed steel channel beams with web holes. *Engineering Structures*, 184, 434-446. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.062>