

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SOĞUK ŞEKİLLENDİRİLMİŞ PASLANMAZ VE KARBON ÇELİK
ÇAPRAZLARIN ÇEVİRİMSSEL YÜK ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammad IKRAM

**KASIM 2022
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**SOĞUK ŞEKİLLENDİRİLMİŞ PASLANMAZ VE KARBON ÇELİK
ÇAPRAZLARIN ÇEVİRİMSSEL YÜK ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

İnş. Müh. Muhammad IKRAM

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
“İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03/11/2022
Tezin Savunma Tarihi : 28/11/2022**

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Serhat DEMİR

ÖNSÖZ

Akademik kariyerimde büyük bir basamak çıkmama vesile olan, Yüksek Lisans eğitimim süresince bana yol gösteren, yaptığım çalışmalarda yardımını esirgemeyen, beraber çalışma fırsatı bulduğum en kalender insanlardan biri olan kıymetli danışmanım Doç. Dr. Serhat DEMİR'e teşekkürlerimi sunarım.

Türkiye'de eğitim sürecim boyunca bulunduğum seviyeye gelmemde bana destek olan İnş. Müh. Serhat UĞÜR, Dr. Yük. İnş. Müh. Yusuf ALIOU ve İnş. Müh. Ramazan BUĞDAYCI'ya teşekkür ederim. Tezin tamamlanması sürecindeki yardımları ve bu çalışma sırasındaki desteği için hocam Arş. Gör. Ali Fuat GENÇ'e teşekkür ederim.

Son olarak, eğitimimi bu seviyeye getirmemde sonsuz destek veren, sürekli cesaret ve motive eden, maddi ve manevi hiçbir desteği esirgemeyen sevgili aileme minnetimi sunarım.

Muhammad IKRAM
Trabzon, 2022

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tez olarak sunduğum “Soğuk Şekillendirilmiş Paslanmaz ve Karbon Çelik Çaprazların Çevrimsel Yük Altındaki Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Serhat DEMİR’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 28/11/22

Muhammad IKRAM

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VII
SUMMARY.	VIII
ŞEKİLLERİN DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SİMGELER DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Çaprazların Genel Stabilitesi	2
1.3. Çaprazların Yerel Stabilitesi.....	3
1.4. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılan Bazı Çalışmalar	4
1.5. Amaç ve Kapsam.....	7
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	8
2.1. Deneyisel Çalışmalar	8
2.1.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	8
2.1.2. Deney Elemanlarının Özellikleri ve Üretimi.....	10
2.1.2.1. Deney Düzeneği	14
2.1.2.1.1. Ölçüm Sistemi ve Kullanılan Aletler	16
2.1.3. Deney Elemanlarına Uygulanan Yatay Yüklemler.....	18
3. BULGULAR VE İRDELEMELER	22
3.1. Bulgular	22
3.1.1. FF Serisi Numunelerin Deney Sonuçları.....	22

3.1.2.	NFC Serisi Numunelerin Deney Sonuçları	27
3.1.3.	NFT Serisi Numunelerin Deney Sonuçları.....	31
3.2.	İrdelemeler.....	35
3.2.1.	Burkulma Yüğü	35
3.2.2.	Yerel Burkulma	40
3.2.3.	Enerji Tüketim Kapasiteleri.....	40
3.2.4.	Yerdeğiştirme Sünekliliği.....	44
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	47
5.	KAYNAKLAR.....	49
ÖZGEÇMİş		

Yüksek Lisans

ÖZET

SOĞUK ŞEKİLENDİRİLMİŞ PASLANMAZ VE KARBON ÇELİK ÇAPRAZLARIN ÇEVİRİMSSEL YÜK ALTINDAKİ DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Muhammad IKRAM

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman : Doç. Dr. Serhat DEMİR
2022, 50 Sayfa

Bugüne kadar boru ve kutu enkesitli çaprazların deneysel davranışları üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda malzeme özelliğinin, enkesit geometrisinin ve yükleme protokolünün çaprazların performansına olan etkisi birbirinden bağımsız olarak incelenmiştir. Bu çalışmada ise bu değişkenlerin bileşik etkilerinin çelik çaprazların performansına etkisi incelenmiştir. Bunun için karbon veya paslanmaz çelik saclardan soğuk olarak şekillendirilmiş, yaklaşık 1/3 ölçekli, 6 adet boru ve 6 adet kutu enkesitli çapraz numune yakın ve uzak fay yüklemelerini temsil eden 3 farklı çevrimsel yük etkisinde deneysel olarak incelenmiştir.

Numunelerin burkulma dayanımları, enerji tüketme kapasiteleri ve yerdeğiştirme süneklikleri malzeme özelliği, enkesit geometrisi ve yükleme protokolü açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca burkulma dayanımları Avrupa ve Amerikan Yönetmelikleriyle kıyaslanmıştır. Buna göre, karbon çelik çaprazlar için AISC 360-16 ve EN 1993-1-1 'de verilen burkulma dayanımı sınırları tüm yükleme protokollerine göre güvenli sonuçlar vermiştir. Ancak, paslanmaz çelik çaprazlar için AISC 370-21 ve EN 1993-1-4 'de verilen burkulma dayanımı sınırlarının uzak fay yüklemeleri için güvenli olduğu, yakın fay yüklemelerinde ise yetersiz olduğu belirlenmiştir. Çaprazların burkulma dayanımları, enerji tüketme kapasiteleri ve yerdeğiştirme süneklikleri için en dezavantajlı sonuçların ancak farklı yükleme protokollerinin uygulanması ile elde edilebileceği görülmüştür. Ayrıca, malzeme özelliğinin çaprazların performansına etkisinin enkesit geometrisine bağlı olarak oldukça değiştiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelik çapraz, paslanmaz çelik, çevrimsel yükleme, yakın fay

Master Thesis

SUMMARY

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF COLD-FORMED STAINLESS AND CARBON STEEL BRACES UNDER CYCLIC LOADING

Muhammad IKRAM

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor : Doç. Dr. Serhat DEMİR
2022, 50 Pages

Until today, many studies have been conducted on the experimental behaviors of pipe and square hollow section braces. In those studies, the effect of material properties, cross-section shape and loading history on the performance of braces were independently investigated. In this study, the effect of the combined effects of these variables on the performance of steel braces was examined. For this purpose, cross-sectional specimens with approximately 1/3 scale, 6 pipes and 6 square hollow sections, which were cold formed from carbon or stainless steel sheets, were experimentally investigated under 3 different cyclic load effects representing near and far fault loading histories.

The buckling strength, energy dissipation capability and displacement ductility of the specimens were evaluated in terms of material properties, cross-section shape and loading protocol. In addition, the buckling strength was compared using European and American standard. Therefore, the buckling strength limits of carbon steel braces in AISC 360-16 and EN 1993-1-1 gave safe results for all loading protocols. However, the buckling strength limits of stainless steel braces in AISC 370-21 and EN 1993-1-4 are safe for far fault loading, but not sufficient for near fault loadings. It has been observed that the most disadvantageous results for the buckling strength, energy dissipation capacity and displacement ductility of the braces can only be obtained by applying different loading protocols. In addition, it has been determined that the effect of material properties on brace performance varies greatly depending on the geometry of the section.

Keywords: Steel brace, stainless steel, cyclic loading, near-fault

ŞEKİLLERİN DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1.	a) Genel Burkulma, b) yerel burkulma (Demir vd, 2020).....	1
Şekil 2.1.	EN 10002–1 (2004)’e göre hazırlanan çekme çubuğunun geometrik ölçüleri (mm).....	8
Şekil 2.2.	Çekme deneyleri yapılan paslanmaz ve karbon numuneler	9
Şekil 2.3.	CS çekme çubuklarına ait gerilme - birim şekildeğiştirme eğrileri.....	9
Şekil 2.4.	SS çekme çubuklarına ait gerilme - birim şekildeğiştirme eğrileri	10
Şekil 2.5.	Deney elemanları.....	12
Şekil 2.6.	Deney elemanlarının ölçüleri	13
Şekil 2.7.	Mafsal plakası ve berkitme levhalar.....	13
Şekil 2.8.	AISC 360-16 (2016)’ya göre tasarlanan mafsal plakası ölçüleri	14
Şekil 2.9.	Deney düzeneğinin ölçüleri.....	15
Şekil 2.10.	Deney düzeneğini oluşturan elemanlar ve düzeneğe yerleştirilmiş bir numune	15
Şekil 2.11.	Ölçüm sistemi ve veri toplama cihazı	17
Şekil 2.12.	Çaprazların orta kesitindeki SG düzeni.....	17
Şekil 2.13.	Uzak fay yükleme protokolü	19
Şekil 2.14.	Basınç etkili yakın fay yükleme protokolü.....	20
Şekil 2.15.	Çekme etkili yakın fay yükleme protokolü	21
Şekil 3.1.	Deney elemanlarının çevrimsel yükleme sonrası görünümü	23
Şekil 3.2.	FF serisi deney numunelerine ait eksenel yük - yerdeğiştirme eğrileri.....	24
Şekil 3.3.	FF serisi deney numunelerinde genel burkulma.....	25
Şekil 3.4.	FF serisi deney numunelerinde lokal burkulma	25
Şekil 3.5.	FF serisi deney numunelerinde çatlak başlangıçları.....	26
Şekil 3.6.	FF serisi deney numunelerinde kopmadan hemen önceki hasar durumu.....	26
Şekil 3.7.	NFC serisi deney numunelerine ait eksenel yük - yerdeğiştirme eğrileri	28
Şekil 3.8.	NFC serisi deney numunelerinde genel burkulma	29
Şekil 3.9.	NFC serisi deney numunelerinde yerel burkulma.....	29
Şekil 3.10.	NFC serisi deney numunelerinde çatlak başlangıçları.	30
Şekil 3.11.	NFC serisi deney numunelerinde kopmadan hemen önceki hasar durumu	30
Şekil 3.12.	NFT serisi deney numunelerine ait eksenel yük - yerdeğiştirme eğrileri	32

Şekil 3.13. NFT serisi deney numunelerinde genel burkulma	33
Şekil 3.14. NFT serisi deney numunelerinde yerel burkulma	33
Şekil 3.15. NFT serisi deney numunelerinde çatlak başlangıçları	34
Şekil 3.16. NFT serisi deney numunelerinde kopmadan hemen önceki hasar durumu	34
Şekil 3.17. Burkulma dayanımının yük protokolüne göre değişimi	36
Şekil 3.18. Burkulma dayanımının enkesit geometrisine göre değişimi	37
Şekil 3.19. Burkulma dayanımının malzeme özelliklerine göre değişimi.....	37
Şekil 3.20. CS malzemesine sahip numunelerin burkulma dayanımının yönetmeliklerle karşılaştırılması.....	38
Şekil 3.21. SS malzemesine sahip numunelerin burkulma dayanımının yönetmeliklerle karşılaştırılması.....	38
Şekil 3.22. FF serisi deney elemanlarının burkulma ve sonrası basınç dayanımları.....	39
Şekil 3.23. Enerji tüketiminin yük protokolüne göre değişimi	41
Şekil 3.24. Enerji tüketiminin enkesit geometrisine göre değişimi	42
Şekil 3.25. Enerji tüketiminin malzeme özelliklerine göre değişimi	42
Şekil 3.26. Çatlak başlangıcı-yerel burkulma ilişkisinin enerji tüketimine göre değişimi.....	43
Şekil 3.27. Kopma-çatlak başlangıcı ilişkisinin enerji tüketimine göre değişimi	43
Şekil 3.28. Yerdeğiştirme sünekliliğinin yük protokolüne göre değişimi	45
Şekil 3.29. Yerdeğiştirme sünekliliğinin enkesit geometrisine göre değişimi	45
Şekil 3.30. Yerdeğiştirme sünekliliğinin malzeme özelliklerine göre değişimi.....	45

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Basınç etkisindeki basınç parçaları için genişlik/kalınlık değerleri (AISC 360-16, 2016)	3
Tablo 1.2. Basınç etkisindeki basınç parçaları için genişlik/kalınlık değerleri (EN 1993-1-1 2014).....	4
Tablo 2.1. Çekme deneylerinde elde edilen ortalama değerler	10
Tablo 2.2. Deney elemanlarının özellikleri	11
Tablo 2.3. Uzak fay yükleme protokolü - FF	19
Tablo 2.4. Yakın fay yükleme protokolü - NFC.....	20
Tablo 2.5. Yakın fay yükleme protokolü - NFT	21
Tablo 3.1. FF serisi deney numunelerinin sonuçları	24
Tablo 3.2. NFC serisi deney numunelerinin sonuçları	28
Tablo 3.3. NFT serisi deney numunelerinin sonuçları	32
Tablo 3.4. Deneylerden elde edilen yerdeğiştirme sünekliğinin bazı araştırmacılar tarafından önerilen denklemlerle kıyaslanması	46

SİMGELER DİZİNİ

A	: Enkesit alanı
A_{eff}	: Etkin enkesit alanı
A_{sf}	: Kırılma çizgisi alanını
a	: Deneysel yerdeğiştirme sünekliliği
a	: Delik kenarından eleman kenarına olan kuvvet doğrultusundaki uzaklığı
B	: Kutu çelik çapraz
b	: Delik kenarından eleman kenarına olan kuvvete dik doğrultudaki uzaklığı
b	: Kutu kesitin uzun eksene göre köşeler hariç uzunluğu
b_e	: Etkin genişliği
CS	: Karbon çelik
D	: Boru çapı
d	: Bulon deliği çapını
E	: Elastisite modülü
E	: Toplam enerji tüketimi
E_Y	: Elastik enerji tüketim kapasitesi
FF	: Yükleme protokolü (Uzak fay)
F_y	: Malzemenin karakteristik akma dayanımı
K	: Burkulma boyu katsayısı
L	: Desteklenen noktalar arasında kalan eleman uzunluğu
$LPDT$	: Doğrusal potansiyometrik cetvel
l_n	: Net boyu
$MÇÇ$	: Merkezi çaprazlı çerçeveler
NFC	: Yükleme protokolü (Yakın fay-basınç)
NFT	: Yükleme protokolü (Yakın fay-çekme)
N_{cr}	: Kritik burkulma yüküdü
n	: Çevrim numarası
P	: Boru çelik çapraz
$P_{c,max}$	: Maksimum basınç yükü
$P_{t,max}$	: Maksimum çekme yükü
P_y	: Akma yükü
R	: Atalet yarıçapı

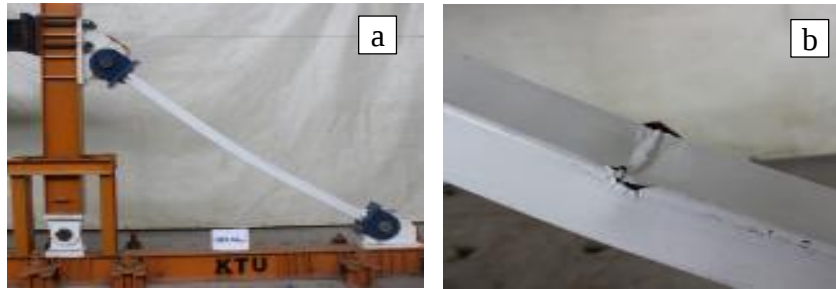
R^2	: Regresyon katsayıları
SG	: Birim şekildeğiştirme ölçer
SS	: Paslanmaz çelik
t	: Et kalınlığı
w	: Mafsal plakası taban genişliğini
@	: Çevrim numarası
λ	: Narinlik oranı
ε	: Birim şekildeğiştirmesi
Δ	: Yatay Yerdeğiştirme
Δ_y	: Akma yerdeğiştirmesine,
Δ_u	: En büyük yerdeğiştirmenin,
$\emptyset$	: Çap
Δ_{GB}	: Genel burkulma için yatay yerdeğiştirme
θ_{GB}	: Genel burkulma için görelî yatay yerdeğiştirme
Δ_{LB}	: Yerel burkulma için yatay yerdeğiştirme
θ_{LB}	: Yerel burkulma için görelî yatay yerdeğiştirme
Δ_{FI}	: Çatlak başlangıcı için yatay yerdeğiştirme
θ_{FI}	: Çatlak başlangıcı için görelî yatay yerdeğiştirme
Δ_{SL}	: Dayanım kaybı için yatay yerdeğiştirme
μ_c	: Basınçta yerdeğiştirme sünekliliği
μ_t	: Çekmede yerdeğiştirme sünekliliği

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Merkezi çaprazlı çerçeveler (MÇÇ) deprem etkilerine karşı kullanılan yatay yük taşıyıcı sistemlerden biridir. MÇÇ'ler çelik yapılarda en yaygın kullanılan yatay yük taşıyıcı sistemler olup en önemli avantajları: tasarım imalat ve montaj kolaylığı, elastik ötesi aşamada enerji tüketme yeteneği, yüksek rijitlikleri sayesinde yatay ötelenmeleri etkili biçimde sınırlandırarak ana taşıyıcı elemanlardaki hasarları azaltmaları ve diğer sistemlere kıyasla oldukça ekonomik olmalarıdır. En önemli dezavantajı ise çaprazların burkulma sonrası basınç dayanımını önemli oranda kaybetmesidir.

Deprem yükü etkisindeki çelik yapılarda enerji yapısal ve yapısal olmayan elemanlar vasıtasıyla tüketilir. Güncel yönetmeliklere göre enerji tüketiminin öncelikle çelik çaprazların elastik ötesi davranışı ile sağlanması gerekmektedir (EN 1998-1, 2013). Böylelikle hasarın çaprazlarda yoğunlaştırılarak kolon, kiriş ve bağlantı elemanlarında sınırlı kalması sağlanır. Bu nedenle, MÇÇ'lerin sismik performansı açısından çaprazların çevrimsel davranışları büyük öneme sahiptir. Çevrimsel yük etkisindeki çaprazlarda enerji elastik ötesi çekme ve burkulma sonrası basınç deformasyonları ile tüketilir. Süneklik düzeyi yüksek çaprazlarda burkulma sonrası eksenel deformasyon akma deformasyonunun 10-20 katına kadar ulaşabilir (AISC 341-16, 2016). Çaprazların çevrimsel performansını etkileyen en önemli faktörler genel ve yerel stabilite durumlarıdır (Han vd., 2007; Remennikov ve Walpole, 1998; Tremblay, 2002) (Şekil 1.1). Bu nedenle yönetmeliklerde her iki durum içinde sınır değerler tanımlanmıştır. Yönetmeliklerde her iki durum dikkate alınsa da, tasarım parametreleri ve sınır değerler yönünden aralarında bazı farklılıklar bulunmaktadır.



Şekil 1.1. a) Genel Burkulma, b) yerel burkulma (Demir vd, 2020).

1.2. Çaprazların Genel Stabilitesi

Çaprazların narinliği genel stabiliteyi etkileyen en önemli parametredir. Düşük narinlik oranına sahip çaprazlar daha yüksek basınç yükü taşıma ve enerji tüketme kapasitelerine sahip olmaktadır. Bununla birlikte, narinlik oranı azaldıkça burkulma bölgesinde meydana gelen plastik mafsalda daha büyük şekildeğişiklikler meydana geldiği için, süneklikte azalmaktadır. Bu nedenlerle çaprazlardan uygun verimi sağlayabilmek amacıyla yönetmeliklerde sınır değerler tanımlanmıştır.

Amerikan yönetmeliğine göre narinlik oranı, λ :

$$\lambda = \frac{KL}{r} \leq 4 \frac{E}{f_y} \quad (1.1)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Burada K burkulma boyu katsayısı, L desteklenen noktalar arasında kalan eleman uzunluğu, E elastisite modülü (200000 MPa) ve r atalet yarıçapıdır (AISC 360-16, 2016). Boyutsuz narinlik oranı üst sınırı ise 200 olarak belirtilmiş olmakla birlikte daha yüksek narinlik oranlarına sahip çaprazlı sistemler için özel şartlar bulunmaktadır. Boyutsuz narinlik oranı için tanımlanan üst sınır çok narin çaprazlarda oluşabilecek dinamik etkileri azaltmak içindir (AISC 341-16, 2016).

Avrupa yönetmeliğinde ise 1., 2.veya 3. sınıf enkesite sahip çaprazlarda boyutsuz narinlik oranı:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} \quad (1.2)$$

formülü ile hesaplanmaktadır. Burada A enkesit alanı, f_y malzemenin karakteristik akma dayanımı ve N_{cr} kritik burkulma yüküdür. 4. sınıf enkesite sahip çaprazlarda ise aynı formülde A yerine etkin enkesit alanı, A_{eff} , kullanılmaktadır (EN 1993-1-1, 2014). Boyutsuz narinlik oranı üst sınırı X-çaprazlara sahip sistemlerde $1.3 < \bar{\lambda} \leq 2.0$; tekil çaprazlara sahip sistemlerde ise $\bar{\lambda} \leq 2.0$ olarak belirtilmiştir. X-çaprazlı sistemlerdeki 1.3 alt sınırı çaprazların burkulmasından önce kolonlarda neden olabilecekleri ilave yükleri sınırlandırmak içindir. Ayrıca 2 kata kadar olan yapılar için narinlik oranı sınırlaması bulunmamaktadır (EN 1998-1, 2013).

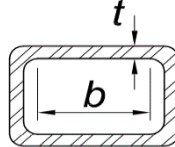
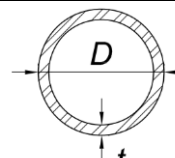
1.3. Çaprazların Yerel Stabilitesi

Genel burkulma basınç elemanlarının tümsel dayanımını ve bir bütün olarak burkulmasını ele almaktadır. Yerel burkulma ise basınç elemanının enkesitini oluşturan bireysel parçaların yerel stabilitesiyle alakalıdır (Aghayere vd., 2018).

Genel burkulmadan sonra çaprazın genellikle orta bölgesinde plastik mafsallık meydana gelir. Yerel burkulmaya oldukça meyilli olan bu bölgede artan basınç kuvvetleri ve boyuna kısaltmalar ile basınca çalışan enkesit parçalarında yerel burkulma görülür (Şekil 1.1.b). Yerel burkulmanın meydana gelmesiyle şekildeğiştirmeler bu bölgede yoğunlaşır ve çapraz mümkün olan basınç kapasitesine ulaşamaz (Aghayere vd., 2018). Bununla birlikte yerel burkulma, elastik ötesi çevrimsel yüklemelerde, düşük çevrim yorgunluğuna sebep olarak çaprazın erkenden göçmesine neden olabilir (Goggins vd., 2006) Bu nedenlerle yönetmeliklerde basınç elemanlarını oluşturan enkesit parçalarının genişlik/kalınlık oranlarına bazı sınırlamalar getirilmiştir.

AISC 360-16 (2016)'da basınç elemanları yerel burkulmaya göre narin ve narin olmayan şeklinde sınıflandırılmıştır. Tablo 1'de boru ve kutu enkesitli basınç elemanlarının enkesit parçaları için gerekli sınır şartları verilmiştir. Bu sınır şartları sağlayan çaprazlar narin olmayan elemanlar olarak sınıflandırılır.

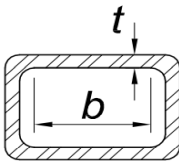
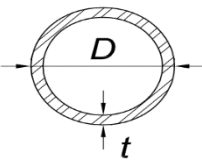
Tablo 1.1. Basınç etkisindeki basınç parçaları için genişlik/kalınlık değerleri (AISC 360-16, 2016).

Kare veya dikdörtgen kutu enkesitlerin başlık ve gövdeleri	$\frac{b}{t} \leq 1.40 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	
Boru enkesitli elemanlar	$\frac{D}{t} \leq 0.11 \frac{E}{f_y}$	

Burada D çap, t et kalınlığı ve b kutu kesitin uzun eksene göre köşeler hariç uzunluğu ve E elastisite modülüdür. Bu sınır şartları sağlamayan boru ve kutu enkesitli çaprazlar narin elemanlar olarak sınıflandırılır. Narin elemanlar AISC Kısım E7'deki yerel burkulma nedeniyle ortaya çıkan dayanım azaltmasının etkilerini içeren koşullara göre tasarlanmalıdır.

EN 1993-1-1 (2014)'de basınç elemanları yerel burkulmaya göre 4 farklı sınıfa ayrılmakta olup sınıflandırma enkesitin dayanım ve süneklilik kabiliyetine göre belirlenmiştir. Tablo 2'de boru ve kutu enkesitli basınç elemanlarının enkesit parçalarının sınıflandırılması için gerekli şartlar verilmiştir. Bu sınır şartları sağlamayan çaprazlar *Sınıf-4* olarak değerlendirilir.

Tablo 1.2. Basınç etkisindeki basınç parçaları için genişlik/kalınlık değerleri (EN 1993-1-1, 2014).

Kare veya dikdörtgen kutu enkesitlerin başlık ve gövdeleri	Sınıf-1	$b/t \leq 33\varepsilon$	
	Sınıf-2	$b/t \leq 38\varepsilon$	
	Sınıf-3	$b/t \leq 42\varepsilon$	
Boru enkesitli elemanlar	Sınıf-1	$D/t \leq 50\varepsilon^2$	
	Sınıf-2	$D/t \leq 70\varepsilon^2$	
	Sınıf-3	$D/t \leq 90\varepsilon^2$	
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$			

Tablo 1 ve 2'de verilen sınıflandırmalar karbon çelik elemanlar için geçerlidir. Paslanmaz çelik elemanlar için benzer sınıflandırmalar farklı katsayılar kullanılması vasıtasıyla AISC 370-21 (2021) ve EN 1993-1-4, (2015)' de verilmiştir.

1.4. Konu ile İlgili Daha Önce Yapılan Bazı Çalışmalar

Teknik literatürde boru ve kutu enkesitli çaprazlar ile ilgili yapılan çalışmaların çoğu karbon çeliğinden üretilmiş elemanların çevrimsel davranışları üzerinedir. Bu konulardaki öncü çalışmalarda çaprazların burkulma dayanımı, burkulma sonrası basınç dayanımındaki azalma, enerji tüketimi gibi özellikleri araştırılmıştır. İlerleyen yıllarda çaprazların kırılma ömrünü ve sünekliliğini etkileyen faktörlerin araştırıldığı deneysel ve sayısal çalışmalar ön plana çıkmıştır. Günümüzde ise araştırmalar, karbon çeliğinin yanı sıra, paslanmaz çelik çaprazların çevrimsel performansları üzerine yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmektedir.

Tang ve Goel (1989) çevrimsel yük etkisindeki kutu enkesitli karbon çelik çaprazlar üzerinde tam ölçekli deneysel ve sayısal çalışmalar yapmıştır. Sonuç olarak kırılma ömrünün narinlik ve genişlik/kalınlık oranı ile doğru orantılı olduğunu belirtilmiştir. Kırılma ömrünün tahmini konusundaki ilk ampirik formül de bu çalışmada önerilmiştir. Ancak önerilen formül çalışma konusu olan kutu enkesitli V-çaprazlar için geçerlidir.

Tremblay (2002) farklı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiş 9 farklı deneysel çalışmadaki farklı enkesitlere sahip toplan 72 adet karbon çelik çaprazın çevrimsel yük etkisindeki elastik ötesi davranışını inceleyerek çaprazların tasarımı için kapsamlı veriler ortaya koymuştur. Enkesit şekli, mesnet şartları, malzeme tipi gibi özelliklerinde göz önünde bulundurulduğu çalışmada; çaprazların burkulma dayanımı, burkulma sonrası basınç dayanımı, çekme dayanımı ve kırılma ömrü gibi bir çok parametre araştırılmıştır. Sonuç olarak kırılma ömrü açısından narin elemanların narin olmayan elemanlara göre daha üstün olduğunu ve bu nedenle, genişlik/kalınlık oranının narin olmayan çaprazlar için süneklik açısından daha belirleyici bir faktör olduğunu belirtmiştir. Bu nedenle minimum narinliği belirleyebilmek için ampirik bir formül önermiştir.

Shaback ve Brown (2003) 9 adet kutu enkesitli karbon çelik çaprazı çevrimsel yük etkisinde incelemiştir. Narinlik, genişlik/kalınlık oranı ve mesnet şartlarının temel kriterler olarak alındığı çalışmada çaprazların çevrimsel davranışını etkileyen en önemli parametrenin narinlik oranı olduğu belirtilmiştir. Daha önceki çalışmalarda olduğu gibi, bu çalışmada da kırılma ömrünün narinlik ve genişlik/kalınlık oranına bağlı olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca, teorik kırılma ömrünün belirlenmesi için çok yönlü bir ampirik formül formül önerilmiştir.

Elchalakan vd. (2003) farklı narinlik oranlarına sahip 20 adet soğuk şekillendirilmiş boru enkesitli karbon çelik çaprazı farklı yerdeğiştirme genliklerine ve tekrar sayılarına sahip 3 farklı yükleme protokolü kullanarak çevrimsel yük etkisinde test etmiştir. Sonuç olarak yerel burkulmanın düşük çevrim yorgunluğu üzerinde oldukça etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca soğuk şekillendirme ve elektrik kaynağının küçük boyutlu elemanların dayanımı oldukça etkilediği belirlenmiştir.

Goggins vd. (2006) soğuk şekillendirilmiş kutu enkesitli karbon çelik çaprazların eksenel yük altındaki performanslarını araştırmıştır. Sadeleştirilmiş narinlik oranı 0.4-3.2 arasında olan 15 adet deney elemanı çevrimsel yüklemeye; 21 adet narin olmayan deney elemanı ise yerdeğiştirme kontrollü çekme yüküne maruz bırakılmıştır. Çekme testleri ile soğuk şekillendirmenin akma ve çekme dayanımına etkisi incelenmiş ve akma dayanımının

kupon numunelere kıyasla %30'a kadar daha fazla olabileceği görülmüştür. Bu nedenle kupon testleriyle elde edilen malzeme dayanımları dikkate alınarak hesaplanan burkulma yükünün gerçek burkulma yükünü tahmin etmede yetersiz kalacağı için malzeme testlerinin çekme kuponları ile değil enkesit üzerinden belirlenmesi önerilmiştir.

Fell vd. (2009) boru, kutu ve I enkesitli 18 adet 2/3 ölçekli karbon çelik çaprazı çevrimsel yük altında test etmiştir. Bu çalışmada, diğer çalışmalardan farklı olarak, enkesit geometrisi, yükleme protokolü, yükleme hızı ve beton dolgusunun çevrimsel davranışa etkisi araştırılmıştır. Sonuç olarak, çevrimsel sünekliğe yükleme protokolünün önemli etkisi olduğu tespit edilirken; beton dolgusunun çok az, yükleme hızının ise kayda değer bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir.

Nip vd. (2010) sıcakta haddelenmiş karbon çelik, soğuk şekillendirilmiş karbon çelik ve soğuk şekillendirilmiş paslanmaz çelikten imal edilmiş 18 adet kutu enkesitli çaprazı çevrimsel yük etkisinde test etmiştir. Sonuç olarak burkulma dayanımı, burkulma sonrası basınç dayanımı ve burkulma bölgesinin yatay yerdeğiştirmesini veren mevcut ampirik bağıntıların hem karbon çelik hemde paslanmaz çelik çaprazlar için kullanılabileceğini belirlenmiştir. Ancak, süneklik ile narinlik arasındaki ilişkiyi veren mevcut bağıntıların paslanmaz çelik çaprazlar için uygulanabilir olmadığı görülmüş ve bu doğrultuda yeni bağıntılar önerilmiştir. Ayrıca soğukta şekillendirilmiş deney elemanlarının kırılma ömrünün sıcakta haddelenmiş deney elemanlarına göre daha az olduğu görülmüştür.

Zhou vd. (2018) farklı narinlik oranlarına sahip 8 adet kutu enkesitli paslanmaz çelik elemanı çevrimsel eksenel yük etkisinde test etmiştir. Dayanım, kırılma ömrü, süneklik ve enerji tüketme kapasitelerinin incelendiği çalışmada güncel yönetmeliklerin paslanmaz çelik basınç elemanlarının tasarımı için güvenli sonuçlar verdiği ve kırılma ömrü ve sünekliğin genişlik/kalınlık oranına bağlı olduğu görülmüştür. Ayrıca yapılan sayısal çalışmalarla başlangıç kusurlarının sonuçları fazla etkilemediği, yalnızca yerel kusurların burkulma sonrası performansa etkili olduğu belirtilmiştir.

Demir vd. (2020) soğuk şekillendirilmiş kutu enkesitli çaprazları iç içe koyarak elde ettiği sandviç tipi elemanlarla genel ve yerel burkulmayı sınırlandırmaya çalışmıştır. 4 adet deneye elemanının test edildiği çalışmada genel burkulma tamamen engellenmiş, yerel burkulma ise sınırlandırılarak çapraz boyunca yayılmıştır. Sonuç olarak yük taşıma kapasitesi, kırılma ömrü, süneklik ve enerji tüketme kapasitelerinde önemli iyileşmeler elde edilmiştir.

1.5. Amaç ve Kapsam

Bugüne kadar boru ve kutu enkesitli çaprazların deneysel davranışları üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda malzeme özelliğinin, enkesit geometrisinin ve yükleme protokolünün çaprazların performansına olan etkisi birbirinden bağımsız olarak incelenmiştir. Bu çalışmada ise bu değişkenlerin bileşik etkilerinin çelik çaprazların performansına etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

Bu kapsamda karbon veya paslanmaz çelik saclardan soğuk olarak şekillendirilmiş, yaklaşık 1/3 ölçekli, 6 adet boru 6 adet kutu enkesitli çapraz numune yakın ve uzak fay yüklemelerini temsil eden 3 farklı çevrimsel yük etkisinde deneysel olarak incelenmiştir. Numunelerin burkulma dayanımları, enerji tüketme kapasiteleri ve yerdeğiştirme süneklilikleri malzeme özelliği, enkesit geometrisi ve yükleme protokolü açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca burkulma dayanımları Avrupa ve Amerikan Yönetmelikleriyle kıyaslanmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

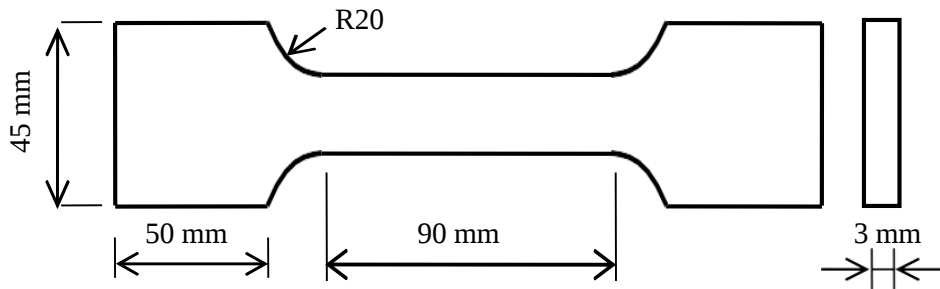
Bu çalışmada, paslanmaz ve karbon çelik plakalardan soğuk olarak şekillendirilerek üretilmiş boru ve kutu en kesitli çapraz elemanların farklı çevrimsel yükler etkisindeki davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Bu bölümde, gerçekleştirilen deneysel çalışmalar hakkında bilgi verilmektedir.

2.1. Deneysel Çalışmalar

2.1.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Çalışma konusu paslanmaz çelik çaprazlar, üretici firma tarafından, EN 1993-1-4 (2015)'e göre akma gerilmesi minimum 220 MPa olan 3.0 mm kalınlığında 304L (1.4307) kalite çelik saclardan; karbon çelik çaprazlar ise EN 1993-1-1 (2014)'e göre akma gerilmesi minimum 235 MPa olan 3.0 mm kalınlığında S235JRH (1.0039) kalite çelik saclardan soğuk şekillendirilerek üretilmektedir.

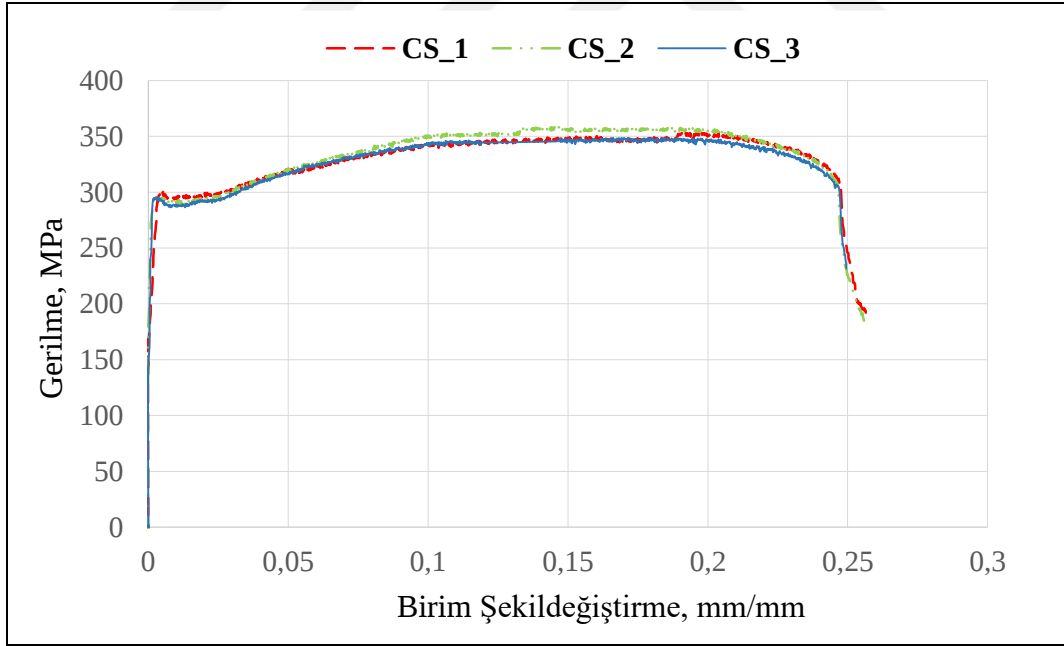
Bu deney elemanlarından EN 10002-1 (2004) de verilen ölçülere uygun olarak su jeti ile kesilen üç adet kupon numunesi üzerinde Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarında aynı standart'a göre çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Kupon numunelerinin geometrik ölçüleri Şekil 2.1'de, çekme deneyleri yapılan paslanmaz ve karbon numuneler Şekil 2.2'de, gerilme-birim şekildeğiştirme eğrileri Şekil 2.3 ve 2.4'te ve çekme deneylerinden elde edilen ortalama değerler Tablo 2.1'de, verilmiştir.



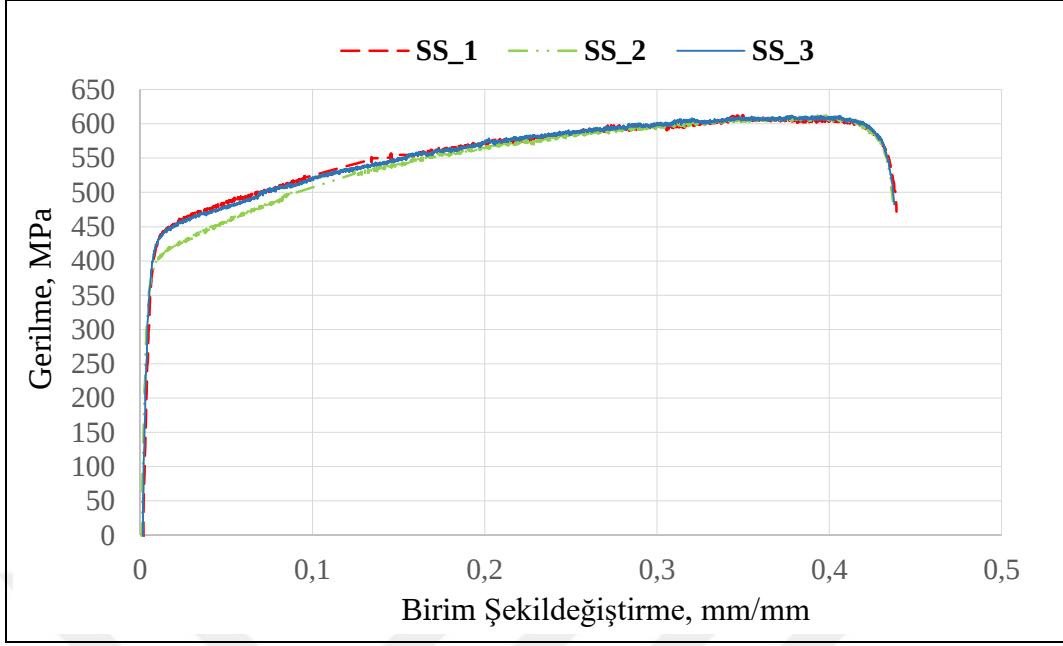
Şekil 2.1. EN 10002-1 (2004)'e göre hazırlanan çekme çubuğunun geometrik ölçüleri (mm)



Şekil 2.2. Çekme deneyleri yapılan paslanmaz ve karbon numuneler



Şekil 2.3. CS çekme çubuklarına ait gerilme - birim şekildeğiştirme eğrileri



Şekil 2.4. SS çekme çubuklarına ait gerilme - birim şekildeğiştirme eğrileri

Tablo 2.1. Çekme deneylerinde elde edilen ortalama değerler

Çekme Deney Elemanı	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
CS	20	3	287.55	353.95	25.1
SS	20	3	413.47	612.47	44.1

2.1.2. Deney Elemanlarının Özellikleri ve Üretimi

Deneysel çalışmalar kapsamında farklı malzeme özelliklerinin, enkesitlerin ve yükleme protokollerinin çaprazların davranışlarına etkisini araştırmak üzere 12 adet deney elemanı test edilmiştir (Şekil 2.5). Bu deney elemanları enkesit özelliğine (boru (P) veya kutu (B)), malzeme özelliğine (karbon (CS) veya paslanmaz çelik (SS)) ve uygulanan yükleme protokolüne (uzak fay (FF), yakın fay-basınç (NFC) ve yakın fay-çekme (NFT)) göre isimlendirilmiş olup detayları Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. Deney elemanlarının özellikleri

Deney Elemanı	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)	Kalınlık (mm)	Uzunluk (mm)	Yerel Stabilité				Genel Stabilité			
					Avrupa Yönetmeliđi		Amerikan Yönetmeliđi		Avrupa Yönetmeliđi		Amerikan Yönetmeliđi	
					λ	λ_r	λ	λ_r	λ	λ_r	λ	λ_r
B-CS-FF	80	80	3	2000	22.67 Class 1	33	22.67 Narin olmayan	40.84	0.66	2	63	200
B-CS-NFC												
B-CS-NFT												
B-SS-FF	80	80	3	2000	22.67 Class 1	26.47	22.67 Narin olmayan	38.27	0.66	2	63	200
B-SS-NFC												
B-SS-NFT												
Deney Elemanı	Çap (mm)		Kalınlık (mm)	Uzunluk (mm)	Yerel Stabilité				Genel Stabilité			
					Avrupa Yönetmeliđi		Amerikan Yönetmeliđi		Avrupa Yönetmeliđi		Amerikan Yönetmeliđi	
					λ	λ_r	λ	λ_r	λ	λ_r	λ	λ_r
P-CS-FF	76.1		3	2000	25.37 Class 1	50	25.37 Narin olmayan	93.61	0.82	2	77.32	200
P-CS-NFC												
P-CS-NFT												
P-SS-FF	76.1		3	2000	25.37 Class 1	53.04	25.37 Narin olmayan	95.23	0.82	2	77.32	200
P-SS-NFC												
P-SS-NFT												

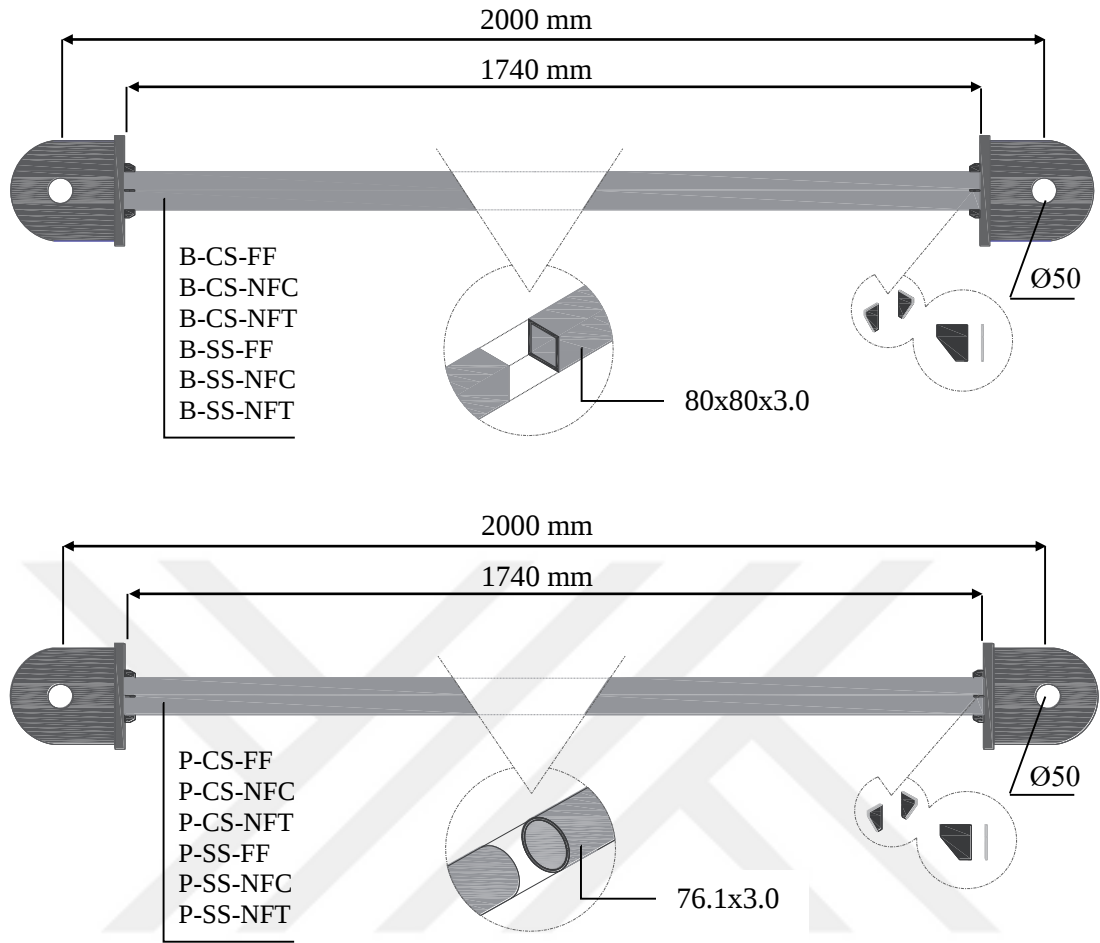
Boru enkesitli deney elemanları 76.1x3.0 mm enkesit ölçülerine, kutu enkesitli deney elemanları ise 80x80x3.0 mm enkesit ölçülerine sahiptir. Tüm deney elemanları net 1740 mm uzunluğunda olup mafsaldan mafsala uzunlukları ise 2000 mm'dir (Şekil 2.6).

Deney elemanlarının boyutsuz narinlik oranları paslanmaz çelik elemanlar için EN-1993-1-4 (2015) ve AISC 370-21 (2021)' e göre, karbon çelik elemanlar için ise EN-1993-1-1 (2014) ve AISC 360-16 (2016)'ya göre hesaplanarak Tablo 2.2'de verilmiştir Bütün deney elemanları ilgili standartlara göre narin olmayan enkesitlere sahip olup genel burkulma sınır koşullarını sağlamaktadır.

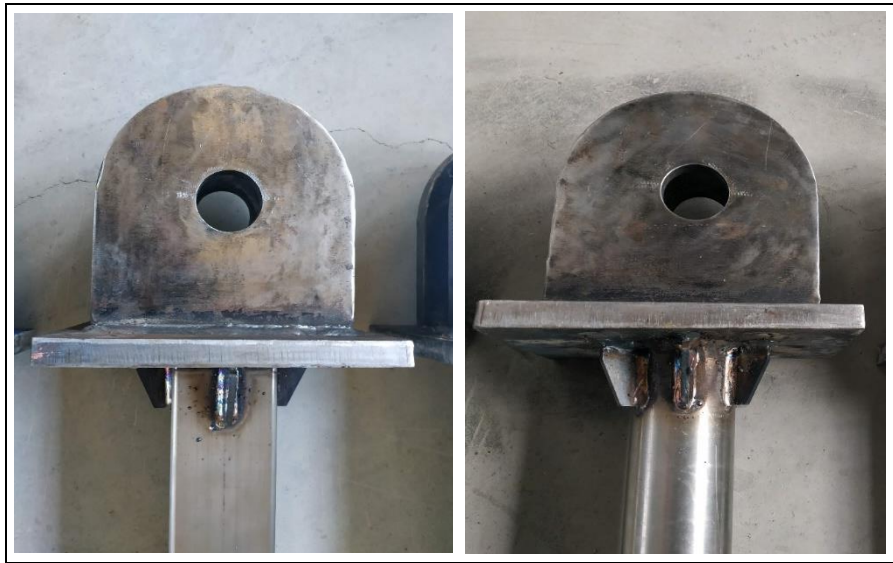
Ölçüleri Şekil 2.6'de verilmiş olan deney elemanları, 1740 mm uzunluğundaki profillerin iki ucundan deney düzeneğine birleşimini sağlayan mafsal plakalarına kaynaklanması ile üretilmiştir. Paslanmaz çelik profillerin mafsal plakasına birleşiminde E308L-15 tipi elektrod, karbon çelik çaprazların birleşiminde ise E42 tipi elektrod kullanılmıştır. Ayrıca bu birleşim bölgelerinde istenmeyen kırılmaları engellenmek için berkitme levhaları kullanılmıştır (Şekil 2.7). Mafsal plakaları AISC 360-16 (2016)'ya uygun olarak tasarlanmış olup özellikleri Şekil 2.8'de verilmiştir. Burada; b delik kenarından eleman kenarına olan kuvvete dik doğrultudaki uzaklığı, t mafsal plakası kalınlığını, b_e etkin genişliği, a delik kenarından eleman kenarına olan kuvvet doğrultusundaki uzaklığı, w mafsal plakası taban genişliğini, A_{sf} kırılma çizgisi alanını ve d bulon deliği çapını göstermektedir.



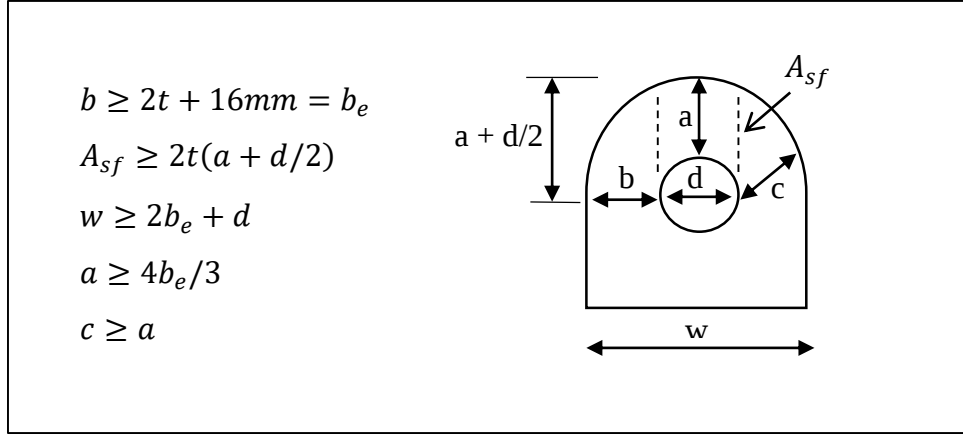
Şekil 2.5. Deney elemanları



Şekil 2.6. Deney elemanlarının ölçüleri



Şekil 2.7. Mafsal plakası ve berkitme levhalar



Şekil 2.8. AISC 360-16 (2016)'ya göre tasarlanan mafsallı plakası ölçüleri

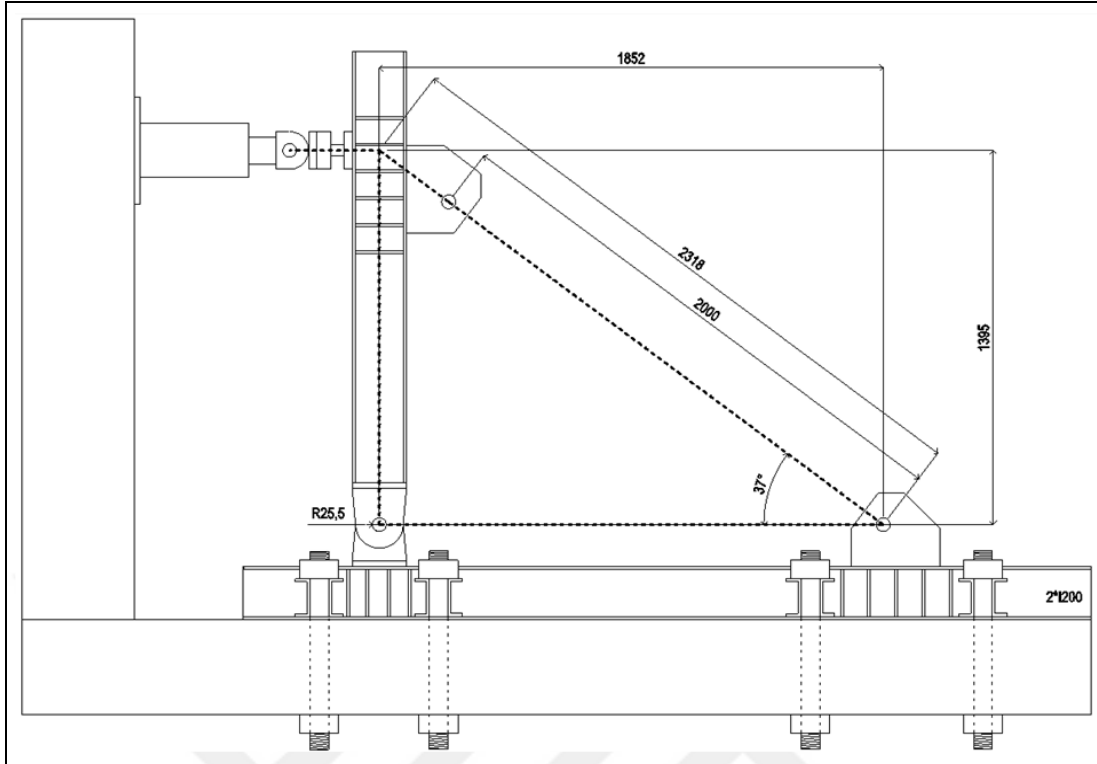
2.1.2.1. Deney Düzeneği

Deneyisel çalışmalar Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında bulunan yükleme platformunda gerçekleştirilmiştir. Yükleme platformu deney düzeneğinin montajına imkan sağlayan delikli döşeme ve yatay yükleme yapmayı sağlayan hidrolik silindirin asılı bulunduğu delikli duvardan meydana gelmektedir (Şekil 2.9).

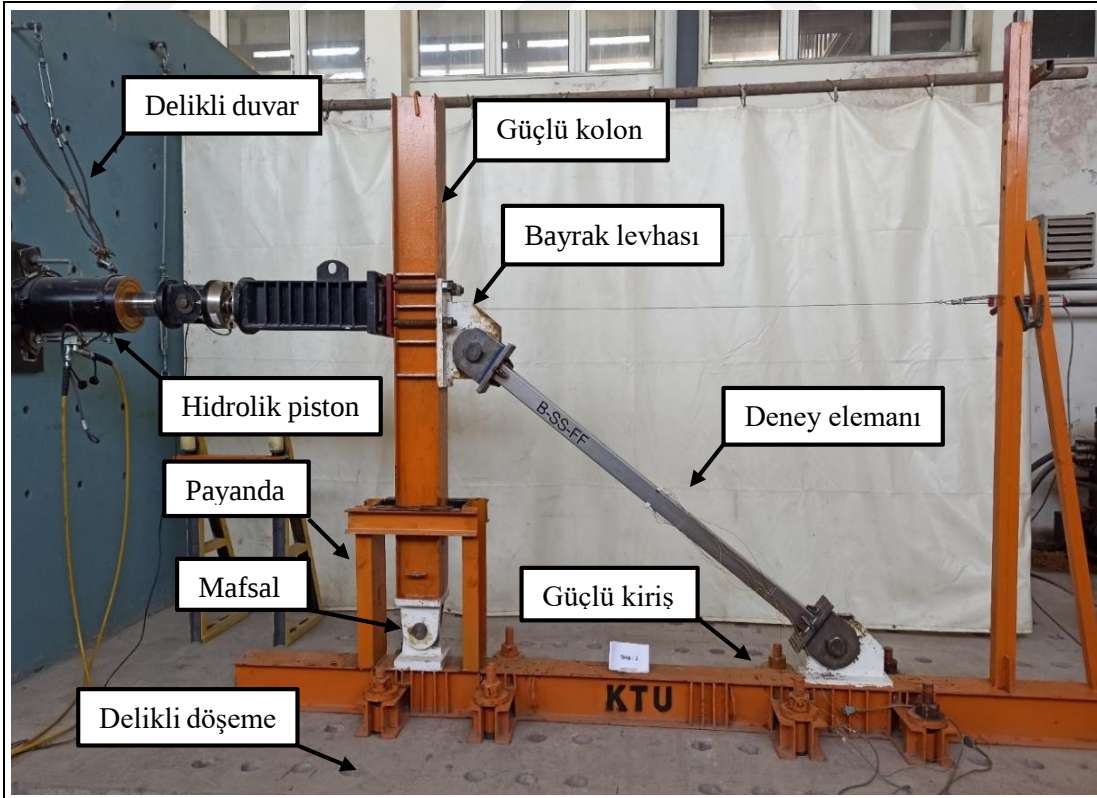
Yükleme platformuna mesnetlenecek olan deney düzeneği, 2 adet I200 profilinin birleştirilmesiyle meydana gelen güçlü kolon ve kiriş ile düzlem dışı hareketi engelleyici payandalardan oluşmaktadır. Güçlü kiriş, delikli döşemeye 8 adet yüksek dayanımlı bulon ile bağlanarak ankastre mesnet şartları sağlanmıştır. Güçlü kolon ise delikli duvarda asılı bulunan ve sisteme yatay yükleme yapacak olan hidrolik silindire 4 adet yüksek dayanımlı bulon ile bağlanmıştır.

Güçlü kolon ile kirişin bağlantısı mafsallı birleşim ile sağlanmıştır. Deney elemanlarının deney düzeneğine montajı, deney düzeneğine kaynaklanan bayrak levhaları ile sağlanmıştır. Tüm birleşimlerde 50 mm çapında bulon kullanılmıştır. Deney elemanlarının deney düzeneğini zorladığı noktaları berkitme levhaları ile güçlendirilmiştir.

Şekil 2.9'de deney düzeneğinin ölçüleri şematik olarak gösterilmektedir. Yatayla 37° açı yapacak şekilde düzeneğe yerleştirilen deney elemanları hidrolik silindire göre herhangi bir dış merkezlik yaratmamaktadır. Hidrolik silindirden gelen yük kolon eksenine ile deney elemanlarının yerleştirileceği eksenin çakıştığı düğüm noktasına uygulanmaktadır. Şekil 2.10'da ise deney düzeneğini oluşturan elemanlar ve düzeneğe yerleştirilmiş bir deney numunesi görülmektedir.



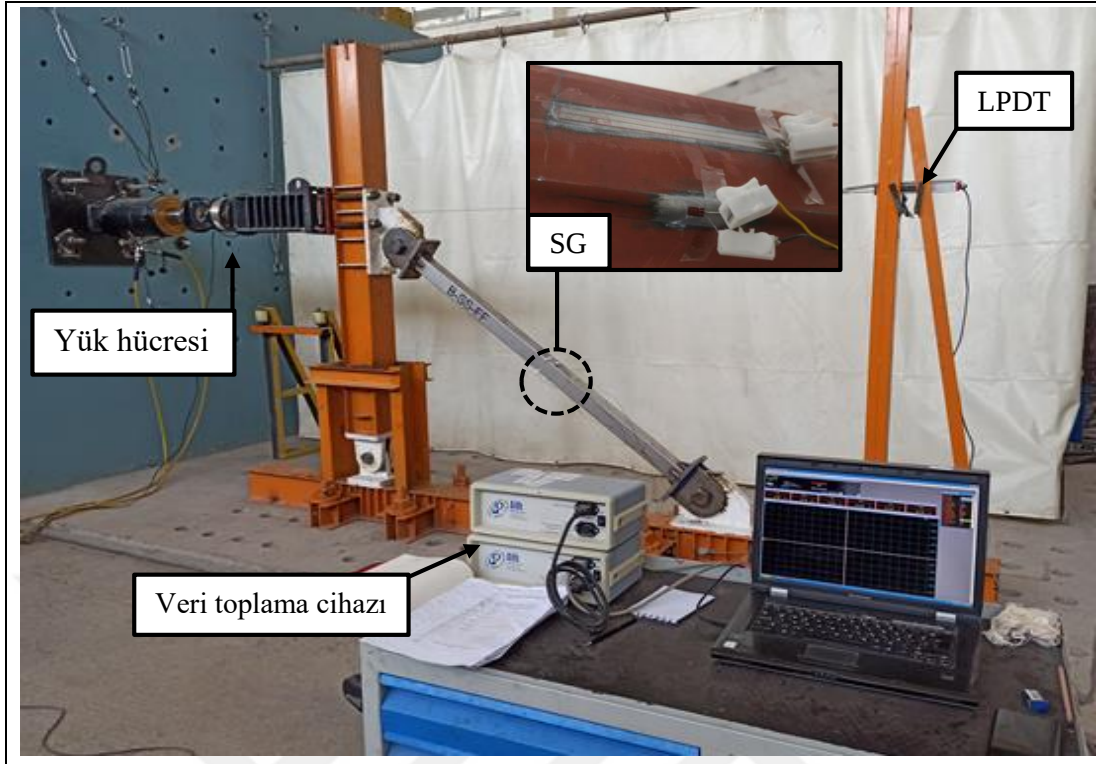
Şekil 2.9. Deney düzeneğinin ölçüleri



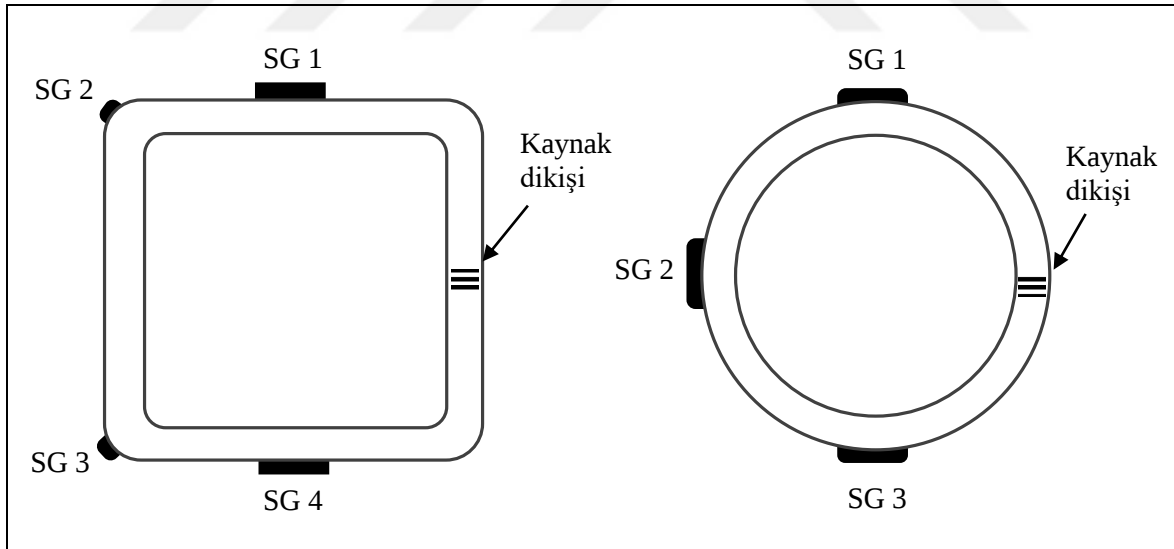
Şekil 2.10. Deney düzeneğini oluşturan elemanlar ve düzeneğe yerleştirilmiş bir numune

2.1.2.1.1. Ölçüm Sistemi ve Kullanılan Aletler

Deneylerde yatay yük, yatay yerdeğiştirme ve birim şekildeğiştirme ölçümleri yapılmıştır (Şekil 2.11). Deney elemanlarına uygulanan yatay yükleme; besleme hortumları vasıtasıyla güç ünitesine bağlı bir hidrolik piston ile yapılmıştır. 300 mm açılma kapasitesi olan hidrolik piston, çevrimsel (itme-çekme) olarak yükleme yapabilmektedir. Hidrolik piston her iki ucundan da mafsallı olarak teşkil edildiği için deney elemanının olası düşey hareketi sırasında yüklemenin farklı gerilmelere yol açması engellenmektedir. Yatay yük ölçümleri güçlü kolon ile güçlü duvar arasında bulunan hidrolik silindirin ucuna bağlanan ve yükü elektronik olarak ölçebilen 500 kN kapasiteli yük hücresi (Loadcell) ile yapılmıştır. Hidrolik pistonun yatay hareketi 1 adet 300 mm ölçüm kapasiteli LPDT (Doğrusal potansiyometrik cetvel) ile ölçülmüştür. Deneyler esnasında çaprazlarda burkulmanın beklendiği orta kesitte birim şekildeğiştirmeleri belirlemek amacıyla kutu enkesitli elemanlara köşelerde 2 mm uzunluğunda üst ve altta ise 90 mm uzunluğunda toplam 4 adet, boru enkesitli çaprazlara ise 90 mm uzunluğunda toplam 3 adet FLA tipi birim şekildeğiştirme ölçer (SG) Şekil 2.12'deki plana göre yerleştirilmiştir. Kutu enkesitli karbon çelik çaprazlara birim şekildeğiştirme ölçer yapıştırılmadan önce yüzeydeki paslanmayı önleyici boya (bordo renkli) temizlenmiştir. Yapıştırıldıktan sonra kalibrasyonu yapılan birim şekildeğiştirme ölçerler ± 0.015 aralığında ölçüm yapabilmektedir. Deneyler boyunca elde edilen veriler saniyede sekiz veri kaydetme özelliğine sahip on altı kanallı CODA Ai8b veri toplama cihazı vasıtası ile kayıt altına alınmıştır.



Şekil 2.11. Ölçüm sistemi ve veri toplama cihazı



Şekil 2.12. Çaprazların orta kesitindeki SG düzeni

2.1.3. Deney Elemanlarına Uygulanan Yatay Yüklemler

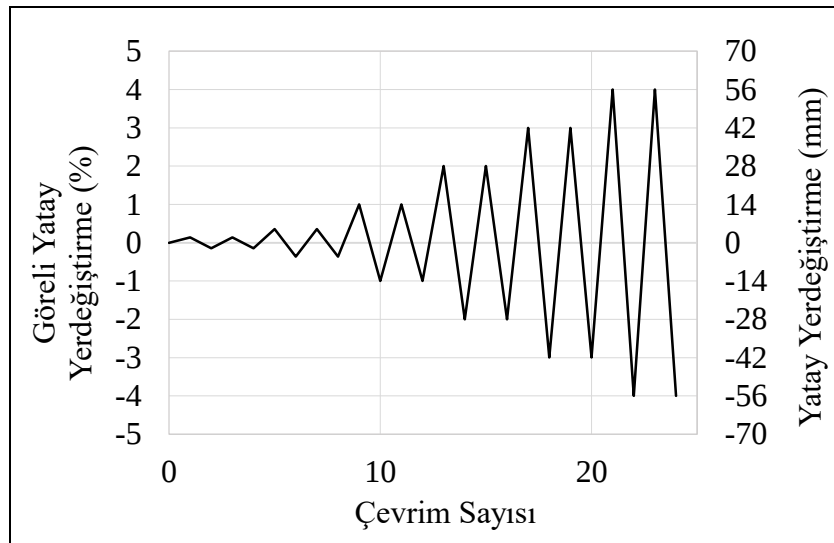
Deneyisel çalışmalar kapsamında uzak ve yakın fay yer hareketlerini temsil eden 3 farklı yarı statik yükleme protokolü kullanılmıştır. Şekil 2.13’de uzak fay yer hareketi talebini temsil eden tam simetrik çevrimsel yükleme protokolü, Şekil 2.14 ve 2.15’de ise darbe etkili yakın fay yer hareketini temsil eden ve simetrik olmayan 2 farklı yükleme protokolü verilmiştir. Yakın fay yükleme protokolleri darbe etkisinin çaprazda basınç yada çekme meydana getirmesi durumuna göre yakın fay-basınç (NFC) yada yakın fay-çekme (NFT) olarak iki şekilde dikkate alınmıştır.

Yükleme protokolleri görelî yatay yer değıştirme cinsinden verilmiştir. Dikkate alınan en büyük deprem yer hareketi talebi, yükleme sisteminin de kapasitesi göz önünde bulundurularak, % 4 görelî yatay yerdeğıştirme olarak seçilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda süneklik düzeyi yüksek merkezi çelik çaprazlı çerçevelerde görelî yatay yerdeğıştirme talebinin % 4-5’ i aşabileceğî belirtilmiştir (Uriz ve Mahin, 2005; McCormick ve diğ., 2007). AISC 360-16 (2016)’da ise süneklik düzeyi yüksek merkezi çelik çaprazların burkulduktan sonra akma anındaki eksenel şekildeğıştirmesinin 10-20 katı kadar daha şekildeğıştirebileceğî ifade edilmektedir. Çelik çaprazlı çerçevelerde burkulmanın % 0.3-0.5 görelî yatay yerdeğıştirme seviyelerinde meydana geldiğî dikkate alındığında % 4 görelî yatay yerdeğıştirme talebi AISC 360-16 (2016) ile’ de uyumludur.

Tüm yükleme protokolleri SAC (2000)’de önerilen yükleme protokollerinden uyarlanmış olup, genlikler deney düzeneğinin kapasitesinin yanı sıra çapraz elemanların yaklaşık % 0.3-0.5 görelî yatay ötelenme seviyesinde burkulacağı dikkate alınarak modifiye edilmiştir (Tablo 2.3, 2.4 ve 2.5). Yakın fay yüklemelerinin sonunda deney elemanlarında göçme olmaması ihtimali göz önünde bulundurularak bu yükleme protokollerinin devamına uzak fay yükleme protokolü eklenerek uygulanmıştır (Şekil 2.14 ve 2.15).

Tablo 2.3. Uzak fay yükleme protokolü - FF

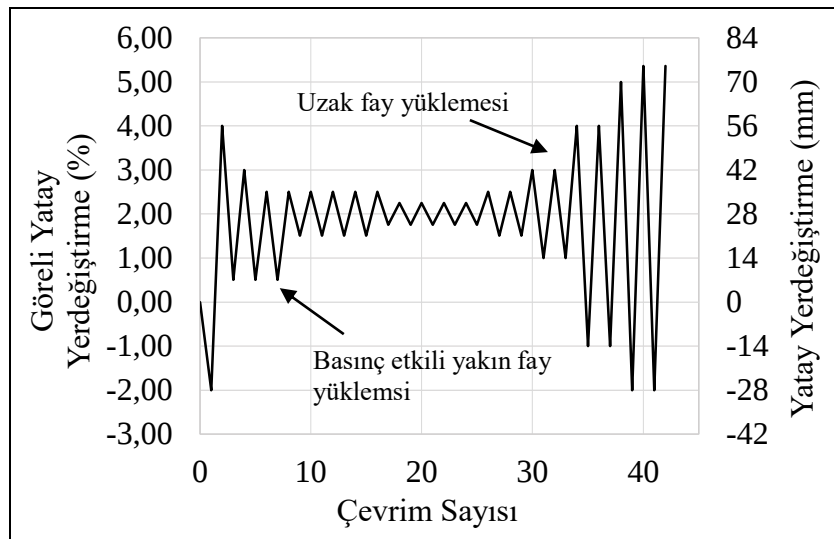
Çevrim Sayısı	Yatay Yerdeğiştirme (Δ , mm)	Görelî Yatay Yerdeğiştirme (%)
1 – 2	2.00	0.14
	-2.00	-0.14
3 – 4	5.00	0.36
	-5.00	-0.36
5 – 6	13.95	1.00
	-13.95	-1.00
7 – 8	27.90	2.00
	-27.90	-2.00
9 – 10	41.85	3.00
	-41.85	-3.00
11 - 12	55.80	4.00
	-55.80	-4.00



Şekil 2.13. Uzak fay yükleme protokolü

Tablo 2.4. Yakın fay yükleme protokolü - NFC

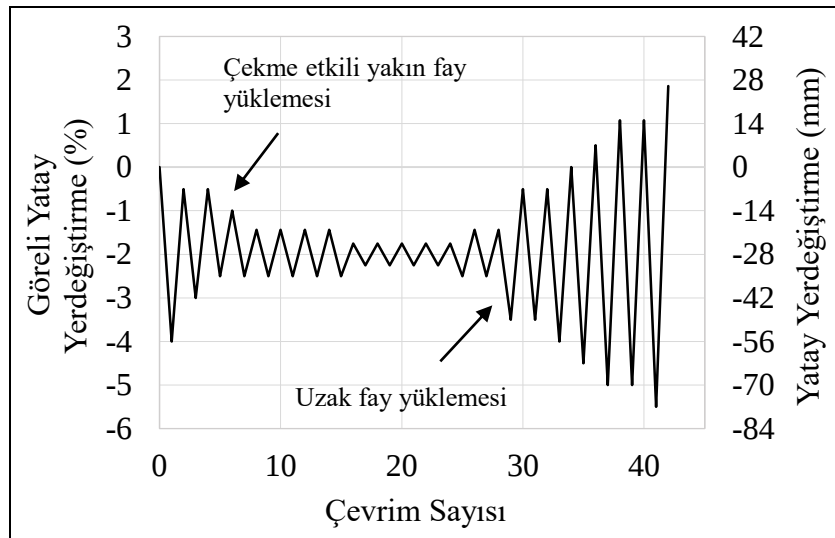
Çevrim Sayısı	Yatay Yerdeğiştirme (Δ , mm)	Görelî Yatay Yerdeğiştirme (%)	Çevrim Sayısı	Yatay Yerdeğiştirme (Δ , mm)	Görelî Yatay Yerdeğiştirme (%)
1	-27.90	-2.00	14	21.00	1.51
	55.80	4.00		34.90	2.50
2	7.00	0.50	15	21.00	1.51
	41.85	3.00		41.85	3.00
3 – 4	7.00	0.50	16	13.95	1.00
	34.90	2.50		41.85	3.00
5 – 8	21.00	1.51	17 – 18	13.95	1.00
	34.90	2.50		55.80	4.00
9 – 12	24.50	1.76	19	-13.95	-1.00
	31.40	2.25		69.75	5.00
13	24.50	1.76	20 – 21	-27.90	-2.00
	34.90	2.50		74.75	5.36



Şekil 2.14. Basınç etkili yakın fay yükleme protokolü

Tablo 2.5. Yakın fay yükleme protokolü - NFT

Çevrim Sayısı	Yatay Yerdeğiştirme (Δ , mm)	Görelî Yatay Yerdeğiştirme (%)	Çevrim Sayısı	Yatay Yerdeğiştirme (Δ , mm)	Görelî Yatay Yerdeğiştirme (%)
1	-55.80	-4.00	13 – 14	-34.90	-2.50
	-7.00	-0.50		-20.10	-1.44
2	-41.85	-3.00	15 – 16	-48.80	-3.50
	-7.00	-0.50		-7.00	-0.50
3	-34.90	-2.50	17	-55.80	-4.00
	-13.95	-1.00		0.00	0.00
4 – 7	-34.90	-2.50	18	-62.77	-4.50
	-20.10	1.44		7.00	0.50
8	-34.90	2.50	19 – 20	-69.75	-5.00
	-24.50	-1.76		15.00	1.08
9 - 12	-31.40	-2.25	21	-76.75	-5.50
	-24.50	-1.76		26.00	1.86



Şekil 2.15. Çekme etkili yakın fay yükleme protokolü

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

3.1. Bulgular

Bu bölümde, çelik çapraz numunelerin yarı statik çevrimsel yük etkisindeki davranışlarını belirlemek üzere gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar verilmektedir.

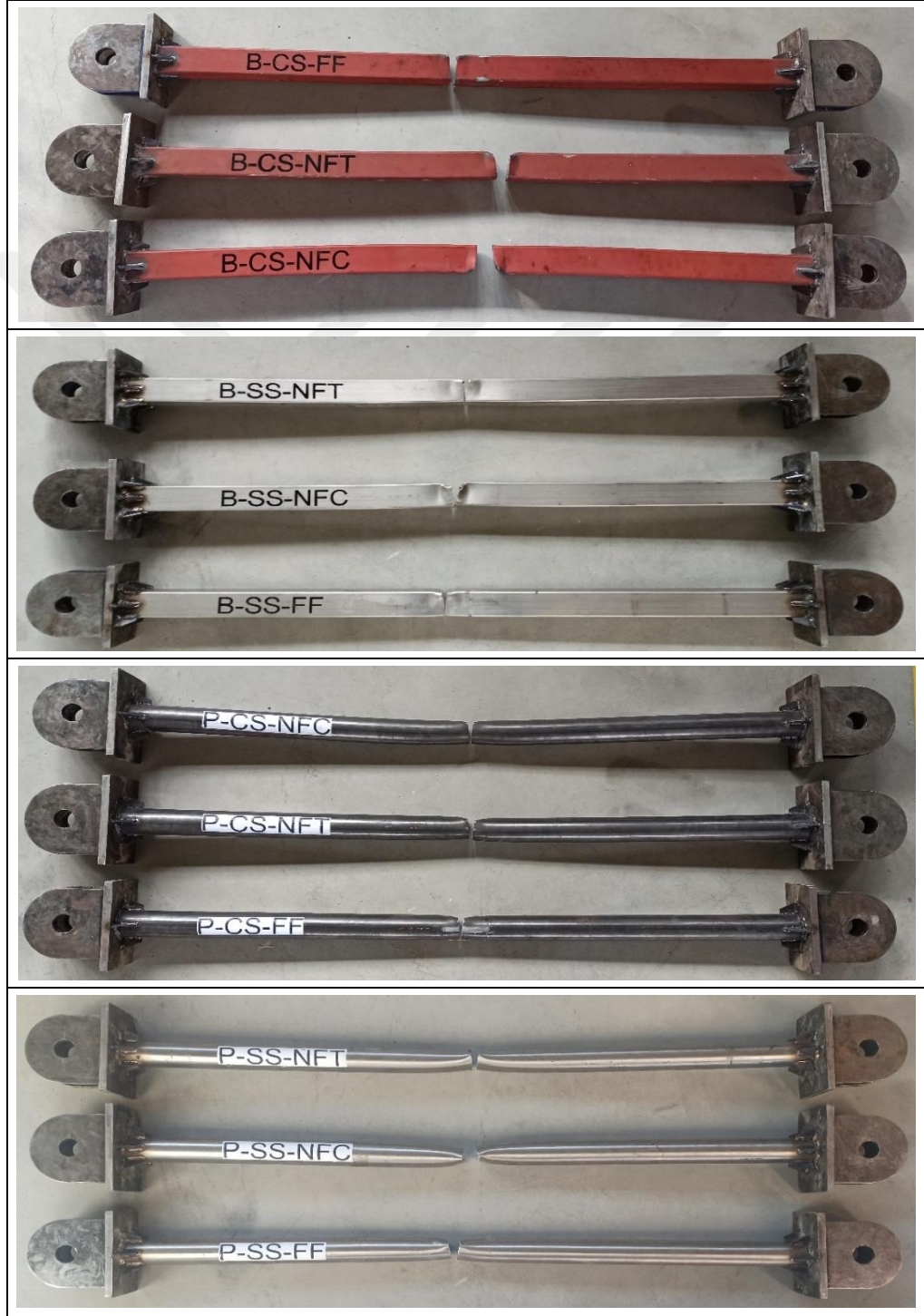
Deneysel çalışmalar kapsamında yaklaşık 1/3 ölçekli toplam 12 adet numune test edilmiştir (Şekil 3.1). 3 farklı yükleme protokolünün uygulandığı deneylerde FF yüklemelerine itme; NFC ve NFT yüklemelerine ise çekme yüklemesi ile başlanılmıştır. Yerdeğiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilen deneylerde dinamik etkileri ihmal edebilmek için boyuna şekildeğiştirme hızı 0.0003 s^{-1} olarak uygulanmıştır (BS 7270, 2006). Grafik ve tablolarda “+” itme yüklemesini “-” ise çekme yüklemesini göstermektedir.

3.1.1. FF Serisi Numunelerin Deney Sonuçları

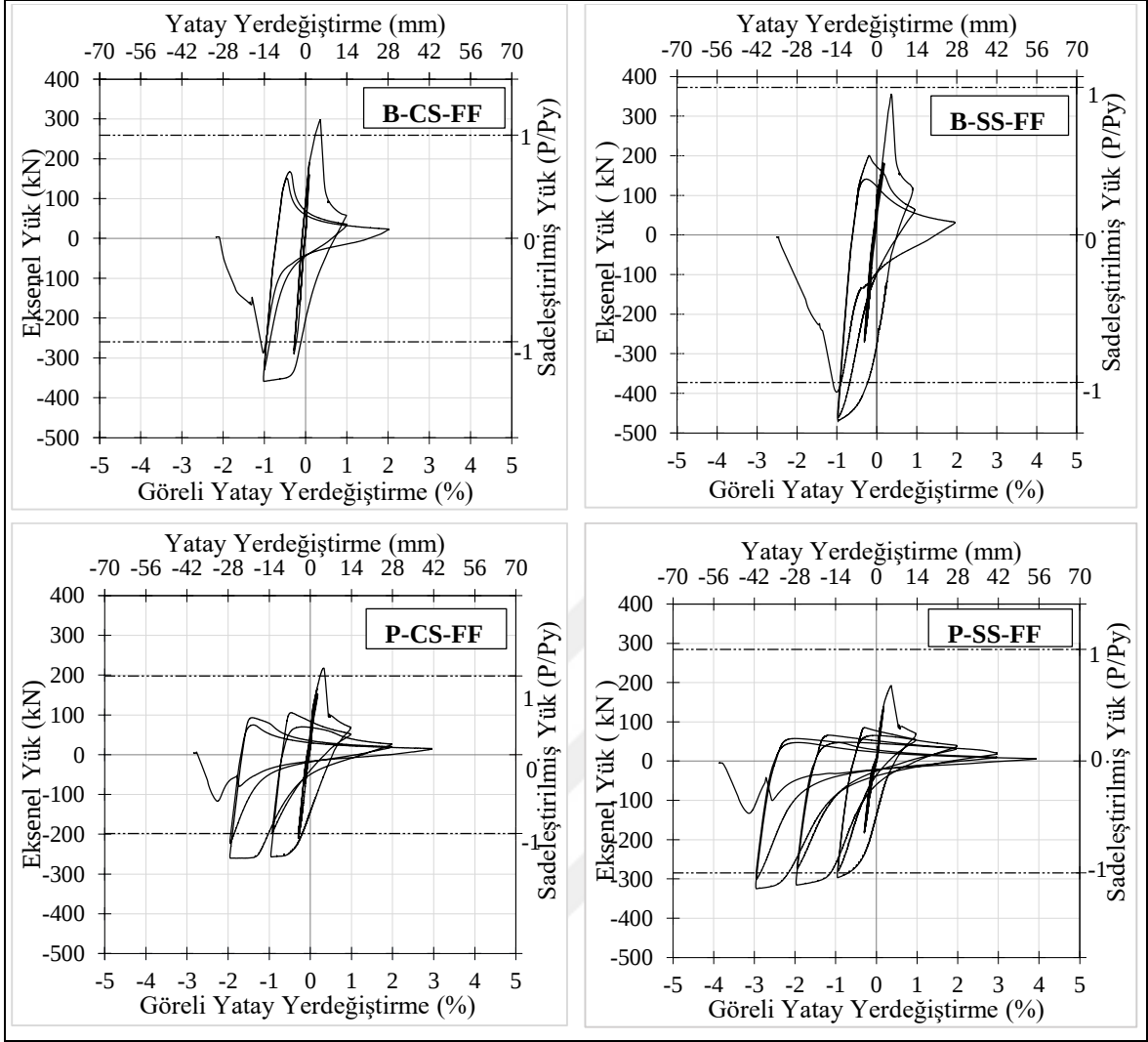
FF yüklemesi altında test edilen B-CS-FF, B-SS-FF, P-CS-FF ve P-SS-FF numunesine ait eksenel yük - yerdeğiştirme eğrileri Şekil 3.2’de ve sonuçlar Tablo 3.1’de verilmiştir.

FF serisi deney numuneleri ilk iki çevrimde elastik davranış sergilemiştir. Üçüncü çevrimde B-CS-FF ve P-CS-FF numuneleri çekmede akma dayanımına ulaşırken B-SS-FF ve P-SS-FF numuneleri elastik davranışı sürdürmüştür. Beşinci çevrimde B-CS-FF, B-SS-FF, P-CS-FF ve P-SS-FF numunelerinde sırasıyla %0.34, %0.36, %0.32, %0.37 görelî yatay yerdeğiştirme ve 294.83, 350.60, 217.42 ve 192.48 kN yük seviyesinde genel burkulma meydana gelmiştir (Şekil 3.3). B-CS-FF ve B-SS-FF numuneleri için genel burkulmanın hemen ardından %1.00 görelî yatay yerdeğiştirme seviyesinde yerel burkulma gözlemlenmiştir. P-CS-FF ve P-SS-FF numuneleri için ise yerel burkulmalar sırasıyla altıncı ve dokuzuncu çevrimlerde meydana gelmiştir (Şekil 3.4). İlerleyen çevrimlerde yerdeğiştirme genlikleri arttıkça numunelerin genel burkulma yüküne kıyasla burkulma dayanımları önemli oranda azalmıştır. B-CS-FF ve B-SS-FF numuneleri için 6, P-CS-FF ve P-SS-FF numuneleri için ise sırasıyla 8 ve 10 nolu çevrimlerin çekme yüklemelerinde yerel burkulmanın yoğunlaştığı köşelerde gözle görülür çatlaklar gözlemlenmiştir (Şekil 3.5).

Bu çatlaklar çekme genliğinin arttığı sonraki çevrimlerde genişleyerek enkesit boyunca yayılmaya başlamış. B-CS-FF ve B-SS-FF numuneleri için 7, P-CS-FF ve P-SS-FF numuneleri için ise sırasıyla 9 ve 11 nolu çevrimlerde en kesitte kopma meydana gelerek numuneler taşıma gücünü tamamen kaybetmiştir. (Şekil 3.6).



Şekil 3.1. Deney elemanlarının çevrimsel yükleme sonrası görünümü



Şekil 3.2. FF serisi deney numunelerine ait eksenel yük - yerdeğiştirme eğrileri

Tablo 3.1. FF serisi deney numunelerinin sonuçları

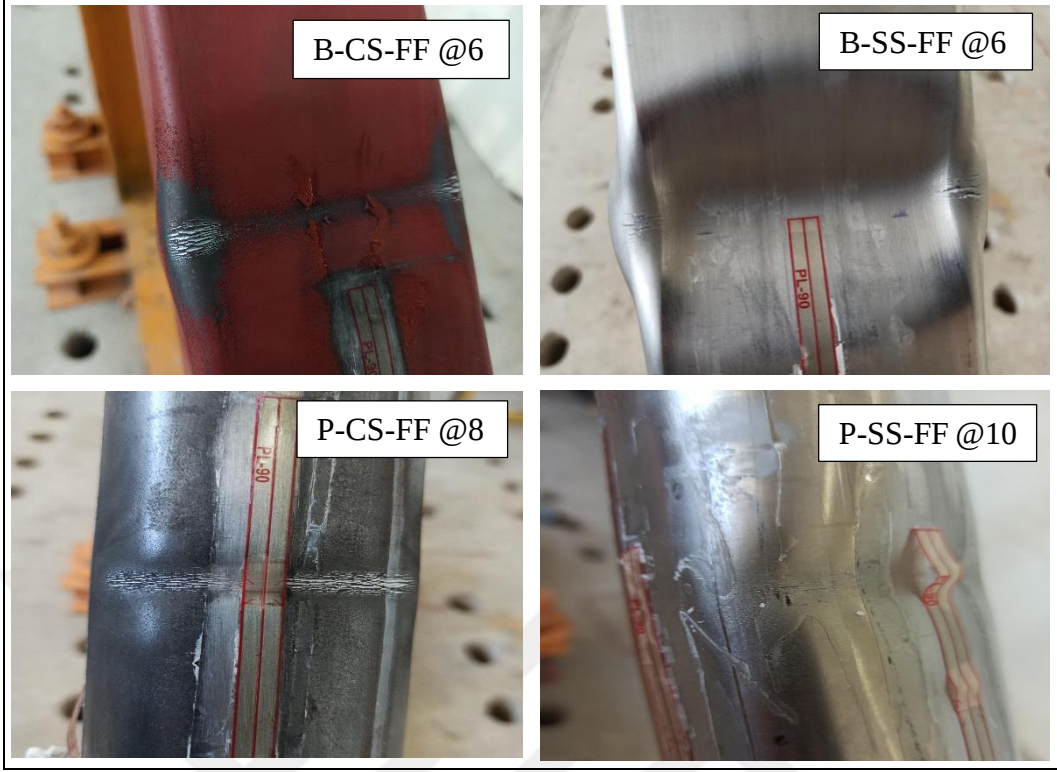
Deney Elemanı	$P_{t,max}$ kN	$P_{c,max}$ kN	Δ_{GB} , mm (θ_{GB} , %)	Δ_{LB} , mm (θ_{LB} , %)	Δ_{FI} , mm (θ_{FI} , %)	Δ_{SL} , mm	μ_c	μ_t
B-CS-FF	-358.71 @5	297.72 @5	4.73 @5 (0.34)	13.95 @5 (1.00)	13.95 @6 (-1.00)	@6	6.41	3.27
B-SS-FF	-471.16 @5	355.79 @5	5.00 @5 (0.36)	13.95 @5 (1.00)	13.95 @6 (-1.00)	@6	6.23	3.20
P-CS-FF	-260.19 @7	217.62 @5	4.45 @5 (0.32)	13.95 @6 (1.00)	27.90 @8 (-2.00)	@8	9.47	6.25
P-SS-FF	-324.86 @9	192.66 @5	5.80 @5 (0.37)	41.85 @9 (3.00)	41.85 @10 (-3.00)	@10	12.6	9.48



Şekil 3.3. FF serisi deney numunelerinde genel burkulma



Şekil 3.4. FF serisi deney numunelerinde lokal burkulma



Şekil 3.5. FF serisi deney numunelerinde çatlak başlangıçları

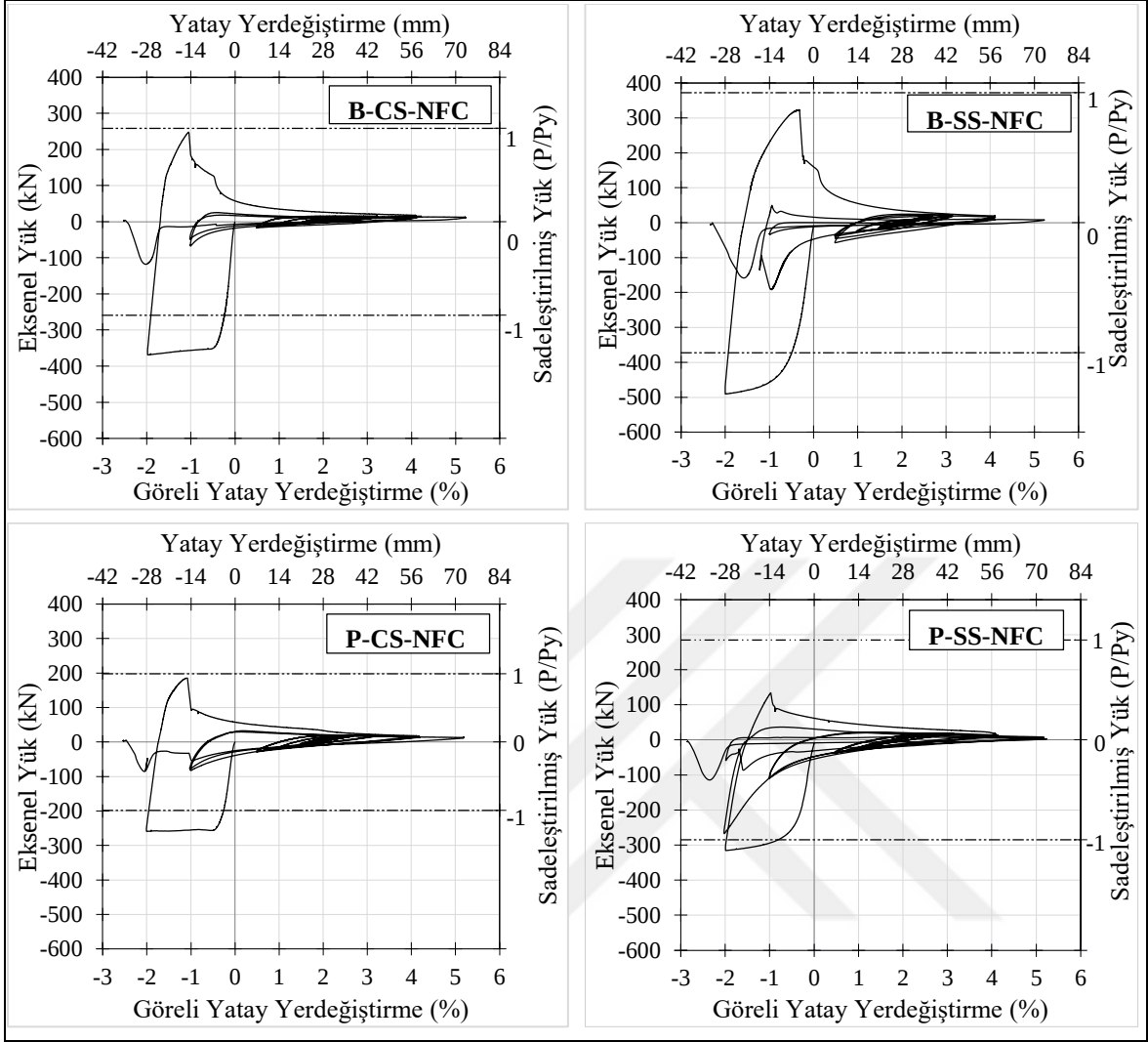


Şekil 3.6. FF serisi deney numunelerinde kopmadan hemen önceki hasar durumu

3.1.2. NFC Serisi Numunelerin Deney Sonuçları

NFC yüklemesi altında test edilen B-CS-NFC, B-SS-NFC, P-CS-NFC ve P-SS-NFC numunelerine ait eksenel yük - yerdeğiştirme eğrileri Şekil 3.7’de ve sonuçlar Tablo 3.2’de verilmiştir.

NFC serisi deneylerde ilk çevrime %2 görelî yatay yerdeğiştirme oranında çekme yüklemesiyle başlanmış ve %4 görelî yatay yerdeğiştirme oranında itme yüklemesiyle devam edilmiştir. Birinci çevrimde bütün deney elemanları çekmede akma dayanımına ulaşmıştır. Aynı çevrimin basınç yüklemesinde B-CS-NFC, B-SS-NFC, P-CS-NFC ve P-SS-NFC numunelerinde sırasıyla 248.17, 323.05, 185.66 ve 134.24 kN yük seviyesinde genel burkulma meydana gelmiştir (Şekil 3.8). Yerel burkulma B serisi numunelerin orta bölgesinde genel burkulmanın hemen ardından meydana gelirken P serisi numunelerde aynı çevrimin sonlarına doğru meydana gelmiştir. (Şekil 3.9). Genel burkulmadan sonra numunelerin basınç dayanımları büyük oranda azalmıştır. B-CS-NFC ve B-SS-NFC numuneleri için 2, P-CS-NFC ve P-SS-NFC numuneleri için ise 17 ve 20 nolu çevrimlerin çekme yüklemelerinde yerel burkulmanın yoğunlaştığı köşelerde gözle görülür çatlaklar gözlemlenmiştir (Şekil 3.10). Bu çatlaklar çekme genliğinin arttığı sonraki çevrimlerde genişleyerek enkesit boyunca ilerlemeye başlamış. B-CS-NFC, B-SS-NFC ve P-CS-NFC numuneleri için 20, P-SS-NFC numunesi için ise 22 nolu çevrimde en kesitte kopma meydana gelerek numuneler taşıma gücünü tamamen kaybetmiştir (Şekil 3.11).



Şekil 3.7. NFC serisi deney numunelerine ait eksenel yük - yerdeğiştirme eğrileri

Tablo 3.2. NFC serisi deney numunelerinin sonuçları

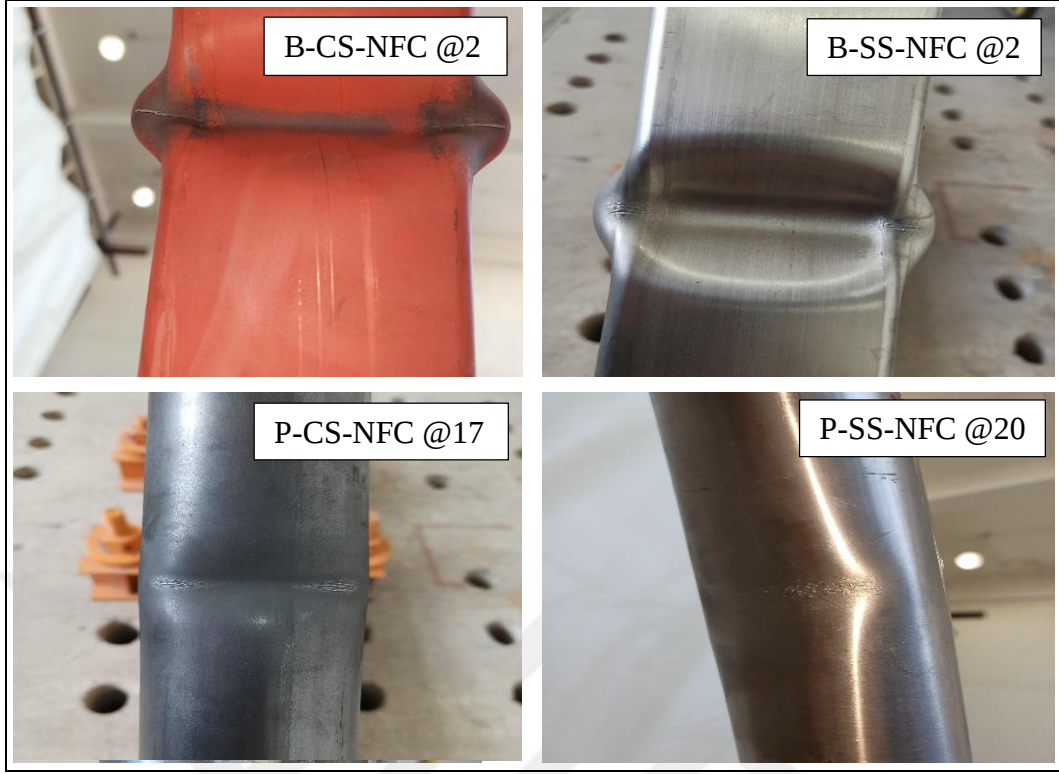
Deney Elemanı	$P_{t,max}$ kN	$P_{c,max}$ kN	Δ_{GB} , mm (θ_{GB} , %)	Δ_{LB} , mm (θ_{LB} , %)	Δ_{FI} , mm (θ_{FI} , %)	Δ_{SL} , mm	μ_c	μ_t
B-CS-NFC	-368.73 @1	248.17 @1	55.80 @1 (4.00)	55.80 @1 (4.00)	7.00 @2 (0.50)	@19	16.74	6.34
B-SS-NFC	-490.56 @1	323.05 @1	55.80 @1 (4.00)	55.80 @1 (4.00)	7.00 @2 (0.50)	@19	16.77	6.38
P-CS-NFC	-258.99 @1	185.66 @1	55.80 @1 (4.00)	55.80 @1 (4.00)	-13.95 @17 (1.00)	@19	16.62	6.39
P-SS-NFC	-315.51 @1	134.24 @1	55.80 @1 (4.00)	55.80 @1 (4.00)	-27.90 @20 (-2.00)	@21	16.77	6.64



Şekil 3.8. NFC serisi deney numunelerinde genel burkulma



Şekil 3.9. NFC serisi deney numunelerinde yerel burkulma



Şekil 3.10. NFC serisi deney numunelerinde çatlak başlangıçları.



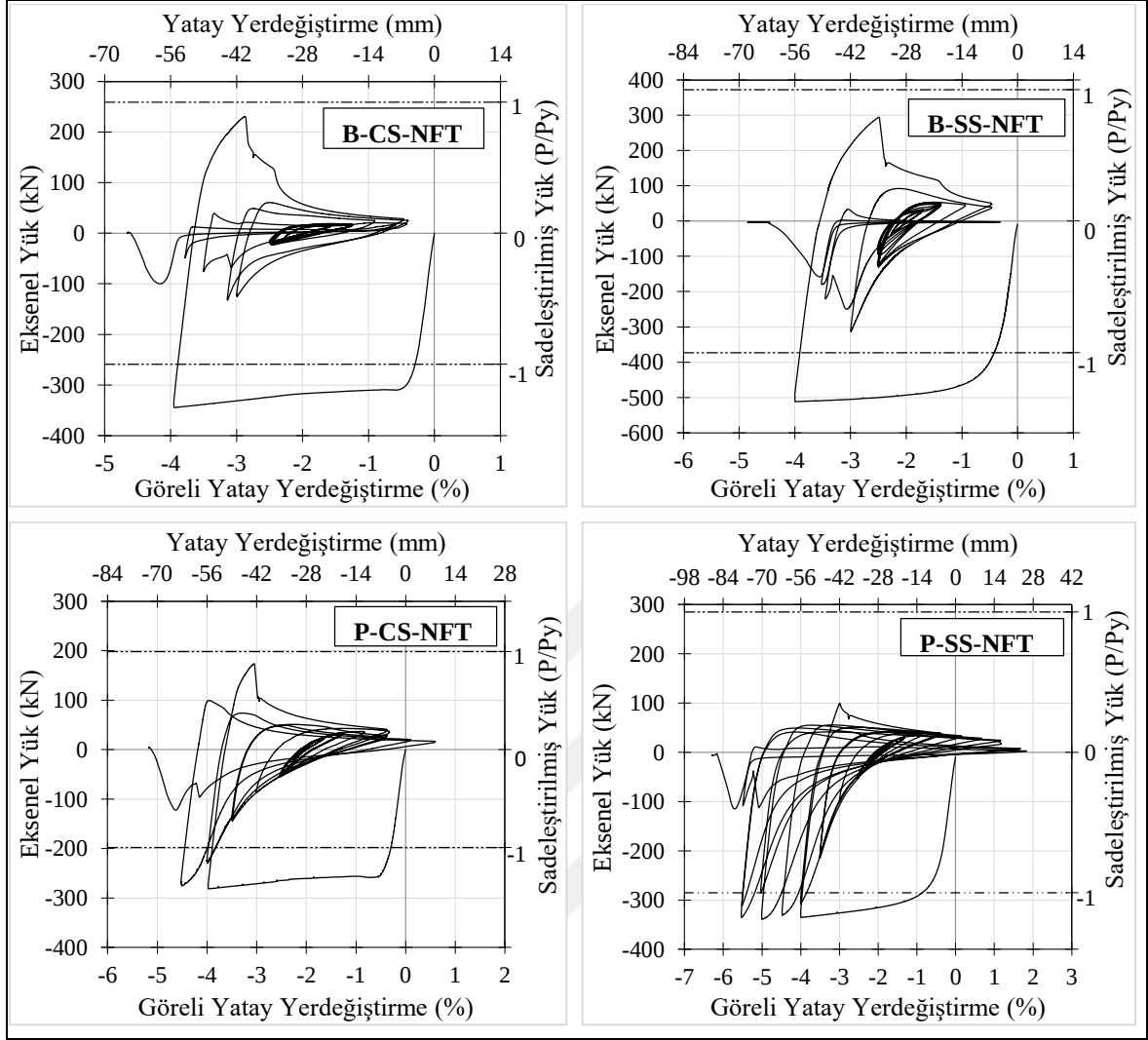
Şekil 3.11. NFC serisi deney numunelerinde kopmadan hemen önceki hasar durumu

3.1.3. NFT Serisi Numunelerin Deney Sonuçları

NFT yüklemesi altında test edilen B-CS-NFT, B-SS-NFT, P-CS-NFT ve P-SS-NFT numunelerine ait eksenel yük - yerdeğiştirme eğrileri Şekil 3.12’de ve sonuçlar Tablo 3.3’de verilmiştir.

NFT serisi deneylere %4 oranında görelî yatay yer değiştirmeye sahip çekme yüklemesi ile başlanmıştır. Yükleme protokolünde görüldüğü gibi (Şekil 2.14) itme çevrimlerinde de numune çekme bölgesinde kalacak şekilde yüklenmiştir. Birinci çevrimde bütün deney elemanları çekmede akma dayanımına ulaşmıştır. Aynı çevrimin basınç yüklemesinde B-CS-NFT, B-SS-NFT, P-CS-NFT ve P-SS-NFT numunelerinde sırasıyla 231.1, 294.45, 173.78 ve 99.75 kN yük seviyesinde genel burkulma meydana gelmiştir (Şekil 3.13). Genel burkulma B-CS-NFT, B-SS-NFT, P-CS-NFT numunelerinde aniden olurken P-SS-NFT numunesinde çok daha yavaş gerçekleşmiştir. Yerel burkulma B-CS-NFT ve B-SS-NFT numunelerinde genel burkulmanın hemen ardından, P-CS-NFT numunesinde ise ikinci çevrimin basınç yüklemesinde meydana gelmiştir (Şekil 3.14). P-SS-NFT numunesinde yerel burkulma oldukça gecikmiş ve deneyin sonlarına doğru, yirminci çevrimlerde, meydana gelmiştir (Şekil 3.14). B-CS-NFT, B-SS-NFT, P-CS-NFT ve P-SS-NFT numunelerinde sırasıyla 2, 3, 17 ve 22 nolu çevrimlerin çekme yüklemelerinde lokal burkulmanın yoğunlaştığı köşelerde gözle görülür çatlaklar gözlemlenmiştir (Şekil 3.15). Bu çatlaklar çekme genliğinin arttığı ileriki çevrimlerde genişleyerek enkesit boyunca ilerlemeye başlamış. B-CS-NFT ve B-SS-NFT numuneleri için 15, P-CS-NFT ve P-SS-NFT numuneleri için ise sırasıyla 19 ve 24 çevrimlerde en kesitte kopma meydana gelerek numuneler taşıma gücünü tamamen kaybetmiştir (Şekil 3.16).

Deneyisel çalışmalarda bütün deney elemanları benzer karakteristik davranışlar göstermişlerdir. Genel burkulma, yerel burkulma, çatlak başlangıcı ve kopma benzer şekilde meydana gelmiş; yalnızca yükleme protokolüne göre gerçekleştikleri çevrimler ve yük taşıma ve yerdeğiştirme kapasitelerinde farklılıklar ortaya çıkmıştır.



şekil 3.12. NFT serisi deney numunelerine ait aksel yük - yerdeğiştirme eğrileri

Tablo 3.3. NFT serisi deney numunelerinin sonuçları

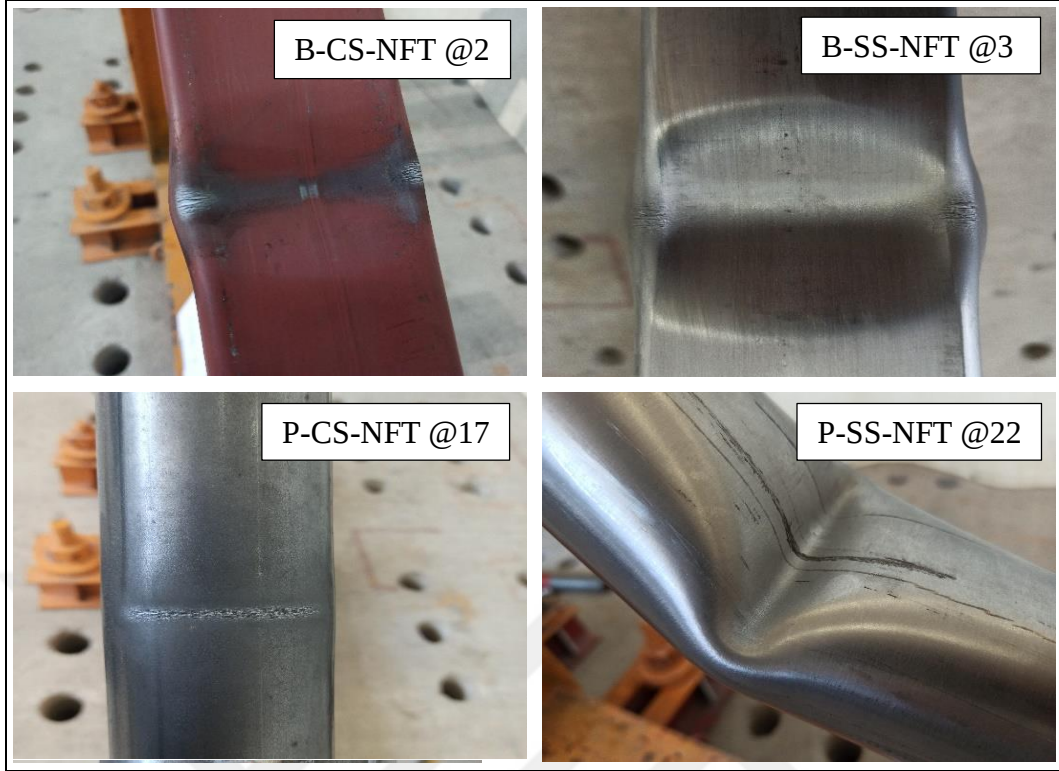
Deney Elemanı	$P_{t,max}$ kN	$P_{c,max}$ kN	Δ_{GB} , mm (θ_{GB} , %)	Δ_{LB} , mm (θ_{LB} , %)	Δ_{FI} , mm (θ_{FI} , %)	Δ_{SL} , mm	μ_c	μ_t
B-CS-NFT	-344.50 @1	231.14 @1	7.00 @1 (0.50)	7.00 @1 (0.50)	41.85 @2 (-3.00)	@14	-	12.64
B-SS-NFT	-511.35 @1	294.45 @1	7.00 @1 (0.50)	7.00 @1 (0.50)	34.80 @3 (-2.50)	@14	-	12.64
P-CS-NFT	-281.41 @1	173.78 @1	7.00 @1 (0.50)	7.00 @2 (0.50)	55.80 @17 (-4.00)	@18	0.60	14.43
P-SS-NFT	-339.13 @19	99.75 @1	7.00 @1 (-0.50)	15.00 @20 (1.08)	76.75 @22 (-5.50)	@24	5.87	17.64



Şekil 3.13. NFT serisi deney numunelerinde genel burkulma



Şekil 3.14. NFT serisi deney numunelerinde yerel burkulma



Şekil 3.15. NFT serisi deney numunelerinde çatlak başlangıçları



Şekil 3.16. NFT serisi deney numunelerinde kopmadan hemen önceki hasar durumu

3.2. İrdellemeler

3.2.1. Burkulma Yüğü

Tablo 3.1, 3.2, ve 3.3 incelendiğinde genel burkulmanın, malzeme ve enkesit geometrisine bağı olmaksızın, yaklaşık aynı ötelenme oranlarında meydana geldiği görölmektedir. Ancak burkulma dayanımlarında yükleme protokolü, enkesit geometrisi ve malzeme özelliklerine bağı olarak önemli farklar meydana gelmiştir. Burkulma yükünde meydana gelen bu farklar Şekil 3.17.'de yükleme protokolüne, Şekil 3.18.'de enkesit geometrisine ve Şekil 3.19.'da malzeme özelliklerine bağı olarak ayrı ayrı gösterilmiştir. Farklı özelliklere sahip deney elemanları arasında karşılaştırma yapabilmek için düşey ekseninde burkulma yükleri sadeleştirilerek verilmiştir. Bunun için deneylerden elde edilen burkulma yükü ($P_{c,max}$) akma yüküne ($P_y=Af_y$) bölünerek sadeleştirilmiştir.

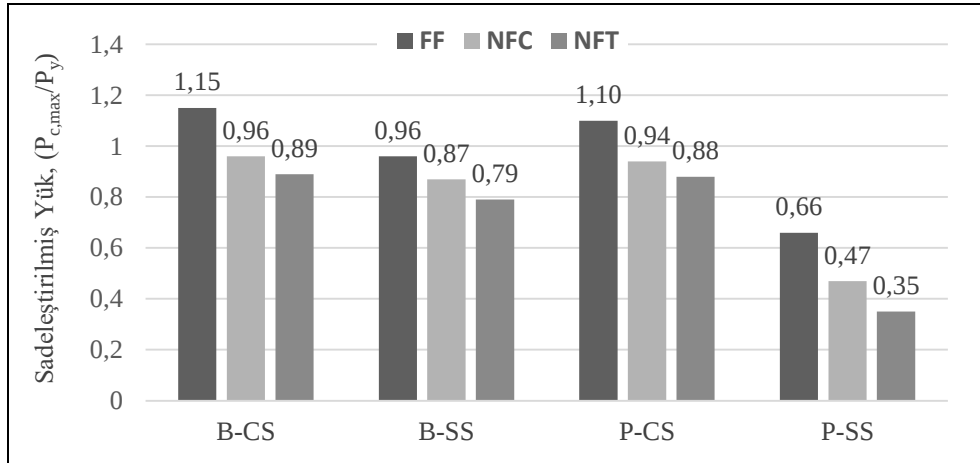
Aynı enkesit geometrisi ve malzeme özelliklere sahip olup farklı yükleme protokollerine maruz bırakılan deney numunelerinin burkulma dayanımlarında önemli farklılıklar meydana gelmiştir (Şekil 3.17). FF yüklemesi altında B-CS ve P-CS numuneleri akma dayanımlarını aşarak burkulmuş ve sadeleştirilmiş yük oranı sırasıyla 1.15 ve 1.10 olarak elde edilmiştir. Bu oran NFC yüklemesinde B-CS ve P-CS numunelerinde sırasıyla 0.96 ve 0.94 olarak elde edilirken numuneler akma dayanımına yaklaşık bir yük seviyesinde burkulmuşlardır. NFT yüklemesinde B-CS ve P-CS numunelerinde ise burkulma yükleri daha da azalarak 0.89 ve 0.88 oranında meydana gelmiştir. Farklı yükleme protokollerine göre B-CS ve P-CS numunelerinin burkulma dayanımlarındaki maksimum azalma sırasıyla %22 ve %20 olarak hesaplanmış olup azalma eğilimi oldukça benzerdir.

B-SS ve P-SS numuneleri her üç yükleme protokolünde de akma dayanımına ulaşmadan burkulmuştur. Farklı yükleme protokollerine göre B-SS numunelerinin burkulma dayanımlarındaki maksimum azalma %18 olarak hesaplanmış olup azalma eğilimi B-CS ve P-CS numunelerine benzerdir. P-SS numunesinde ise, farklı yükleme protokollerine göre burkulma dayanımlarındaki maksimum azalma %47 olarak hesaplanmıştır. Diğer numunelerle kıyaslandığında yükleme protokolünün P-SS serisi numunelerin burkulma dayanımına etkisinin daha büyük olduğu anlaşılmaktadır.

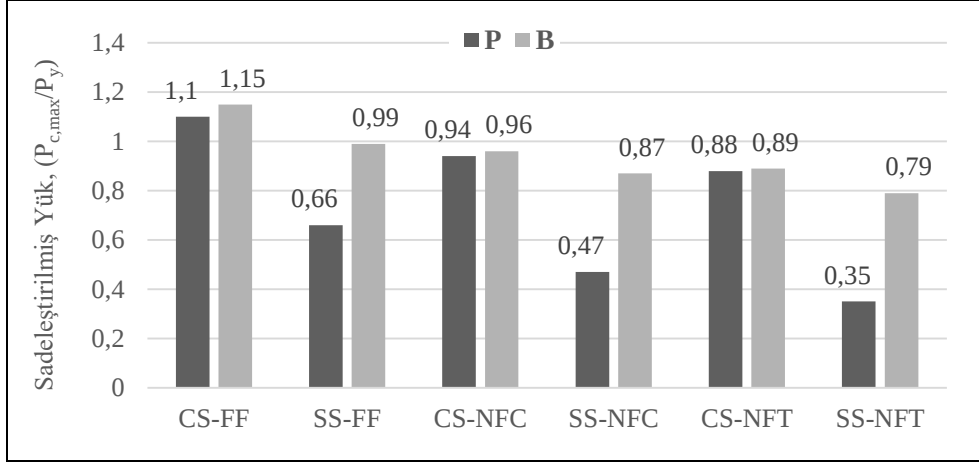
Şekil 3.18'de aynı malzeme özelliğine sahip olup aynı yükleme protokolüne maruz bırakılan numunelerin burkulma dayanımlarındaki değişim enkesit geometrisine bağı olarak gösterilmiştir. Burada görüldüğü gibi P ve B serisi numunelerde sadeleştirilmiş yük oranı

CS-FF, CS-NFC ve CS-NFT’de yaklaşık eşittir. SS-FF, SS-NFC ve SS-NFT’de ise P serisi numunelerin burkulma dayanımı oranı B serisi numunelere göre oldukça küçüktür. Bu fark SS-FF, S-NFC ve CS-NFT’ için sırasıyla %33, %46 ve %55 olarak hesaplanmıştır. Buradan enkesit geometrisinin burkulma dayanımı üzerinde tek başına önemli bir fark yaratmadığı ancak, malzeme özelliğine bağlı olarak B serisi numunelerin daha yüksek burkulma dayanımlarına ulaşabileceği görülmektedir.

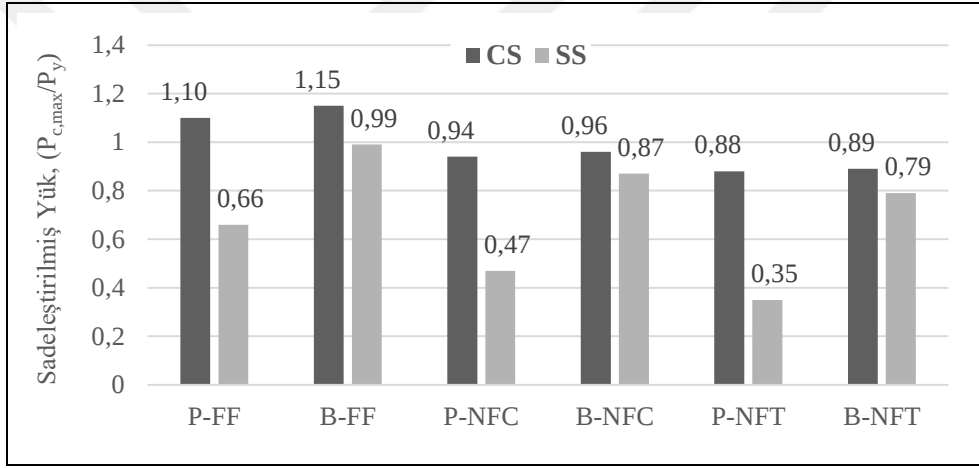
Şekil 3.19’da aynı enkesit geometrisine sahip olup aynı yükleme protokolüne maruz bırakılan numunelerin burkulma dayanımlarındaki değişim malzeme özelliğine bağlı olarak gösterilmiştir. Buradan CS özelliğine sahip numunelerin SS özelliğine sahip numunelerine göre her koşulda daha büyük burkulma dayanımına ulaştıkları görülmektedir. SS malzemesine sahip B-FF, B-NFC ve B-NFT numunelerinin burkulma dayanımları CS malzemesine sahip numunelere göre sırasıyla % 14, %9 ve %11 daha küçüktür. Bu oran P-FF, P-NFC ve P-NFT numuneleri için ise sırasıyla %40, %50 ve %60 olarak hesaplanmıştır. Buradan malzeme özelliğinin P serisi numunelerin burkulma dayanımlarını önemli oranda etkilediği, B serisi numunelerin burkulma dayanımlarını ise sınırlı oranda etkilediği görülmektedir.



Şekil 3.17. Burkulma dayanımının yük protokolüne göre değişimi

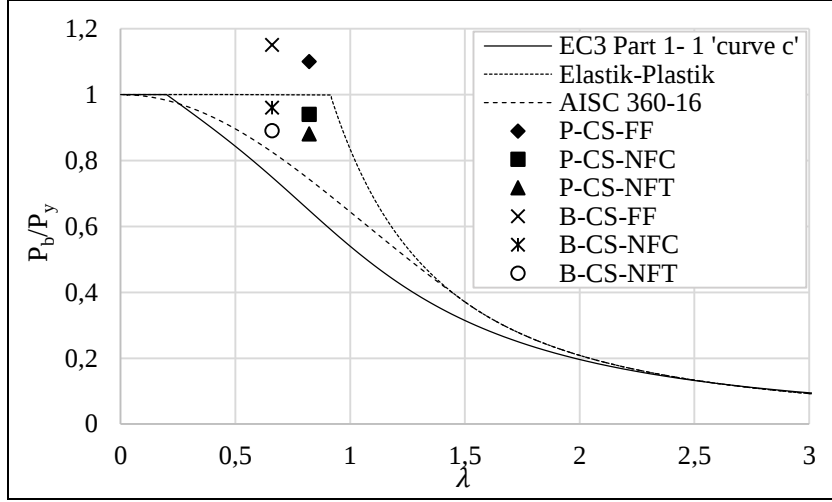


Şekil 3.18. Burkulma dayanımının enkesit geometrisine göre değişimi



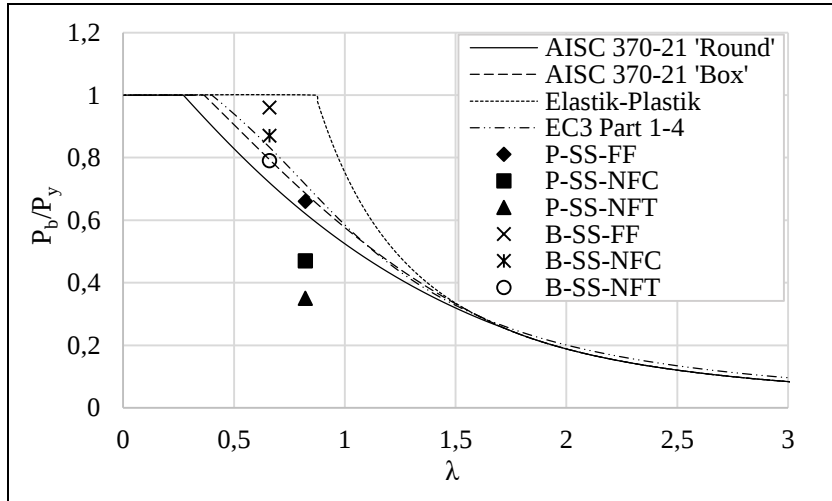
Şekil 3.19. Burkulma dayanımının malzeme özelliklerine göre değişimi

Şekil 3.20.' CS özelliğine sahip numunelerin sadeleştirilmiş burkulma dayanımları sadeleştirilmiş narinlik oranlarına göre işaretlenerek AISC 360-16 (2016) ve EN 1993-1-1 (2014)'e verilen arttırılmamış tasarım dayanımları ile karşılaştırılmıştır. Buradan her iki yönetmeliğinde yakın fay yüklemelerinin burkulma dayanımında neden olacağı azalmayı da dikkate alan güvenli eğriler verdiği görülmektedir.



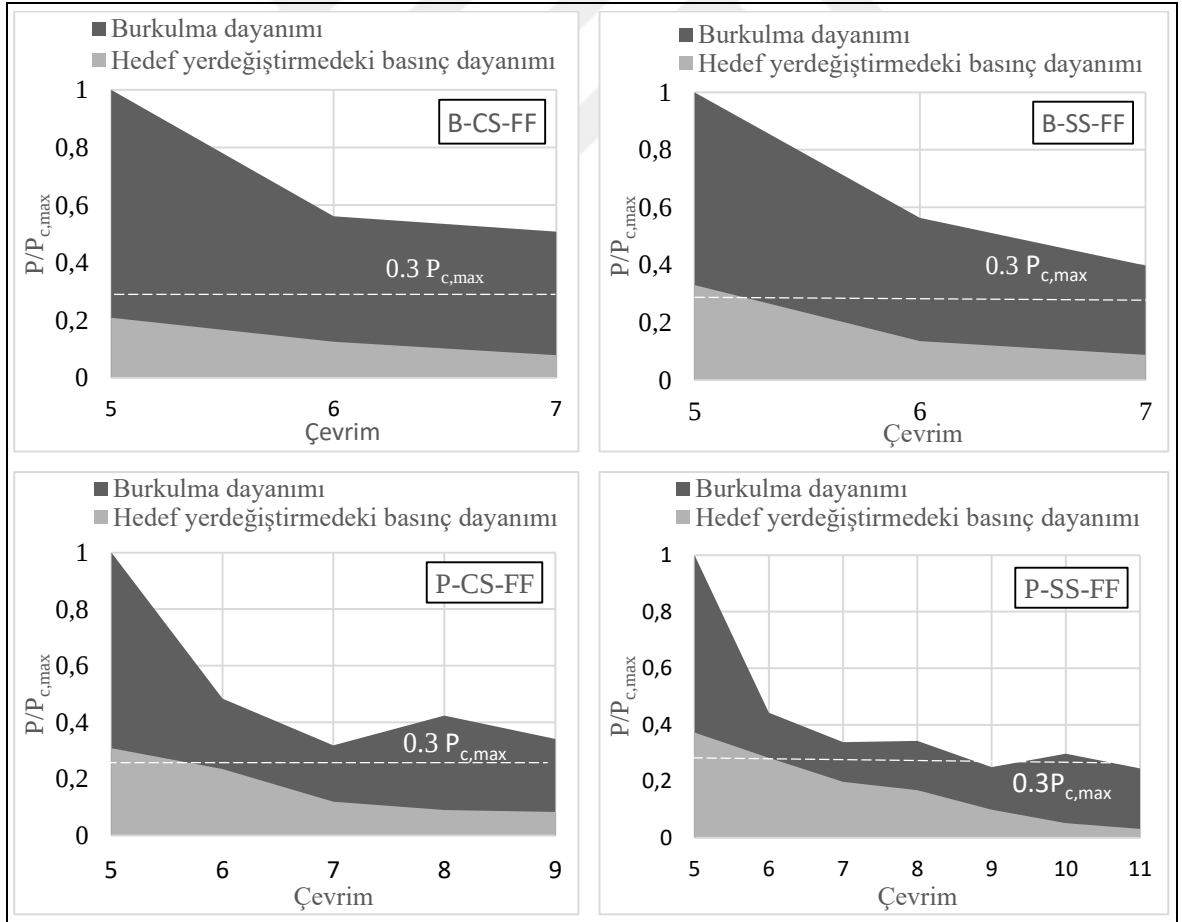
Şekil 3.20. CS malzemesine sahip numunelerin burkulma dayanımının yönetmeliklerle karşılaştırılması

Şekil 3.21.' de ise SS özelliğine sahip numunelerin sadeleştirilmiş burkulma yükleri sadeleştirilmiş narinlik oranlarına göre işaretlenerek AISC 370-21 (2021) ve EN 1993-1-4 (2015)'e verilen arttırılmamış tasarım dayanımları ile karşılaştırılmıştır. Görüldüğü gibi B serisi numuneler için AISC 370-21 (2021) güvenli sonuçlar vermiştir. P serisi numunelerde ise yakın fay yüklemeleri nedeniyle azalan burkulma dayanımları yönetmelikte verilen tasarım dayanımının altında kalmıştır. EN 1993-1-4(2015) ile kıyaslandığında ise hem B hem de P serisi numunelerde yakın fay yüklemeleri nedeniyle azalan burkulma dayanımları tasarım dayanımının altında kalmıştır.



Şekil 3.21. SS malzemesine sahip numunelerin burkulma dayanımının yönetmeliklerle karşılaştırılması

Çaprazlı çerçevelerde çaprazların burkulma sonrası basınç dayanımının tahmini elastik ötesi aşamada kat kesme kuvvetlerini ve dolayısıyla da kolon ve kirişlere gelecek kuvvetlerin belirlenmesi için gereklidir. Deprem yönetmeliklerine göre çaprazların burkulma sonrası basınç dayanımlarının burkulma dayanımının minimum %30' u olması gerekmektedir (AISC 341-16, 2016 ve EN 1998-1, 2013). Şekil 3.22.' da FF serisi deney elemanlarının burkulma ve sonrası basınç dayanımları her bir çevrim için gösterilmiştir. Burada burkulma dayanımı her bir çevrimdeki maksimum basınç yükü, hedef yerdeğiştirmedeki basınç dayanımı ise ilgili çevrimdeki maksimum yerdeğiştirme anına denk gelen basınç yüküdür. Görüldüğü gibi bütün FF serisi deney elemanlarının burkulma sonrası basınç dayanımı burkulma dayanımının %30'undan büyüktür. Her bir çevrimde burkulmadan sonra artan yerdeğiştirmelerle orantılı olarak basınç dayanımı giderek azalmaktadır. Maksimum burkulma yüküne oranlandığında bu azalış P serisi numunelerde B serisi numunelere göre daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 3.22. FF serisi deney elemanlarının burkulma ve sonrası basınç dayanımları

3.2.2. Yerel Burkulma

Genel burkulma ile kıyaslandığında yerel burkulmanın meydana geldiği çevrimler arasında önemli farklar bulunmaktadır (Tablo 3.1, 3.2, ve 3.3). Buna enkesit geometrisi ve malzeme özellikleri etkili olmuştur. Enkesit geometrisi açısından değerlendirildiğinde, yerel burkulma B serisi numunelerde genel burkulmadan hemen sonra ve aynı çevrim içinde meydana gelirken P serisi numunelerde daha geç ve çoğunlukla sonraki çevrimlerde meydana gelmektedir.

Malzeme özelliği açısından değerlendirildiğinde B serisi numunelerde yerel burkulma hem CS hem de SS numuneleri için yaklaşık aynı anda meydana gelmiştir. P serisi numunelerde ise önemli farklar gözlemlenmiştir. Yerel burkulma, P-CS'ye kıyasla, P-SS numunelerinde oldukça gecikmiş ve deneyin sonlarına doğru (kopmaya yakın) meydana gelmiştir. Malzeme özellikleri, B serisi numunelerle kıyaslandığında, P serisi numunelerde yerel burkulmanın geciktirilmesinde oldukça etkili olmuştur. Buradan yerel burkulma üzerinde enkesit geometrisinin direk etkisi olduğu, malzeme özelliğinin ise enkesit geometrisine bağlı olarak etkili olabileceği anlaşılmaktadır.

3.2.3. Enerji Tüketim Kapasiteleri

Deney numuneleri üzerlerine etkiyen yüklerin oluşturduğu enerjinin bir kısmını şekildeştirmeler yaparak tüketmektedirler. Tüketilen bu enerji, özellikle deprem gibi dinamik yükleme durumları için, numunelerin çevrimsel performanslarının belirlenmesinde kullanılan oldukça önemli bir göstergedir. Deney numunelerine uygulanan çevrimsel yüklemeler neticesinde tükettikleri enerji her bir çevrim için yük-yerdeğiştirme eğrisinin kapsadığı alan olarak hesaplanmış daha sonra her çevrim için tüketilen enerji değerleri artımsal olarak toplanarak toplam tüketilen enerji değerlerine ulaşılmıştır.

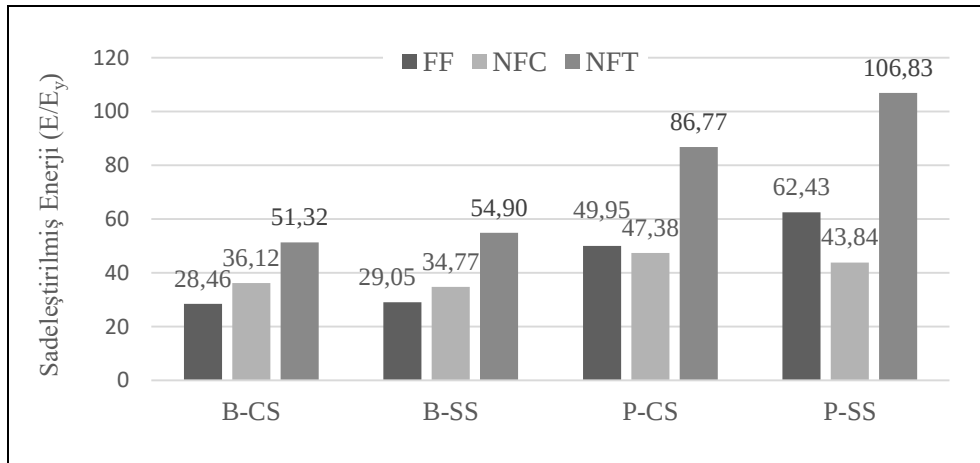
Deney numunelerinin enerji tüketim kapasitelerinde yükleme protokolü, enkesit geometrisi ve malzeme özelliklerine bağlı olarak önemli farklar meydana gelmiştir. Enerji tüketim kapasitelerinde meydana gelen bu farklar Şekil 3.23'da yükleme protokolüne, Şekil 3.24'de enkesit geometrisine ve Şekil 3.25'da malzeme özelliklerine bağlı olarak ayrı ayrı gösterilmiştir. Farklı özelliklere sahip deney elemanları arasında karşılaştırma yapabilmek için düşey ekseninde enerji tüketim kapasiteleri sadeleştirilerek verilmiştir. Bunun için deneylerden elde edilen toplam enerji tüketimi (E) elastik enerji tüketim kapasitesine

($E_y = 0.5f_y \Delta_y$) bölünerek sadeleştirilmiştir. Burada Δ_y akma yerdeğiştirmesi olup numunenin net boyu, l_n , ile akma birim şekildeğiştirmesinin, ε_y , çarpımına eşittir.

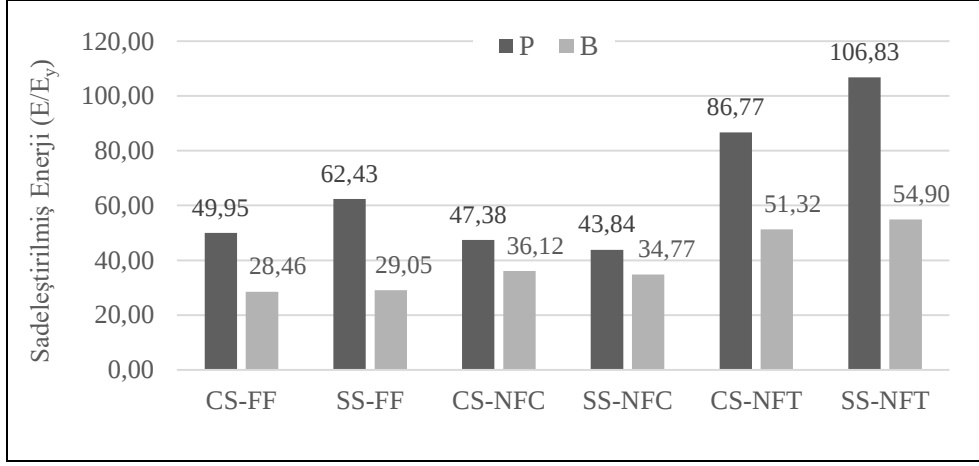
Aynı enkesit geometrisi ve malzeme özelliklere sahip olup farklı yükleme protokollerine maruz bırakılan deney numunelerinin enerji tüketim kapasitelerinde önemli farklılıklar meydana gelmiştir (Şekil 3.23). Bütün deney numuneleri en fazla enerjiyi NFT yüklemesinde tüketmiştir. En az enerji ise P serisi numunelerde NFC, B serisi numunelerde FF yüklemelerinde tüketilmiştir. P-CS ve P-SS numunelerinin FF yüklemesinde tükettikleri enerji NFC'ye göre %5 ve %42 daha büyük olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.24'de aynı malzeme özelliğine sahip olup aynı yükleme protokolüne maruz bırakılan numunelerin enerji tüketim kapasitelerindeki değişim enkesit geometrisine bağlı olarak gösterilmiştir. Buradan P serisi numunelerin B serisi numunelere göre her koşulda daha fazla enerji tüketim kapasitesine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuç P serisi numunelerde lokal burkulmanın ve çatlak başlangıcının B serisi numunelere göre çok daha geç meydana gelmesine bağlıdır.

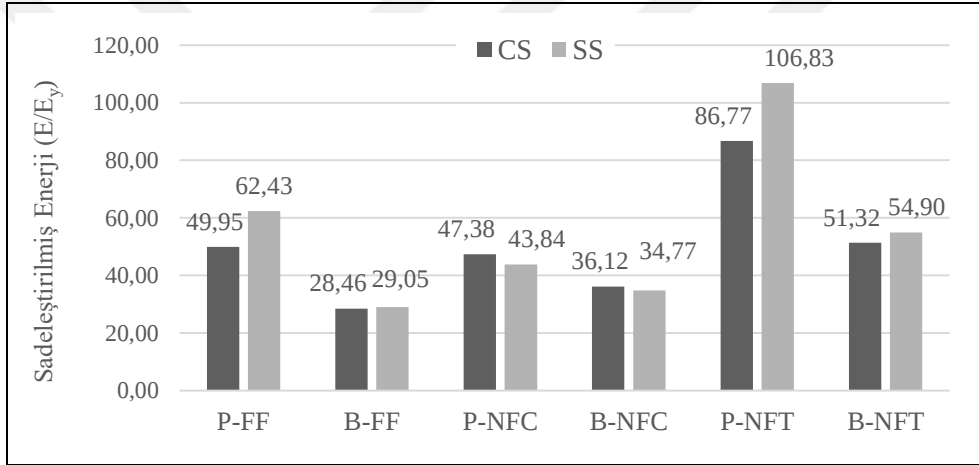
Şekil 3.25'de aynı enkesit geometrisine sahip olup aynı yükleme protokolüne maruz bırakılan numunelerin enerji tüketim kapasitelerindeki değişim malzeme özelliğine bağlı olarak gösterilmiştir. Paslanmaz çeliğin gerilme-şekildeğiştirme özelliği karbon çeliği göre oldukça üstün olmasına rağmen (Tablo 2.1) bu durum B serisi numunelerin enerji tüketim kapasitelerinde kayda değer bir fark yaratmamıştır. P serisi numunelerde ise bu durum yükleme protokolüne göre değişiklik göstermiştir. SS özelliğine sahip P-FF ve P-NFT numunelerinde enerji tüketim kapasiteleri CS'ye göre sırasıyla %25 ve %23 daha büyüktür. SS özelliğine sahip P-NFC numuneleri ise CS'ye göre %7 daha az enerji tüketmiştir.



Şekil 3.23. Enerji tüketiminin yük protokolüne göre değişimi



Şekil 3.24. Enerji tüketiminin enkesit geometrisine göre değişimi

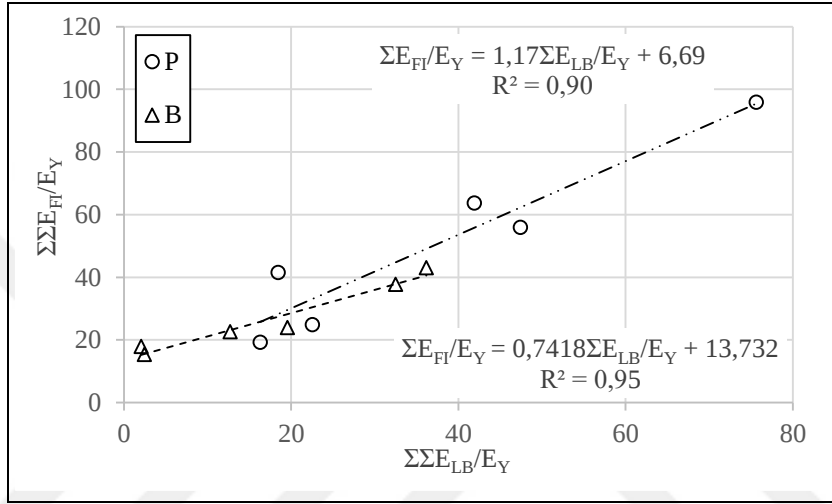


Şekil 3.25. Enerji tüketiminin malzeme özelliklerine göre değişimi

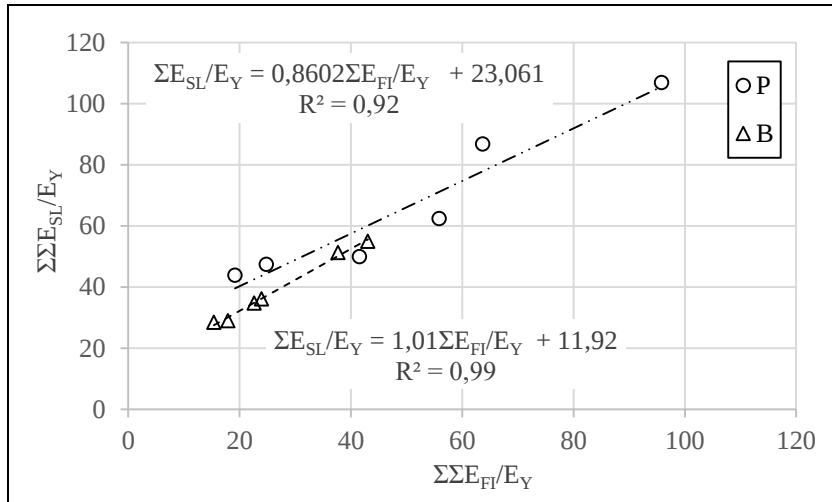
Çevrimsel yük etkisindeki çaprazlarda genel burkulmadan sonra meydana gelen hasarlar yerel burkulma, çatlak başlangıcı ve kopma sıralamasıyla gerçekleşmektedir. Bu hasarlar malzeme özelliği, enkesit geometrisi ve yükleme protokolüne göre farklı çevrimlerde meydana gelmiştir (Tablo 3.1, 3.2 ve 3.3). Bu nedenle, Şekil 3.26 ve 3.27’de bu hasar durumları arasındaki ilişkiler doğrusal regresyon analizi yapılarak ilgili hasarlar meydana gelene kadar tüketilen sadeleştirilmiş enerjiler cinsinden verilmiştir.

Şekil 3.26’de bağımlı değişken çatlak başlangıcı, bağımsız değişken ise yerel burkulmadır. P serisi ve B serisi için ayrı ayrı yapılan analizlerde regresyon katsayıları, R^2 , sırasıyla 0.90 ve 0.95’ dir. Görüldüğü gibi yerel burkulmaya göre çatlaklar P serisi numunelerde B serisi numunelere göre daha geç başlamakta olup bu eğilim bütün yükleme protokolleri ve malzemeler için geçerlidir.

Şekil 3.27’de bağımlı değişken kopma, bağımsız değişken ise çatlak başlangıcıdır. P serisi ve B serisi için ayrı ayrı yapılan analizlerde regresyon katsayıları, R^2 , sırasıyla 0.92 ve 0.99’ dur. Görüldüğü gibi B serisi numunelerde, bütün yükleme protokolleri ve malzemeler için, çatlak başlangıcı ile kopma arasında nispeten 11.92’lik sabit bir aralık bulunmaktadır. P serisi numunelerde kopma B serisi numunelere kıyasla çatlak başlangıcına daha yakın gerçekleşmektedir.



Şekil 3.26. Çatlak başlangıcı-yerel burkulma ilişkisinin enerji tüketimine göre değişimi



Şekil 3.27. Kopma-çatlak başlangıcı ilişkisinin enerji tüketimine göre değişimi

3.2.4. Yerdeğiştirme Sünekliği

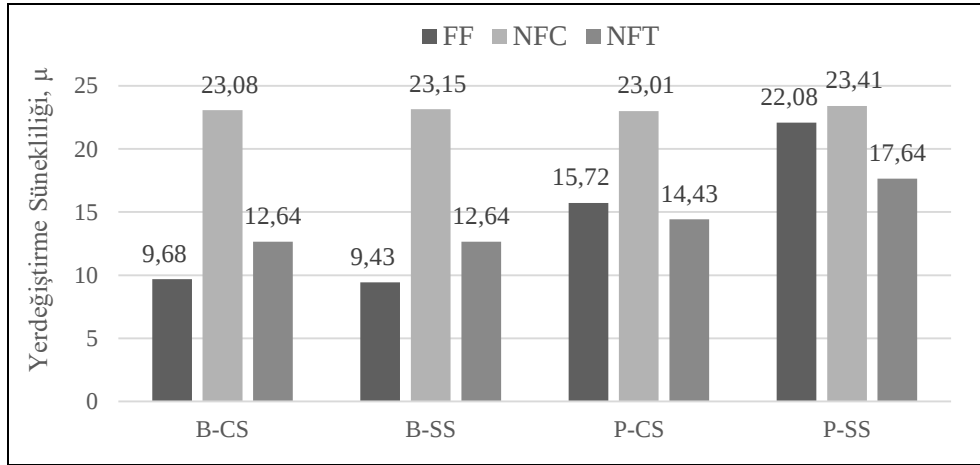
Yapısal elemanların süneklik düzeyleri tasarım aşamasında göz önünde bulundurulması gereken bir konudur. Bu çalışmada deney numunelerinin yerdeğiştirme süneklikleri, μ , itme ve çekmede başarı ile tamamlanmış en büyük yerdeğiştirmenin, Δ_u , akma yerdeğiştirmesine, Δ_y , bölünmesi ile hesaplanmıştır (Tablo 3.1, 3.2 ve 3.3).

Deney numunelerinin yerdeğiştirme sünekliklerinde yükleme protokolü, enkesit geometrisi ve malzeme özelliklerine bağlı olarak önemli farklar meydana gelmiştir. Yerdeğiştirme sünekliklerinde meydana gelen bu farklar Şekil 3.28’de yükleme protokolüne, Şekil 3.29’da enkesit geometrisine ve Şekil 3.30’da malzeme özelliklerine bağlı olarak ayrı ayrı gösterilmiştir.

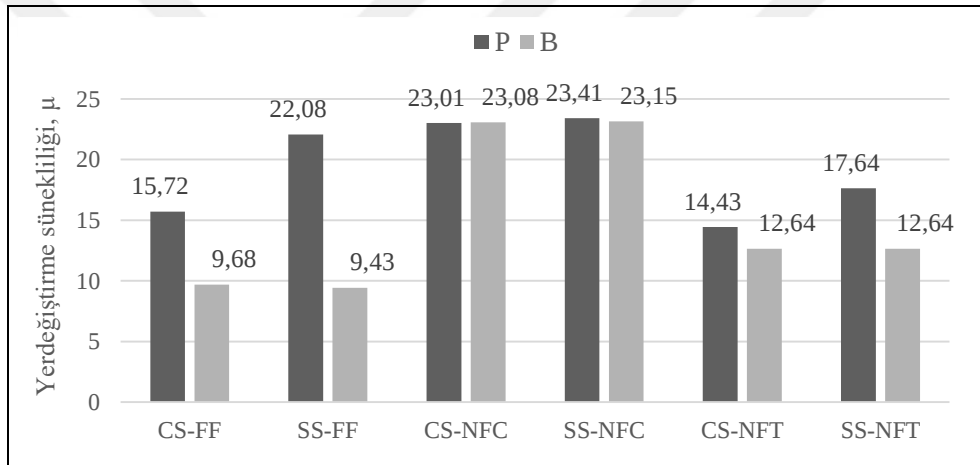
Aynı enkesit geometrisi ve malzeme özelliklere sahip olup farklı yükleme protokollerine maruz bırakılan deney numunelerinin yerdeğiştirme sünekliklerinde önemli farklılıklar meydana gelmiştir (Şekil 3.28). Bütün deney numunelerinde en büyük yerdeğiştirme sünekliğine NFC yüklemesinde ulaşılmıştır. Kopmaya en büyük etkinin çekme deformasyonlarının sebep olduğu düşünüldüğünde Tremblay (2002) ve Shaback vd (2003) bu sonuç normaldir. En az yerdeğiştirme sünekliği ise P serisi numunelerde NFT, B serisi numunelerde FF yüklemelerinde elde edilmiştir.

Şekil 3.29’da aynı malzeme özelliğine sahip olup aynı yükleme protokolüne maruz bırakılan numunelerin yerdeğiştirme sünekliklerindeki değişim enkesit geometrisine bağlı olarak gösterilmiştir. Buradan P serisi numunelerin B serisi numunelere göre, NFC dışındaki yüklemelerde daha sünek davrandığı görülmektedir. B serisi numunelerin köşelerinde yoğunlaşan şekildeğiştirmeler ve çatlaklar bu numunelerin P serisi numunelere kıyasla daha erken kopmasına neden olmuş ve bu durum çekme etkisinin NFC’ye kıyasla çok daha fazla olduğu FF ve NFT yüklemelerinde kendini göstermiştir.

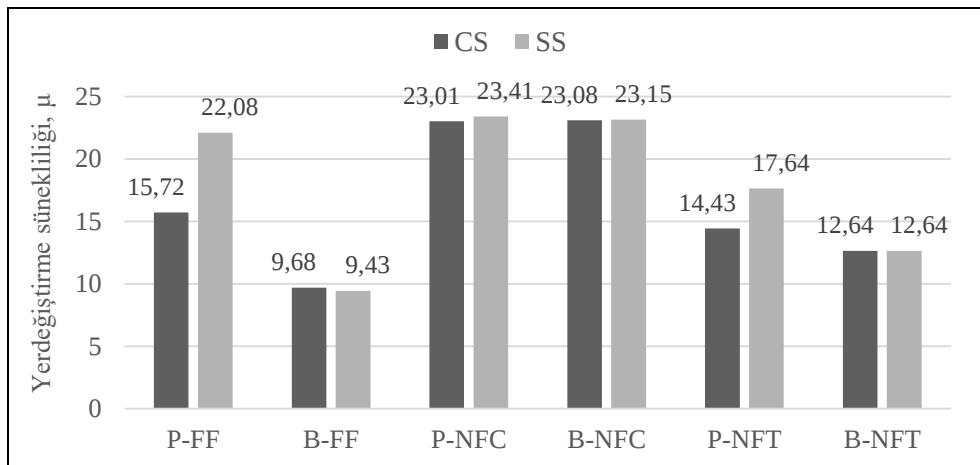
Şekil 3.30’de aynı enkesit geometrisine sahip olup aynı yükleme protokolüne maruz bırakılan numunelerin yerdeğiştirme sünekliğindeki değişim malzeme özelliğine bağlı olarak gösterilmiştir. Malzeme özelliği B serisi numunelerin yerdeğiştirme sünekliği üzerinde kayda değer bir fark yaratmamıştır. P serisi numunelerde ise bu durum yükleme protokolüne göre değişiklik göstermiştir. SS özelliğine sahip P-FF ve P-NFT numunelerinin yerdeğiştirme sünekliği CS’ye göre sırasıyla %40 ve %22 daha büyüktür. NFC yüklemesinde ise malzeme özelliği P serisi numunelerin yerdeğiştirme sünekliklerine etki etmemiştir.



Şekil 3.28. Yerdeğiştirme sünekliğinin yük protokolüne göre değişimi



Şekil 3.29. Yerdeğiştirme sünekliğinin enkesit geometrisine göre değişimi



Şekil 3.30. Yerdeğiştirme sünekliğinin malzeme özelliklerine göre değişimi

Literatürde çaprazların yerdeğiştirme sünekliğini tahmin edebilmek için narinlik oranı ile genişlik/kalınlık oranına bağlı çeşitli ampirik denklemler önerilmiştir (Tremblay, 2002; Goggins, 2006; Nip vd., 2010). Tremblay (2002) ve Goggins vd. (2006) tarafından önerilen denklemlerde yalnızca kutu enkesitli karbon çelik çaprazlar dikkate alınmıştır. Tablo 3.4’de bu denklemlerle yapılan tahminler deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Tremblay (2002) tarafından önerilen denkleme göre yapılan tahminler deneylere kıyasla hem CS hemde SS numuneler için oldukça uzak sonuçlar vermiştir. Goggins vd. (2006) tarafından önerilen denklem ile yapılan tahminler ise deney sonuçlarına oldukça yakın olup aradaki oran CS ve SS numuneler için sırasıyla 1.22 ve 1.08’dir. Değişkenlik katsayıları ise sırasıyla 0.29 ve 0.35 olarak elde edilmiştir. Nip vd. (2010) karbon çelik ve paslanmaz çelik çaprazlar için ayrı formüller önermiş olup bu formüllere göre yapılan tahminler bu çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlarla tutarlı değildir.

Tablo 3.4. Deneylerden elde edilen yerdeğiştirme sünekliğinin bazı araştırmacılar tarafından önerilen denklemlerle kıyaslanması

Kaynak	Denklem	Denklem/Deney			
		CS		SS	
		Ort.	CV	Ort.	CV
Tremblay (2002)	$\mu_{\Delta} = 2.3 + 8.3\bar{\lambda}$	4,19	0,29	3,71	0,36
Goggins vd. (2006)	$\mu_{\Delta} = -0.7 + 26.2\bar{\lambda}$	1,22	0,29	1,08	0,35
Nip vd. (2010)	$\mu_{\Delta} = 6.45 + 2.28\bar{\lambda} - 0.11\left(\frac{b}{t\epsilon}\right) - 0.06\bar{\lambda}\left(\frac{b}{t\epsilon}\right)$	0,47 ^a	0,59	-	-
	$\mu_{\Delta} = -3.42 + 19.86\bar{\lambda} + 0.21\left(\frac{b}{t\epsilon}\right) - 0.64\bar{\lambda}\left(\frac{b}{t\epsilon}\right)$	-	-	0,60 ^a	0,59

^a Deneysel yerdeğiştirme sünekliği Shaback ve Brown (2003)’ e göre hesaplanmıştır

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Paslanmaz ve karbon çelik plakalardan soğuk olarak şekillendirilerek üretilmiş boru ve kutu en kesitli çaprazların farklı çevrimsel yükler etkisindeki davranışlarının deneysel olarak incelendiği bu çalışmadan elde edilen bulgular ve deneysel aşamadaki gözlemler doğrultusunda varılan sonuçlar ile bazı öneriler aşağıda verilmektedir.

- Deney elemanlarının burkulma dayanımları yükleme protokolüne göre değişmektedir. Bütün deney elemanlarında en büyük burkulma dayanımına uzak fay yüklemeleri (FF) ile ulaşılmıştır. Burkulma dayanımı açısından en dezavantajlı sonuçlar ise çekme etkili yakın fay yüklemelerinden (NFT) elde edilmiştir.
- Karbon çelik çaprazlar için AISC 360-16 ve EN 1993-1-1 'de verilen burkulma dayanımı sınırları tüm yükleme protokollerine göre güvenli sonuçlar vermektedir.
- Paslanmaz çelik çaprazlar için AISC 370-21 ve EN 1993-1-4 'de verilen burkulma dayanımı sınırları uzak fay yüklemelerine göre güvenli sonuçlar verirken yakın fay yüklemelerinde yetersiz kalmışlardır. Bu durumun yakın fay yüklemelerinin paslanmaz çelik çaprazların burkulma dayanımlarını karbon çelik çaprazlara kıyasla daha fazla düşürmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
- FF serisi deney elemanlarının genel burkulma sonrası burkulma dayanımları yönetmeliklerde verilen sınırlar ile uyumludur.
- Malzeme özelliği ile enkesit geometrisinin burkulma dayanıma etkisi birbirinden bağımsız değildir. Malzeme özelliği boru enkesitli (P) numunelerin burkulma dayanımını önemli oranda değiştirirken kutu enkesitli (B) numunelerde kayda değer bir fark yaratmamıştır.
- Kutu enkesitli numunelerde yerel burkulma genel burkulmadan hemen sonra meydana gelmekte olup bu numuneler boru enkesitli numunelere göre yerel burkulmaya daha yatkındır. Boru enkesitli paslanmaz çelik çaprazlarda yerel burkulma boru enkesitli karbon çelik çaprazlara göre oldukça gecikmiştir. Ancak aynı durum kutu enkesitli çaprazlar için geçerli değildir. Buradan yerel burkulma üzerinde enkesit geometrisinin direk etkisi olduğu, malzeme özelliğinin ise enkesit geometrisine bağlı olarak etkili olabileceği anlaşılmaktadır.

- Deney numunelerinin enerji tüketim kapasiteleri yükleme protokolüne göre farklılık göstermektedir. Bütün numuneler en fazla enerjiyi çekme etkili yakın fay yüklemesinde (NFT) tüketmiştir. En az enerji ise boru enkesitli numunelerde basınç etkili yakın fay (NFC), kutu enkesitli numunelerde ise uzak fay (FF) yüklemesinde tüketilmiştir.
- Boru enkesitli numunelerde yerel burkulma ve çatlak başlangıcının kutu enkesitli numunelere göre çok daha geç meydana gelmesi bu numunelerin kutu enkesitli numunelere göre daha fazla enerji tüketmelerine olanak vermektedir.
- Paslanmaz çeliğin gerilme-şekildeğiştirme özelliği karbon çeliğe göre oldukça üstün olduğu halde kutu enkesitli paslanmaz çelik çaprazların enerji tüketme kapasiteleri kutu enkesitli karbon çelik çaprazlarınkine yaklaşık eşittir. Boru enkesitli çaprazlarda ise paslanmaz çelik enerji tüketimini %25'e kadar artırmaktadır.
- Bütün deney numuneleri en büyük yerdeğiştirme sünekliğine basınç etkili yakın fay yüklemesinde (NFC) ulaşmıştır. En az yerdeğiştirme sünekliği boru enkesitli numunelerde çekme etkili yakın fay yüklemesinde (NFT), kutu enkesitli numunelerde ise uzak fay (FF) yüklemesinde elde edilmiştir. Buradan çekme etkisi arttıkça yerdeğiştirme sünekliğinin de azaldığı söylenebilir.
- Literatürde çaprazların kırılma ömrünün belirlenmesi için önerilen deneye dayalı formüller kıyaslandığında Goggins vd. (2006) tarafından önerilen formül bu çalışma ile oldukça uyumlu sonuçlar vermektedir.
- Çaprazların performansını belirleyen en önemli faktörler burkulma dayanımları, enerji tüketme kapasiteleri ve yerdeğiştirme süneklikleridir. Bu faktörler için en dezavantajlı sonuçların ancak farklı yükleme protokollerinin uygulanması ile elde edilebileceği bu çalışma ile ortaya konulmuştur.
- Farklı narinlik oranlarına sahip paslanmaz çelik çaprazların da yakın fay yüklemeleri altındaki burkulma dayanımlarının araştırılarak yönetmeliklerle kıyaslanması gelecek çalışmalar için önerilmektedir.

5. KAYNAKLAR

- Aghayere, A.,O. ve Vigil, J., 2018. Çelik Yapı Tasarımı-Uygulamaya Yönelik Bir Yaklaşım, Çevirenler: Akbaş, B. ve Eğilmez, Ö.,O., 2. Basımdan çeviri, Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara.
- ANSI/AISC 370-21, 2021. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, AISC, Chicago.
- ANSI/AISC 360-16, 2016. Specification for Structural Steel Buildings Supersedes the Specification for Structural Steel Buildings, AISC, Chicago.
- ANSI/AISC 341-16, 2016. Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, AISC, Chicago.
- BS 7270, 2006. Metallic materials. Constant amplitude strain controlled axial fatigue. Method of test, BSI Group.
- Demir, S., Demir, A. D., ve Hüsem, M., 2020. Sandwich type cold formed tubular braces: design, analysis and cyclic loading test, Structures, 25, 35-46.
- EN 1993-1-1, 2014. Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Standard, Brussels.
- EN 1993-1-4, 2015. Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-4: General rules - Supplementary rules for stainless steels, European Standard, Brussels.
- EN 1998-1, 2013. Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, European Standard, Brussels.
- EN 10002-1, 2004. Metallic materials-Tensile testing Part 1: Method of test at ambient temperature, UNI.
- Elchalakani, M., Zhao, X. L., ve Grzebieta, R., 2003. Tests of cold-formed circular tubular braces under cyclic axial loading. Journal of Structural Engineering, 129, 4, 507-514.
- Fell, B. V., Kanvinde, A. M., Deierlein, G. G., ve Myers, A. T., 2009. Experimental investigation of inelastic cyclic buckling and fracture of steel braces. Journal of structural engineering, 135, 1, 19-32.
- Goggins, J. M., Broderick, B. M., Elghazouli, A. Y., ve Lucas, A. S., 2006. Behaviour of tubular steel members under cyclic axial loading. Journal of Constructional Steel Research, 62, 1-2, 121-131.
- Gupta, A., ve Krawinkler, H., 1999. "Prediction of seismic demands for SMRFs with ductile connections and elements." SAC Background Document, Rep. No. SAC/BD-99/06,

SAC Steel Project, Sacramento, Calif.

- Han, S. W., Kim, W. T., ve Foutch, D. A., 2007. Seismic behavior of HSS bracing members according to width–thickness ratio under symmetric cyclic loading, Journal of Structural Engineering, 133, 2, 264-273.
- McCormick, J., DesRoches, R., Fugazza, D., ve Auricchio, F., 2007. Seismic assessment of concentrically braced steel frames with shape memory alloy braces, Journal of Structural Engineering, 133, 6, 862–870.
- Nip, K. H., Gardner, L., ve Elghazouli, A. Y., 2010. Cyclic testing and numerical modelling of carbon steel and stainless steel tubular bracing members, Engineering structures, 32, 2, 424-441.
- Remennikov, A. M., ve Walpole, W. R., 1998. A note on compression strength reduction factor for a buckled strut in seismic-resisting braced system, Engineering Structures, 20, 8, 779-782.
- SAC., 2000. Loading histories for seismic performance testing of SMRF components and assemblies, SAC/BD-00/10, SAC Joint Venture, Sacramento, Calif.
- Shaback, B., ve Brown, T., 2003. Behaviour of square hollow structural steel braces with end connections under reversed cyclic axial loading. Canadian Journal of Civil Engineering, 30, 4, 745-753.
- Tang, X., ve Goel, S. C., 1989. Brace fractures and analysis of phase I structure, Journal of Structural Engineering, 115, 8, 1960-1976.
- Tremblay, R., 2002. Inelastic seismic response of steel bracing members, Journal of Constructional Steel Research, 58, 5-8, 665-701.
- Uriz, P., ve Mahin, S. A., 2004. Seismic performance assessment of concentrically braced steel frames, Proc., 13th World Conf. on Earthquake Engineering, Pergamon, Oxford, England.
- Zhou, F., Fang, C., ve Chen, Y., 2018. Experimental and numerical studies on stainless steel tubular members under axial cyclic loading, Engineering Structures, 171, 72-85.

ÖZGEÇMİŞ

İlkokulunu Endonezya da tamamladıktan sonra Oemar Diyan orta okulu ve lisesinde eğitimine devam etti. 2013 yılında Syiah Kuala Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünü kazandı. 2014 yılında bu üniversiteden ayrılarak YTB bursu ile Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümüne yerleşti. Lisans öğrencisiyken Rönesan Holding firmasında 3 ay boyunca staj yapma imkanı buldu. 2019 yılında Atatürk Üniversitesi'nden mezun olduktan sonra aynı yıl YTB bursuna başvurarak yüksek lisans bursu kazandı ve halen Karadeniz Teknik Üniversitesi'nde İnşaat Mühendisliği bölümü yüksek lisans öğrencisi olarak kariyerine devam etmektedir.