

T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DELİK AÇILMIŞ SOĞUK ŞEKİLLENDİRİLMİŞ KARE KUTU PROFİLLERİN
EKSENEL VE EKSANTRİK BASINÇ YÜKLEMESİ ALTINDAKİ
DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Mehmet Emin AKCAN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman İstemihan COŞĞUN

TEZ JÜRİ ÜYELERİ

Dr. Öğr. Üyesi Süleyman İstemihan COŞĞUN

Dr. Öğr. Üyesi Harun AKOĞUZ

Dr. Öğr. Üyesi Ali Fuat GENÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERZİNCAN, 2024

© 2024 [Mehmet Emin AKCAN]. Tüm hakları saklıdır.

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
TABLolar DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1.GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Taraması	3
2. ARAŞTIRMANIN ÖNEMİ VE KAPSAMI	7
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	10
3.1. Çekme Deneyleri	10
3.2. Deney Elemanlarının Özellikleri	12
3.2.1. Deney elemanlarının boyutları	12
3.2.2. Başlangıçtaki yerel geometrik kusurların ölçümleri.....	15
3.3. Deney Sisteminin Kurulumu	17
4. SAYISAL ÇALIŞMA	21
4.1. Çelik İçin Malzeme Modeli	22
4.2. Sonlu Eleman Ağının Oluşturulması.....	25
4.3. Sınır Koşulları	27
4.4. Yerel Geometrik Kusurlar	28
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR.....	30
5.1. Delinmenin Yük Taşıma Kapasitesi Üzerindeki Etkileri	30
5.2. Yükleme Durumunun Etkileri: Eksenel ve Eksantrik Basınç Yükleme si	33
5.3. Et Kalınlığının Yük Taşıma Kapasitesi Üzerindeki Etkisi	34
5.4. Sayısal ve Deneysel Çalışma Bulgularının Karşılaştırılması	38
5.5. Eksantrikliğin Yük Taşıma Kapasitesi Üzerindeki Etkileri	46
5.6. Halka Tipi Delik Kenarı Rijitleştirici Elemanlarının Etkinliği	48
6. SONUÇLAR.....	56
KAYNAKÇA	59

ÖZET

DELİK AÇILMIŞ SOĞUK ŞEKİLLENDİRİLMİŞ KARE KUTU PROFİLLERİN EKSENEL VE EKSANTRİK BASINÇ YÜKLEMESİ ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Mehmet Emin AKCAN

Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman İstemihan COŞGUN

2024, 63 sayfa

Bu çalışmada temel olarak eksantrik basınç yüklemesi altında eksantrik olarak delinmiş kare kutu profillerin davranışları incelenmiştir. Deneysel ve sayısal olarak incelenen numuneler, 100 mm x 100 mm karakteristik boyutlara ve 410 mm uzunluğa sahip soğuk şekillendirilmiş çelik kare kutu profillerden oluşmaktadır. Et kalınlıkları 2,00 ila 5,00 mm arasında değişen delikli çelik kolonların deney sonuçları, deliksiz numunelerin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, dijital görüntü korelasyon yöntemi kullanılarak tüm deney numunelerinin yerel burkulma oluşumu gözlemlenmiştir. Ek olarak, eksenel yüklemenin yanı sıra 25 ila 100 mm arasında değişen ve 25 mm' lik artışlarla farklı eksantrisite değerlerini dikkate alan sayısal bir parametrik çalışma da yürütülmüştür. Sonuçlar, eksantrik oval delikler oluşturulduğunda ve kolonlar eksantrik basınç yüküne maruz bırakıldığında, yük taşıma kapasitesinde yaklaşık %75-%78'e varan bir azalma meydana geldiğini göstermiştir. Sayısal analizler, çelik kutu profillerin hem nihai yük taşıma kapasitelerini hem de deformasyon şekillerini doğru bir şekilde belirlemeye olanak sağlamıştır. Sayısal analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar arasındaki güçlü uyum, yük taşıma kapasitesi ve nihai hasar durumu açısından, delikli ve deliksiz elemanların hem eksenel hem de eksantrik basınç yükleri altındaki davranışlarını elde etmekte sayısal inceleme yönteminin güvenilirliğini ortaya koymuştur. Ayrıca, önerilen halka tipi delik kenarı rijitleştirici elemanlarının etkinliği, farklı rijitleştirici kalınlıkları dikkate alınarak sayısal olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: soğuk şekillendirilmiş, delinmiş, kutu profil, sayısal analiz, eksantrik basınç yüklemesi

ABSTRACT

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF PERFORATED COLD-FORMED SQUARE HOLLOW SECTIONS UNDER AXIAL AND ECCENTRIC COMPRESSION LOADING

Mehmet Emin AKCAN

**Master's Thesis, Erzincan Binali Yıldırım University, Institute of Science and
Technology,**

Department of Civil Engineering

Advisor: Assist. Prof. Dr. Süleyman İstemihan COŞĞUN

2024, 63 pages

This study mainly investigated the behavior of eccentrically perforated square hollow sections under eccentric compression loading. Cold-formed steel square hollow-section stub columns with nominal dimensions of 100 mm $\times$ 100 mm and a length of 410 mm were experimentally tested. The test results of perforated square hollow-section stub columns with nominal wall thicknesses ranging from 2.00 to 5.00 mm were compared with those of nonperforated specimens. Furthermore, the formation and progression of all the test specimens with local buckling were observed using the digital image correlation method. In addition to axial loading, a numerical parametric study was conducted considering different eccentricity values ranging from 25 to 100 mm in 25 mm increments. The results showed that when eccentric flat oval-shaped perforations were formed and a column was subjected to eccentric compression loading, the load-bearing capacity was substantially reduced by up to 75%–78%. Numerical analysis was comprehensively used as a predictive tool to effectively determine both load-bearing capacities and deformation modes of the square hollow-section stub columns. The strong agreement between the numerical model predictions and experimental findings demonstrated the reliability of the method for obtaining the behavior of perforated and nonperforated elements under both axial and eccentric compressive loads in terms of the load-bearing capacity and damage mode. Additionally, the effectiveness of a ring-type hole stiffener was numerically investigated by considering different stiffener thicknesses.

Keywords: cold-formed, perforated, hollow-section, numerical analysis, eccentric compression loading

TEŞEKKÜR

Tez kapsamında yardımlarını esirgemeyen, tecrübe ve bilgi birikimiyle sürekli araştırmaya, geliştirmeye ve sorgulamaya yönelten değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Süleyman İstemihan COŞĞUN' a teşekkür ederim.

Mehmet Emin AKCAN

Aralık, 2024



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Çekme deneyi sonuçları	11
Tablo 2. 2 mm et kalınlığı için eksantrik yükleme- delik konumu ilişkisinin yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi.	13
Tablo 3. Deney elemanlarının isimlendirilmesi	15
Tablo 4. Kısa kolon numunelerinin ölçülen boyutları ve başlangıç kusur genlikleri.....	17
Tablo 5. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması.....	39
Tablo 6. Parametrik çalışma sonuçları	47



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Slovakya'daki Bory alışveriş merkezi' nin "Tornado" çatı yapısının genel görünümü ve bağlantı detayları	1
Şekil 2. Nazarbayev Alışveriş Merkezi yapısının genel görünümü ve bağlantı detayları (Astana, Kazakistan).....	2
Şekil 3. Cıvata öngerme işlemi sırasında çift taraflı bir bağlantıda oluşabilecek muhtemel kesit deformasyonu	7
Şekil 4. Cıvatanın basit sıkma işlemi sırasında çift taraflı bir bağlantıda oluşabilecek muhtemel kesit deformasyonu.....	8
Şekil 5. Soğuk şekillendirilmiş çelik kutu profillerin nominal gerilme-nominal şekil değiştirme diyagramları	10
Şekil 6. Ön analizler ve delik açılmış deney numunelerinin üretimi.....	13
Şekil 7. Delik açılmış deney numunelerinin şematik çizimleri.	14
Şekil 8. Başlangıçtaki yerel geometrik kusurların ölçümü için kurulan deney düzeneği	16
Şekil 9. Deney sisteminin genel şeması: (a) ön görünüm, (b) eksenel yükleme, (c) eksantrik yükleme.	18
Şekil 10. Mafsal tipi mesnetlerin konumlandırılması.....	19
Şekil 11. Mafsallı mesnetlerin detayları	19
Şekil 12. Deney sisteminin kurulumu ve ölçüm aletleri.....	20
Şekil 13. DGK ölçüm yöntemi için kullanılan desenler	20
Şekil 14. Kısa kolonların doğrusal olmayan burkulma analizlerinin akış diyagramı.....	22
Şekil 15. Çelik kutu profillerin gerçek gerilme (σ_{true})-plastik şekil değiştirme (ϵ_{pl}) diyagramları.	23
Şekil 16. Soğuk şekillendirilmiş çelik kutu profillerde genişletilmiş köşe bölgelerinin gösterimi	24
Şekil 17. Genişletilmiş köşe bölgeleri için kabul edilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisi	24
Şekil 18. Delikli ve deliksiz eleman modelleri için sonlu eleman ağı görünümleri.....	26
Şekil 19. Sayısal analizlerde dikkate alınan mesnet koşulları ve gösterimi	28
Şekil 20. Et kalınlığına göre gruplandırılmış delikli ve deliksiz numunelerin yük-yerdeğiştirme eğrileri	31
Şekil 21. P/EC ve NP/EC numunelerinin deney sonuçlarının karşılaştırılması	32

Şekil 22. Et kalınlığına göre gruplandırılmış deliksiz numunelerin yük – yerdeğiştirme eğrileri	33
Şekil 23. P/EC ve NP/AC (a) ve NP/EC ve NP/AC (b) numunelerinin deney sonuçlarının karşılaştırılması	34
Şekil 24. Her et kalınlığı için yük-yerdeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılması	35
Şekil 25. NP/AC, P/EC ve NP/EC numunelerinin test sonuçlarının karşılaştırılması	36
Şekil 26. Yerel burkulmaların başlangıç aşamalarında numunelerin ön yüzlerindeki von Mises şekildeğiştirme dağılımı	36
Şekil 27. Deneyssel ve sayısal olarak elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrilerinin ve yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması.....	40
Şekil 28. Deneyssel ve sayısal olarak elde edilen yerel burkulma hasar modlarının karşılaştırılması (von Mises gerilmesi MPa cinsindendir.).	44
Şekil 29. Yük taşıma kapasitesi ile eksantrikliğin kesit genişliğine veya yüksekliğine oranına ($e/(H, B)$) bağlı ilişkisi	46
Şekil 30. Halka tipi rijitleştirici elemanların delik kenarına uygulanması ile ilgili şematik çizimler	48
Şekil 31. Kutu profillerin delik kenarının rijitleştirici elemanlar ile takviye edildiği durumu temsil eden sayısal modelin solu eleman ağı oluşturulmuş hali	49
Şekil 32. $e=100$ mm için halka tipi rijitleştiricilere sahip delikli elemanların sayısal olarak elde edilen yerel burkulma hasar modları (von Mises gerilmesi MPa; t_w ve t_s mm cinsindendir.)	51
Şekil 33. $e=100$ mm için yük taşıma kapasitesi üzerinde rijitleştirici kalınlığının etkilerinin karşılaştırılması (t_w ve t_s mm cinsindendir.).....	53
Şekil 34. t_s/t_w ve $P_{rijitleştirilmiş}/P_{rijitleştirilmemiş}$ oranları arasındaki ilişki (t_w ve t_s mm cinsindendir.).....	55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

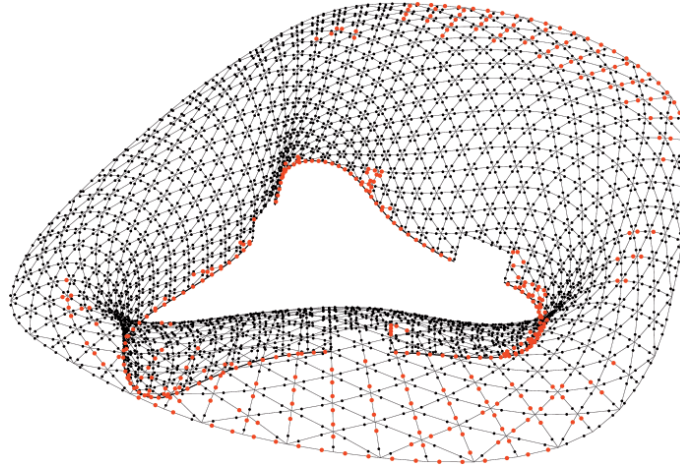
API	Amerikan Petrol Enstitüsü
dak	dakika
P	Delikli numune
NP	Deliksiz numune
L	Deney Elemanının Boyu
t_w	Deney Elemanının Et Kalınlığı
$P_{\text{Deneyssel}}$	Deneysel Olarak Elde Edilen Yük Taşıma Kapasitesi
DGK	Dijital Görüntü Korelasyonu
S4R	Dört Düğüm Noktalı Kabuk Sonlu Eleman
f_y, f	Düz Bölge Akma Dayanımı
E	Elastisite Modülü
σ_{true}	Gerçek Gerilme
GPa	Gigapaskal
ω_i	i. Burkulma Modu Ölçek Faktörü
ϕ_i	i. Burkulma Mod Şekli
kg	Kilogram
kN	Kilonewton
f_y, c	Köşe Bölgesi Akma Dayanımı
MPa	Megapaskal
m^3	Metreküp
mm	Milimetre
N	Newton
σ_{nom}	Nominal Gerilme
ϵ_{nom}	Nominal Şekildeğiştirme
B	Numune Genişliği
ω_0	Numunelerin Başlangıçtaki Yerel Geometrik Kusuru
H	Numune Yüksekliği
ϵ_{pl}	Plastik Şekildeğiştirme
ν	Poisson Oranı
$P_{\text{rijitleştirilmiş}}$	Rijitleştirilmiş Eleman Yük Taşıma Kapasitesi
$P_{\text{rijitleştirilmemiş}}$	Rijitleştirilmemiş Eleman Yük Taşıma Kapasitesi
$P_{\text{Sayısal}}$	Sayısal Olarak Elde Edilen Yük Taşıma Kapasitesi

S8R5	Sekiz Düğüm Noktalı, Her Bir Düğüm Noktasının Beş Serbestlik Derecesine Sahip Olduğu Kabuk Sonlu Eleman
T	Test numunesi (Deney elemanı)
6061-T6	T6 Temperleme İşlemine Tabi Tutularak Hazırlanmış Alüminyum Alaşım
ε_M	Von Mises Şekildeğiştirmesi
YD	Yükleme Durumu
%	Yüzde
ρ	Yoğunluk



1. GİRİŞ

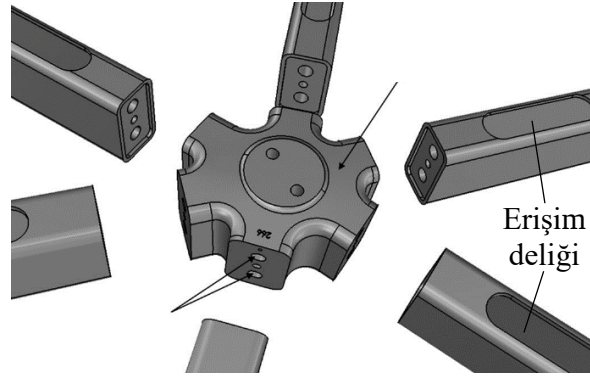
Çelik kutu profiller; hafiflik, estetik görünüm, geniş boyut aralığı ve yüksek mukavemet-ağırlık oranı gibi birçok avantaja sahiptir (Wardenier vd., 2010; Eekhhout, 2011; Cosgun, 2023). Bu yapısal elemanların sahip olduğu özellikler, diğer yapısal çelik elemanlarla karşılaştırıldığında, birim ağırlık başına daha yüksek yük taşıma kapasitesi sunmakta ve önemli ölçüde malzeme maliyeti tasarrufu sağlamaktadır. Geometrik yapıları, çelik kutu profillerin daha hafif olmasına olanak tanımakta, bu da ağırlık esasına göre maliyet belirlenen çelik yapı elemanlarının daha düşük maliyetli olmasını sağlamaktadır. Bir binanın kullanım amacına bağlı olarak, sıhhi tesisat, elektrik ve ısıtma sistemleri gibi çeşitli tesisatların montajını sağlamak amacıyla yapı elemanlarına delik açılması gerekebilmektedir. Ayrıca, binanın inşaat sürecinde farklı montaj işlemlerini ve malzeme yerleşimlerini kolaylaştırmak amacıyla bu tür deliklerin açılması zorunlu hale de gelebilmektedir. Çelik kutu profillerin birleşim noktalarında iç kısımlara erişim sağlanması ve bu elemanlar arasında bağlantı kurulması ise mühendislik açısından çözülmesi gereken bir zorluk teşkil etmektedir. Bu bağlamda, Slovakya'daki Bory Alışveriş Merkezi ile Kazakistan'daki Nazarbayev Alışveriş Merkezi, bu tür yapısal zorlukların ele alınmasına ilişkin iyi örnekler sunmakta olup, ilgili ayrıntılar Şekil 1 ve 2'de gösterilmektedir.



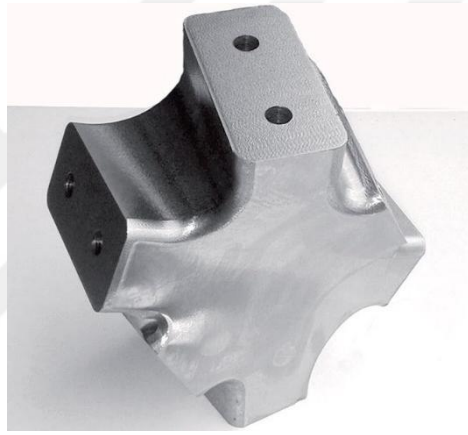
(a) Eleman bağlantılarının genel görünümü (kırmızı = kaynaklı, siyah = cıvatalı) (grafik: Knippers Helbig)

Şekil 1. Slovakya'daki Bory alışveriş merkezi'nin "Tornado" çatı yapısının genel görünümü ve bağlantı detayları (Helbig vd. 2016)

Şekil 1'in (devamı)



(b) Düğüm noktasının üç boyutlu model örneği (geometri: MFA; grafik: Knippers Helbig)



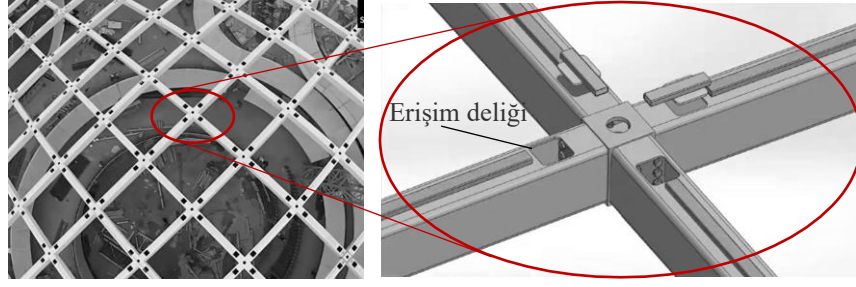
(c) Üretilen düğüm noktası elemanının örnek görseli (fotoğraf: Metal Yapı)



(a) Yapının görünüşleri

Şekil 2. Nazarbayev Alışveriş Merkezi yapısının genel görünümü ve bağlantı detayları (Astana, Kazakistan)

Şekil 2'nin devamı



(b) Düğüm noktasının üç boyutlu model örneği

1.1. Literatür Taraması

Teknik literatürde, yukarıda bahsedilen durumların kutu profillerin yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerini araştırmak için içi boş çelik profil elemanlara delikler açılmış ve deneysel, sayısal birçok çalışma yapılmıştır. Daha önceki çalışmalarda kutu profillere açılan deliğin ve korozyonun etkilerini göstermek için kasıtlı delinme tipi hasara maruz bırakılmıştır (Cui ve Wang, 2020; Coşkun vd., 2024; Vaz vd., 2018). Açılan deliklerin yapı elemanlarının davranışını ne ölçüde etkilediğini belirlemek için birçok çalışma yapılmıştır. Ghazijahani vd. (2014) tarafından delinmiş dairesel içi boş kesitli boruların yorulma davranışı üzerine kapsamlı bir çalışma yürütülmüştür. Araştırma sonucunda mesnet bölgesi hasarı ve eleman kesit hasarı olmak üzere iki ana hasar şekli tanımlanmıştır. Araştırmanın bir diğer sonucu ise optimum çaptaki bir deliğin dairesel içi boş kesitli boruların yorulma ömrünü önemli ölçüde artırdığı görülmüştür. Çalışmada, delik çapının önemi vurgulanarak şekildeğiştirme değerleri ile delik çapı arasında doğrudan bir ilişki olduğu ortaya koyulmuştur. Ayrıca yorulma ömrünü uzatacak optimum delik çapı belirlenmiştir. Feng ve Young (2015), 6061-T6 alüminyum alaşımlı dairesel delikli kolonların yapısal davranışını araştırmışlardır. Bu kapsamda numuneler üzerinde 28 adet basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları tasarım şartnamelerinde verilen mevcut tasarım kuralları dikkate alınarak hesaplanan karakteristik dayanımlar ile karşılaştırılmıştır. Mevcut tasarım kurallarının, delikli alüminyum alaşımlı kolonların performansını doğru bir şekilde tahmin edemediği ve bu nedenle alüminyum alaşımlarına özgü yeniden düzenlenmiş tasarım kurallarının oluşturulması gerektiği vurgulanmıştır. Sonu ve Singh (2017), tek bir dairesel deliğin dikdörtgen kutu profil kırımların kesme kapasitesi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Hem deneysel verileri hem de sayısal analizleri kullanarak, delik boyutu, konumu ve gövde narinliği gibi parametrelerin kutu profil

kirişlerin kayma davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bulgular yüksek gerilmenin olduğu bölgelerde bulunan deliklerin kesme kapasitesini azalttığını ortaya koymuştur. Ayrıca sayısal analiz sonuçlarına dayanarak yeni bir kayma burkulması durumunu göz önüne alan tasarım ifadeleri önerilmiştir. Ek olarak bir önceki çalışmanın devamı niteliğinde olabilecek bir çalışma yürütülmüştür. Rijitleştiricilerin gövdesi delikli dikdörtgen kutu kirişlerin kesme kapasitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Eğimli, dikey, yatay ve halka şeklindeki rijitleştiricilerden ve kesit geometrisine odaklanılarak genişlik, kalınlık ve uzunluk gibi rijitleştirici boyutlarındaki değişikliklerin kirişlerin yapısal davranışını nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Bulgular, kesme kapasitesinin eğimli rijitleştiriciler tarafından önemli ölçüde arttığını, ancak dikey rijitleştiricilerden dikkate değer bir şekilde etkilenmediğini göstermektedir (bkz. Sonu ve Singh, 2021).

Hafif yapı elemanları depremin yapılar üzerindeki etkilerini azalttığı için yaygın olarak tercih edilmektedir. Newton'un ikinci yasasına göre bir binanın kütlesi azaldıkça yapıya etki eden deprem kuvvetleri de aynı oranda azalmaktadır. Bu yaklaşım doğrultusunda Peen vd. (2019) daha hafif yapısal elemanlar elde etmek için delikli içi boş yapıya sahip Cholla bitkisinde gözlemlenen birden fazla boşluk formundan esinlenmişlerdir. Peen vd. (2019) yaptığı çalışmada, delik açılan API standardında çelik boru şeklindeki numunelerin aksenal basınç, eğilme ve burulma etkileri altındaki davranışları incelenmiştir. Yapılan çalışmada, deliksiz kontrol elemanı modeli ile 12 adet delikli dairesel kutu profil, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ABAQUS programında modellenmiştir. Sayısal model sonuçları; basınç, eğilme ve burulma yükleri altındaki kontrol modelleri (deliksiz) ve delikli deney elemanları için elde edilen test sonuçlarıyla iyi bir uyum göstermiştir. Sayısal analiz yönteminin, birden fazla delinmenin olduğu dairesel içi boş profiller için de güvenilir sonuçlar üretebileceği belirtilmiştir. Ma vd. (2019) tarafından hem basınç hem de eğilmeye maruz kalan soğuk şekillendirilmiş yüksek mukavemetli çelik kutu profil elemanların davranışı araştırılmıştır. Çalışmanın deneysel sonuçları Amerikan, Avustralya ve Avrupa standartlarındaki hesap yöntemleri ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmak için soğuk şekillendirilmiş yüksek mukavemetli çelik dikdörtgen ve kare kutu profiller üzerinde 51 adet test gerçekleştirilmiştir. Ek olarak, soğuk şekillendirilmiş yüksek mukavemetli çelik kutu profil elemanların yapısal davranışını elde etmek için sayısal model geliştirilmiştir. Sayısal modelin doğruluğunun, yük-yerdeğiştirme grafikleri, yük taşıma kapasiteleri ve hasar şekillerinin karşılaştırılmasıyla doğrulandığını belirtmişlerdir. Umbarkar vd. (2013) dairesel deliklerin geometrik özelliklerinin, aksenal basınç yüklemesi altında yalın dubleks paslanmaz çelik içi boş

kolonların burulma davranışına etkisi üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Sayısal analiz için ABAQUS programı kullanılan araştırmada, delik boyutunun, deliğin eksantrikliğinin ve kolon et kalınlığının kolonların kritik burkulma yüküne ve eksenel kısalmayı nasıl etkilediğine odaklanılmıştır. Elde edilen bulgular sonucunda daha büyük delik boyutlarının ve eksantrikliğinin burkulma dayanımında azalmaya yol açtığı, eleman et kalınlığındaki artışın ise burkulma dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir. Singh ve Chan (2021)'in yaptıkları çalışmada ise soğuk ve sıcak şekillendirilmiş çelik kolonların burkulma dayanımını elde etmek için sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Çeşitli geometrik parametrelerin etkileri; eksantriklik (delik konumu/kolon uzunluğu), delik şekilleri (dairese, kare ve altıgen), deliğin boyutları (genişlik/çap), delik yüksekliği ve kesit et kalınlığının, sıcak ve soğuk şekillendirilmiş çelik kolonların burkulma performansı üzerine etkileri incelenmiştir. İncelenen delik şekillerinin, burkulma kapasitesi üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Kolonun burkulma kapasitesindeki azalma kare delikli numunede en fazla iken dairese delikli numunede en az olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, aynı delik genişliği için, delik yüksekliğinin 2,5 katına kadar artırılmasının, kolon kapasitesindeki değişimi ihmal edilebilir seviyede etkilediği gösterilmiştir. Anbarasu vd. (2022) tarafından ise kolon numunelerinin genişliği ve yüksekliği boyunca merkezi olarak zıt yüzlere yerleştirilmiş iki dairese deliğe sahip soğuk şekillendirilmiş ferritik paslanmaz çelik kolon numunelerinin eksenel basınç yüklemesi altındaki davranışına ilişkin sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Parametrik çalışma, dairese şekilli deliğin enine kesit özellikleri ve çap/genişlik oranı dikkate alınarak yapılmıştır. Parametrik çalışma sonuçları, mevcut doğrudan mukavemet yönteminin soğuk şekillendirilmiş ferritik paslanmaz çelik kolon elemanı üzerindeki tutarlılığını değerlendirmek için kullanılmıştır. Shi vd. (2022) soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların çeşitli yükler etkisindeki davranışlarını araştırmayı amaçlamışlardır. Yapılan çalışmada basınç, eğilme ve bileşik yükleme altındaki yerel burkulma davranışı dikkate alınmıştır. Parametrik çalışmalar, farklı kesit genişlik/kalınlık oranları ve yükleme durumları dikkate alınarak yapılmıştır. Araştırmacılar ayrıca basınç ve eğilme yükü altında soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların nihai mukavemetini elde etmek için etkili bir plastik tasarım prensiplerine dayalı bir yöntem önermişlerdir.

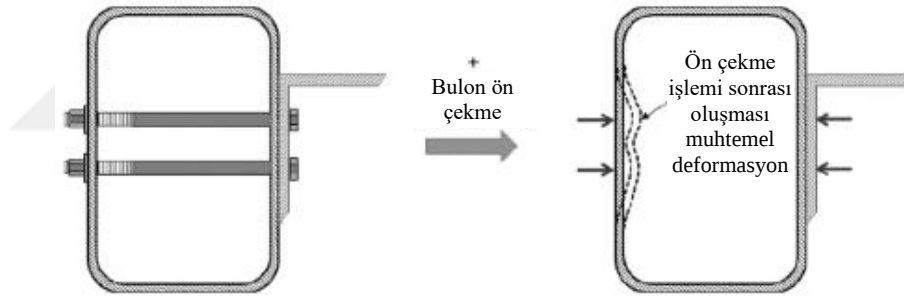
Sachidananda ve Singh (2017) tarafından eksenel basınç yüklemesi altında yalın dubleks paslanmaz çelik kolonların davranışı üzerine sayısal bir çalışma yürütülmüştür. Sayısal analiz sonuçlarına göre eksenel basınç yüklemesi altındaki kolonların yapısal performansı, yük taşıma kapasitesi ve deformasyon şekilleri incelenmiştir. Sayısal analiz sonuçlarına göre yalın

dubleks paslanmaz elik kolonların yük taşıma kapasitesi; oval şekilli kolonun enine kesitteki düz kısmının uzunluğu, enine kesitteki eğri bölgenin yarıçapı, enine kesitteki düz elemanlar arasındaki mesafe artık artmaktadır.

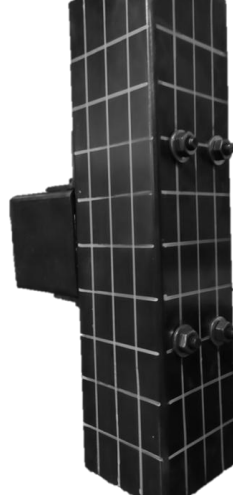


2. ARAŞTIRMANIN ÖNEMİ VE KAPSAMI

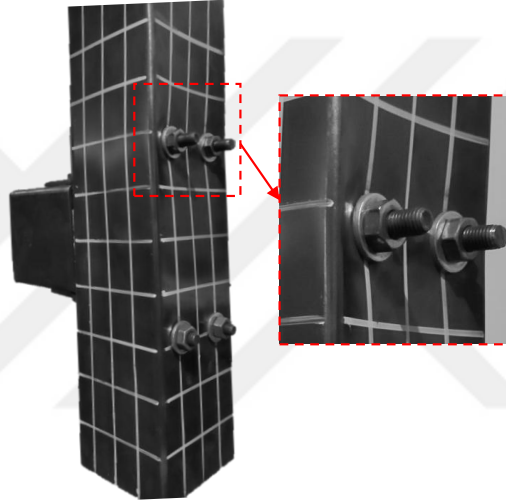
Kutu profil elemanların birleşiminde genellikle kaynaklı veya cıvatalı bağlantılar tercih edilmektedir. Uygulama alanındaki özel montaj ihtiyaçları, kuru yüzey gereksinimleri ve kaynak yöntemlerine ilişkin genel sorunlar nedeniyle kaynaklı bağlantılar daha az tercih edilebilmektedir (Tahir vd., 2018). Uygulamada kutu profillerin cıvatalı bağlantıları tek taraflı veya çift taraflı (geçişli) olmaktadır. Ancak, cıvata öngerme işlemi sırasında özellikle çift taraflı cıvatalı bağlantılar, kutu profil elemanının yüzeyinde noktasal bir yüke neden olmakta ve bu durum, profil gövdesinde istenmeyen deformasyonlara yol açabilmektedir (Şekil 3). Ayrıca ilgili yönetmeliklerde cıvata sıkma sınırlamaları (torklama talimatı) belirtilmesine rağmen saha uygulamalarında basit sıkma yöntemi ile oluşturulmuş birleşimlerde aşırı cıvata sıkılması nedeniyle kutu profillerde istenmeyen kesit formu deformasyonları meydana gelebilmektedir. Şekil 4'te yukarıdaki durumu temsil eden, cıvatalı bir kutu profil kolon-kiriş bağlantısında aşırı cıvata sıkılmasından kaynaklanan içe doğru kesit deformasyonunun bir örneğini verilmiştir.



Şekil 3. Cıvata öngerme işlemi sırasında çift taraflı bir bağlantıda oluşabilecek muhtemel kesit deformasyonu (McCormick vd. 2017)



(a) Normal sıkma



(b) Aşırı sıkma

Şekil 4. Cıvatanın basit sıkma işlemi sırasında çift taraflı bir bağlantıda oluşabilecek muhtemel kesit deformasyonu

Ayrıca, çift taraflı bağlantılarda çoğu durumda istenilen dayanımın ve rijitliğin sağlanabilmesi amacıyla kullanılan rijitleştirme levhalarının ilgili elemanın ve/veya birleşimin iç kısmına kaynaklanması gerekebilmektedir. Bu durum da çift taraflı bağlantı uygulamasını zaman alıcı ve maliyetli hale getirmektedir. Sonuç olarak, tek taraflı cıvatalı bağlantılar avantajlı görünmektedir. Ancak birleştirilen içi boş elemanın kapalı şekli nedeniyle iç tarafa erişilemediği için tek taraflı bağlantılar işlevsel değildirler (McCormick, 2017). Bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla tek taraflı birleşim yapmaya imkân sağlayan ve genellikle “kör” cıvata olarak adlandırılan cıvatalar kullanılmaktadır. Ancak bu cıvatalar geleneksel olanlardan daha pahalıdır ve bu cıvataların kullanılmasında birtakım özel montaj gereksinimlerine

ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum kör cıvatalı bağlantıların tercih edilmesini engellemektedir. Kaynaklı, çift taraflı, kör cıvatalı sistemlerin dezavantajları nedeniyle tek taraflı cıvatalı sistemler, kapalı elemanlarının geometrilerinden kaynaklanan erişilemezlik durumu erişim deliği açılarak ortadan kaldırıldığında daha elverişli bir bağlantı sistemi olmaktadır. Bu erişim sorununu ortadan kaldırmak için yapı elemanlarında delikler açılmaktadır.

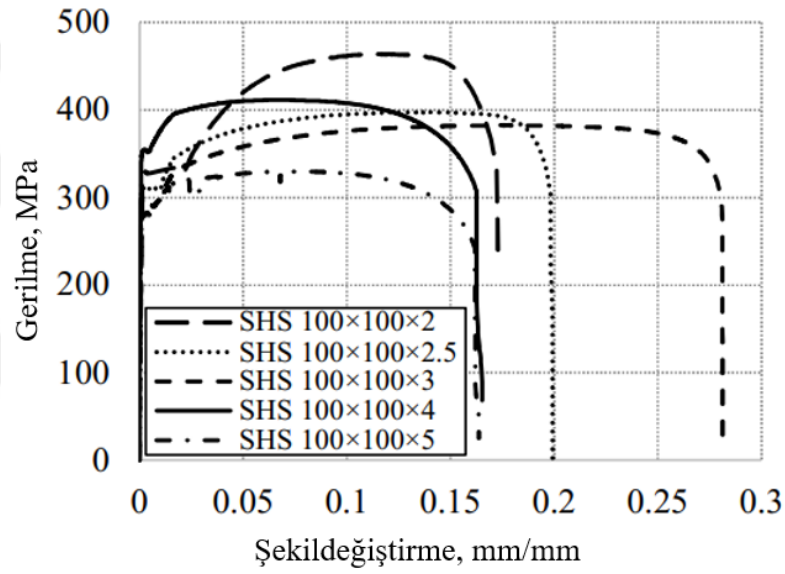
Literatürde delik açılmış yapı elemanlarının davranışları üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, genellikle eksenel basınç yüklemesi, burkulma, burulma, kesme kuvveti etkisi ve bileşik yükleme durumları ele alınmıştır. Ayrıca, deliklerin şekli, oranı ve eleman boyunca konumu gibi değişkenlerin etkisi araştırılmış ve eleman eksenine ile delik ekseninin çakışmasının davranış üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ancak, delikli çelik elemanlarda eksenel yüklerin yanı sıra eksantrik basınç yüklemesi konusu literatürde kapsamlı bir şekilde ele alınmamıştır. Bunun yanı sıra, deliklerin çubuk eksenine dik yöndeki konumunun (deliğin eksantrikliği) davranışa etkisi de mevcut çalışmalarda incelenmemiştir.

Bu çalışmanın amacı, kare kutu profillerin iç kısmına erişimi sağlamak için eksantrik olarak açılan deliklerin numunelerin yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerini belirlemektir. Çalışmada, bağlantı zorluklarını ortadan kaldırmak amacıyla erişim deliklerini temsilen düz oval delikler kullanılmıştır. Basınç dayanımı kapasitesindeki ve yükleme altındaki davranıştaki değişiklikler, eksantrik delikler oluşturularak eksenel ve eksantrik basınç yükleri altında incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, kontrol deney numunelerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda, tek taraflı cıvata montajını kolaylaştırmak amacıyla açılan eksantrik oval deliklerin, numunelerin eksenel ve eksantrik basınç yüklemesi altındaki davranışlarına etkisi ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

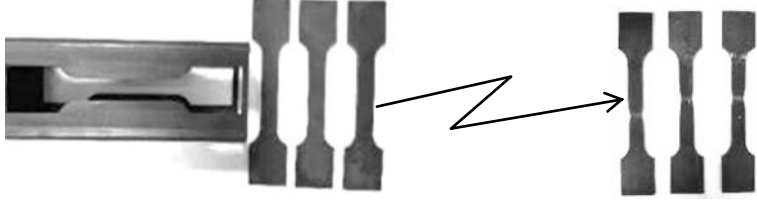
3.1. Çekme Deneyleri

Çalışma kapsamında deney elemanlarının üretiminde kullanılan soğuk şekillendirilmiş çelik kutu profil elemanların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme testleri yapılmıştır. ASTM A370-14 (2014) standardına göre her bir deney elemanı için üç adet çekme deney numunesi hazırlanmış olup Instron 3382 test cihazı ile deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5'te her bir et kalınlığı için nominal gerilme-nominal şekil değiştirme diyagramları verilmiştir. Ayrıca çekme deney sonuçları Tablo 1'de özetlenmiştir.



Şekil 5. Soğuk şekillendirilmiş çelik kutu profillerin nominal gerilme-nominal şekil değiştirme diyagramları

Tablo 1. Çekme deneyi sonuçları



Numenin üretildiği profil	Numune genişliği, mm	Numunenin nominal kalınlığı, mm	Numunenin ölçülen kalınlığı, mm	Elastisite modülü, GPa	Nom. akma dayanımı, MPa	Nom. çekme dayanımı, MPa
SHS	20.00			195	280	378
100×100×5	20.01	5.00	4.97	200	279	365
	20.02			196	283	375
SHS	19.99			186	352	412
100×100×4	19.98	4.00	3.95	189	350	407
	20.00			193	348	410
SHS	14.00			197	295	384
100×100×3	13.98	3.00	2.95	198	289	379
	13.98			193	296	381
SHS	14.00			196	308	397
100×100×2.5	13.98	2.50	2.43	197	307	384
	13.99			199	310	398
SHS	14.00			200	338	462
100×100×2	13.97	2.00	1.97	198	335	463
	13.98			199	336	461

3.2. Deney Elemanlarının Özellikleri

3.2.1. Deney elemanlarının boyutları

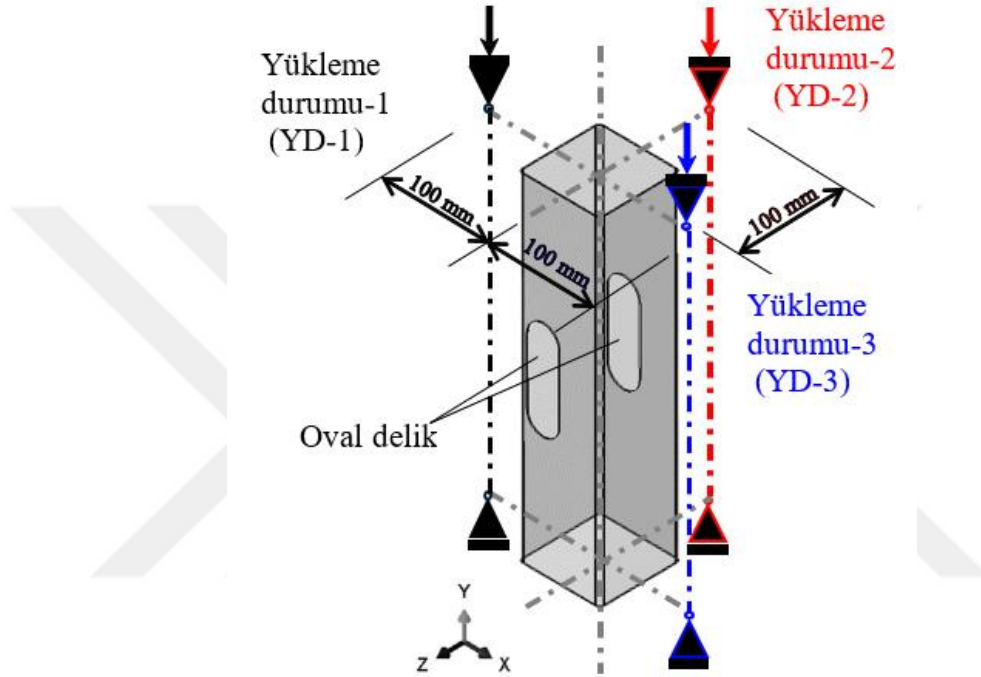
Bu çalışmada, nominal boyutları 100 mm × 100 mm enkesitli, 410 mm uzunluğunda ve farklı et kalınlıklarında (2,00, 2,50, 3,00, 4,00 ve 5,00 mm) soğuk şekillendirilmiş çelik kutu profiller aksel ve eksantrik basınç yüklemesi altında test edilmiştir. Genel burkulmayı önlemek için, kısa kolonların nominal uzunluğu en kesit boyutunun yaklaşık dört katı olacak şekilde seçilmiştir (bkz. Gardner vd., 2010). Bazı deney elemanlarında delikler oluşturulmuş ve bu deliklerin numunelerin davranışı üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Singh ve Chan (2021) tarafından farklı delik şekillerinin içi boş kolonların basınç dayanımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sonuçlar, dairesel deliğin diğer delik formlarına göre daha az dayanım kaybına neden olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, söz konusu çalışmada deney elemanları dairesel olarak delinmiştir. Bu çalışmada, deliklerin genişliği ve uzunluğu temel geometrik parametreler olarak ele alınmıştır ve içi boş kesitli bir kolonu cıvatalı birleşimle yapısal bir elemana bağlamak için oluşturulan erişim deliğinin çelik kutu profillerin basınç dayanımına etkisi incelenmiştir. Erişim sorununu ortadan kaldırmak için açılan delik kullanılan cıvatayı sıkmak için yeterli boyutlarda olmalıdır. Bu koşulu sağlarken elemanın dayanımını da azaltmayacak şekilde boyutlandırılmalıdır. Erişim deliğinin çapı elemanın yatay ekseninde eksantrik olarak açıldığından elemanın genişliğinin yarısından daha az olacak şekilde 40 mm olarak seçilmiştir. Yapılan ön sayısal parametrik çalışmalar sonucunda aksel yükleme altında delik yüksekliğinin delik genişliğinin üç katı olacak şekilde 120 mm seçildiğinde aksel basınç dayanımındaki azalmanın ise yaklaşık %1'den az olduğu tespit edilmiştir.

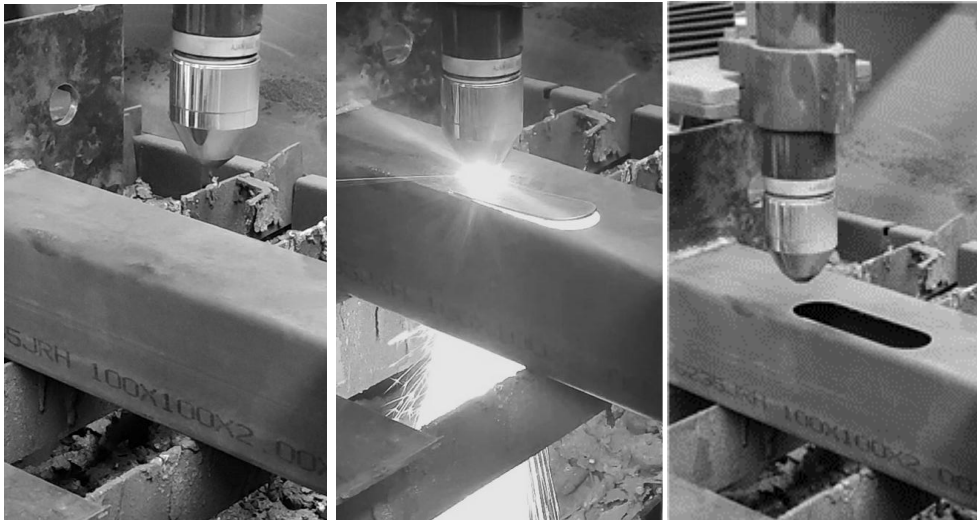
Ek olarak, Tablo 2 ve Şekil 6 (a)'da görülen yükleme durumu (YD)-1 için et kalınlığının 2,00 mm olması durumunda en düşük yük taşıma kapasitesine sahip yükleme-delik konumu kombinasyonunu ifade etmektedir. Bu bulgu, diğer et kalınlıkları için eksantrik yükleme ve delik konumu ilişkisini temsil edebileceğinden eksantrik yükleme durumunda en düşük yük taşıma kapasitesine sahip olan YD-1, bu çalışmada güvenli tarafta kalacak bir yaklaşımla dikkate alınmıştır. Delikli deney numunelerinin hazırlanma aşamalarına ait görseller ve çizimler sırasıyla Şekil 6 ve Şekil 7'de sunulmaktadır.

Tablo 2.2 mm et kalınlığı için eksantrik yükleme-delik konumu ilişkisinin yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi

Yükleme durumu	Eksantrisite (e), mm	$P_{\text{delik açılmış}}/P_{\text{deliksiz}}$
YD-1	100	0.76
YD-2		0.81
YD-3		0.98

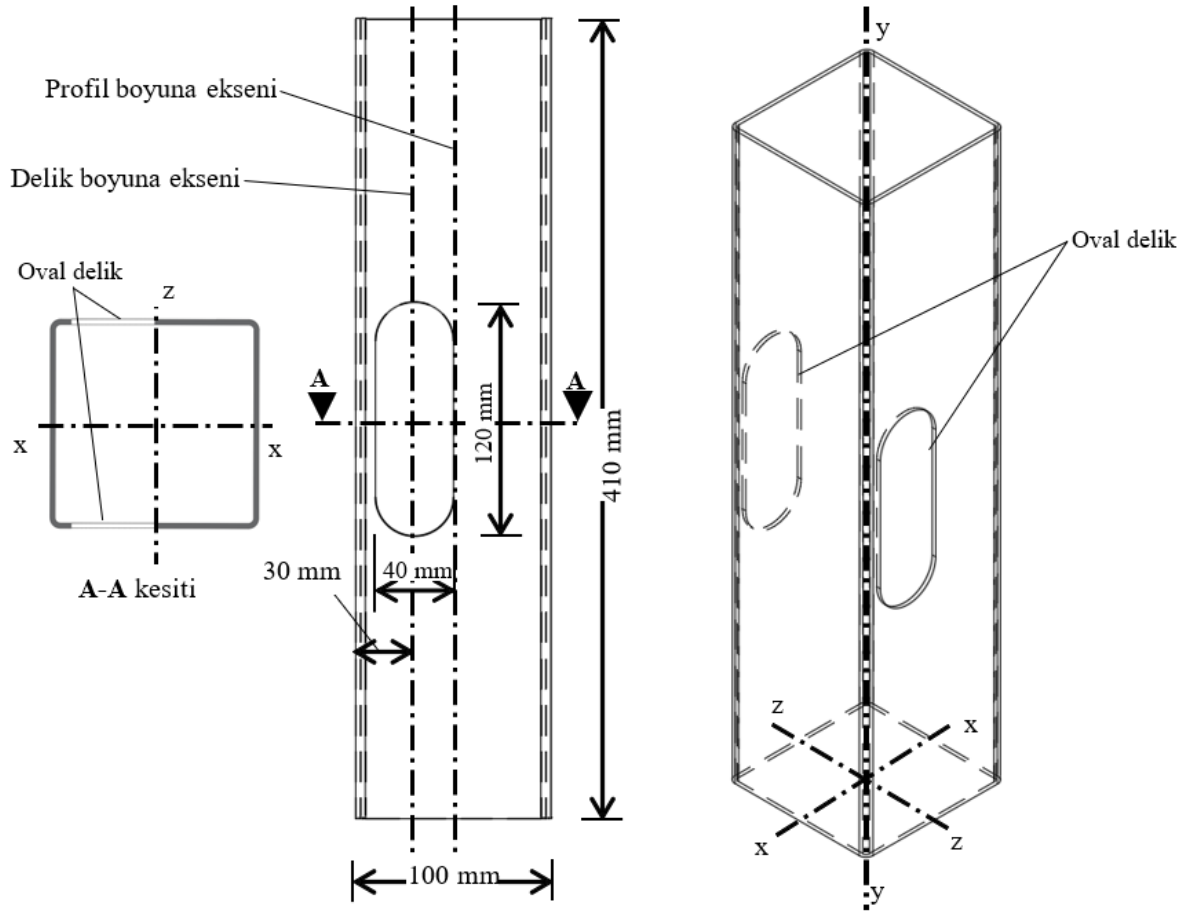


(a) Ön analizlerde dikkate alınan yükleme durumları



(b) Delik açılmış deney numunelerinin üretimi

Şekil 6. Ön analizler ve delik açılmış deney numunelerinin üretimi



Şekil 7. Delik açılmış deney numunelerinin şematik çizimleri

Çalışma kapsamında deneyleri yapılan numunelerinin isimlendirmesi Tablo 3'te verilmiştir. Tanımlamadaki ilk üç rakam, test numunesinin et kalınlığını milimetre cinsinden temsil eder ve “T” “test numunesi” anlamına gelmektedir. Dördüncü ve beşinci karakterler, deliklerin varlığını belirtmekte olup “P” deliğin varlığını, “NP” ise deliğin yokluğunu ifade etmektedir. Son karakterler, test numunesine uygulanan yükleme türünü belirtmekte ve “AC” ve “EC” sırasıyla eksenel ve eksantrik basınç yüklemesini temsil etmektedir.

Tablo 3. Deney elemanlarının isimlendirilmesi

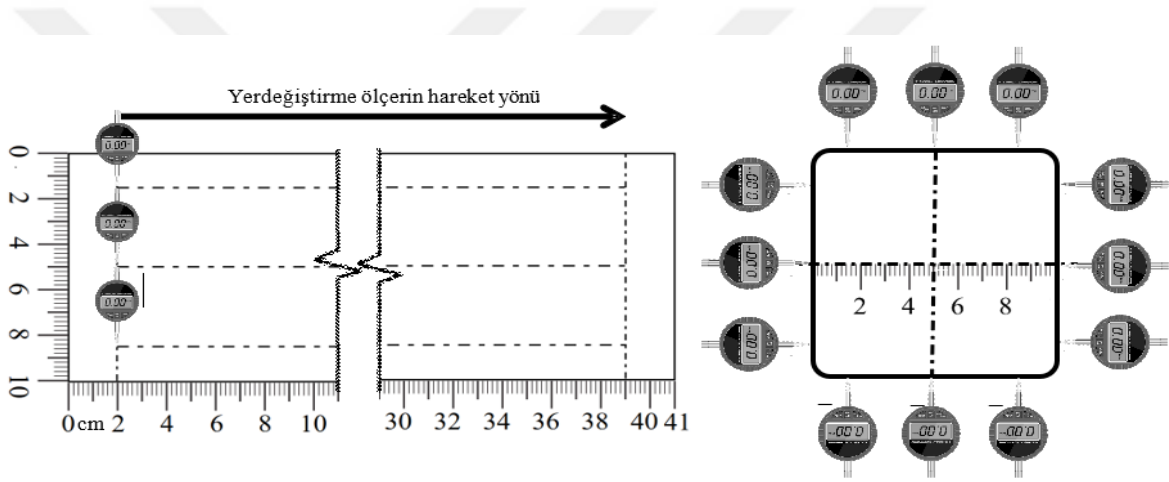
Deney elemanı	Nominal et kalınlığı, mm	Yükleme durumu	Delinme durumu
T2.00/NP/AC	2.00	Eksenel	Yok
T2.00/NP/EC	2.00	Eksantrik	Yok
T2.00/P/EC	2.00	Eksantrik	Var
T2.50/NP/AC	2.50	Eksenel	Yok
T2.50/NP/EC	2.50	Eksantrik	Yok
T2.50/P/EC	2.50	Eksantrik	Var
T3.00/NP/AC	3.00	Eksenel	Yok
T3.00/NP/EC	3.00	Eksantrik	Yok
T3.00/P/EC	3.00	Eksantrik	Var
T4.00/NP/AC	4.00	Eksenel	Yok
T4.00/NP/EC	4.00	Eksantrik	Yok
T4.00/P/EC	4.00	Eksantrik	Var
T5.00/NP/EC	5.00	Eksantrik	Yok
T5.00/P/EC	5.00	Eksantrik	Var

3.2.2. Başlangıçtaki yerel geometrik kusurların ölçümü

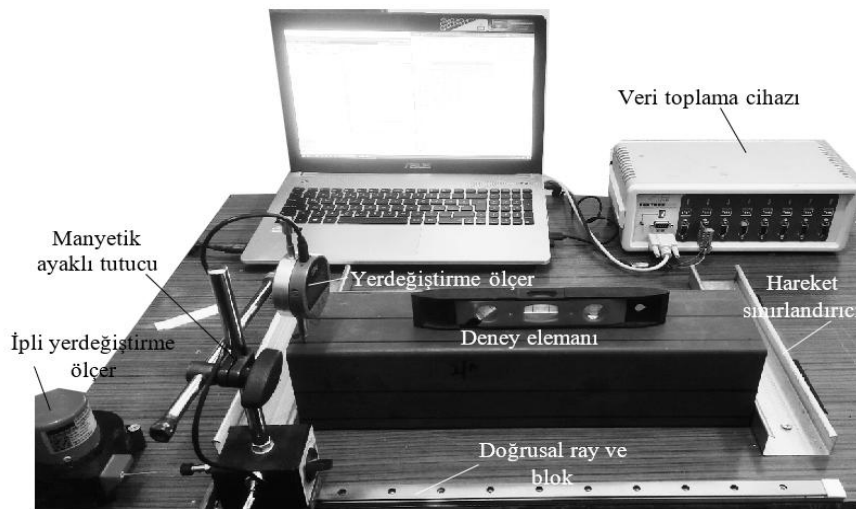
Yerel geometrik kusur büyüklüklerinin özellikle ince cidarlı metal elemanların burkulma davranışı üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından araştırılmış ve önemi ortaya konmuştur. Çalışma kapsamında, deney elemanlarının üretiminde kullanılan çelik kutu profillerin başlangıçtaki yerel geometrik kusurları her et kalınlığı için deneysel olarak ölçülmüştür. Söz konusu deney elemanları, aynı üretim aşamalarına sahip olan üretim partisinden kesilerek hazırlandığından ölçülen yerel geometrik kusurların kolon numunelerinde bulunan kusurlarla yaklaşık olarak aynı olduğu varsayılmıştır (bkz. Zhu ve Young 2006).

Ölçüm aşamasında, numunelerin her iki ucunda şerit testere ile kesme sonucu oluşabilecek kusurların potansiyel etkisini azaltmak için önlemler alınmıştır (Zhu ve Young 2006). Bu önlemleri almak amacıyla, nominal uzunluğu 410 mm olan çelik kutu profillerin her iki

ucundaki 20 mm'lik kısımlar hariç tutularak, arada kalan 370 mm uzunluğundaki bölüm üzerinden ölçümler yapılmıştır. Her yüzey için, üç farklı uzunlamasına yol boyunca yerel sapmalar kaydedilmiştir (Şekil 8, (a)). Şekil 8, (b)' de gösterildiği gibi, ölçümler için 0,01 mm hassasiyete sahip bir dijital yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Tespit edilen tüm geometrik kusurların, soğuk şekillendirilmiş yapısal içi boş kesitler için belirtilen tolerans kriterlerini karşıladığı doğrulanmıştır (EN 10219-2, 2006). Bu kriterler, kare ve dikdörtgen içi boş bölümlerin yüzey eğriliklerinin (içbükeylik veya dışbükeylik), genişliğin (B) veya yüksekliğin (H) %0,8 ini aşmaması gerektiğini belirtir. Sonuç olarak, numunelerin başlangıçtaki yerel geometrik kusuru (ω_0), her bir çelik kutu profilin dört yüzünden elde edilen ölçümlerin en büyüğü olarak belirlenmiştir. Kolon numunelerinin boyutları ve başlangıçtaki kusur genlikleri Tablo 4' te sunulmuştur.



(a) Ölçümler için dijital yerdeğiştirme ölçerin uzunlamasına ölçüm yolları



(b) Yerel kusur ölçümünün gösterimi

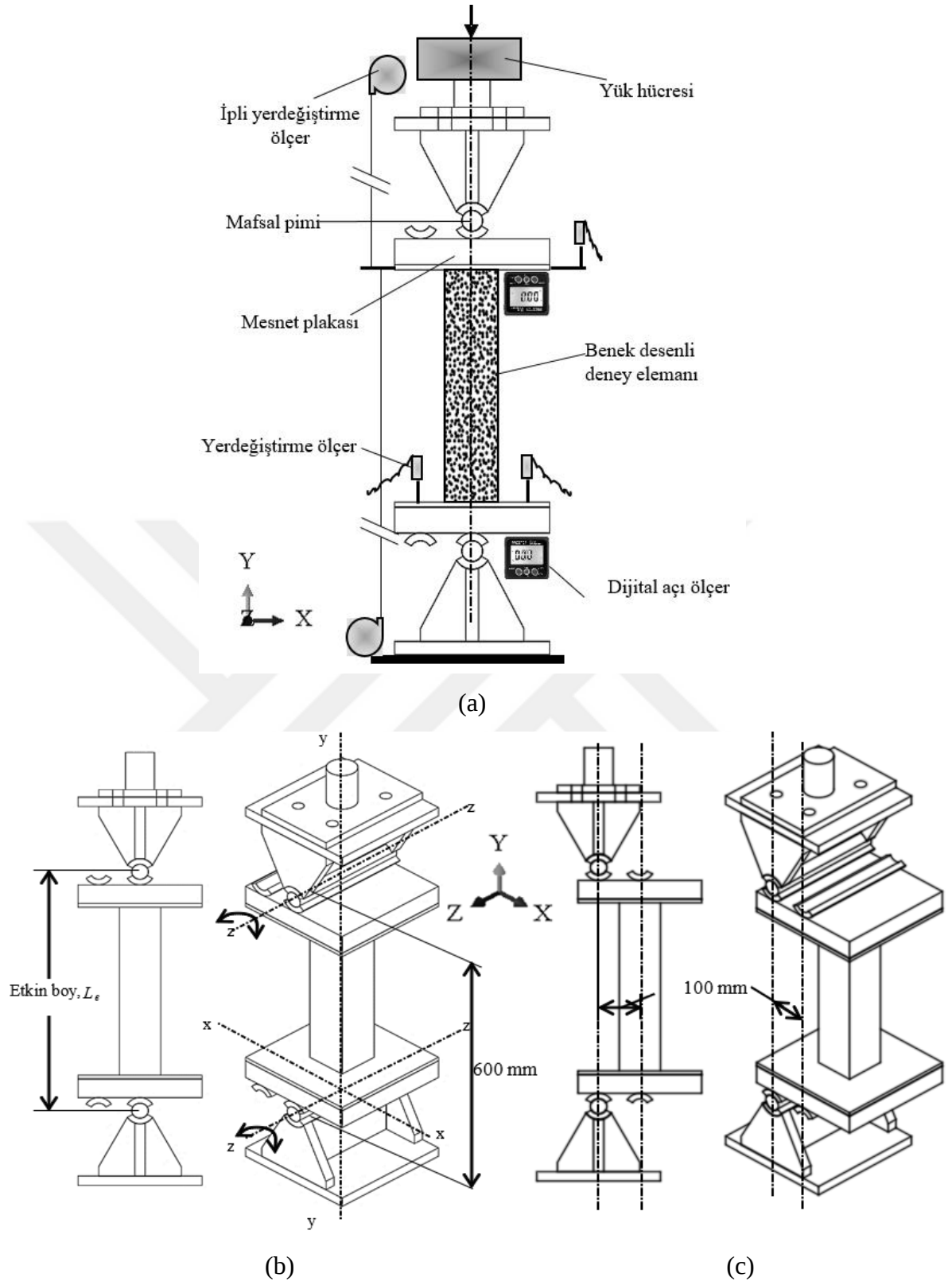
Şekil 8. Başlangıçtaki yerel geometrik kusurların ölçümü için kurulan deney düzeneği

Tablo 4. Kısa kolon numunelerinin ölçülen boyutları ve başlangıç kusur genlikleri

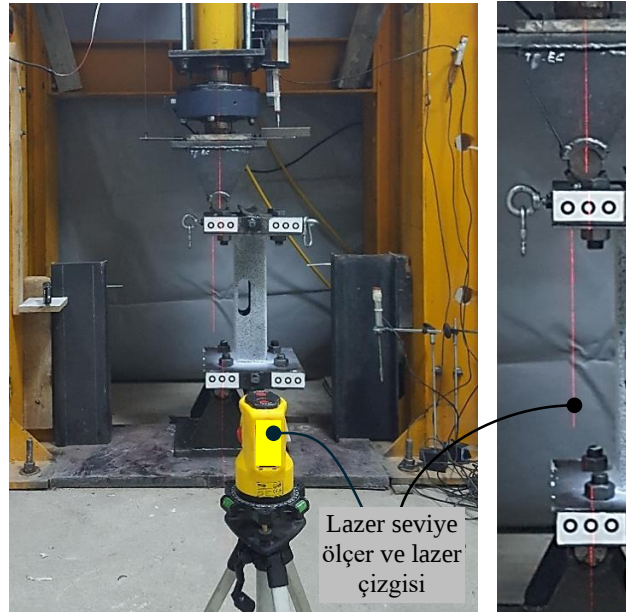
Numenin üretildiği profil	L, mm	H, mm	B, mm	t, mm	ω_0 , mm
SHS 100×100×2	410.5	100.0	100.1	1.97	0.31
SHS 100×100×2.5	409.7	100.0	100.1	2.43	0.27
SHS 100×100×3	410.0	100.0	100.1	2.95	0.71
SHS 100×100×4	411.3	100.0	100.2	3.95	0.67
SHS 100×100×5	409.9	100.0	100.2	4.97	0.43

3.3. Deney Sisteminin Kurulumu

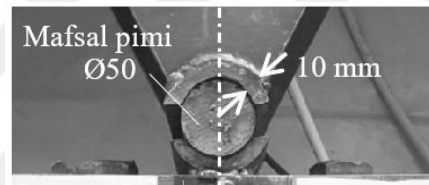
Deney elemanları, monotonik basınç yüklemesi altında 700 kN’luk hidrolik silindir ve el pompası kullanılarak test edilmiştir. Numunelerin üst ve alt kısımları, deney elemanlarının deney süresince her iki ucunda mafsallı bağlı olması durumu için tasarlanmıştır (Şekil 9). Deneyden önce, her deney numunesi eksenel basınç yüklemesini sağlamak için yükleme sisteminin ortasına yerleştirilmiştir. Eksantrik basınç yüklemesi için ise her test numunesi enine yönde kaydırılarak sabitlenmiş ve alt ve üst kısımdaki mafsal merkezleri bir lazer seviye ölçer ile hassas bir şekilde ayarlanmıştır (Şekil 10). Mafsallı mesnetlerin detayları ise Şekil 11’de verilmiştir.



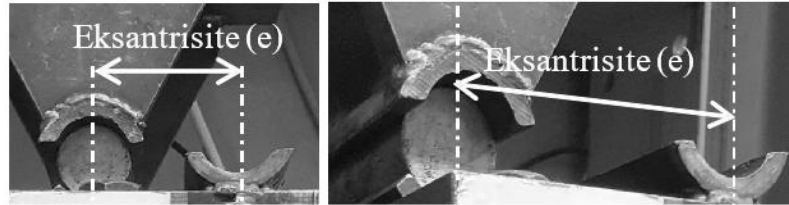
Şekil 9. Deney sisteminin genel şeması: (a) ön görünüm, (b) eksenel yükleme, (c) eksantrik yükleme.



Şekil 10. Mafsal tipi mesnetleri konumlandırılması (eksantrik yükleme durumu)



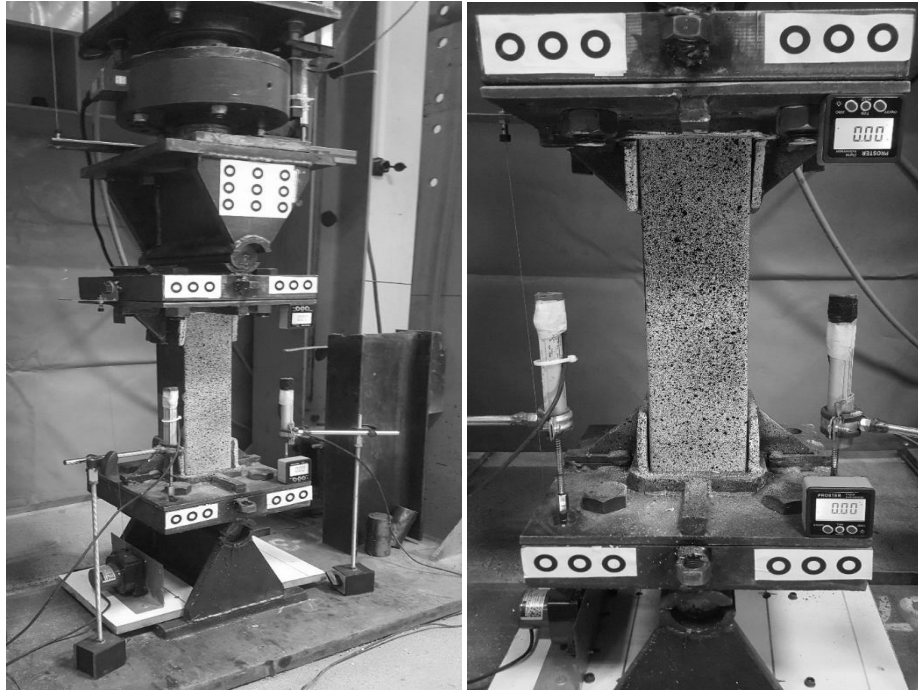
(a) Eksenel yükleme



(b) Eksantrik yükleme

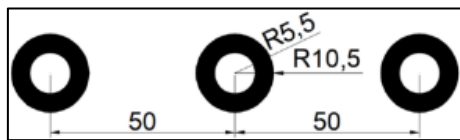
Şekil 11. Mafsalı mesnetlerin detayları

Tüm numuneler yaklaşık olarak aynı monotonik yükleme sürecine tabi tutulmuş ve 2000 N' a kadar olan yüklemeler için yaklaşık 2 mm/dak. yerdeğiştirme hızı kullanılmıştır. Deney aşamasında, deney elemanlarında oluşan eksenel kısalmayı ölçmek amacıyla yükleme plakalarının iki köşesine iki adet ipli potansiyometre yerleştirilmiştir. Kalın alt mesnet plakasının görelî hareketini belirlemek için doğrusal değişken yerdeğiştirme ölçer (doğrusal potansiyometre) kullanılmıştır. Veriler, Teknik Destek Grubu (Ankara, Türkiye) tarafından sağlanan Testbox 1001 veri toplama sistemi ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Mafsalı mesnetlerin dönmelerini anlık olarak ölçülmesi amacıyla ise üst ve alt mesnet plakalarına iki adet dijital açı ölçer monte edilmiştir (Şekil 12).

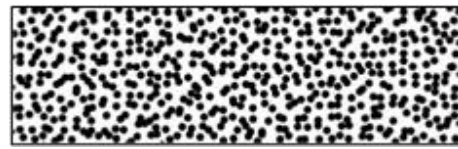


Şekil 12. Deney sisteminin kurulumu ve ölçüm aletleri

Geleneksel ölçüm yöntemlerine ek olarak, test numunelerinin düzlem içi yerdeğiştirmeleri, GOM Correlate (2019) yazılımı ile dijital görüntü korelasyonu (DGK) yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca, test numunelerinin ön yüzündeki von Mises şekildeğiştirme dağılımları ile yerel burkulma davranışının oluşumu ve gelişimi kaydedilmiştir. Burkulma mukavemet halinin ani doğası nedeniyle, yerel burkulma davranışının hassas bir şekilde elde edilebilmesi için videolar normalde kullanılan saniyede 24 kare hızında değil, saniyede 240 kare hızında kaydedilmiştir. Kayıtlar, gri tonlamalı bir filtre kullanılarak işlenmiştir. Yükleme sistemi ve deney elemanında meydana gelen yerdeğiştirmeler ile DGK yöntemiyle elde edilen şekildeğiştirmelerin elde edilebilmesi amacıyla kullanılan ölçüm desenleri sırasıyla Şekil 13 (a) ve (b)'de sunulmuştur.



(a) Halka şeklindeki desen
(Birimler mm cinsindendir.)



(b) Temsili rastgele benek deseni

Şekil 13. DGK ölçüm yöntemi için kullanılan desenler.

4. SAYISAL ÇALIŞMA

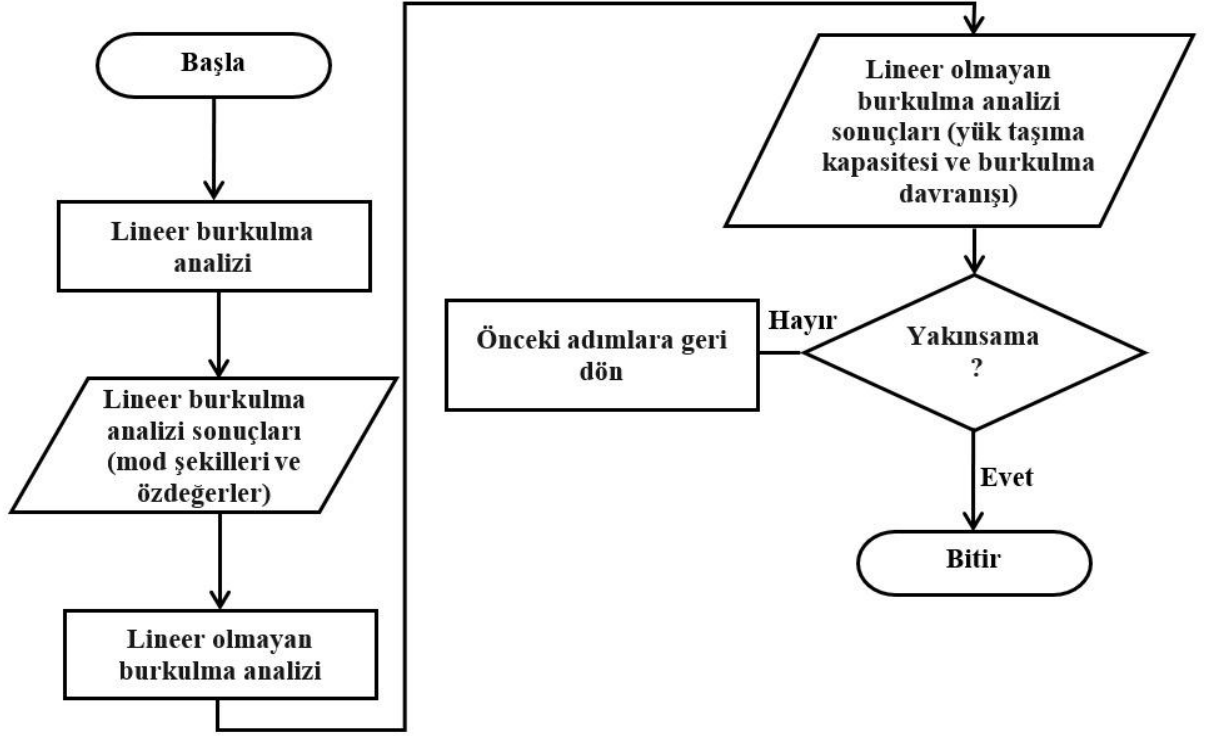
Literatürde birçok araştırmacı, ince et kalınlıklı metal yapı elemanlarının doğrusal olmayan burkulma davranışını incelemek için çeşitli sayısal analiz yöntemlerini kullanmışlardır. Sayısal analiz yazılımlarında; yarı-statik dinamik/örtük, yarı-statik dinamik/açık ve doğrusal olmayan statik analiz olmak üzere üç farklı çözücü mevcuttur (Dwivedi ve Vyavahare, 2021). Önceki çalışmalarda yaygın olarak statik analiz yöntemleri kullanılmıştır (Zhou ve Young, 2007, 2013; Nguyen vd., 2017; Gunalan ve Mahendran, 2015).

Natário vd., (2014 (a), 2014 (b)) ve Sundararajah vd., (2017, 2019) karmaşık temas koşullarını ve yakınsama zorluklarını içeren doğrusal olmayan statik analizler için açık bir entegrasyon şemasına sahip yarı-statik bir analizin daha uygun olduğunu, doğrusal olmayan statik analiz prosedürünün burkulma sonrası davranışla ilgili olarak her zaman iyi bir uyum sağlamadığını öne sürmüşlerdir. Ancak Heurkens vd. (2018) göre, eylemsizlik ve zamana bağlı malzeme etkileri göz ardı edilerek doğrusal olmayan statik işlemler kullanılabilir. Bu araştırmacılar açık bir şemaya sahip yarı statik bir işlemin gerekli olmadığını öne sürmüşlerdir. ABAQUS (2016)'e göre açık dinamik işlem, darbe ve patlama yüklemesi gibi kısa süreli geçici dinamik olayları simüle etmek için uygundur. Ayrıca, Piyawat vd. (2011) açık bir şema kullanmanın, soğuk şekillendirilmiş kesitlerin doğrusal olmayan burkulması için yüksek frekanslı bir gürültü tepkisi ile sonuçlandığını belirtmiştir. Ek olarak, sayısal analiz sonuçlarının anlamlı hale gelmesi için gürültünün filtrelenmesi gerekir; bu, statik ve yarı statik yükleme durum için üstesinden gelinmesi gereken bir zorluktur.

Yousefi vd. (2017 (a), 2017 (b), 2017 (c)) ve Yousefi vd. (2018 (a, b)), örtük entegrasyon şeması kullanarak gerçekleştirdikleri yarı-statik analizlerde, bu şemayla simüle edilen yükleme durumlarının sonuçlarının, soğuk şekillendirilmiş kirişlerin gövde kısmında meydana gelen burkulma modları ve yük- yerdeğiştirme eğrileri ile deneysel verilerle yüksek derecede uyum sağladığını öne sürmüşlerdir.

Bu çalışmada, sayısal analizler ABAQUS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uygun analiz sürecini belirlemek için yapılan ön sayısal çalışmalar, yarı statik uygulama seçeneği olan dinamik/örtük bir çözücünün kullanılmasının, özellikle deneysel olarak elde edilen hasar koşulları ve yük- yerdeğiştirme eğrilerini maksimum yük sonrası eğri profilini tahmin etmede en doğru yöntem olduğunu göstermiştir.

Ayrıca, literatürde ince kabuklu elemanların burkulma analizlerinde statik, monotonik yükleme durumları için statik-Riks çözücüsü de tercih edilmektedir (Hasanali, 2022, 2023; Öztürk, 2022). Ancak yapılan ön sayısal analiz sonuçları statik-Riks yöntemi ile özellikle delik açılmış elemanların yerel burkulma davranışının doğru bir şekilde tahmin edilmediğini göstermiştir. Şekil 14’te kısa kolonların doğrusal olmayan burkulma analiz sürecinin basitleştirilmiş bir akış şeması sunulmaktadır.



Şekil 14. Kısa kolonların doğrusal olmayan burkulma analizlerinin akış diyagramı

Malzeme modeli, sonlu eleman ağ boyutu, sınır koşulları, geometrik kusur tanımlaması ve sayısal analiz sonuçlarının doğruluğunu etkileyen diğer önemli parametrelere ilişkin daha fazla ayrıntı aşağıdaki başlıklar altında sunulmaktadır.

4.1. Çelik İçin Malzeme Modeli

Çeliğin malzeme modeli klasik metal plastisite modeli olarak tanımlanmıştır. Bu modelde, metalin elastik ve plastik davranışları ayrı ayrı tanımlanmaktadır. Elastisite modülü (E) ve Poisson oranı (ν), elastik davranış için elemanlara atanmış olup gerçek gerilme ve plastik şekildeğiştirme diyagramı ise akma ve akma sonrası davranış için tanımlanmıştır.

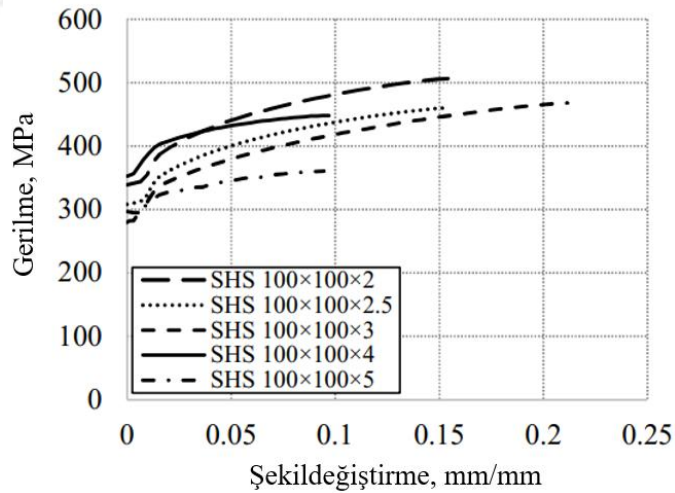
Gerçek gerilme (σ_{true})- plastik şekildeğiştirme (ε_{pl}) verileri, statik çekme testlerinden nominal gerilme (σ_{nom})- nominal şekildeğiştirme (ε_{nom}) verilerinin dönüştürülmesiyle elde edilmiştir. (Şekil 15). Dönüştürme, Denk. (1-3) kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Hibbitt vd., 2011).

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \quad \text{Denklem (1)}$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad \text{Denklem (2)}$$

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad \text{Denklem (3)}$$

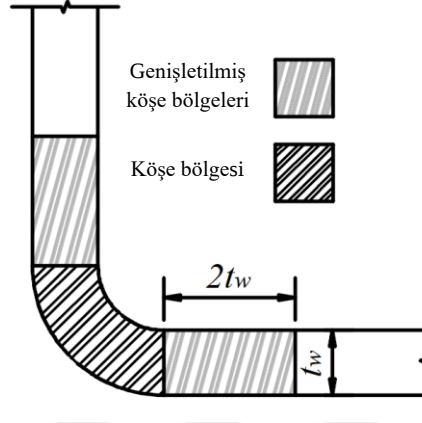
Elde edilen σ_{true} ve ε_{pl} verileri ABAQUS’de izotropik pekleşme prensipleri dikkate alınarak tablo halinde tanımlanmıştır. İzotropik pekleşme, akma yüzeyinin her yönde eşit şekilde boyut değiştirmesini ifade eder ve bu durum plastik şekildeğiştirme meydana geldiğinde akma gerilmesinin her yönde artmasına veya azalmasına neden olur. Ayrıca, Poisson oranı ve birim hacim ağırlığı (ρ), tüm çelik kutu profiller için sırasıyla 0,3 ve 7850 kg/m³ olarak tanımlanmıştır.



Şekil 15. Çelik kutu profillerin gerçek gerilme (σ_{true})-plastik şekildeğiştirme (ε_{pl}) diyagramları

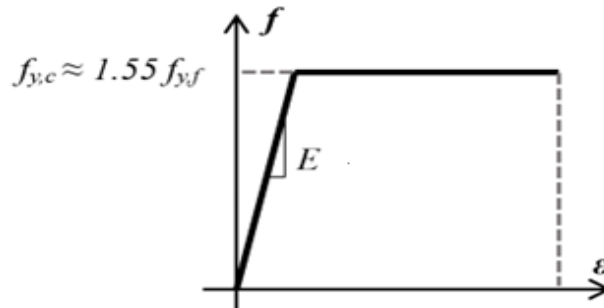
Soğuk şekillendirme işlemi, göreceli olarak düşük et kalınlığına sahip elemanların çeşitli yapısal bileşenlere dönüştürmek için kullanılan bir üretim yöntemidir. Soğuk şekillendirme işlemi, kesitlerin deforme olmuş bölgelerinde değişen derecelerde plastik şekildeğiştirmelere neden olarak malzemenin mekanik özelliklerini değiştirmektedir. Gerçekçi sayısal modelleme

ve analiz süreçlerinin yürütülebilmesi için, çelik kutu profillerin soğuk şekillendirme işlemleri ile değişen mekanik özellikleri genişletilmiş köşe bölgesi boyutu dikkate alınarak, Ma vd. (2019) tarafından benimsenen yaklaşıma göre ve deney elemanı et kalınlıklarına bağlı olarak belirlenmiştir (Şekil 16).



Şekil 16. Soğuk şekillendirilmiş çelik kutu profillerde genişletilmiş köşe bölgelerinin gösterimi (Ma vd. 2019)

Bu çalışma kapsamında, köşe bölgelerinden doğrudan çekme testi sonuçları deneysel olarak elde edilememiştir. Bu nedenle genişletilmiş köşe bölgelerinin akma ve çekme dayanımları, köşe bölgesinin akma dayanımının (f_y, c) düz bir bölgenin akma dayanımına (f_y, f) oranı kullanılarak tahmin edilmiştir (Liu vd., 2023; Xu vd., 2019). Bu oran, soğuk şekillendirme nedeniyle akma dayanımındaki artışı temsil etmektedir. Sayısal çalışmalarda, genişletilmiş köşe bölgeleri için kabul edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi, Şekil 17'de gösterilen ideal elasto-plastik gerilme-şekildeğiştirme diyagramı ile dikkate alınmıştır.

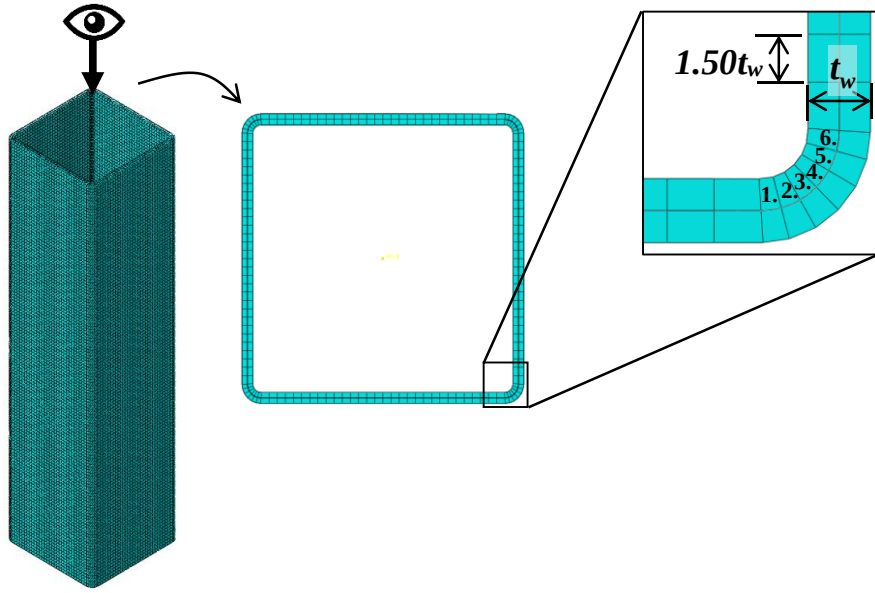


Şekil 17. Genişletilmiş köşe bölgeleri için kabul edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi

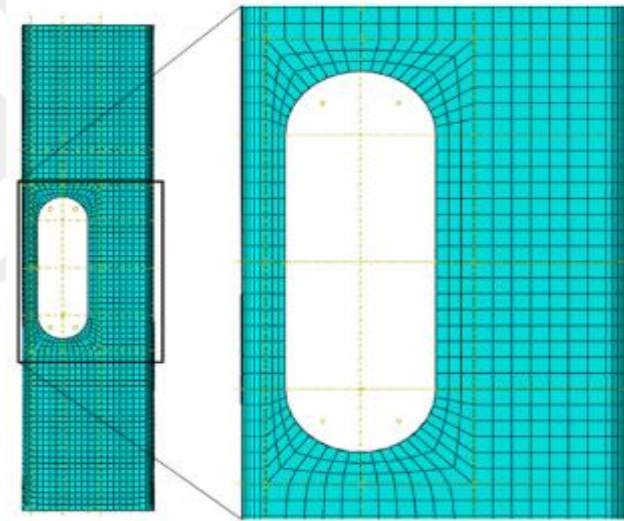
Ayrıca, soğuk şekil verme yöntemi ile üretilmiş kutu profillerde kaynaklama ve soğuk şekillendirme işlemlerinden dolayı artık gerilmeler ortaya çıkabilmektedir. Bu gerilmeler, soğuk şekillendirilmiş çelik elemanların yükleme altındaki deneysel davranışlarını etkileyebilirken, yapılan çalışmalar söz konusu elemanların sayısal analizlerinde artık gerilmelerin yük-yerdeğiştirme ilişkisi ve yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkilerinin ihmal edilebilir olduğunu ileri sürmüştür (Huang ve Young, 2014; Ma vd., 2016). Sonuç olarak, çalışma kapsamında yapılan sayısal analizlerde, çelik kutu profillerin sayısal modeli oluşturulurken ek artık gerilmeler dikkate alınmamıştır.

4.2. Sonlu Eleman Ağı'nın Oluşturulması

Sonlu kabuk elemanları, doğal geometrileri nedeniyle göreceli olarak et kalınlığı az olan elemanların modellenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, farklı et kalınlıklarına ve sonlu eleman tiplerine sahip soğuk şekillendirilmiş çelik kutu profillerin optimum sonlu eleman boyutlarını belirlemek için sonlu eleman boyutu yakınsama çalışması yapılmıştır. Yakınsama çalışmasının sonuçları, çelik kutu profillerin düz olan gövde parçaları için, yakınsamanın eleman et kalınlığının yaklaşık 1,50 katı kullanılarak sağlandığını göstermiştir. Soğuk şekillendirme işlemi sonrası söz konusu elemanlarda oluşan dairesel geometriye sahip köşe bölgeleri için ise eğrisel formu doğru bir şekilde dikkate almak amacıyla Singh ve Chan (2021) tarafından yapılan çalışmaya benzer şekilde, bölgeler altı sonlu elemana bölünmüştür. Şekil 18 (a)'da 2,00 mm et kalınlığına sahip bir çelik kutu profillerin sonlu eleman ağı görünümü verilmiştir. Delik açılmış deney elemanlarının modellenmesinde ise çelik kutu profilin düz olan gövde kısımlarındaki süreksizlikler nedeniyle farklı bir sonlu eleman ağı oluşturma yönteminin kullanılma ihtiyacı doğmuştur. Bu nedenle, önceki çalışmalarda tercih edilen delik kenarından uzaklaştıkça sonlu eleman boyutunun arttığı bir sonlu eleman ağı sistemi dikkate alınmıştır Şekil 18 (b). (bkz. Nemade ve Shikalgar 2020; Singh ve Chan, 2021; Tsamasphyros ve Giannakopoulos, 1985; Zeytinci vd., 2021)



(a) Deliksiz eleman modelleri için sonlu eleman ağı



(b) Delik açılmış eleman modelleri için sonlu eleman ağı

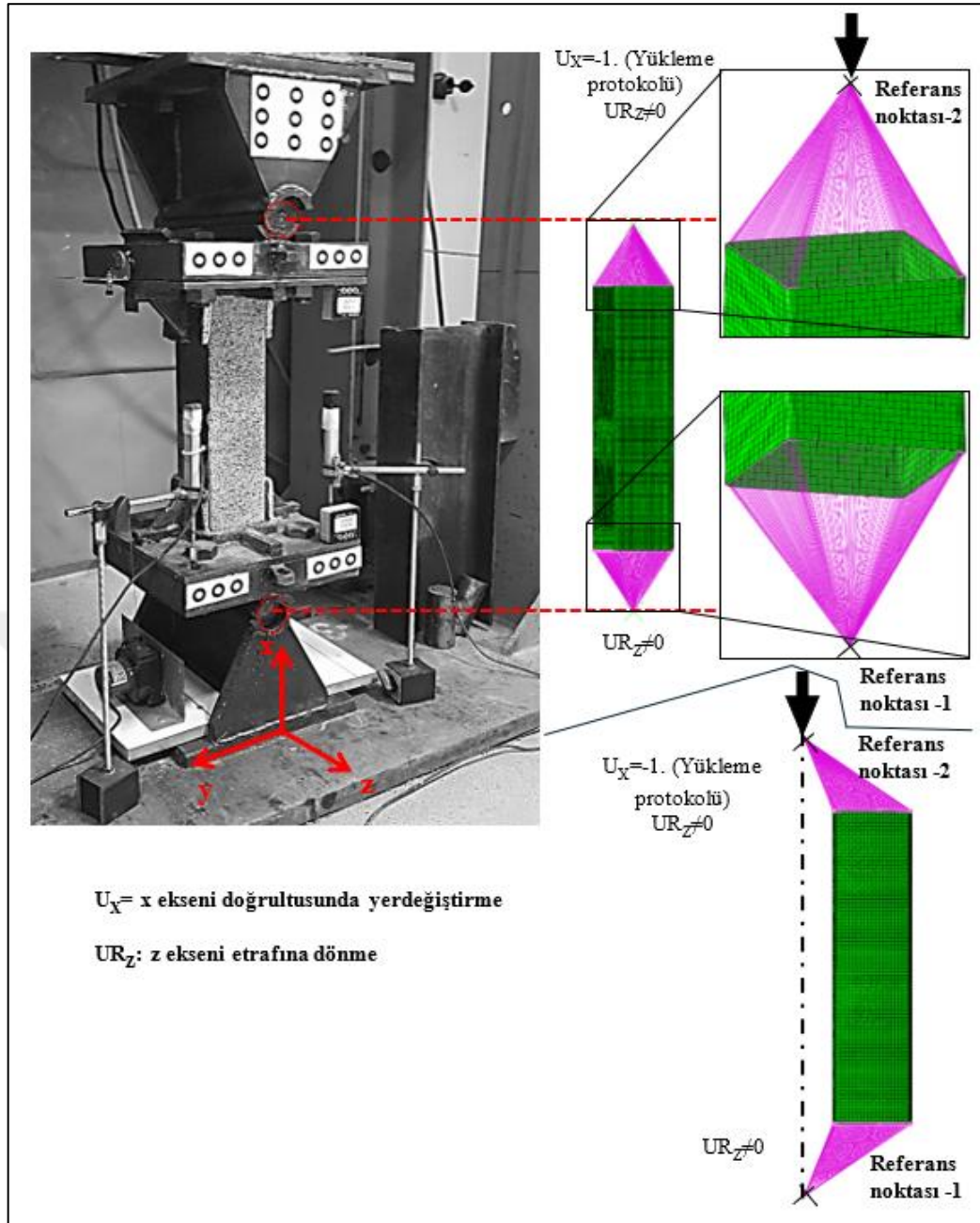
Şekil 18. Delikli ve deliksiz eleman modelleri için sonlu eleman ağı görünümleri

Ayrıca bu çalışmada, sekiz düğüm noktalı, her bir düğüm noktasının beş serbestlik derecesine sahip olduğu S8R5 sonlu elemanı ile genel dört düğüm noktalı S4R sonlu elemanı kullanılarak elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri kullanılarak farklı sonlu eleman tiplerinin analiz sonuçları üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Sonuçlar, S8R5 sonlu elemanının yük-yerdeğiştirme eğrilerinin maksimum yük değeri sonrası yük taşıma kapasitesindeki azalmayı S4R elemanın göre daha doğru bir şekilde tahmin ettiğini göstermiştir. Bu durum, S8R5'in S4R'den daha yüksek dereceli bir ikinci dereceden sonlu eleman olmasına ve daha fazla

sayıda noktaya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal analizlerde S8R5 sonlu elemanı kullanılmıştır.

4.3. Sınır Koşulları

Sayısal modellerde, eksenel ve eksantrik basınç yüklemesi için mesnet ve yükleme koşullarını tanımlamak amacıyla ideal olarak "rijit gövde (rigid body)" kısıtlama tipi kullanılmıştır. Rijit gövde kısıtlaması, montaj bölgelerinin hareketlerini referans noktalarının hareketleri ile sınırlamıştır. Şekil 19'da gösterildiği gibi, referans noktaları, mafsal pimlerinin merkezleri dikkate alınarak alt ve üst mafsalı mesnetlerin tanımlanması için konumlandırılmıştır (bkz. Şekil 9 (b)). Sınır koşulları ise alt ve üst mesnetlerin z eksenine etrafında serbestçe dönebilmesi ve yalnızca üst mesnetin dikey doğrultuda (x eksenine doğrultusu) yerdeğiştirebileceği şekilde tanımlanmıştır.



Şekil 19. Sayısal analizlerde dikkate alınan mesnet koşulları ve gösterimi

4.4. Yerel Geometrik Kusurlar

Bu çalışmada, aksenal ve eksantrik basınç yüklemesi altında delikli ve deliksiz kısa çelik kutu profil kolon numunelerinin davranışlarını araştırmak için yerel geometrik kusurlar göz önünde bulundurulmuştur. Numunelerin kusurlu geometrisini sayısal analize dahil etmek için, ABAQUS’de bulunan Lanczos Eigensolver kullanılarak herhangi bir yerel kusurun olmadığı geometri dikkate alınarak elastik bir burkulma analizi gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak

elde edilen deformasyon moduyla eşleşen kritik en düşük burkulma modu şekli, doğrusal olmayan burkulma analizinde ölçeklenmiş ve söz konusu ölçekleme işlemi matematiksel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmiştir (Denk. 4.).

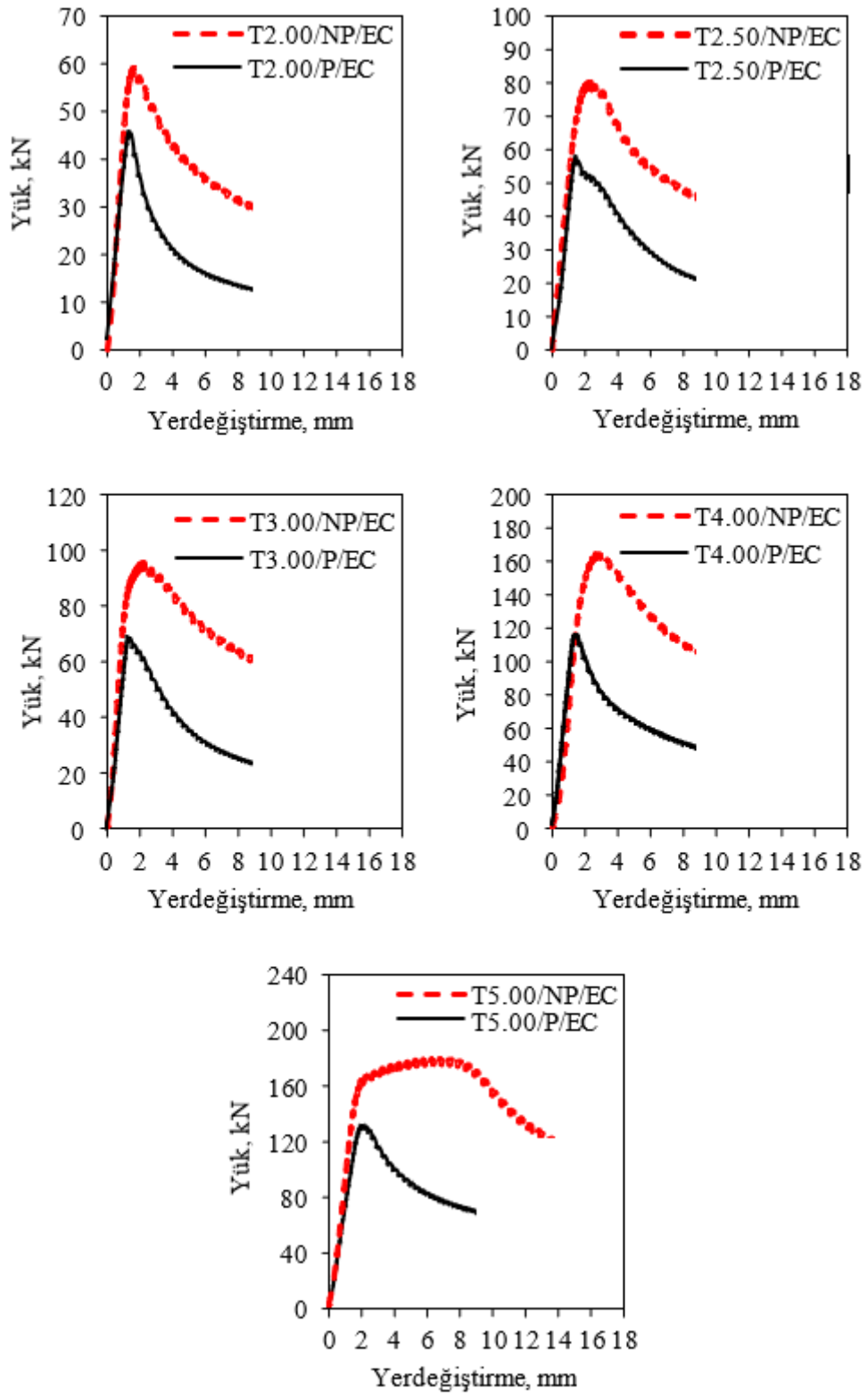
$$\Delta_{xi} = \sum_{i=1}^M \omega_i \phi_i, \quad \text{Denklem (4)}$$

Burada, ϕ_i i.mod şeklini ve ω_i ise ilgili elastik burkulma modu için ölçek faktörüdür. Denklem 4’te görüldüğü gibi, farklı burkulma modları dikkate alınabilmektedir (bkz. Dawson, 1972; Ma vd., 2019; Singh ve Chan, 2021). Ancak genel yaklaşım, ilk kritik burkulma modunu dikkate alınmasıdır. Bu çalışmada, delikli ve deliksiz çelik kutu profil modellerindeki başlangıç yerel geometrik kusurları, numunelerden yapılan ölçümlere ve çelik kutu profillerin nominal et kalınlıklarına (t_w) dayalı büyüklüklere göre tanımlanmıştır. Farklı yerel geometrik kusur genlikleri dikkate alınarak gerçekleştirilen sayısal analizlerin karşılaştırmalı sonuçları Tablo 5’ te özetlenmiştir.

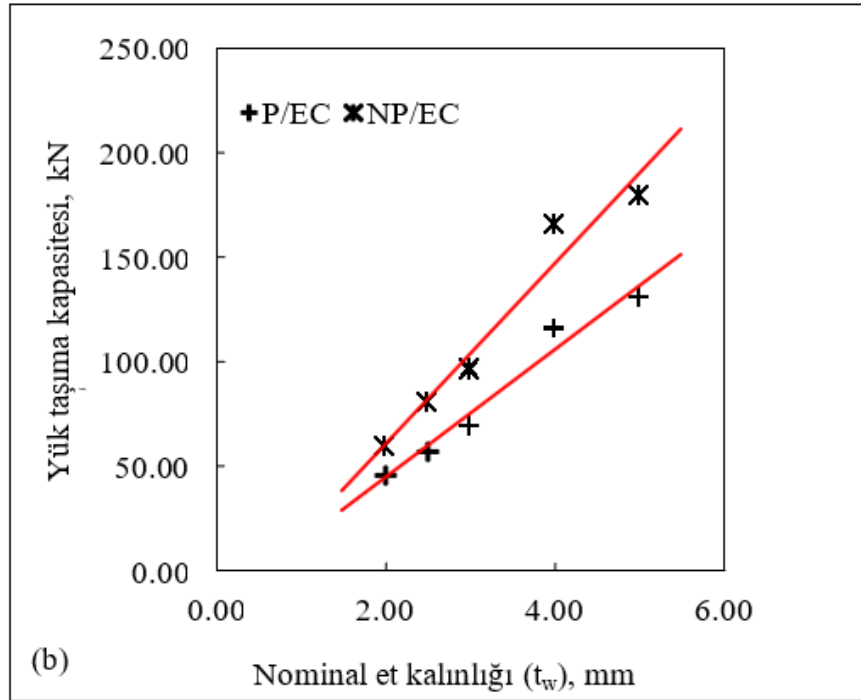
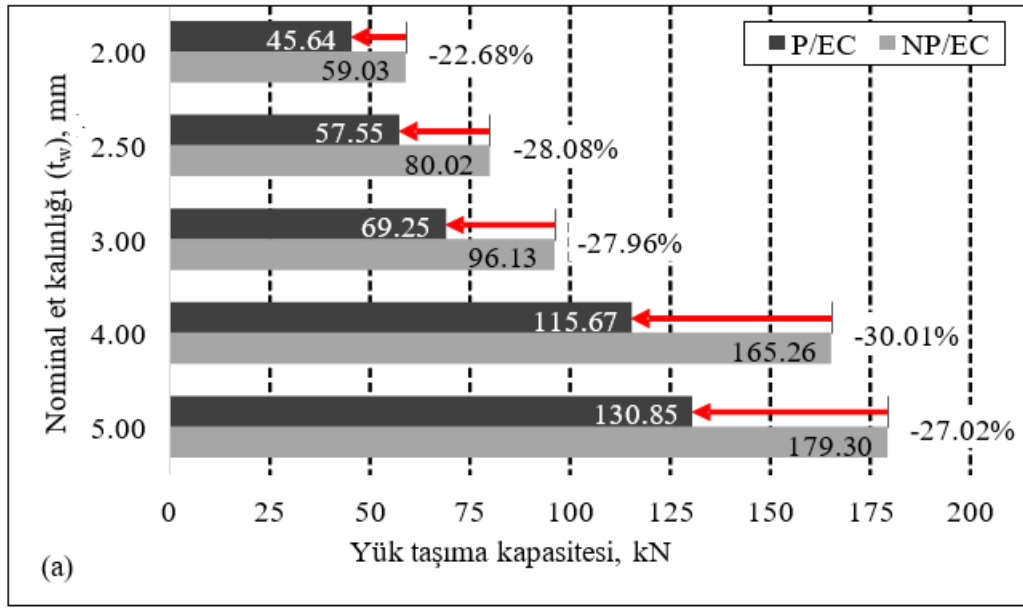
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

5.1. Delinmenin Yük Taşıma Kapasitesi Üzerindeki Etkileri

Bu bölümde, eksantrik basınç yükleme altındaki delikli ve deliksiz numunelerin deneylerinden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 20’de verilmiştir. Deliksiz ve delikli numunelerin sonuçları karşılaştırıldığında deliklerin varlığının her et kalınlığında numunelerin yük taşıma kapasitesini azalttığını göstermektedir. 2,00 mm et kalınlığı hariç tüm numuneler için ortalama azalma yaklaşık olarak %28’dir (Şekil 21(a)). İnce et kalınlıklı numune (T2.00/NP/EC), daha kalın et kalınlıklı numunelere kıyasla yük taşıma kapasitesinde daha küçük bir azalma sergilemiş, bu durum deney elemanının delinmenin etkilerine karşı daha toleranslı olduğunu göstermiştir. Ayrıca, delikli ve deliksiz deney elemanlarında, nominal et kalınlığı ve nihai yük taşıma kapasitesi yaklaşık olarak doğrusal bir ilişki göstermektedir (Şekil 21(b)).



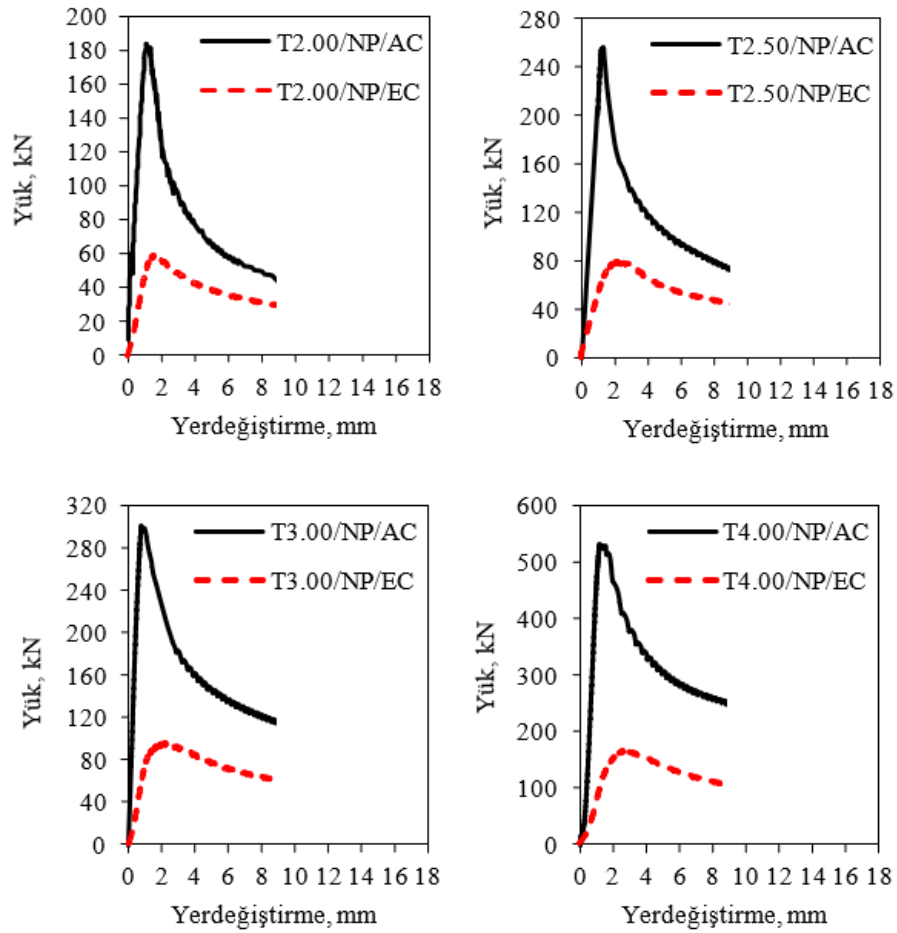
Şekil 20. Et kalınlığına göre gruplandırılmış delikli ve deliksiz numunelerin yük-yerdeğiştirme eğrileri



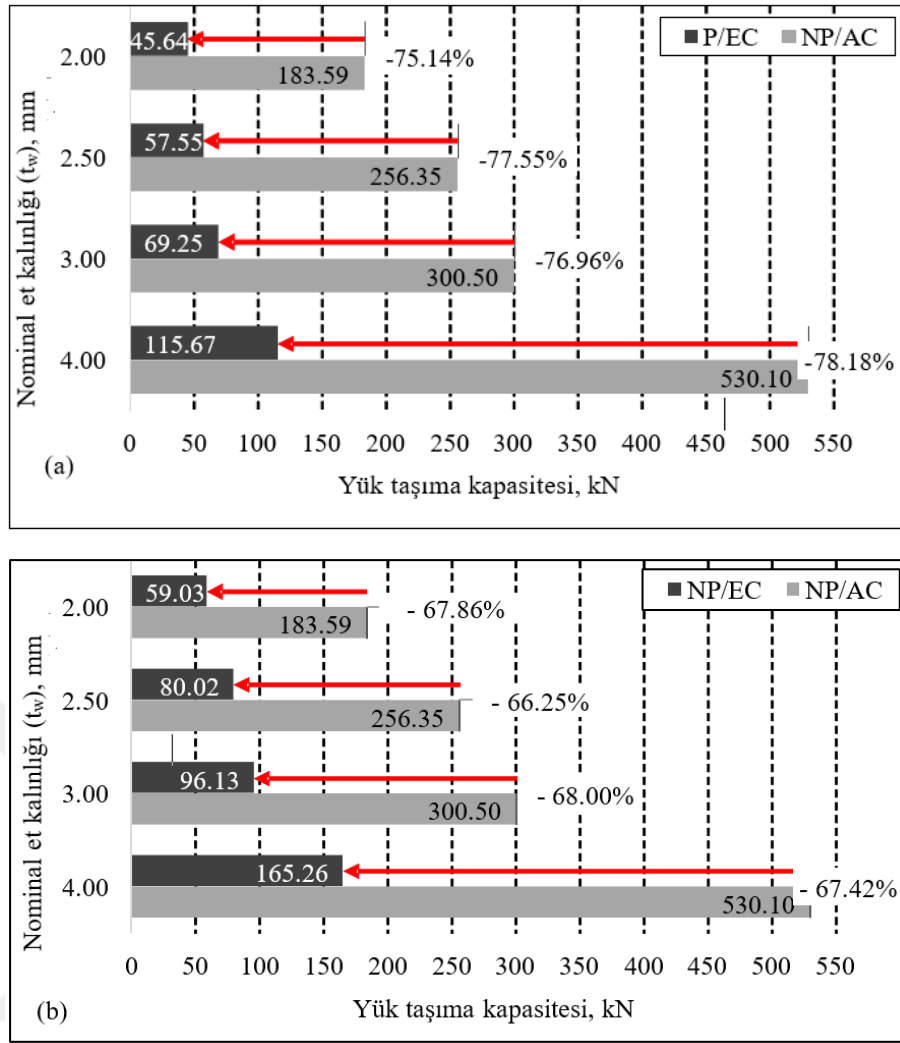
Şekil 21. P/EC ve NP/EC numunelerinin deney sonuçlarının karşılaştırılması

5.2. Yükleme Durumunun Etkileri: Eksenel ve Eksantrik Basınç Yüklemesi

Bu bölümde, eksenel ve eksantrik basınç yükleme altında delikli ve deliksiz numuneler üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar tartışılmaktadır. Yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 22’de verilmiştir. Şekil 23’te görüldüğü gibi, eksenel ve eksantrik basınç yükleme altında deliksiz numunelerin yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırması, NP/EC kombinasyonunun, nominal et kalınlığından bağımsız olarak NP/AC ’ye göre yaklaşık %67 daha düşük bir kapasiteye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, P/EC ve NP/AC kombinasyonlarının karşılaştırılması, yük taşıma kapasitesindeki azalmanın et kalınlığından bağımsız olarak yaklaşık %75-%78 arasında olduğunu göstermektedir.



Şekil 22. Et kalınlığına göre gruplandırılmış deliksiz numunelerin yük- yerdeğiştirme eğrileri



Şekil 23. P/EC ve NP/AC (a) ve NP/EC ve NP/AC (b) numunelerinin deney sonuçlarının karşılaştırılması

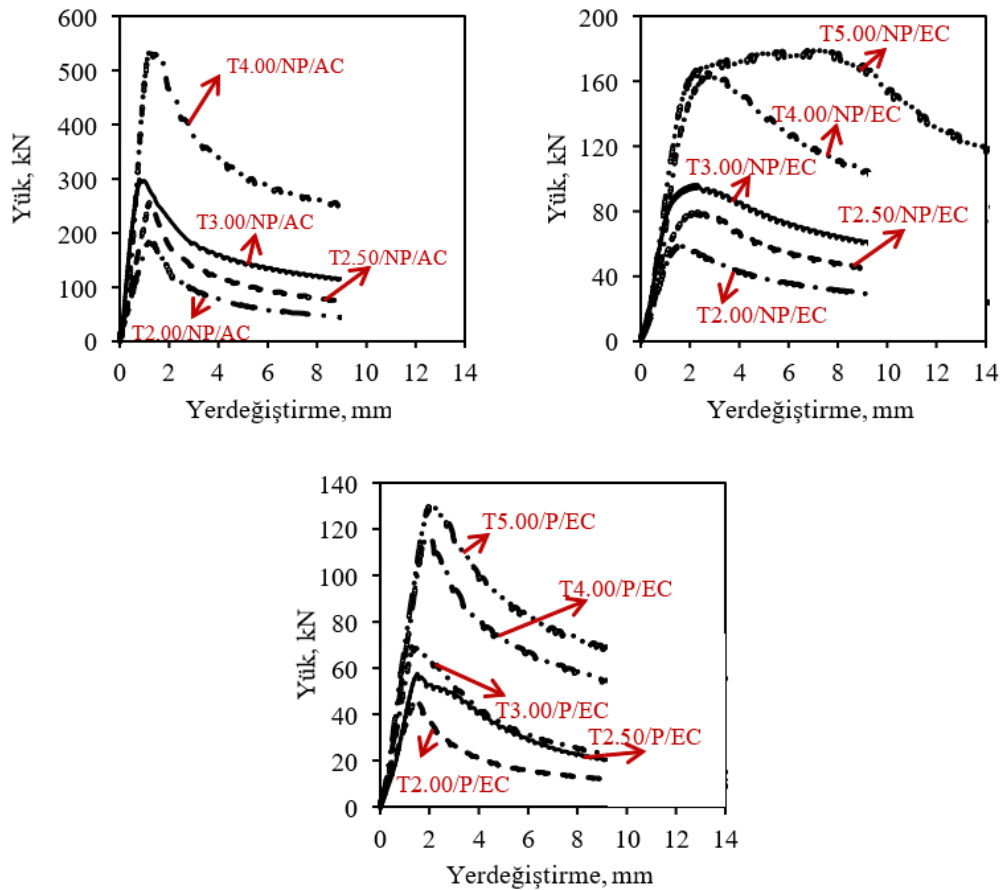
5.3. Et Kalınlığının Yük Taşıma Kapasitesi Üzerindeki Etkileri

Şekil 24’te görüldüğü gibi, et kalınlığı arttıkça test numunelerinin yük taşıma kapasiteleri de artmıştır. Ancak, et kalınlığının yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi tüm test koşullarında aynı olmamıştır. Et kalınlığındaki artışın sağladığı kapasite artışı, NP/AC kombinasyonunda en belirgin şekilde gözlemlenmiştir. Ayrıca, Şekil 25’ te görüldüğü gibi et kalınlığı artışının P/EC kombinasyonundaki kapasiteye etkisi daha sınırlı olmuştur. Şekil 26’da 2,00 mm et kalınlığına sahip test elemanlarının yerel burkulmasının ilk aşamasında von Mises şekildeğiştirmesi (ϵ_M) dağılımını gösterilmektedir. Bu şekil ayrıca diğer test elemanlarının tüm kombinasyonlar altındaki davranışlarını da temsil etmektedir. GOM Correlate (2019) yazılımında, von Mises eşdeğer şekildeğiştirmeleri aşağıda verilen Denk. 5 ile hesaplanmaktadır.

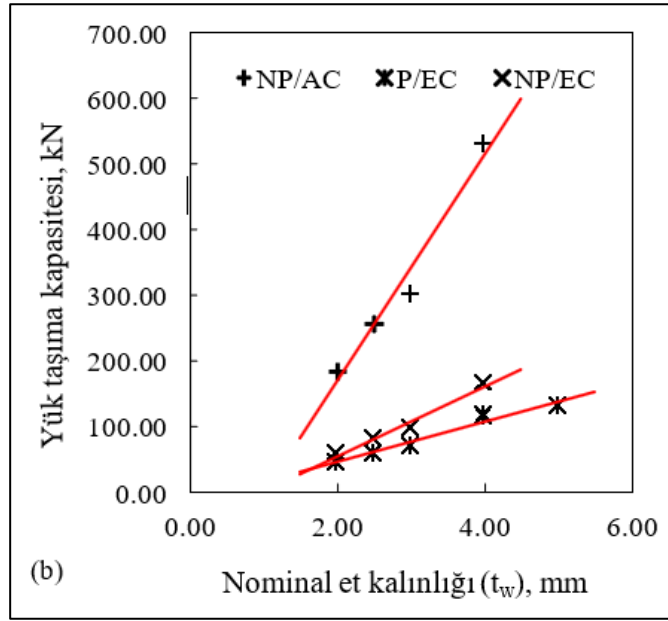
$$\varepsilon_M = \sqrt{\frac{2}{3} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}$$

Denklem (5)

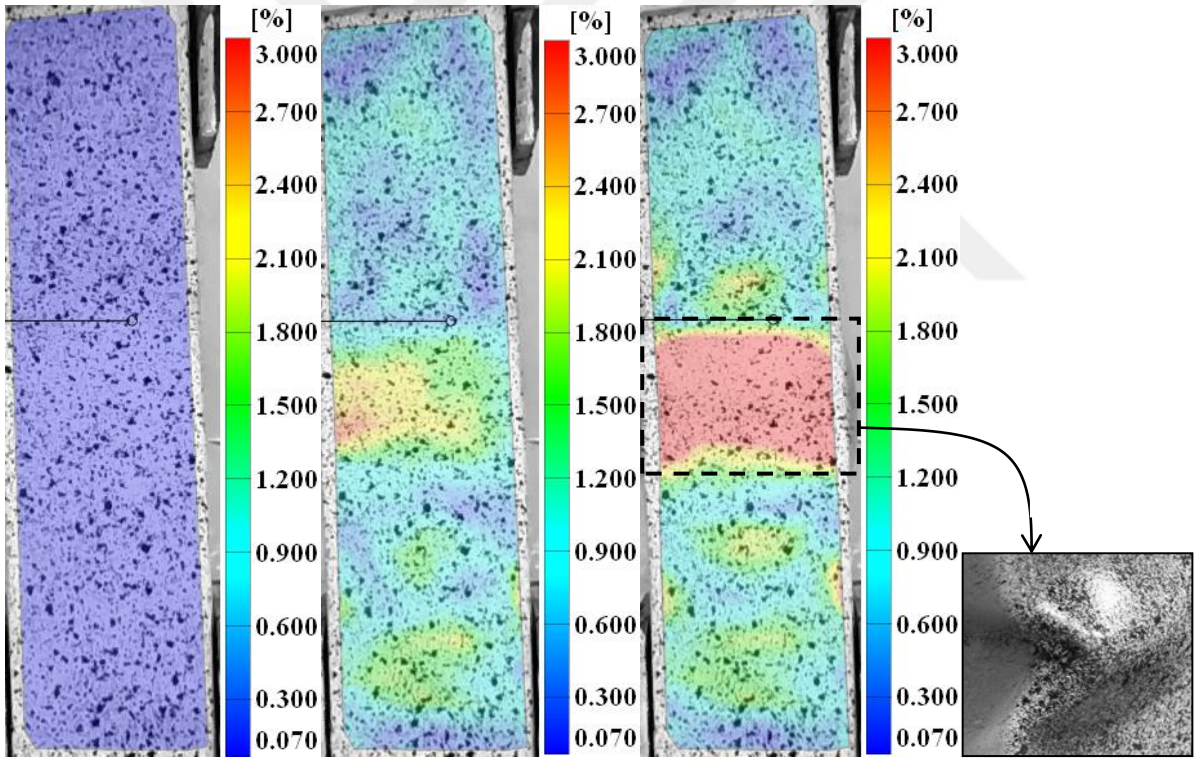
Şekil 26(a)'dan görüldüğü gibi, eksenel basınç yüklemesi altında şekildeğiştirme, elemanın kesiti boyunca göreceli olarak düzgün bir şekilde dağılmış ve bu durum, yüksek bir yük taşıma kapasitesi elde edilmesini sağlamıştır. Ancak, Şekil 26(b)'den görüldüğü gibi eksantrik basınç yüklemesi altında şekildeğiştirme, uç momentine karşılık gelen dar bir bölgede yoğunlaşmış ve bu durum, kesit parçalarının üniform olmayan yük paylaşımı nedeniyle daha düşük bir yük taşıma kapasitesi elde edilmesine neden olmuştur. Şekil 26(c)'den görüldüğü gibi, P/EC kombinasyonunda şekildeğiştirme yoğunlaşması, eksantrik basınçla aynı tarafta bulunan çelik kutu profil kesitinin çok küçük bir kısmı olan delik çevresinde meydana gelmiştir. Bu durum, P/EC kombinasyonunun yük taşıma kapasitesinin, NP/AC ve NP/EC kombinasyonlarından daha düşük bir yük taşıma kapasitesi elde edilmesi ile sonuçlanmıştır.



Şekil 24. Her et kalınlığı için yük-yerdeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılması

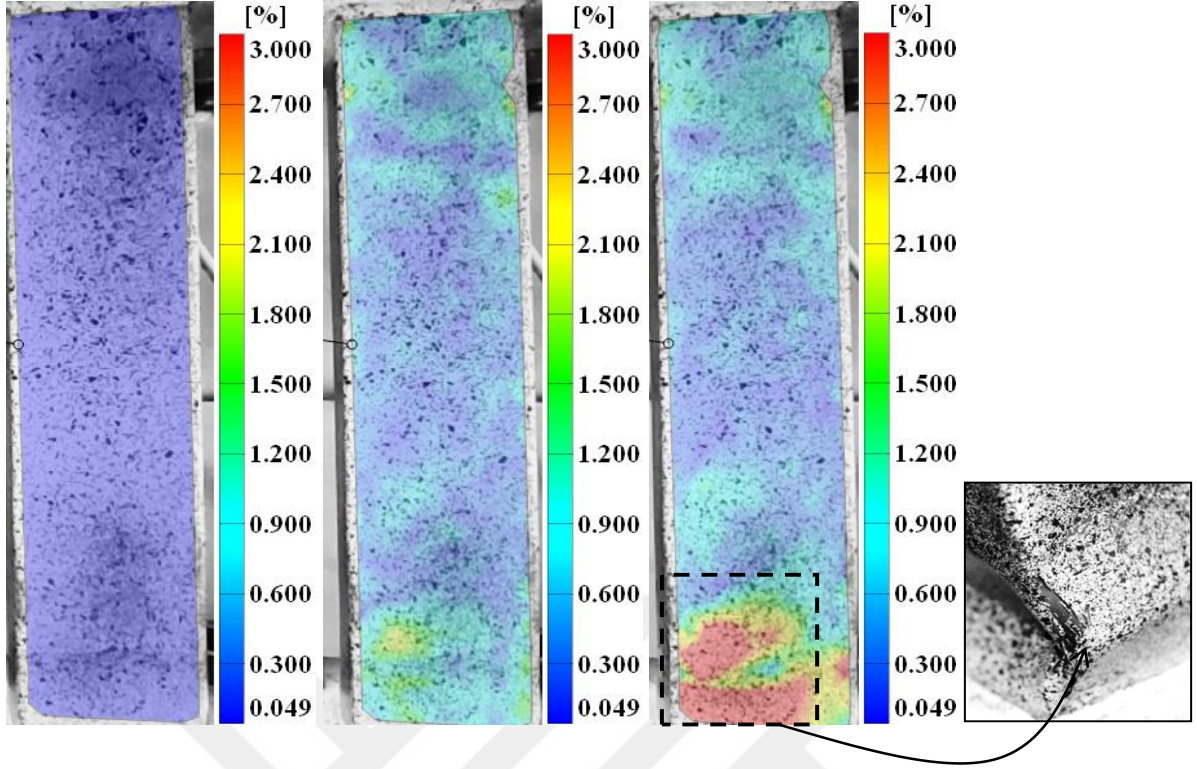


Şekil 25. NP/AC, P/EC ve NP/EC numunelerinin test sonuçlarının karşılaştırılması

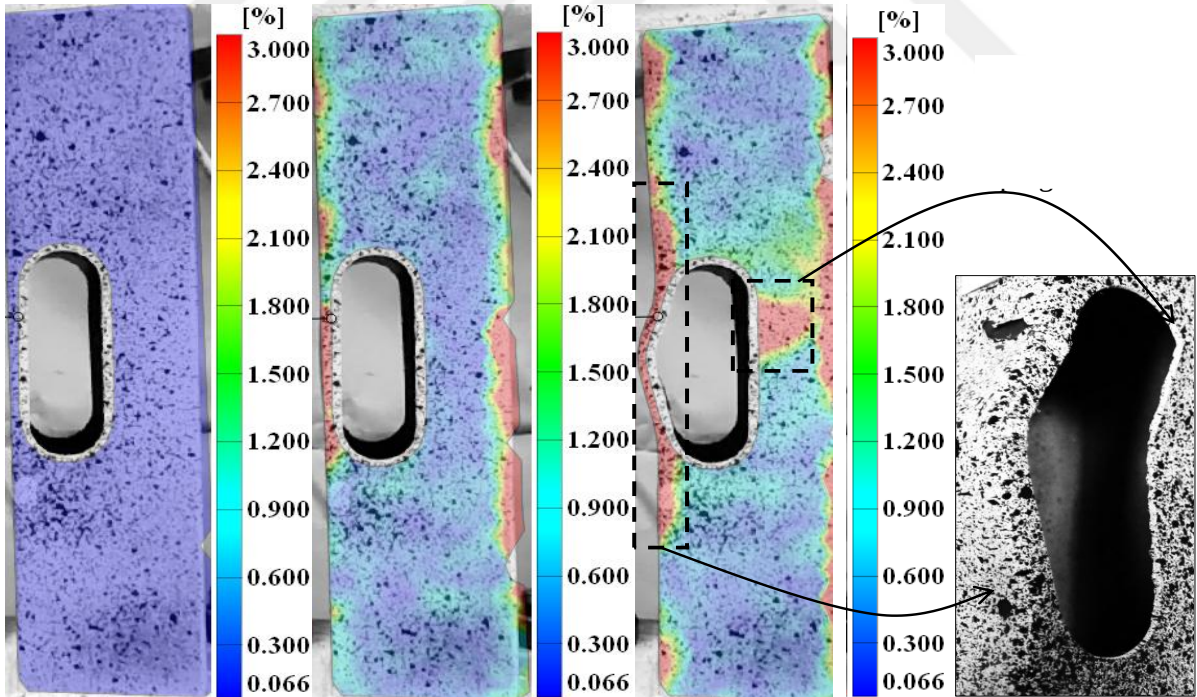


Şekil 26. Yerel burkulmaların başlangıç aşamalarında numunelerin ön yüzlerindeki von Mises şekildeğiştirme dağılımı

Şekil 26'nın devamı



(b) T2.00/NP/EC



(c) T2.00/P/EC

5.4. Sayısal ve Deneysel Çalışma Bulgularının Karşılaştırılması

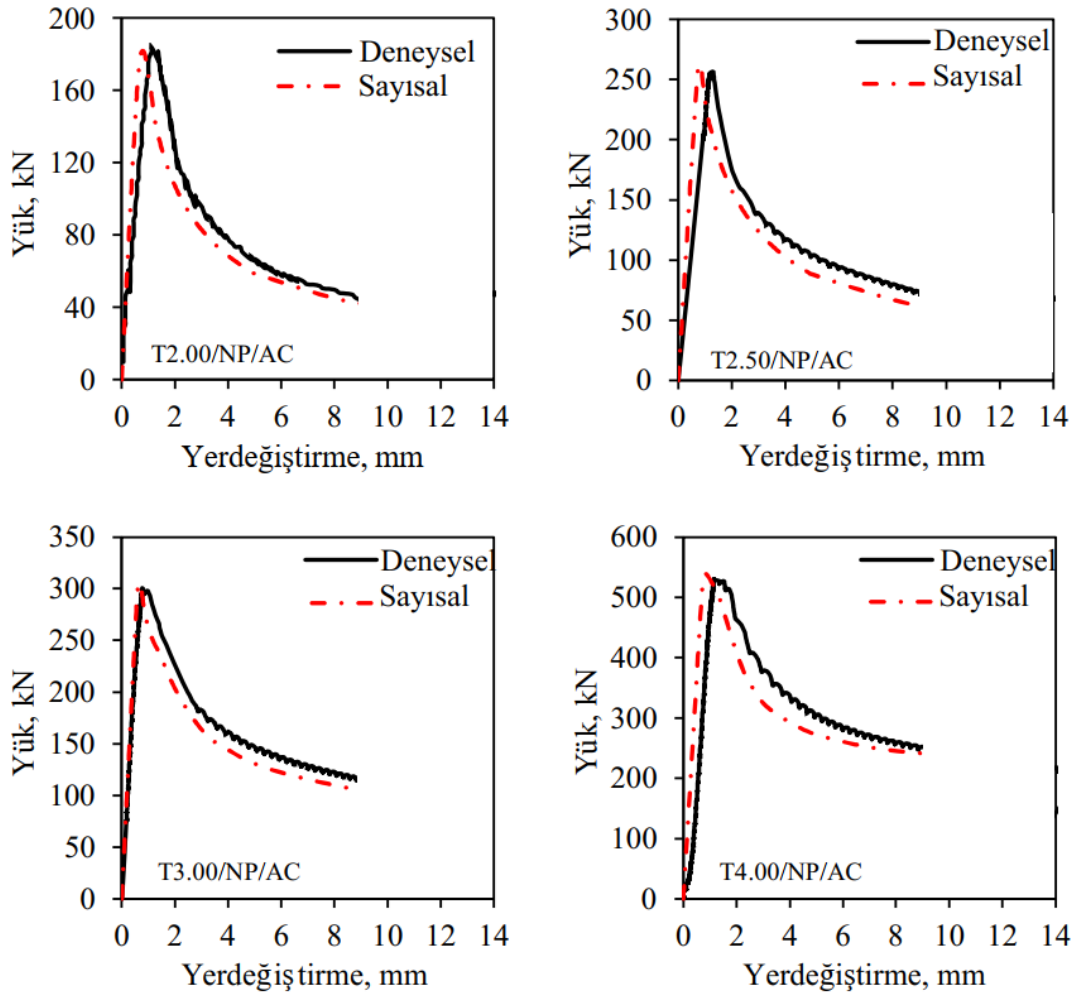
Bu bölümde, sayısal analizlerin ve deneysel bulguların karşılaştırmalı bir analizi sunulmuştur. Deneysel ve sayısal yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 27'de verilmiştir. Şekillerden görülebileceği gibi, tüm deney elemanlarının yük-yerdeğiştirme ilişkileri hem maksimum yük hem de maksimum yükten sonraki eğri profili açısından sayısal olarak doğru bir şekilde tahmin edilebilmiştir. Ancak, sayısal ve deneysel olarak elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrilerin ilk kısımlarının eğimlerinin (başlangıç rijitliği) karşılaştırılması sonucunda başlangıç rijitliklerinin tam olarak uyuşmadığı görülmektedir. Bu durum, deneysel olarak elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrilerinin başlangıç rijitliği ile sayısal analiz sonuçları arasındaki farklılıkların, sınır koşullarının ve deneyler sırasındaki yüklemenin, ideal sınır koşullarını tanımlandığı sayısal modellerde tam olarak uygulanamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 27 (d)'de deneysel ve sayısal olarak elde edilen yük taşıma kapasitelerini karşılaştıran dağılım grafiği sunulmaktadır. Ayrıca, sayısal ve deneysel olarak elde edilen yük taşıma kapasiteleri ise Tablo 5'te sunulmuştur.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen sayısal analiz aşamasında dikkate alınan başlangıç yerel kusur genlikleri incelendiğinde, deneysel olarak ölçülen ω_0 ile $t_w/10$ büyüklüğündeki kusur genliği dikkate alınarak gerçekleştirilen analiz sonuçlarının iyi derecede uyuştugu görülmüştür. Buna rağmen, başlangıç kusur genliğinin $t_w/100$ olması durumunda ise sayısal analiz sonuçlarının göreceli olarak daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.

Ek olarak, nihai hasar durumları doğrusal olmayan yerel burkulma modu açısından iyi tahmin edilebilmiş olmasına rağmen yerel burkulmaların yoğunlaştığı bölge, özellikle de deliksiz test elemanının sayısal analizi durumunda tam olarak elde edilememiştir (Şekil 28). Bu durum, temsili ölçümlerden elde edilen başlangıçtaki yerel kusur genliklerinin gerçek numunelerin genlikleriyle tam olarak uyuşmaması ve testlerdeki sınır koşullarının sayısal analiz aşamasında tam olarak dikkate alınamamasından kaynaklanmaktadır.

Tablo 5. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması

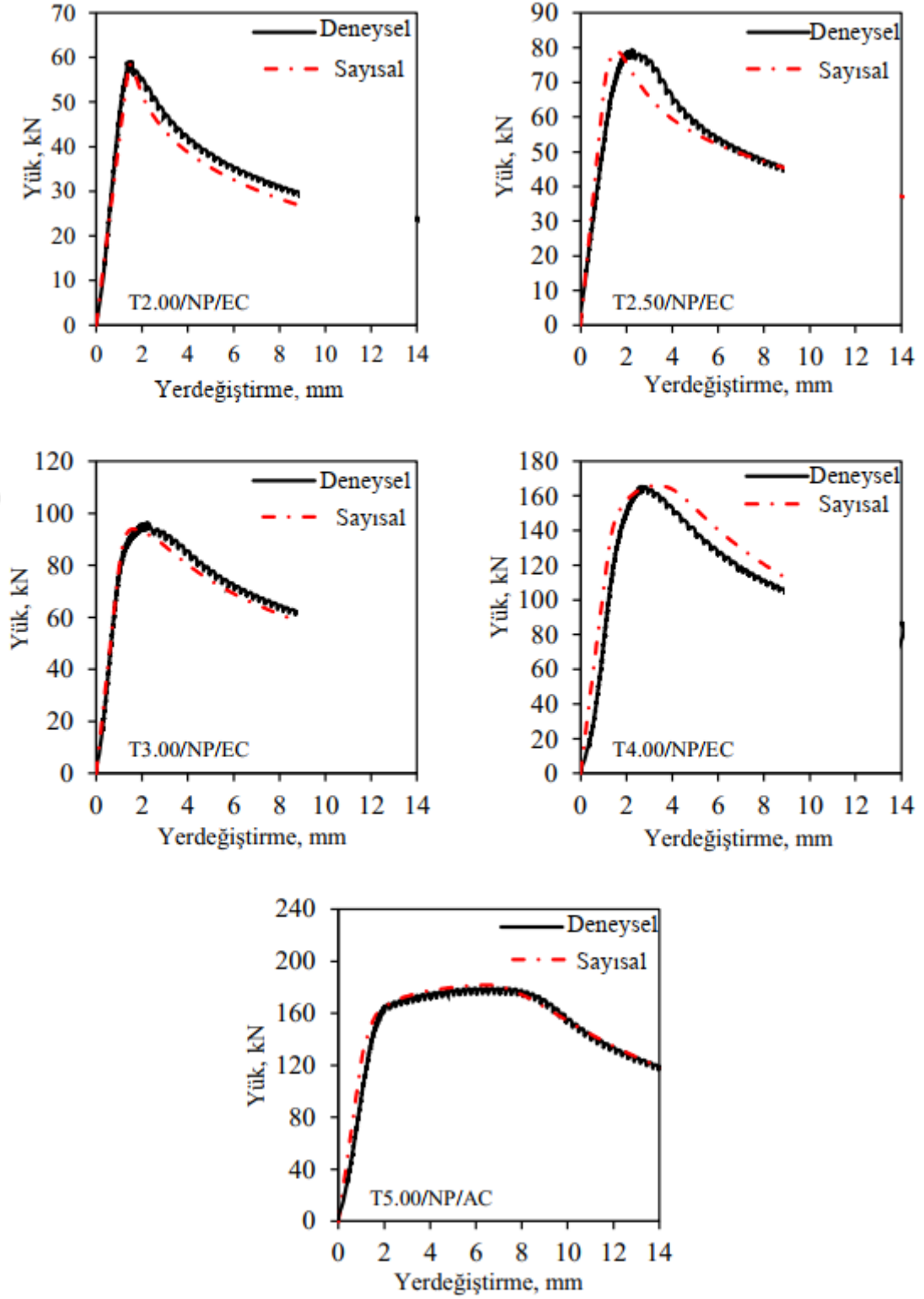
Deney elemanı	Yük taşıma kapasitesi, kN				$P_{\text{Deneysel}}/P_{\text{Sayisal}}$		
	P_{Deneysel}	P_{Sayisal}			ω_0	$t_w/10$	$t_w/100$
		ω_0	$t_w/10$	$t_w/100$			
T2.00/NP/AC	183.59	181.86	186.29	203.87	1.01	0.99	0.90
T2.00/NP/EC	59.03	58.95	59.54	60.67	1.00	0.99	0.97
T2.00/P/EC	45.64	44.73	45.07	45.42	1.02	1.01	1.00
T2.50/NP/AC	256.35	262.63	264.40	289.16	0.98	0.97	0.89
T2.50/NP/EC	80.02	78.25	78.57	85.28	1.02	1.02	0.94
T2.50/P/EC	57.55	57.48	57.59	59.07	1.00	1.00	0.97
T3.00/NP/AC	300.50	305.75	329.85	348.57	0.98	0.91	0.86
T3.00/NP/EC	96.13	94.00	97.72	106.06	1.02	0.98	0.91
T3.00/P/EC	69.25	67.65	69.50	71.27	1.02	1.00	0.97
T4.00/NP/AC	530.10	539.20	554.49	569.42	0.98	0.96	0.93
T4.00/NP/EC	165.26	165.90	171.58	182.30	1.00	0.96	0.91
T4.00/P/EC	115.67	115.57	117.30	120.00	1.00	0.99	0.96
T5.00/NP/EC	179.30	181.80	181.00	185.74	0.99	0.99	0.97
T5.00/P/EC	130.85	128.45	127.45	129.45	1.02	1.03	1.01



(a) NP/AC kombinasyonuna altında deney numunelerinin sayısal ve deneysel olarak elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri

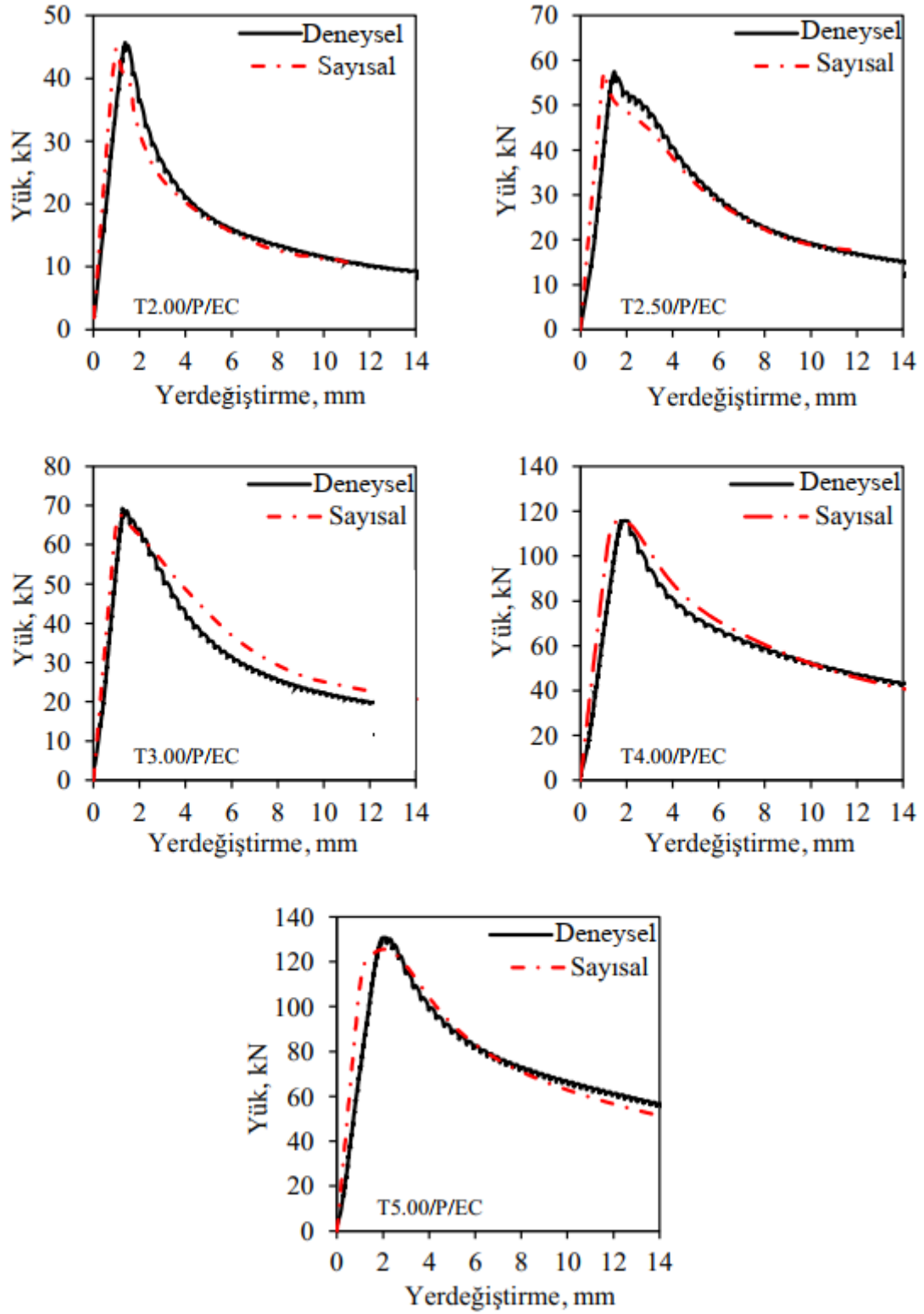
Şekil 27. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrilerinin ve yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması

Şekil 27'nin devamı



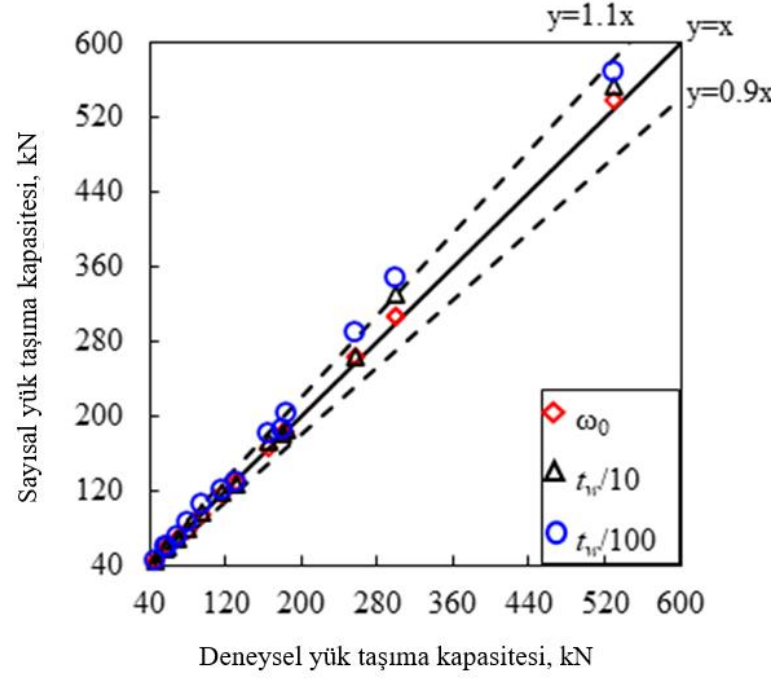
b) NP/EC kombinasyonuna altında deney numunelerinin sayısal ve deneysel olarak elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri

Şekil 27'nin devamı

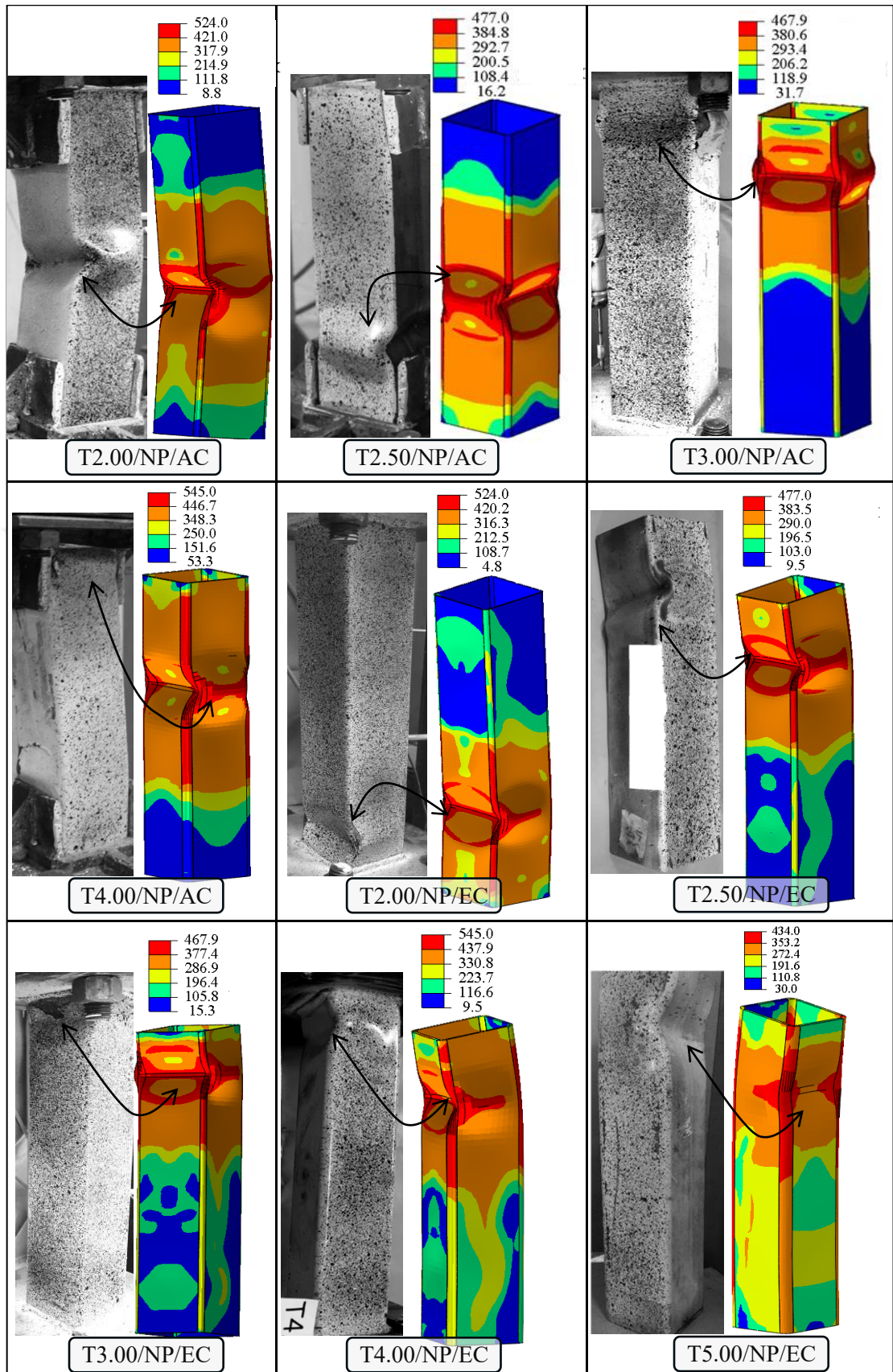


(c) P/EC kombinasyonuna altında deney numunelerinin sayısal ve deneysel olarak elde edilen yük- yerdeğiştirme eğrileri

Şekil 27'nin devamı

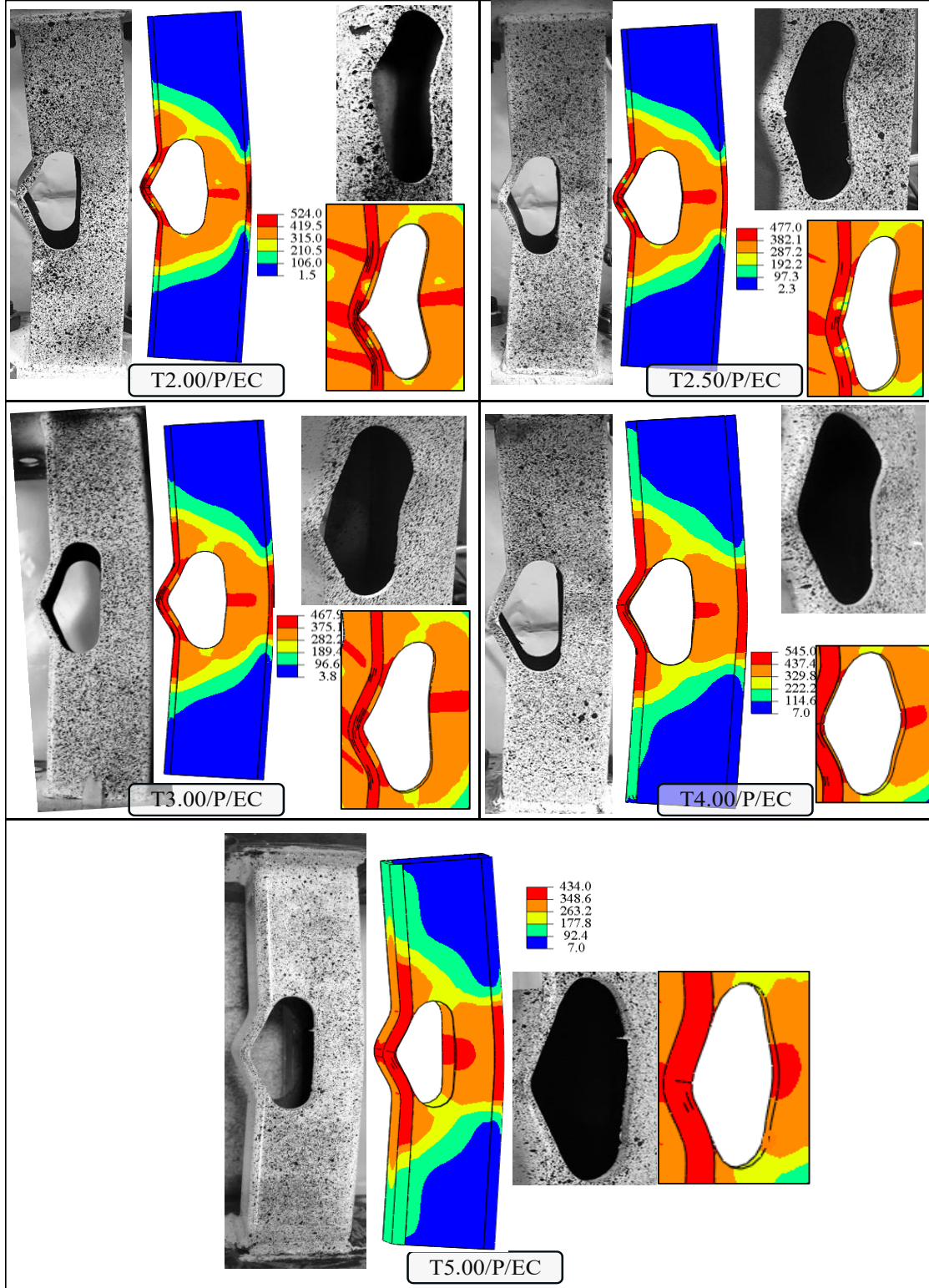


(d) Deneysel ve sayısal sonuçları karşılaştıran dağılım grafiği



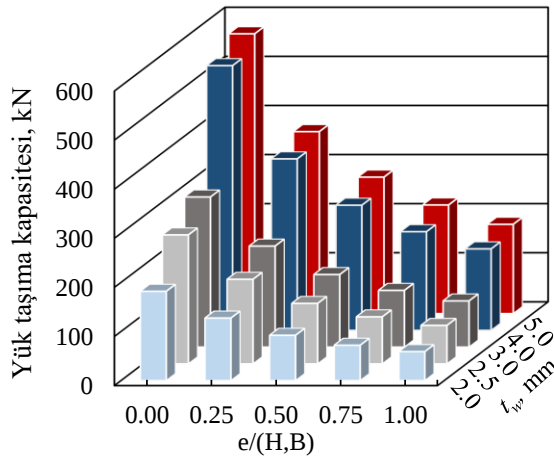
Şekil 28. Deneysel ve sayısal olarak elde edilen yerel burkulma hasar modlarının karşılaştırılması (von Mises gerilmesi MPa cinsindendir.)

Şekil 28'in devamı

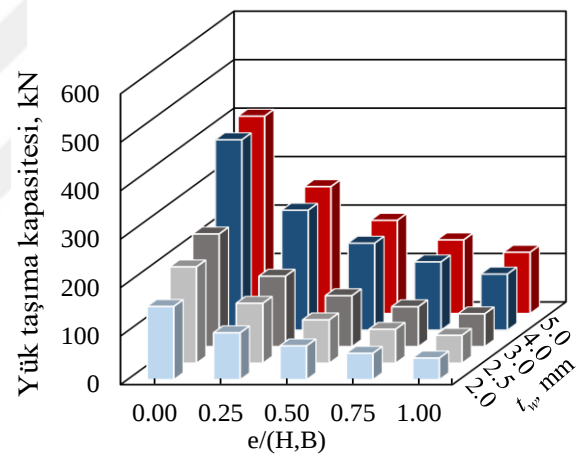


5.5. Eksantrikliğin Yük Taşıma Kapasitesi Üzerindeki Etkileri

Yukarıdaki bölümlerde sunulan deneysel ve sayısal çalışmalara ek olarak 0 ila 100 mm arasında değişen ve 25 mm'lik artışlarla farklı eksantrisite değerlerini dikkate alan sayısal bir parametrik çalışma da yürütülmüştür. Söz konusu parametrik çalışma kapsamında, eksenel ve 100 mm eksantrik basınç yükleme senaryoları için doğrulanan sayısal modeller kullanılmıştır. Sonuçlar hem delikli hem de deliksiz kutu profillerin yük taşıma kapasitesinin artan eksantriklikle birlikte yaklaşık olarak üstel olarak azaldığını göstermektedir (Şekil 29). Tüm et kalınlıkları için hem delikli hem de deliksiz numunelerde artan eksantriklikle birlikte yük taşıma kapasitesindeki tutarlı azalma, bu parametreler arasında güçlü ve potansiyel olarak öngörülebilir bir ilişki olduğunu göstermektedir. Ek olarak, eksantrikliğin artırılması, kutu profil et kalınlığının yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini azaltmıştır. Parametrik çalışma sonuçları Tablo 6' da özetlenmiştir.



(a) Deliksiz elemanların analiz sonuçları



(b) Delik açılmış elemanların analiz sonuçları

Şekil 29. Yük taşıma kapasitesi ile eksantrikliğin kesit genişliğine veya yüksekliğine oranına ($e/(H, B)$) bağlı ilişkisi

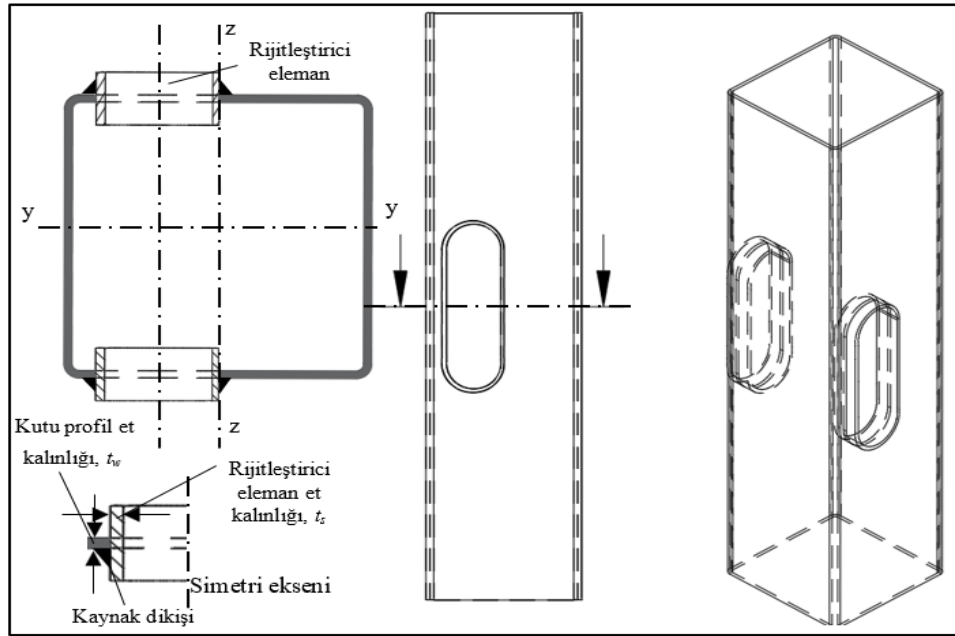
Tablo 6. Parametrik çalışma sonuçları

Deney elemanı	e, mm	e/ (H, B)	Yük taşıma kapasitesi, kN
T2.00/NP/EC	0.00	0.00	181.86
	25.00	0.25	127.37
	50.00	0.50	92.26
	75.00	0.75	72.01
	100.00	1.00	59.03
T2.50/NP/EC	0.00	0.00	262.63
	25.00	0.25	172.20
	50.00	0.50	123.07
	75.00	0.75	95.71
	100.00	1.00	78.26
T3.00/NP/EC	0.00	0.00	305.75
	25.00	0.25	205.71
	50.00	0.50	147.76
	75.00	0.75	115.49
	100.00	1.00	94.00
T4.00/NP/EC	0.00	0.00	539.20
	25.00	0.25	349.22
	50.00	0.50	254.85
	75.00	0.75	200.94
	100.00	1.00	165.90
T5.00/NP/EC	0.00	0.00	569.90
	25.00	0.25	370.59
	50.00	0.50	277.94
	75.00	0.75	221.20
	100.00	1.00	181.80
T2.00/P/EC	0.00	0.00	151.05
	25.00	0.25	96.83
	50.00	0.50	69.75
	75.00	0.75	54.51
	100.00	1.00	44.73
T2.50/P/EC	0.00	0.00	198.73
	25.00	0.25	123.56
	50.00	0.50	89.29
	75.00	0.75	69.93
	100.00	1.00	57.48
T3.00/P/EC	0.00	0.00	232.45
	25.00	0.25	145.40
	50.00	0.50	105.12
	75.00	0.75	82.31
	100.00	1.00	67.65
T4.00/P/EC	0.00	0.00	392.76
	25.00	0.25	247.32
	50.00	0.50	179.31
	75.00	0.75	140.67
	100.00	1.00	115.57
T5.00/P/EC	0.00	0.00	407.29
	25.00	0.25	261.89
	50.00	0.50	192.43
	75.00	0.75	152.03
	100.00	1.00	126.45

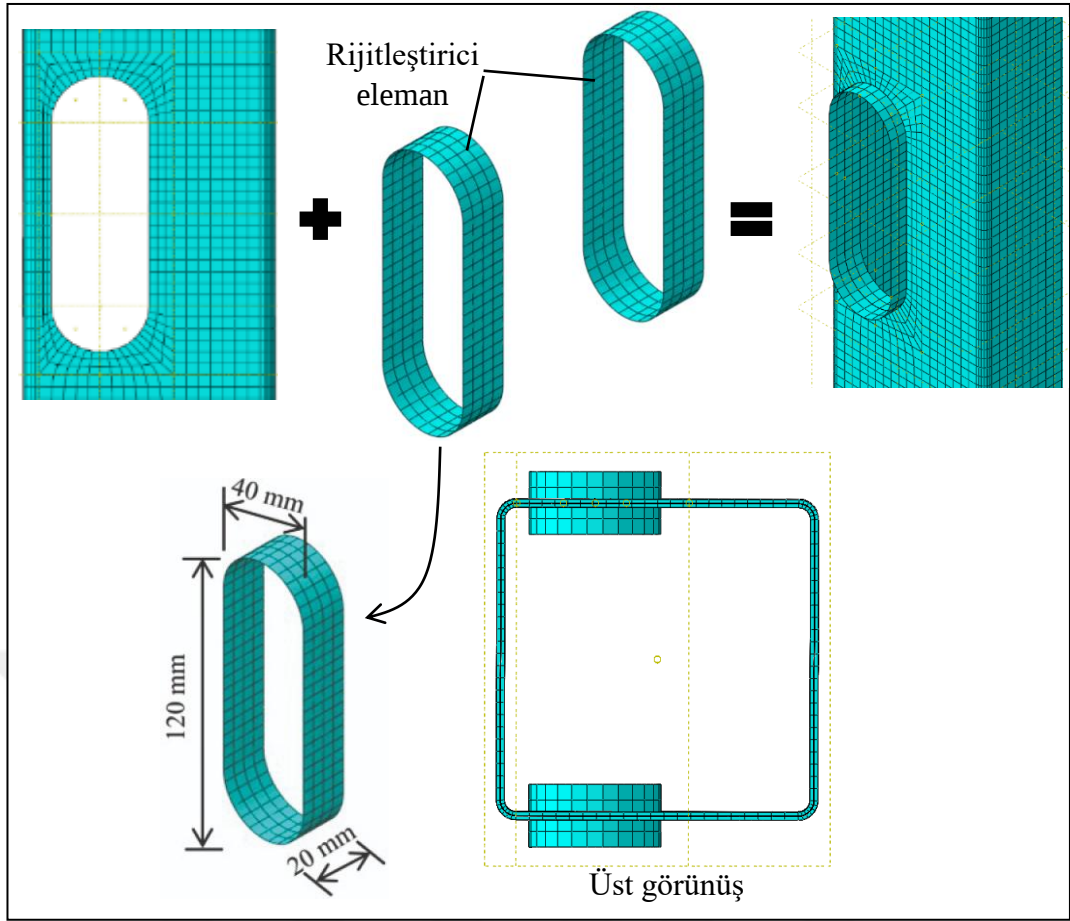
5.6. Halka Tipi Delik Kenarı Rijitleştirici Elemanlarının Etkinliği

Bu bölümde, yükün ve numunede açılan deliğin eksantrik ve aynı tarafta olduğu durumda deney elemanının yük taşıma kapasitesindeki azalmanın önüne geçmek için kullanılan rijitleştirici elemanların etkinliğini araştırmak için yürütülen sayısal çalışma sonuçları sunulmaktadır. Çalışma kapsamında, Cheng vd., (2015) tarafından yürütülen çalışmalarda farklı geometrilere sahip rijitleştirici elemanların karşılaştırılmalı bir çalışması yapılmış ve etkinliği vurgulanan halka tipi rijitleştirici elemanlar dikkate alınmıştır.

Çalışma kapsamında rijitleştirici elemanların farklı kalınlıkları dikkate alınarak parametrik bir çalışma yürütülmüştür. Analiz aşamasında, rijitleştirici elemanların malzeme özellikleri ideal elasto-plastik malzeme modeline uygun şekilde tanımlanmış ve akma dayanımının 235 MPa olduğu kabul edilmiştir. Şekil 30'da halka tipi rijitleştirici elemanların delik kenarına uygulanması ile ilgili şematik çizimler verilmiştir. Şekil 31'de ise delik açılmış kutu profillerin delik kenarının rijitleştirici elemanlar ile takviye edildiği durumu temsil eden sayısal modelin solu eleman ağı oluşturulmuş hali sunulmuştur.



Şekil 30. Halka tipi rijitleştirici elemanların delik kenarına uygulanması ile ilgili şematik çizimler

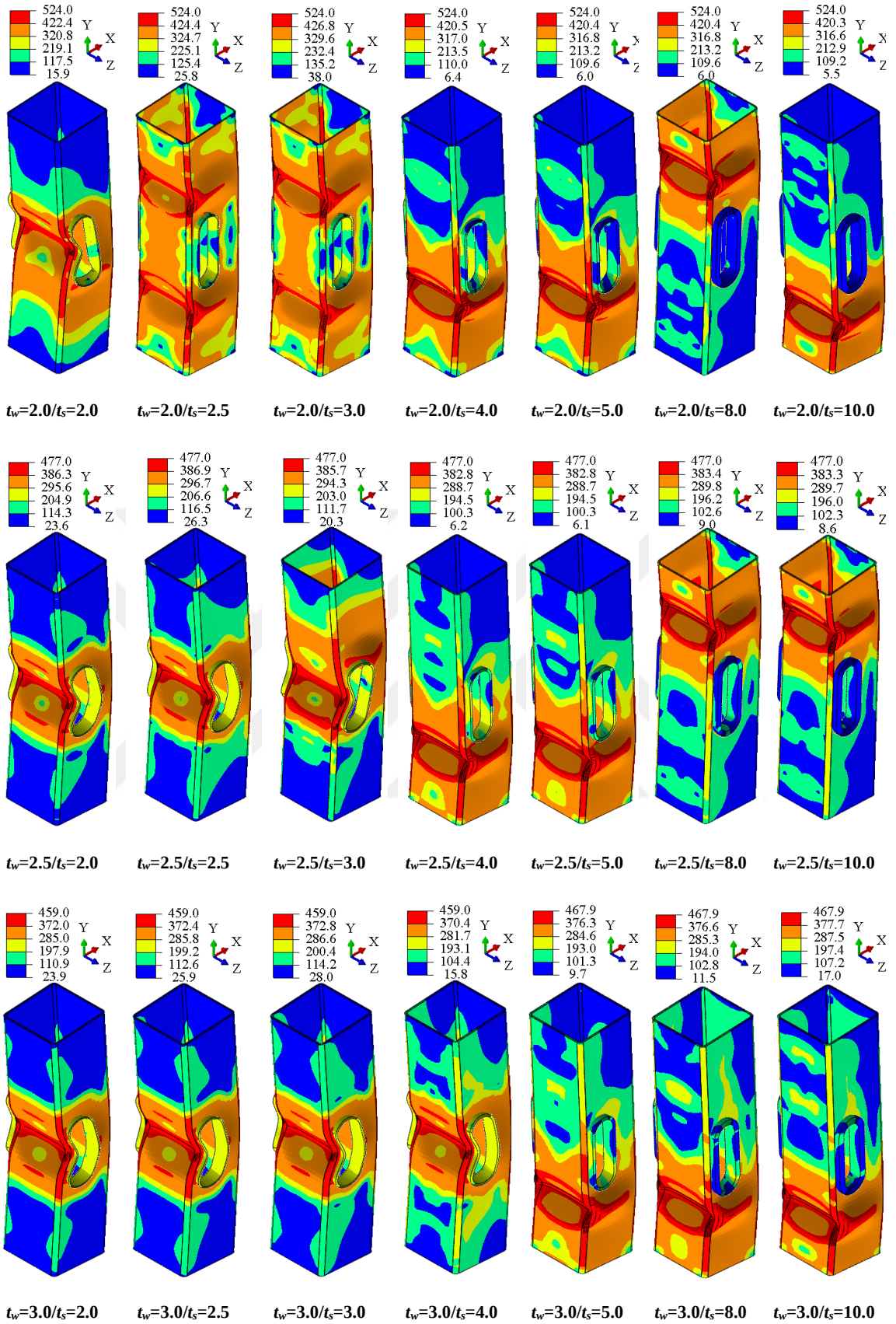


Şekil 31. Kutu profillerin delik kenarının rijitleştirici elemanlar ile takviye edildiği durumu temsil eden sayısal modelin solu eleman ağı oluşturulmuş hali

Halka tipi rijitleştirici elemanlar ile takviye edilen delik açılmış kutu profillerin sayısal olarak elde edilen yerel burkulma hasar mod şekilleri Şekil 32’de verilmiştir. Analiz sonuçları, delik kenarı rijitleştirici elemanların belirli bir seviyeye kadar etkili olduğunu, ancak deliklerin neden olduğu yük taşıma kapasitesindeki azalmayı göreceli olarak düşük et kalınlıklarında tamamen telafi edemediğini göstermektedir. Ek olarak yük taşıma kapasitesi rijitleştirici kalınlığının artmasıyla birlikte arttığı görülmüştür (Şekil 33). Ancak yük taşıma kapasitesi, rijitleştirici kalınlığının artmasıyla sürekli olarak artmamaktadır. Her profil et kalınlığı ve rijitleştirici et kalınlığı için, normalize edilmiş taşıma kapasitesi ile t_s/t_w oranı arasındaki ilişki iki parçalı doğrusal bir eğri ile yaklaşık olarak belirlenmiştir. Şekil 34’te görüldüğü üzere, 0,67 ve 2,50 değerleri kritik t_s/t_w oranlarını temsil etmektedir. Özellikle, 0,6’ ye karşılık gelen rijitleştirilmemiş kutu profil yük taşıma kapasitesine göre hesaplanan normalize edilmiş yük taşıma kapasitesi ortalama olarak yaklaşık 1,20 olarak bulunmuştur. Bulgular, halka tipi rijitleştirici kullanıldığında mukavemetin maksimum değerin 1,20 katına kadar keskin bir şekilde arttığını; ancak bu artışın maksimum değerin 1,20 katından sonra oldukça sınırlı olduğunu göstermektedir. Bunun başlıca nedeni, delik kenarına yakın bölgeyi güçlendirmek

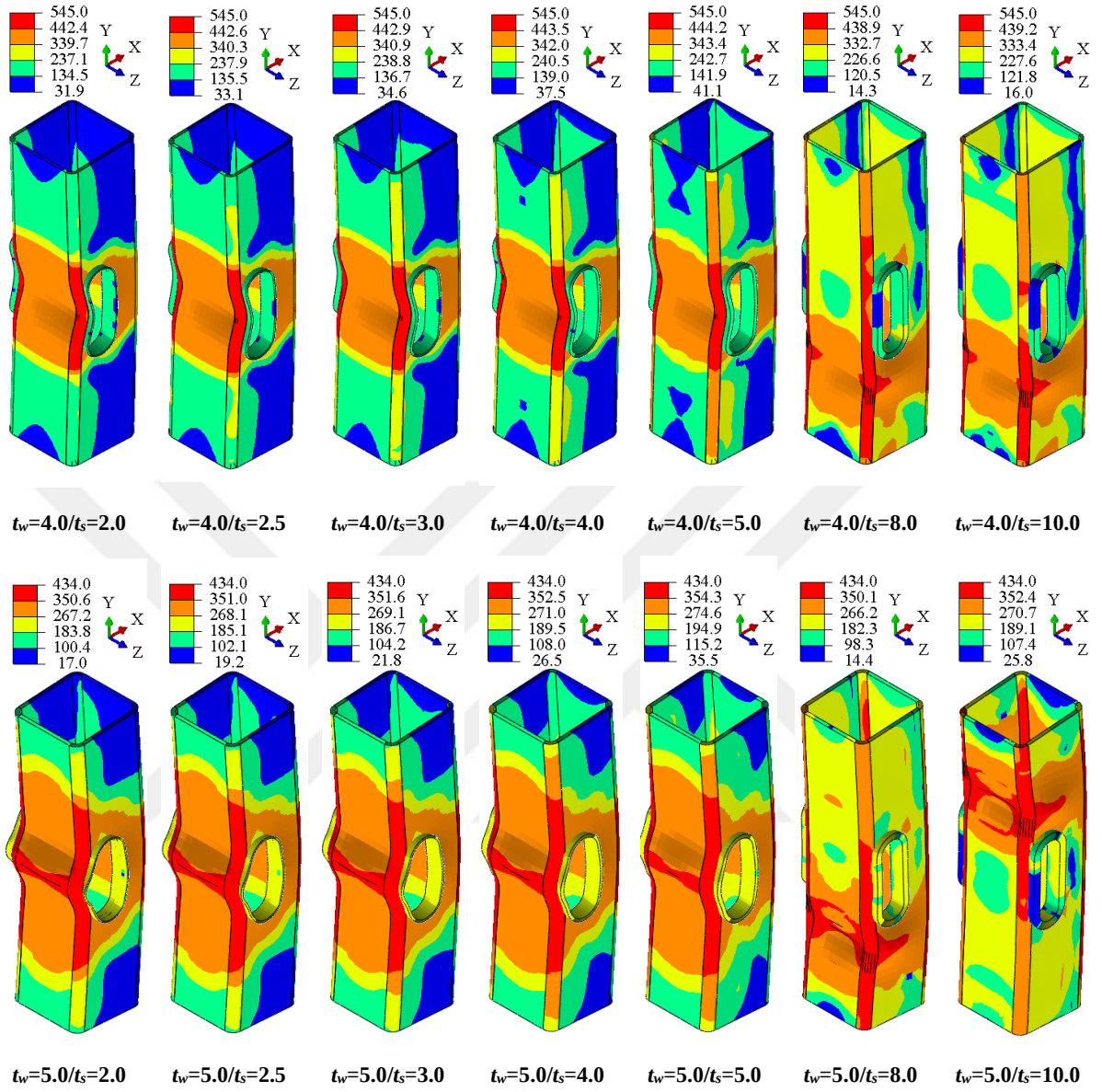
amacıyla kullanılan göreceli olarak dayanımı yüksek halka tipi rijitleştiricilerin, rijitleştirme bölgesi ile destekler arasındaki kutu profillerin enkesit parçalarının yerel burkulmasını önleyememesidir (bkz. Şekil 32).

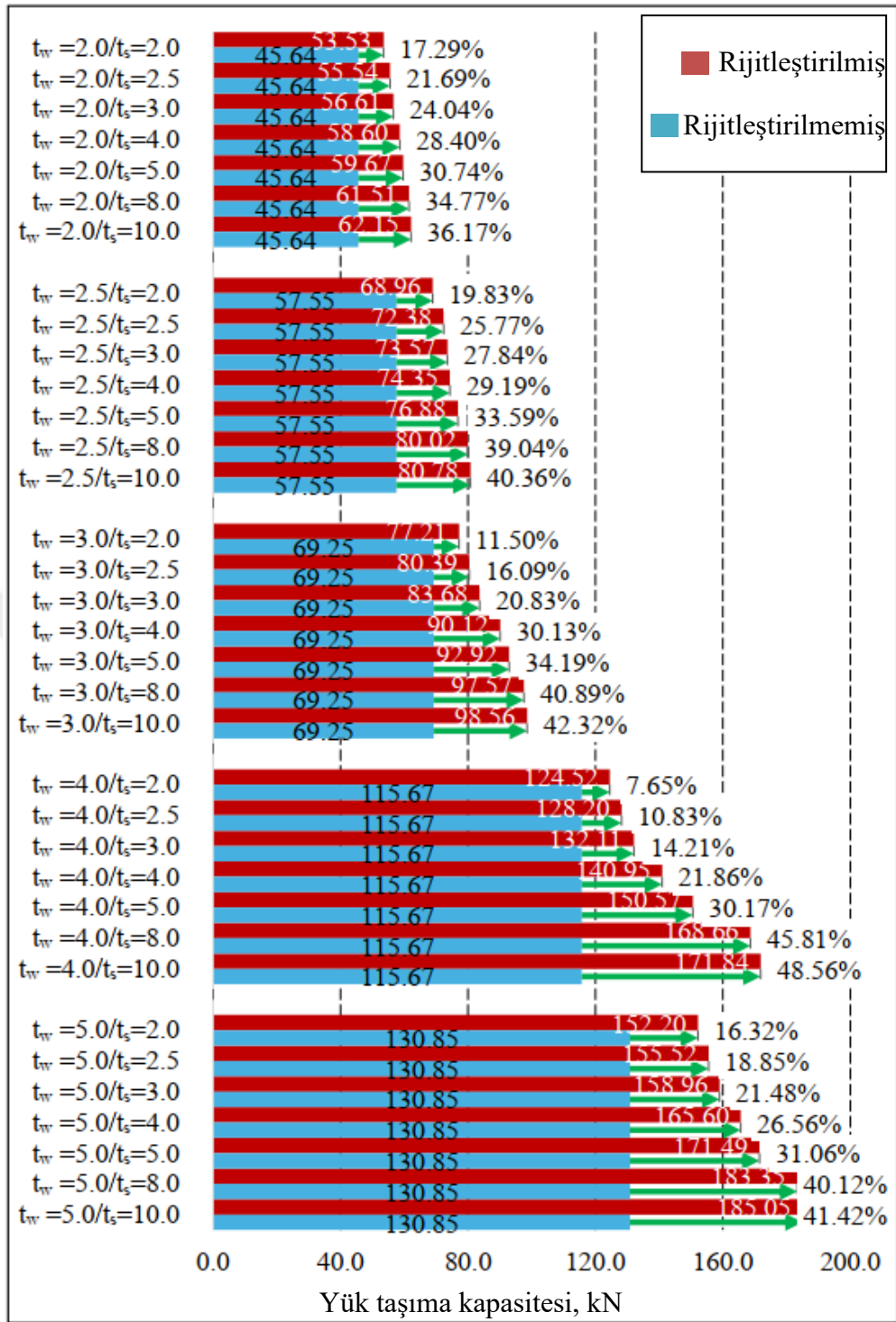




Şekil 32. $e=100$ mm için halka tipi rijitleştiricilere sahip delikli elemanların sayısal olarak elde edilen yerel burkulma hasar modları (von Mises gerilmesi MPa; t_w ve t_s mm cinsindendir.)

Şekil 32' nin devamı

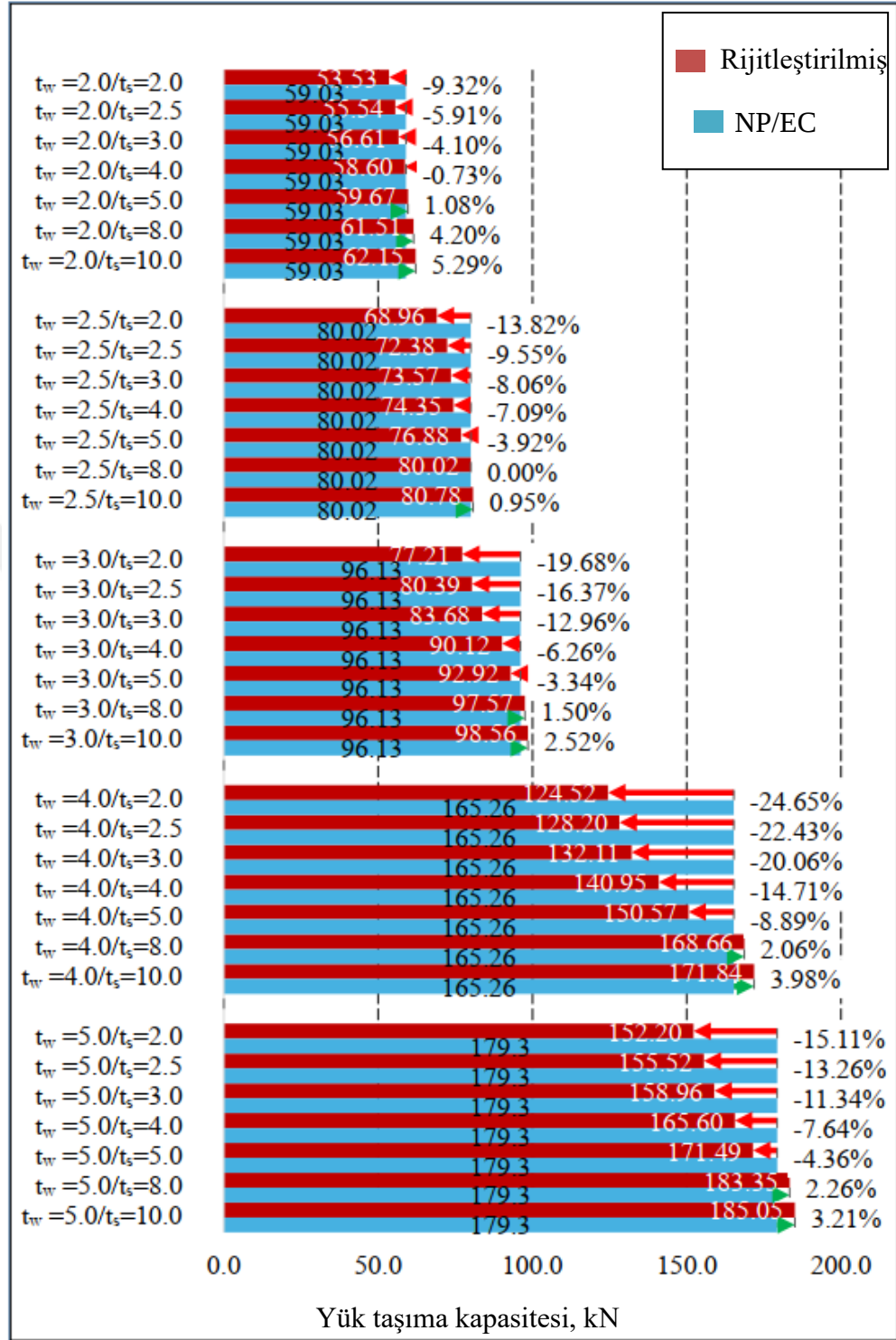




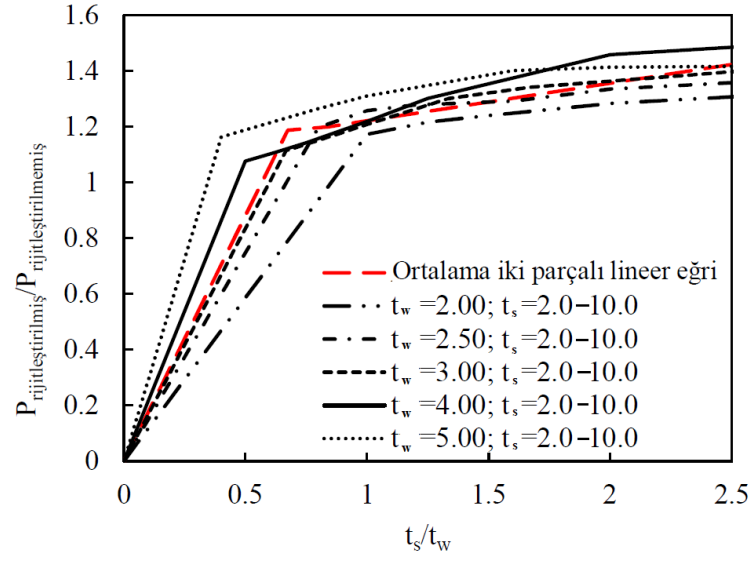
(a) Rijitleştirilmiş ve rijitleştirilmemiş model sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 33. $e=100$ mm için yük taşıma kapasitesi üzerinde rijitleştirici kalınlığının etkilerinin karşılaştırılması (t_w ve t_s mm cinsindendir.)

Şekil 33'ün devamı



(b) Rijitleştirilmiş ve NP/EC model sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 34. t_s/t_w ve $P_{rijitlestirilmis}/P_{rijitlestirilmemis}$ oranları arasındaki ilişki (t_w ve t_s mm cinsindendir.)

6.SONUÇLAR

Bu çalışmada, eksantrik basınç yüklemesi altındaki eksantrik oval delikli çelik kutu profillerin yük taşıma kapasitesi araştırılmıştır. Nominal et kalınlıkları 2,00 ila 5,00 mm arasında değişen delikli kutu profillerin test sonuçları, deliksiz numunelerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ek olarak, delikli ve deliksiz test numunelerine hem eksantrik hem de eksenel basınç yükleri uygulanarak yükleme koşullarının yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin ikincil bir araştırması yapılmıştır. Ayrıca, deneyler sırasında tüm deney elemanlarının ABAQUS yazılımı kullanılarak sayısal modeller oluşturulmuş ve geliştirilen modellerin etkinliği ve doğruluğu değerlendirilmiştir. Deliklerden kaynaklanan yük taşıma kapasitesindeki azalmayı telafi etmek için halka tipi delik kenarlı rijitleştirici elamanların etkinliğini ortaya koymak ve rijitleştirici elamanların et kalınlıklarının değişiminin etkisini araştırmak için sayısal analizler yapılmıştır. Bu kapsamda gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmalar neticesinde elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Deneysel çalışma sonuçlarına göre kutu profillerin et kalınlıklarının yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi hem yükleme durumuna hem de oval erişim deliğinin olup olmamasına göre değiştiğinden kolaylıkla elde edilebilir değildir. Kutu profillerin et kalınlıkları ile yük taşıma kapasitesi arasındaki ilişki yaklaşık olarak doğrusal olup et kalınlığının artması, eksenel ve eksantrik basınç yüklemesi altında yük taşıma kapasitesini artırmıştır. Bu artış en fazla NP/AC kombinasyonunda görülmüştür ardından NP/EC ve P/EC kombinasyonları takip etmiştir.
- Yük taşıma kapasitesi değerlendirildiğinde, NP/EC kombinasyonundan NP/AC kombinasyonuna göre ortalama %67 daha düşük yük taşıma kapasitesi elde edilmiştir. P/EC ve NP/EC kombinasyonları karşılaştırıldığında ise yük taşıma kapasitesi arasındaki fark yaklaşık %22-30 olarak bulunmuş olup, beklendiği gibi, delinme nedeniyle P/EC kombinasyonu kapasiteleri NP/EC kombinasyonundan daha düşük elde edilmiştir.
- Sonuçlar, oval şekilli deliğin ve eksantrik basınç yüklemesinin aynı tarafta olması durumunun kutu profillerin yük taşıma kapasitesi üzerinde en olumsuz etkiye sahip olan kombinasyon olduğunu göstermiştir. Bu durumda, kutu profillerin yük taşıma kapasitesi yaklaşık %75-78 oranında azalmıştır.

- Farklı eksantrisite değerleri dikkate alınarak yapılan sayısal parametrik çalışma sonuçları, tüm kalınlıklardaki hem delikli hem de deliksiz kutu profiller için artan eksantrisitenin yük taşıma kapasitesinde tutarlı bir üstel azalmaya neden olduğunu göstermiştir. Ayrıca, eksantrikliğin artması, kutu profil et kalınlığının yük taşıma kapasitesi üzerindeki belirgin etkisini azaltmıştır.
- DGK sonuçları, eksantrik yüklemenin numunelerin enine kesitleri boyunca düzgün olmayan bir gerilme dağılımına neden olduğunu göstermiştir. Bu durum, daha yüksek gerilmelerin olduğu bölgelerde erken yerel burkulmalara yol açmıştır. Buna rağmen, eksenel yükleme altında meydana gelen gerilme dağılımı daha düzgün bir şekilde kesite yayılmış ve bu da daha yüksek yük taşıma kapasitesi elde edilmesini sağlamıştır.
- Bulgular, yük taşıma kapasitesinin artan rijitleştirici kalınlığıyla arttığını göstermiştir. Ancak yük taşıma kapasitesi her durumda rijitleştirici kalınlığının artmasıyla artmamıştır. Numunenin akma dayanımı ve nominal et kalınlığından bağımsız olarak, halka tipi rijitleştirici varlığında dayanımdaki artış yaklaşık 1,20 kata kadar belirgin olmuştur. Bununla birlikte, tüm sayısal analiz sonuçları değerlendirildiğinde, rijitleştirilmiş eleman dayanımının, rijitleştirilmemiş elemana göre yaklaşık 1,35 ila 1,50 kat daha fazla olabileceği görülmüştür.
- Sonuçlar, delik kenarı rijitleştirici kalınlığının, oluşturulan delik nedeniyle yük taşıma kapasitesindeki azalmayı telafi etmek için 2,00, 2,50 ve 3,00 mm et kalınlıklarında kutu profil et kalınlığının yaklaşık üç katı seçilmesi gerektiğini, daha büyük et kalınlıkları (4,0 ve 5,0 mm) için ise kutu profil et kalınlığının yaklaşık iki katı bir kalınlığın yeterli olacağını göstermiştir.
- Geliştirilen sayısal model, tüm deney elemanları için hem nihai hasar durumları, yük taşıma kapasiteleri ve yük-yerdeğiştirme eğrisi profilleri açısından oldukça doğru tahminler üretmiştir. Buna rağmen, yerel burkulmaların yoğunlaştığı bölgeler tam olarak elde edilememiştir. Bunun temel nedeni, temsili ölçümlerden elde edilen başlangıç yerel geometrik kusur genliklerinin gerçek deney numunelerinin genlikleriyle tam olarak uyuşmaması ve deneysel çalışmalarda sınır koşullarının sayısal analizlerde tam olarak uygulanamamasıdır.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, delik açılmış yapısal elemanların kullanıldığı yapı sistemleri tasarlanırken deliklerin varlığının ve yerinin dikkate alınmasının önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca, kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri, deney numunelerinin boyut ve şekli ile yükleme koşulları, elemanların yük taşıma kapasitesini etkileyen faktörler arasında yer almaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmanın bulgularını diğer yapısal elemanlara uygularken, çalışmanın sınırlamalarının göz önünde bulundurulması büyük önem taşımaktadır.



KAYNAKÇA

- Anbarasu, M., Subalakshmi, M., Dar, M. A., & Hassanein, M. F. (2022). Cold-formed ferritic stainless steel perforated tubular stub columns: Behaviour and design. *Thin-Walled Structures*, 170, 108654.
- American Society for Testing and Materials. (2014). Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, ASTM A370-14.
- Cheng, Bin, Jianlei Wang, and Peng Shi. "Improving the compression behaviors of perforated plates with slotted holes using strengthening stiffeners." *Journal of Structural Engineering* 141.12 (2015): 04015048.
- Cosgun, S. I. (2023, August). Experimental and computational study on local buckling of standard and improved cold-formed square hollow sections under static and dynamic loading. In *Structures* (Vol. 54, pp. 291-317). Elsevier.
- Cui, J., & Wang, D. (2020). An experimental and numerical investigation on ultimate strength of stiffened plates with opening and perforation corrosion. *Ocean Engineering*, 205, 107282.
- CEN, EN 10219-2: 2006, Cold Formed Welded Structural Hollow Sections of Nonalloy and Fine Grain Steels - Part 2: Tolerances, Dimensions and Sectional Properties, European Committee for Standardization, Brussels, 2006.
- Correlate, G. O. M. (2019). Theory and user manual.
- Dassault Systèmes, D. S. (2016). Abaqus analysis user's guide. Abaqus Documentation, Simulia Corp., Waltham, MA, Report.
- Dikmen Coşkun, K., Yaman, Z., Maali, M., Ağcakoca, E., & Sadid, M. S. (2024). The Effects of Corrosion Damage on the Square Hollow Steel Section (SHSS) Profiles: An Experimental and Numerical Investigation. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-20.
- Dwivedi, R., & Vyavahare, A. Y. (2021, October). Web crippling behavior of cold-formed beam sections. In *Structures* (Vol. 33, pp. 4629-4641). Elsevier.
- Eekhout, M. *Tubular Structures in Architecture*, 2nd ed.; Delft University of Technology: Delft, The Netherlands, 2011; 127p.
- Feng, R., & Young, B. (2015). Experimental investigation of aluminum alloy stub columns with circular openings. *Journal of Structural Engineering*, 141(11), 04015031.
- Gardner, L., Saari, N., & Wang, F. (2010). Comparative experimental study of hot-rolled and cold-formed rectangular hollow sections. *Thin-walled structures*, 48(7), 495-507.

- Ghazijahani, Tohid Ghanbari, Hui Jiao, and Damien Holloway. "Influence of a cutout on circular steel hollow sections under cyclic loading." *Journal of Constructional steel research* 100 (2014): 12-20.
- Gunalan, S., & Mahendran, M. (2015). Web crippling tests of cold-formed steel channels under two flange load cases. *Journal of Constructional Steel Research*, 110, 1-15.
- Hasanali, M., Mojtabaei, S. M., Clifton, G. C., Hajirasouliha, I., Torabian, S., & Lim, J. B. (2022). Capacity and design of cold-formed steel warping-restrained beam-column elements. *Journal of Constructional Steel Research*, 190, 107139.
- Hasanali, M., Mojtabaei, S. M., Hajirasouliha, I., Clifton, G. C., & Lim, J. B. (2023). More accurate design equations for cold-formed steel members subjected to combined axial compressive load and bending. *Thin-Walled Structures*, 185, 110588.
- Helbig, T., Riederer, J., Kamp, F., & Oppe, M. (2016). Free-form on every scale:" Tornado "roof structure for Bory Mall, Bratislava, Slovakia. *Steel Construction*, 9(3), 249-254.
- Heurkens R, Hofmeyer H, Mahendran M, Snijder H. Direct strength method for web crippling–lipped channels under EOF and IOF loading. *Thin-Wall Struct* 2018;123:126–41.
- Hibbitt, Karlsson, Sorensen, 2011, ABAQUS User's Manual, Pawtucket, 6th Edition.
- Liu, H., Chen, J., & Chan, T. M. (2023). Predictive models for material properties of cold-formed conventional steels in the corner region. *Thin-Walled Structures*, 187, 110740.
- J.-L. Ma, T.-M. Chan, B. Young, Experimental investigation on stub-column behavior of cold-formed high-strength steel tubular sections, *J. Struct. Eng.* 142 (2016) 4015174.
- Ma, J. L., Chan, T. M., & Young, B. (2019). Cold-formed high-strength steel rectangular and square hollow sections under combined compression and bending. *Journal of Structural Engineering*, 145(12), 04019154.
- McCormick, J. (2017). Connecting hollow structural section members with through-bolts. Steel Tube Institute.
- Natário, P., N. Silvestre, and D. Camotim. 2014a. "Computational modelling of flange crushing in cold-formed steel sections." *Thin-Wall. Struct.* 84: 393–405. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.07.006>.
- Natário, P., N. Silvestre, and D. Camotim. 2014b. "Web crippling failure using quasi-static FE models." *Thin-Wall. Struct.* 84: 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.05.003>.
- Nemade, A., & Shikalgar, A. (2020). The mesh quality significance in finite element analysis. *J. Mech. Civ. Eng.*, 17, 44-48.

- Nguyen, V. V., Hancock, G. J., & Pham, C. H. (2017). New developments in the direct strength method (DSM) for the design of cold-formed steel sections under localised loading. *Steel Construction*, 10(3), 227-233.
- Öztürk, F., Mojtabaei, S. M., Şentürk, M., Pul, S., & Hajirasouliha, I. (2022). Buckling behaviour of cold-formed steel sigma and lipped channel beam–column members. *Thin-Walled Structures*, 173, 108963.
- Peen, Woo Yian, Choong Kok Keong, and Omid Hassanshahi. "Behaviour of hollow circular section with multiple perforations under compression, flexure and torsion." *Latin American Journal of Solids and Structures* 16.2 (2019).
- Piyawat, K., Ramseyer, C., & Kang, T. H. (2011). Nonlinear buckling of built-up cold-formed sections. *International Journal of Theoretical and Applied Multiscale Mechanics*, 2(2), 146-164.
- R.G. Dawson, A.C. Walker, Post-buckling of geometrically imperfect plates, *J. Struct. Div.* 98 (1972) 75–94.
- Singh, T. G., & Chan, T. M. (2021). Effect of access openings on the buckling performance of square hollow section module stub columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 177, 106438.
- Shi, X., Cheng, X., Wang, X., & Mansour, M. (2022). Ultimate Behavior and Design of Cold-Formed Steel Square Hollow Section Members. *International Journal of Steel Structures*, 22(3), 767-790.
- Sachidananda, K., & Singh, K. D. (2017). Structural behaviour of fixed ended stocky Lean Duplex Stainless Steel (LDSS) flat oval hollow column under axial compression. *Thin-Walled Structures*, 113, 47-60.
- Sundararajah L, Mahendran M, Keerthan P. New design rules for lipped channel beams subject to web crippling under two-flange load cases. *Thin-Wall Struct* 2017;119:421–37.
- Sonu, J. K., & Singh, K. D. (2017). Shear behaviour of single perforated lean duplex stainless steel (LDSS) rectangular hollow beams. *Thin-Walled Structures*, 119, 851-867.
- Sonu, J. K., & Singh, K. D. (2021). Shear behavior of stiffened single perforated lean duplex stainless steel (LDSS) rectangular hollow beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 176, 106377.
- Sundararajah L, Mahendran M, Keerthan P. Numerical modeling and design of lipped channel beams subject to web crippling under one-flange load cases. *J Struct Eng* 2019;145:04019094.

- Tahir, M. M., Mohammadhosseini, H., Ngian, S. P., & Effendi, M. K. (2018). I-beam to square hollow column blind bolted moment connection: Experimental and numerical study. *Journal of Constructional Steel Research*, 148, 383-398.
- Tsamasphyros, G., & Giannakopoulos, A. E. (1985). The mapped elements for the solution of cracked bodies. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 49(3), 331-342.
- Umbarkar, Kunal R., Longshithung M. Patton, and Konjengbam Darunkumar Singh. "Effect of single circular perforation in lean duplex stainless steel (LDSS) hollow circular stub columns under pure axial compression." *Thin-Walled Structures* 68 (2013): 18-25.
- Wardenier, J.; Packer, J.A.; Zhao, X.L.; Van der Vegte, G.J. *Hollow Sections in Structural Applications*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2010; 232p.
- Xu, B., Xia, J., Ma, R., Wang, J., Chen, X., Chang, H., & Zhang, L. (2019). Investigation on true stress-strain curves of flat and corner regions of cold-formed section using 3D digital image correlation method. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1-18.
- Vaz, M. A., Cyrino, J. C., Hernández, I. D., Zegarra, V. D., Martinez, J. L., & Liang, D. A. (2018). Experimental and numerical analyses of the ultimate compressive strength of perforated offshore tubular members. *Marine Structures*, 58, 1-17.
- Yousefi, A. M., J. B. P. Lim, and G. C. Clifton. 2017a. "Cold-formed ferritic stainless steel unlipped channels with web openings subjected to web crippling under interior-two-flange loading condition. I: Tests and finite element model validation." *Thin-Wall. Struct.* 116: 333–341. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.03.026>.
- Yousefi, A. M., J. B. P. Lim, and G. C. Clifton. 2017b. "Cold-formed ferritic stainless steel unlipped channels with web openings subjected to web crippling under interior-two-flange loading condition. II: Parametric study and design equations." *Thin-Wall. Struct.* 116: 342–356. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.03.025>.
- Yousefi, A. M., J. B. P. Lim, and G. C. Clifton. 2017c. "Web bearing capacity of unlipped cold-formed ferritic stainless steel channels with perforated web subject to end-two-flange (ETF) loading." *Eng. Struct.* 152: 804–818. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.040>.
- Yousefi, A. M., J. B. P. Lim, and G. C. Clifton. 2018a. "Web crippling design of cold-formed ferritic stainless steel unlipped channels with fastened flanges under end-two-flange loading." *J. Constr. Steel Res.* in press. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.03.032>.

- Yousefi, A. M., Lim, J. B., & Charles Clifton, G. 2018b. Web crippling behavior of unlipped cold-formed ferritic stainless steel channels subject to one-flange loadings. *Journal of structural engineering*, 144(8), 04018105.
- Y. Huang, B. Young, Structural performance of cold-formed lean duplex stainless steel columns, *Thin-Walled Struct.* 83 (2014) 59–69
- Zhu, J. H., & Young, B. (2006). Tests and design of aluminum alloy compression members. *Journal of structural engineering*, 132(7), 1096-1107.
- Zhou, F., & Young, B. (2007). Experimental and numerical investigations of cold-formed stainless steel tubular sections subjected to concentrated bearing load. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(11), 1452-1466.
- Zhou, F., & Young, B. (2013). Web crippling behaviour of cold-formed duplex stainless steel tubular sections at elevated temperatures. *Engineering Structures*, 57, 51-62.
- Zeytinci, B. M., Şahin, M., Güler, M. A., & Tsavdaridis, K. D. (2021). A practical design formulation for perforated beams with openings strengthened with ring type stiffeners subject to Vierendeel actions. *Journal of Building Engineering*, 43, 102915.
- URL-1:<https://www.metalyapi-eng.com/projects-nazarbayev-center.html>