

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CFRP ELEMANLARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ TÜP KESİTLİ ÇELİK
ÇAPRAZLARIN HİSTERETİK DAVRANIŞI**

DOKTORA TEZİ

Cem HAYDAROĞLU

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

EYLÜL 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CFRP ELEMANLARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ TÜP KESİTLİ ÇELİK
ÇAPRAZLARIN HİSTERETİK DAVRANIŞI**

DOKTORA TEZİ

**Cem HAYDAROĞLU
(501052002)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Oğuz Cem ÇELİK

EYLÜL 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501052002 numaralı Doktora Öğrencisi Cem HAYDAROĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “CFRP ELEMANLARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ TUP KESİTLİ ÇELİK ÇAPRAZLARIN HİSTERETİK DAVRANIŞI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Oğuz Cem ÇELİK
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Feridun ÇILI
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. A. Zafer ÖZTÜRK
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Engin ORAKDÖĞEN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Z. Canan GİRGİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 6 Haziran 2017
Savunma Tarihi : 7 Eylül 2017





Kızım Bahar'a,



ÖNSÖZ

Doktora çalışmamı İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi'nde tamamlamamın bir ayrıcalık olduğunu her zaman hissettim. Bu uzun bir süreç içerisinde çalışmam birçok insanın değerli katkısı ve desteğiyle gerçekleşmiş olup kendilerine teşekkür etmek isterim.

Hayatın her alanında kendisini örnek aldığım, tez çalışmam süresince; desteğini, zamanını, bilgisini, deneyimlerini ve sabrını esirgemeyen, teşvik eden, cesaretlendiren ve tezimi hazırlamamda bana yol gösteren değerli hocam Sayın Prof.Dr. Oğuz Cem ÇELİK'e en içten teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmamın altı aylık dönemleri sonunda toplanarak yapılanları değerlendirip yapıcı ve geliştirici yönde destek ve katkı sağlayan tez izleme jürisi hocalarım Prof.Dr. Feridun ÇILI'ya ve Prof. A. Zafer ÖZTÜRK'e teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarımındaki en büyük yardımcım, çalışma arkadaşım İnş.Müh. Adem TÜRKER'e özellikle teşekkür ederim. Ayrıca deneysel çalışmalarına malzeme ve/veya işçilikle destek sağlayan BASF YKS'ye, BORUSAN MANNESMANN'a, TABOSAN'a, Sayın Hadi Kesim ve AS CİVATA'ya ve ÇİMTAŞ'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği ve Yapı Malzemesi Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Bu birimlere vermiş oldukları desteklerden dolayı şükranlarımı sunarım. Deney numunelerinin hazırlanmasında ve deneyler sırasında her zaman yanımda olan İnş.Yük.Müh. Hakan SARUHAN'a, teknisyen Mahmut ŞAMLI'ya ve Ahmet ŞAHİN'e, değerli zamanını ayırarak FRP uygulamasını bizzat uygulayarak öğreten değerli arkadaşım Dr. Engin Cüneyt SEYHAN'a, deneylerin gerçekleşmesi sırasında bilgisi ve desteğiyle yanımda olup yol gösteren Yar.Doç.Dr. Kıvanç TAŞKIN'a, deneyler sırasında ve sonrasında yardımlarıyla destek olan Yard.Doç.Dr. Çiğdem AVCI KARATAŞ ve İnş.Yük.Müh. Seçkin ÇETİNKAYA'ya, gerekli tüm ölçümleri yaparak deney düzeneğinin doğru yerleştirilmesi sağlayan Yar.Doç.Dr. Serdar BİLGİ'ye, kıymetli desteklerini hiç esirgemeyen arkadaşlarım Yar.Doç.Dr. Mehmet Selim ÖKTEN'e, Dr. Burcu BALABAN ÖKTEN'e ve Yar.Doç.Dr. Hatice Eser ÖKTEN'e, bitmek bilmeyen sorularımı zaman ayırarak sabırla cevaplayan Yar.Doç.Dr. Cüneyt VATANSEVER'e ve İnş.Yük.Müh. Tolga AYDÖNER'e şükranlarımı sunarım.

Son olarak her zaman bana inanan, yardımına koşan, destekleyen ve yanımda olup bugünlere gelmem için büyük emek veren annem Azer HAYDAROĞLU'na ve tüm aileme, kıymetli desteğini hiç esirgmeden sabırla hep yanımda olan eşim Sibel HAYDAROĞLU'na ve bu uzun süreçte çalışmamı tamamlamam için tüm imkanları ve desteği büyük bir hoşgörülle sağlayan başta ARUP Türkiye lideri İnş.Yük.Müh. Serdar KARAHASANOĞLU ve Yapı Grubu lideri İnş.Yük.Müh. Cüneyt ANADOLU olmak üzere tüm ARUP ailesine şükranlarımı sunarım.

Eylül 2017

Cem HAYDAROĞLU
(İnşaat Yüksek Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
KISALTMALAR.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ.....	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Motivasyon	1
1.2 Amaç.....	2
1.3 Kapsam ve Yöntem	3
2. ÇELİK ÇAPRAZLARIN HİSTERETİK DAVRANIŞI VE ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	7
2.1 Genel.....	7
2.2 Çelik Çaprazın Histeretik Davranışı.....	7
2.3 Çelik Çaprazların Histeretik Davranışıyla İlgili Önceki Çalışmalar.....	10
2.4 FRP Malzemeye Güçlendirilen Çelik Elemanlarla İlgili Önceki Çalışmalar ..	17
2.5 Çaprazlarla İlgili Tasarım Yönetmeliklerinin İncelenmesi	21
2.5.1 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007)...	21
2.5.2 Amerikan Çelik Yapılar Deprem Yönetmeliği (2016)	22
2.5.3 FEMA 356 (2000)	23
3. DENEY DÜZENEGİNİN TASARIMI, NUMUNELERİN ÜRETİMİ VE MALZEME DENEYLERİ	25
3.1 Deney Düzeneği	25
3.1.1 L-şekilli yükleme çerçevesi	25
3.1.2 Düzlem dışı stabilitenin sağlanması	31
3.2 Deney Numuneleri	32
3.2.1 Çekme deneyleri.....	36
3.2.2 Numunelerin tasarımı	44
3.2.2.1 Çekme etkisindeki çaprazlar.....	44
3.2.2.2 Basınç etkisindeki çaprazlar	45
3.2.3 Birleşimlerin tasarımı	48
3.2.3.1 Kaynakların tasarımı.....	48
3.2.3.2 Bulonların tasarımı.....	49
3.2.4 Numune birleşim detayları.....	52
3.2.5 Numunelerin üretimi.....	53
3.2.6 Kritik kesitler ve numunelerin güçlendirilmesi.....	54
3.2.6.1 Yüzey temizliği.....	55
3.2.6.2 Güçlendirmenin uygulanması.....	56
3.3 Ölçüm Düzeneği.....	62
3.3.1 Şekildeğiştirme ölçerler (Straingauge'ler).....	62
3.3.2 Yerdeğiştirme ölçerler (LVDT'ler)	62

4. YALIN VE CFRP ELEMANLARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ ÇAPRAZ NUMUNELERE İLİŞKİN DENEYSEL SONUÇLAR.....	65
4.1 Giriş.....	65
4.2 Yükleme Protokolleri.....	65
4.2.1 ATC-24 (1992) yükleme protokolü	65
4.2.2 Yakın fay etkisi yükleme protokolü (SAC/BD-00/10)	66
4.3 Numunelere İlişkin İtme (Pushover) Eğrilerinin Hesaplanması.....	68
4.4 Deney Gözlemleri	69
4.4.1 TB-1 numunesi (Kutu 60x60x3 - Yalın)	70
4.4.2 TB-2 numunesi (Kutu 60x60x3 + Uçlar: CFRP plaka ve kumaş + Orta: %17L CFRP sargı).....	79
4.4.3 TB-3 numunesi (Kutu 60x60x3 + Uçlar: CFRP plaka ve kumaş + Orta: %33L CFRP sargı).....	88
4.4.4 TB-4 numunesi (Kutu 50x50x4 – Yalın numune)	98
4.4.5 TB-5 numunesi (Kutu 50x50x4 + Uçlar: CFRP plaka ve kumaş + Orta: %13L CFRP sargı).....	104
4.4.6 TB-6 numunesi (Kutu 50x50x4 + Uçlar: CFRP plaka ve kumaş + Orta: %25L CFRP sargı).....	114
4.4.7 TB-8 numunesi (Kutu 60x60x4 + Uçlar: CFRP plaka ve kumaş)	124
4.4.8 TB-9 numunesi (Kutu 60x60x4 – Yalın numune)	133
4.4.9 TB-10 numunesi (Kutu 50x50x4 – Yalın Numune)	143
4.4.10 TB-11 numunesi (Kutu 50x50x4 + Uçlar: CFRP plaka).....	152
4.4.11 TB-12 numunesi (Kutu 50x50x4 + Uçlar: CFRP plaka ve kumaş)	160
4.4.12 TB13 numunesi (Kutu 70x70x3 – Yalın Numune).....	169
4.4.13 TB-14 numunesi (Kutu 70x70x3 + Uçlar: CFRP plaka ve kumaş + Orta:%17L CFRP sargı).....	178
4.4.14 TB-15 numunesi (Kutu 70x70x3+Uçlar: CFRP plaka ve kumaş + Orta:%33L CFRP sargı).....	187
4.4.15 TB-16 numunesi (Kutu 70x70x4 - Yalın)	195
4.4.16 TB-17 numunesi (Kutu 70x70x4 - Yalın)	204
4.4.17 TB-18 numunesi (Kutu 70x70x4 + Uçlar: CFRP plaka ve kumaş + Orta:%22L CFRP sargı).....	213
4.4.18 TB-19 numunesi (Boru 76.1x3 – Yalın numune)	222
4.4.19 TB-20 numunesi (Boru 76.1x3 + Uçta:CFRP plaka ve kumaş + Orta:%14L CFRP sargı).....	231
4.4.20 TB-21 numunesi (Boru 76.1x3 + Uçta:CFRP plaka ve kumaş + Orta:%28L CFRP sargı).....	241
4.4.21 Boş deney düzeneğinin denenmesi	250
5. DENEY SONUÇLARININ GRUP HALİNDE KARŞILAŞTIRILMASI	251
5.1 Giriş.....	251
5.2 Tüp çaprazların deneysel tanımlanmış toplam yatay yerdeğiştirmeleri.....	251
5.3 Tüp çaprazların deneysel burkulma boyu katsayıları	252
5.4 Tüp çaprazların normalize edilmiş burkulma kapasiteleri	252
5.5 Basınç ve çekme etkisinde ayrı ayrı tüketilen enerji oranları.....	253
5.6 Etkin rijitlik değişimi	254
5.7 Histeretik sönüm oranları	254
5.8 Deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	256
5.8.1 TB-1, TB-2 ve TB-3 (Kutu 60x60x3) numunelerinin sonuçlarının karşılaştırılması.....	256

5.8.2 TB-4, TB-5 ve TB-6 (Kutu 50x50x4) numunelerinin sonuçlarının karşılaştırılması	262
5.8.3 TB-8 ve TB-9 (Kutu 60x60x4) numunelerinin sonuçlarının karşılaştırılması	268
5.8.4 TB-10, TB-11, TB-12 (Kutu 50x50x4) numunelerinin sonuçlarının karşılaştırılması	273
5.8.5 TB-13, TB-14, TB-15 (Kutu 70x70x3) numunelerinin sonuçlarının karşılaştırılması	279
5.8.6 TB-16, TB-17, TB-18 (Kutu 70x70x4) numunelerinin sonuçlarının karşılaştırılması	285
5.8.7 TB-19, TB-20, TB-21 (Boru 76.1x3) numunelerinin sonuçlarının karşılaştırılması	292
6. DENEY SONUÇLARININ TOPLUCA DEĞERLENDİRİLMESİ.....	299
6.1 Giriş	299
6.2 Değerlendirme	299
7. TÜP ÇAPRAZLARIN HİSTERETİK DAVRANIŞLARININ MODELLENMESİ	311
7.1 Genel	311
7.2 ABAQUS Model Formu	311
7.3 Sonlu Elemanlara Bölme (Mesh işlemi)	314
7.4 Metallerde Pekleşme ve Pekleşme Üsteli Kavramı	316
7.5 Analiz Sonuçları ve Değerlendirme	321
7.5.1 TB-1 numunesi	321
7.5.2 TB-10 numunesi	324
7.5.3 Değerlendirme	326
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	327
8.1 Genel	327
8.2 Sonuçlar	329
8.3 Sonraki Çalışmalar İçin Öneriler	333
KAYNAKLAR	335
EKLER	341
ÖZGEÇMİŞ	415



KISALTMALAR

AISC	: American Institute of Steel Construction
ASTM	: American Society for Testing Materials
ATC	: Applied Technology Concil
AZB	: Alt Zayıflatılmış Bölge
BÖÇ	: Burkulması Önlenmiş Çapraz
BSI	: British Standards Institution
CFRP	: Karbon Lifli Polimer
ÇYE	: Çevrimsel Yükleme Etkisinde
DBYBHY	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
EDD	: Energy Dissipating Devices
FRP	: Lifli Polimer
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
HAZ	: Heat Affected Zone
HSFG	: High Strength Friction Grip
GFRP	: Cam Lifli Polimer
GÖÖ	: Göreli Öteleme Oranı
LRFD	: Load and Resistance Factor Design
LVDT	: Yerdeğiştirme Ölçer
NLD	: Non Linear Device
OB	: Orta Bölge
TBDY	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TTY	: Tanımlanmış Toplam Yatay Yerdeğiştirme
ÜZB	: Üst Zayıflatılmış Bölge
YFE	: Yakın Fay Etkisi



SEMBOL LİSTESİ

A	: Genel enkesit alanı
A_b	: Bulon enkesit alanı
A_e	: Etkili enkesit alanı
A_g	: Brüt enkesit alanı
A_k	: Numunenin son kesit alanı
A_0	: Numunenin ilk (başlangıç) kesit alanı
a	: Kaynak kalınlığı
B	: Tüp kesitin dıştan dışa toplam başlık boyutu
b	: Kutu profil kenarının düz bölge uzunluğu ($=H-3t$)
b/t	: Kutu profiller için yerel narinlik
$C_{r\text{ ilk}}$	: İlk burkulmanın olduğu çevrimde ulaşılan en büyük basınç kuvveti
$C_{r\text{ son}}$	: Göçmeden önceki son basınç çevriminde ulaşılan en büyük basınç kuvveti
C_r''	: Hedef yerdeğiştirmede ulaşılan basınç kuvveti
D	: Boru profil dış çapı
D_u	: Uygulanan ortalama öngermenin uygulanan minimum öngermeye oranını gösteren katsayı
D/t	: Boru profiller için yerel narinlik
d	: Kutu profil kenar boyutu
E	: En genel halde çelik elastisite modülü
E_s	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007)'ye göre çelik elastisite modülü
$E_{D,Ai}$	: Numune tarafından i sayılı çevrimde sönmölenen enerji
F	: Çekme kuvveti
F_e	: AISC (2016a)'ya göre elastik burkulma gerilmesi
F_{exx}	: AISC (2016a)'ya göre kaynak elektrotunun en büyük dayanımı
F_y	: Çelik akma gerilmesi
F_u	: Çelik ya da bulon kopma gerilmesi
H	: Tüp kesitin dıştan dışa toplam gövde boyutu
h_{sc}	: Bulon delik faktörü
K	: Etkili burkulma boyu katsayısı
K_d	: Dayanım katsayısı
K_e	: Deneysel burkulma boyu katsayısı
KL/r	: Genel narinlik
k_s	: Bulonda sürtünme kapasitesi azaltma katsayısı
L	: Çapraz temiz boyu
L_B	: Birleşim boyu
l	: Kaynak boyu
l_0	: Numunenin ilk (başlangıç) boyu
l_k	: Numunenin son (kopma sonrası) boyu
M	: Moment
M_{pr}	: Plastik moment
N_b	: Çekme kuvveti aktaran bulon sayısı

N_s	: Kayma düzlemi sayısı
n_j	: j yükleme adımında uygulanan çevrim sayısı
n_0	: Akma yerdeğiştirmesinden küçük pik deplasmanların sayısı
n	: Pekleşme üsteli
P	: Uygulanan yük
P_c	: Çapraz basınç kapasitesi
P_n	: Genel haliyle çapraz üzerindeki eksenel kuvvet
P_t	: Çapraz çekme kapasitesi
P_{takma}	: Çaprazın çekme etkisinde akma kapasitesi
P_{tkopma}	: Çaprazın çekme etkisinde kopma kapasitesi
R	: Elastik deprem yükü azaltma katsayısı
r	: Atalet yarıçapı
T_b	: Bulonlara uygulanması gereken minimum öngerme kuvveti
T_u	: Bulonlara etkiyen çekme kuvveti
t	: Kutu ya da boru profil et kalınlığı
t_w	: Kutu profil gövde kalınlığı
$V_{\Delta i}$	: i sayılı çevrimde elde edilen maksimum çekme/basınç kuvvetleri
w_d	: Teorik yerel burkulma kusuru
Δ	: Düzlem dışı yerdeğiştirme
Δ_c	: Eksenel plastik mafsal modelinde eksenel kısalma
Δ_f	: Deneysel toplam tanımlanmış yatay yerdeğiştirme
Δ_i	: i sayılı çevrimde elde edilen maksimum yerdeğiştirme
Δ_T	: Eksenel plastik mafsal modelinde eksenel uzama
Δl	: Boy değişimi
δ	: Çaprazın eksenel yerdeğiştirmesi
δ_j	: j yükleme adımıdaki maksimum yerdeğiştirme
δ_y	: Akma yerdeğiştirmesi
δ_{yd}	: Deneysel basınç akma yerdeğiştirmesi
δ_{yt}	: Tahmin edilen basınç akma yerdeğiştirmesi
ϵ	: Şekildeğiştirme (Deformasyon)
ϵ_g	: Gerçek birim şekildeğiştirme
$\epsilon_{müh}$	: Mühendislik birim şekildeğiştirmesi
Φ_c	: Basınçta dayanım azaltma katsayısı
Φ_t	: Çekmede dayanım azaltma katsayısı
ΦR_{kaynak}	: Kaynak tasarım kapasitesi
μ	: Ortalama sürtünme katsayısı
σ	: Gerilme
σ_a	: Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007)'ye göre çelik akma gerilmesi
σ_{cr}	: Kritik gerilme
σ_g	: Gerçek gerilme
σ_{max}	: Kupon deneyinden ele edilen maksimum çekme dayanımı
$\sigma_{müh}$	: Mühendislik gerilmesi
$\sigma_{0.2\%}$	: %0.2 kalıcı şekildeğiştirme yöntemiyle belirlenen akma gerilmesi
ξ_{effb}	: Etkili sönüm oranı
ψ	: Kesit daralması

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Çapraz numunelerin geometrik, varsayılan malzeme ve güçlendirme özellikleri.	34
Çizelge 3.2 : Malzeme deneyi sonuçları.	41
Çizelge 3.3 : Sonuç malzeme özellikleri.	43
Çizelge 3.4 : Basınç çaprazlarının K katsayılarının incelenmesi (Çelik ve diğ., 2004).	45
Çizelge 3.5 : Kutu kesitli numunelerin çekme ve basınç dayanımları.	46
Çizelge 3.6 : Boru kesitli numunelerin çekme ve basınç dayanımları.	47
Çizelge 3.7 : Numunelerin yüzey temizliği yöntemleri.	55
Çizelge 3.8 : CFRP plaka teknik özellikleri (BASF, 2008).	58
Çizelge 3.9 : Epoksi esaslı CFRP plaka yapıştırıcısı teknik özellikleri (BASF, 2008).	58
Çizelge 3.10 : CFRP kumaş teknik özellikleri (BASF, 2008).	60
Çizelge 3.11 : Epoksi esaslı CFRP kumaş yapıştırıcısı teknik özellikleri (BASF, 2008).	61
Çizelge 5.1 : TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerinin deneysel burkulma boyu katsayıları ve deneysel TTY'leri.	257
Çizelge 5.2 : TB-4, TB-5 ve TB-6 numunelerinin deneysel burkulma boyu katsayıları ve deneysel TTY'leri.	263
Çizelge 5.3 : TB-8 ve TB-9 numunelerinin deneysel burkulma boyu katsayıları ve deneysel TTY'leri.	269
Çizelge 5.4 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerinin deneysel burkulma boyu katsayıları ve deneysel TTY'leri.	274
Çizelge 5.5 : TB-13, TB-14 ve TB-15 numunelerinin deneysel burkulma boyu katsayıları ve deneysel TTY'leri.	280
Çizelge 5.6 : TB-16, TB-17 ve TB-18 numunelerinin deneysel burkulma boyu katsayıları ve deneysel TTY'leri.	286
Çizelge 5.7 : TB-19, TB-20 ve TB-21 numunelerinin deneysel burkulma boyu katsayıları ve deneysel TTY'leri.	293
Çizelge 6.1 : Deney sonuçları özeti.	302
Çizelge 7.1: Numunelerin gerçek malzeme özellikleri	320



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Narinliğe bağlı olarak çaprazların histeretik davranışlarının basitleştirilmiş gösterimi (Nakashima ve Wakabayashi (1992)'den uyarlanmıştır).	8
Şekil 2.2 : Tekrarlı eksenel yük etkisindeki bir çaprazın histeretik eğrisi (Bruneau ve diğ., 2011).	9
Şekil 2.3 : Çapraz histeretik davranışı: (a) Gerçek histeretik davranış örneği (bu çalışma). (b) Çaprazın histeretik eğrisinin fiziksel anlamı (Ikeda ve Mahin, 1984'ten uyarlanmıştır).	12
Şekil 2.4 : Kutu kesitli çapraz ortasında hasar oluşumu: (a) Yerel burkulma oluşumu. (b) Yırtılma/kopma başlangıcı (Çelik ve diğ., 2004).	13
Şekil 2.5 : Kutu çapraz ortasında oluşan yerel burkulma: (a) Deney. (b) Sonlu eleman modeli (Ding ve diğ., 2008).	14
Şekil 2.6 : Deney gözlemleri: (a) Güçlü guse levhası–zayıf çapraz numune. (b) Yırtılma/kopma başlangıcı (Haddad ve diğ., 2011).	15
Şekil 2.7 : 2011 Tohoku depremi sonrası çelik çaprazda yerel burkulma ve yırtılma başlangıcı (Midorikawa ve Okazaki, 2012).	16
Şekil 2.8 : CFRP elemanlarla güçlendirilmiş çelik tüp kesitlerde göçme modları (Bambach ve Elchalakani, 2007).	18
Şekil 2.9 : CFRP ile sarılmış numunelerin deney sonrası görünüşleri (Ekiz ve El-Tawil, 2008).	18
Şekil 2.10 : Eksenel kuvvet – eksenel şekil değiştirme ilişkisi ve çaprazların performans seviyeleri (FEMA, 2000).	23
Şekil 3.1 : Deney düzeneğinin genel görünüşü.	25
Şekil 3.2 : Deney düzeneğinin laboratuvarından görünüşleri: (a) Tüm düzeneğin görünüşü. (b) Yalnız L-şeklindeki düzeneğin görünüşü.	26
Şekil 3.3 : Deney düzeneğinin fabrikadaki durumu: (a) Yükleme kolonu ve temel girişi. (b) Mafsalsal bölgesi.	26
Şekil 3.4 : Tamamen boyanmış yükleme kolonu.	27
Şekil 3.5 : Boyaları temizlenmiş birleşim bölgeleri: (a) Yükleme kolonunun durumu. (b) Temel girişinin durumu.	27
Şekil 3.6 : Hidrolik veren ankraj plakası detayları.	28
Şekil 3.7 : Hidrolik veren ankraj plakasının laboratuvarındaki görünüşleri: (a) Önden görünüş. (b) Yandan görünüş.	28
Şekil 3.8 : Ankraj ve hidrolik veren montajı: (a) ve (b) Teodolit ile eksen çakıştırma. (c) Hidrolik veren montajı.	29
Şekil 3.9 : Temel girişinin güçlü döşemeye bağlanmış durumu.	29
Şekil 3.10 : Gress yağı uygulanmış mafsalsal bölgesi: (a) Yandan görünüş. (b) Önden görünüş.	30
Şekil 3.11 : Düzenek montajı: (a) Yükleme kolonu montajı. (b) Hidrolik veren montajı.	31
Şekil 3.12 : Düzlem dışı destek/payanda sistemi şematik görünüşü.	32

Şekil 3.13 : Düzlem dışı destek sistemi: (a) Düzlem dışı payandaları. (b) Kayıcı sistem.	32
Şekil 3.14 : 6m boyundaki profillerin atölyede durumu.	33
Şekil 3.15 : Atölyedeki numunelerin kesitlerinin genel görünüşü.	33
Şekil 3.16 : ASTM A370-08a standardına göre belirlenen çekme numunesi boyutları.	36
Şekil 3.17 : Deney numunelerinin bir kenarındaki kaynak çizgileri.	36
Şekil 3.18 : Kutu tüp kesitlerde numune alınan noktalar.	37
Şekil 3.19 : Tüp kesitli profillerden alınan çekme numuneleri.	37
Şekil 3.20 : Belirgin akma göstermeyen çeliğin gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.	38
Şekil 3.21 : Çekme deneyi düzeneği.	38
Şekil 3.22 : Çekme testi ve sonucu: (a) Kopma. (b) Gerilme-şekildeğiştirme grafiği.	39
Şekil 3.23 : Çekme numunelerinin kod açılımı.	39
Şekil 3.24 : Deney sonrası çekme numunesi görünüşleri: (a) İlk grup. (b) İkinci grup.	40
Şekil 3.25 : Tipik numune alt ucu birleşim detayı.	49
Şekil 3.26 : Gedore mekanik tork cihazı.	51
Şekil 3.27 : Bulonlara öngerme verilmesi.	52
Şekil 3.28 : Zayıflatılmış kesit şematik gösterimi (Plan).	52
Şekil 3.29 : Numunelerin montajı: (a) Bayrak levhalarının montajı. (b) Yerinde punto kaynak yapılması. (c) Gazaltı kaynak makinesi. (d) Yerde kaynakların yapılışı. (e) Tamamlanmış kaynak.	53
Şekil 3.30 : Tüp çaprazlardaki kritik kesitler ve güçlendirme: (a) Beklenen göçme/kopma modları. (b) CFRP ile güçlendirme biçimleri.	54
Şekil 3.31 : Laboratuvarıda yüzey temizliği uygulamaları: (a) CFRP plaka yapıştırılacak bölgede yüzey hazırlığı. (b) CFRP kumaş yapıştırılacak bölgede yüzey hazırlığı.	56
Şekil 3.32 : Numunelerin fabrikadaki durumları: (a) Kumlama öncesi. (b) Kumlama sonrası.	56
Şekil 3.33 : Zayıflatılmış uç bölge güçlendirme detayları: (a) Kutu profiller için yalnızca CFRP plaka uygulaması. (b) Kutu profiller için CFRP plaka ve CFRP kumaş sargı uygulaması. (c) Boru profiller için CFRP kumaş şerit ve CFRP kumaş sargı uygulaması.	57
Şekil 3.34 : CFRP plakaların yapıştırılma adımları: (a) Güçlendirmede kullanılan tüm malzemeler. (b) CFRP plakaların kesilmesi. (c) Plakaların asetonla temizlenmesi. (d) Epoksi bileşenleri. (e) Bileşenlerin belirli oranlarda karıştırılması. (f) Plakaların yapıştırılması.	59
Şekil 3.35 : CFRP kumaş yapıştırma aşamaları: (a) CFRP kumaşın belirlenen boyda kesilmesi. (b) MBrace Saturant epoksi bileşenleri. (c) ve (d) CFRP kumaş sarıldıktan sonraki örnek görünüşler.	61
Şekil 3.36 : Laboratuvarıdan ölçüm düzeneği görünüşü.	63
Şekil 3.37 : Ölçüm cihazlarının yerleşimi: (a) Düzlem içi. (b) Düzlem dışı.	64
Şekil 4.1 : ATC-24 yerdeğiştirme protokolü (ATC,1992).	66
Şekil 4.2 : Yakın fay etkisi yükleme protokolü (Krawinkler ve diğ, 2000).	67
Şekil 4.3 : SAP2000’de oluşturulan örnek analiz modelinin: (a) Çubuk gösterimi. (b) Profil boyutlarının görünümü.	68
Şekil 4.4 : Çekme ve basınç kuvvetlerinin yönleri.	69
Şekil 4.5 : TB-1 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi.	71
Şekil 4.6 : TB-1 numunesi yükleme protokolü.	71

Şekil 4.7 : TB-1 düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.	72
Şekil 4.8 : TB-1 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.	72
Şekil 4.9 : TB-1 numunesi deney öncesi görünüşleri, elastik çevrimleri ve $-1\delta_y$ (-5.63mm) yerdeğiştirme seviyesinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi kanal kontrollerinin yapılması. (c,d) $+0.5\delta_y$ ($+2.81\text{mm}$)’de elastik davranış. (e,f) $-1\delta_y$ (-5.63mm)’de burkulma.	75
Şekil 4.10 : TB-1 Numunesinin $2\delta_y$ ($\pm 11.26\text{mm}$), $3\delta_y$ ($\pm 16.89\text{mm}$) ve $4\delta_y$ ($\pm 22.52\text{mm}$) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-2\delta_y$ (-11.26mm)’de burkulma. (b) $-3\delta_y$ (-16.89mm)’de burkulma. (c) $+3\delta_y$ ($+16.89\text{mm}$)’de üst zayıflatılmış kesit alt kısmında boya dökülmesi. (d) $+4\delta_y$ ($+22.52\text{mm}$)’de alt zayıflatılmış kesit batı yüzünde boya dökülmesi. (e) $-4\delta_y$ (-22.52mm)’de burkulma. (f) $-4\delta_y$ (-22.52mm)’de yerel burkulma.	76
Şekil 4.11 : TB-1 numunesi $5\delta_y$ ($\pm 28.15\text{mm}$) yatay yerdeğiştirme seviyesinde davranışı: (a) $+5\delta_y$ ($+28.15\text{mm}$)’de üst zayıflatılmış kesit batı yüzünde boya dökülmesi. (b) $+5\delta_y$ ($+28.15\text{mm}$)’de alt zayıflatılmış kesitte boğum oluşumu ve alt yüzde yırtığın ilerlemesi. (c) $-5\delta_y$ (-28.15mm)’de burkulma. (d) $+5\delta_y$ ($+28.15\text{mm}$)’de alt zayıflatılmış kesitte yırtığın batı yüzünde ilerlemesi. (e) $+5\delta_y$ ($+28.15\text{mm}$)’de üst zayıflatılmış kesitte plastikleşme. (f) $-5\delta_y$ (-28.15mm)’de alt zayıflatılmış kesit yan batı yüzünde yerel burkulma oluşumu.	77
Şekil 4.12 : TB-1 numunesi kopma sonrası görünüşleri: (a,b,c) Alt zayıflatılmış kesitin kopma sonrası görünüşleri. (d) Kopma sonrası numunenin ön cepheden görünüşü. (e,f) Kopma sonrası üst zayıflatılmış kesitin doğu ve alt yüzlerinin durumu.	78
Şekil 4.13 : TB-2 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi.	80
Şekil 4.14 : TB-2 numunesi yükleme protokolü.	80
Şekil 4.15 : TB-2 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.	81
Şekil 4.16 : TB-2 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.	81
Şekil 4.17 : TB-2 numunesi deney öncesi, elastik çevrimleri ve $-1\delta_y$ (-5.63mm) yerdeğiştirme seviyesinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi son kontrollerinin yapılması. (c) Alt zayıflatılmış kesit güçlendirmesi. (d) Orta bölge güçlendirilmesi. (e) $+0.5\delta_y$ ($+2.81\text{mm}$)’de elastik davranış. (f) $-1\delta_y$ (-5.63mm)’de burkulma.	84
Şekil 4.18 : TB-2 numunesinin $2\delta_y$ (11.26mm), $3\delta_y$ (16.89mm) ve $4\delta_y$ (22.52mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-2\delta_y$ (-11.26mm)’de burkulma. (b) $-3\delta_y$ (-16.89mm)’de burkulma. (c) $-3\delta_y$ (-16.89mm)’de orta bölgedeki güçlendirmenin durumu. (d) $-3\delta_y$ (-16.89mm)’de yerel burkulma başlangıcı. (e) $-4\delta_y$ (-22.52mm)’de burkulma. (f) $-4\delta_y$ (-22.52mm)’de artan yerel burkulma.	85
Şekil 4.19 : TB-2 numunesi $4\delta_y$ (22.52mm) ve $5\delta_y$ (28.15mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $+4\delta_y$ ($+22.52\text{mm}$)’de çekme etkisinde yerel burkulma bölgesinin durumu. (b) $+4\delta_y$ ($+22.52\text{mm}$)’de çekme etkisinde alt zayıflatılmış kesit güçlendirmesinin durumu (c) $-5\delta_y$ (-28.15mm)’de ilk çevrimde burkulma. (d) $-5\delta_y$ (-28.15mm)’de ilk çevrimde yerel burkulma. (e) $+5\delta_y$ ($+28.15\text{mm}$)’de ikinci çevrimde yırtılma başlangıcı. (f) $+5\delta_y$ ($+28.15\text{mm}$)’de yırtığın hızla artması.	86
Şekil 4.20 : TB-2 numunesi $5\delta_y$ (28.15mm) ve kopma öncesi – sonrası görünüşleri: (a) $-5\delta_y$ (-28.15mm)’de düzlem içi ve düzlem dışı burkulma. (b) $+6\delta_y$ ’nin ilk çekme pikine giderken yırtığın ilerlemesi. (c) Kopma bölgesinin yandan görünüşü. (d) Kopma bölgesinin yakından görünüşü. (e) Kopma	

sonrası üst zayıflatılmış kesit güçlendirmesinin durumu. (f) Kopma sonrası alt zayıflatılmış kesit güçlendirmesinin durumu.	87
Şekil 4.21 : TB-3 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi.	89
Şekil 4.22 : TB-3 numunesi yükleme protokolü.	89
Şekil 4.23 : TB-3 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.	90
Şekil 4.24 : TB-3 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.	90
Şekil 4.25 : TB-3 numunesi deney öncesi, elastik çevrimleri ve $-1\delta_y(-5.63\text{mm})$ yerdeğiştirme seviyesinde davranış: (a) Genel görünüş. (b) Alt zayıflatılmış kesit güçlendirmesi. (c) Orta bölge güçlendirilmesi. (d) Üst zayıflatılmış kesit güçlendirmesi. (e) $+0.5\delta_y(+2.81\text{mm})$ 'de elastik davranış. (f) $-1\delta_y(-5.63\text{mm})$ 'de burkulma.	94
Şekil 4.26 : TB-3 numunesinin $2\delta_y(11.26\text{mm})$, $3\delta_y(16.89\text{mm})$, $4\delta_y(22.52\text{mm})$ ve $5\delta_y(28.52\text{mm})$ yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranış: (a) $-2\delta_y(-11.26\text{mm})$ 'de burkulma. (b) $-3\delta_y(-16.89\text{mm})$ 'de burkulma. (c) $+4\delta_y(+22.52\text{mm})$ 'de çekmedeki durum. (d) $-4\delta_y(-22.52\text{mm})$ 'de burkulma. (e) $-5\delta_y(-28.15\text{mm})$ 'de burkulma. (f) $-5\delta_y(-28.15\text{mm})$ 'de yerel burkulma başlangıcı.	95
Şekil 4.27 : TB-3 numunesi $6\delta_y(33.78\text{mm})$ yatay yerdeğiştirme seviyesinde ve kopma öncesi davranış: (a) $-6\delta_y(-33.78\text{mm})$ 'de burkulma. (b) $-6\delta_y(-33.78\text{mm})$ 'de yerel burkulan bölüm üst yüzde CFRP kumaşta yırtılma. (c) $-6\delta_y(-33.78\text{mm})$ 'de yerel burkulan bölüm alt yüzde CFRP kumaşta yırtılma. (e) $+6\delta_y(+33.78\text{mm})$ 'de ikinci çevrimde çekme etkisinde davranış. (f) $+7\delta_y$ pikine giderken kopma öncesinde çekme etkisinde CFRP kumaşın iki bölgeden enine doğrultuda yırtılması.	96
Şekil 4.28 : TB-3 numunesi deney sonrası görünüşleri: (a) Genel görünüş. (b) Alt zayıflatılmış kesit güçlendirmesinin durumu. (c) Üst zayıflatılmış kesit güçlendirmesinin durumu. (d) Kopma bölgesinin doğudan görünüşü. (e) Kopma bölgesinin batıdan görünüşü. (f) Kopma sonrası CFRP kumaşın çelik yüzeyden ayrılmış görünüşü.	97
Şekil 4.29 : TB-4 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi ve itme eğrisi.	99
Şekil 4.30 : TB-4 numunesi yükleme protokolü.	99
Şekil 4.31 : TB-4 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.	100
Şekil 4.32 : TB-4 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.	100
Şekil 4.33 : TB-4 numunesi deney öncesi, elastik çevrimleri, $-1\delta_y(-4.08\text{mm})$ ve $-2\delta_y(-8.16\text{mm})$ yerdeğiştirme seviyelerinde davranış: (a) Genel görünüş. (b) Alt zayıflatılmış kesit görünüşü. (c) Üst zayıflatılmış kesit görünüşü. (d) $-0.84\delta_y(-3.42\text{mm})$ 'de elastik davranış. (e) $-1\delta_y$ 'de burkulma. (f) $-2\delta_y$ 'de burkulma.	102
Şekil 4.34 : TB-4 numunesinin $3\delta_y(12.24\text{mm})$, $4\delta_y(16.32\text{mm})$ yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranış ve kopma sonrası: (a) $-3\delta_y$ 'de burkulma. (b) $+4\delta_y$ 'de çekmedeki durum. (c) $-4\delta_y$ 'de burkulma. (d,e) Kopma sonrası görünüşler. (f) Kopma sonrası üst başlık görünüşü.	103
Şekil 4.35 : TB-5 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi.	105
Şekil 4.36 : TB-5 numunesi yükleme protokolü.	105
Şekil 4.37 : TB-5 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.	106
Şekil 4.38 : TB-5 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.	106
Şekil 4.39 : TB-5 numunesinin deney öncesi görünüşleri, elastik çevrim ve $1\delta_y(4.08\text{mm})$ yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranış: (a) Deney öncesi genel görünüş. (b) Deney öncesi orta bölge. (c) Deney öncesi alt	

- güçlendirme bölgesi. (d) Deney öncesi üst güçlendirme bölgesi. (e) Elastik basınç etkisinde davranış. (f) $-1\delta_y$ (-4.08mm)’de burkulma. 110
- Şekil 4.40 :** TB-5 numunesinin $2\delta_y$ (8.16mm), $3\delta_y$ (12.24mm), $4\delta_y$ (16.32mm) ve $5\delta_y$ (20.4mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-2\delta_y$ (-8.16mm)’de burkulma. (b) $-3\delta_y$ (-12.24mm)’de burkulma. (c) $+4\delta_y$ ($+16.32\text{mm}$)’de davranış. (d) $-4\delta_y$ (-16.32mm)’de burkulma. (e) $+5\delta_y$ ($+20.4\text{mm}$)’de davranış. (f) $-5\delta_y$ (-20.4mm)’de burkulma. 111
- Şekil 4.41 :** TB-5 numunesinin $6\delta_y$ (14.48mm), $7\delta_y$ (28.56mm) ve $8\delta_y$ (32.64mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-6\delta_y$ (-14.48mm)’de burkulma. (b) $-7\delta_y$ (-28.56mm)’de burkulma. (c) $-7\delta_y$ (-28.56mm)’de orta bölge. (d) $-8\delta_y$ (-32.64mm)’de burkulma. (e) $-8\delta_y$ (-32.64mm)’de üst uç batı yüzündeki CFRP plakanın yüzeyden ayrılması. (f) $-8\delta_y$ (-32.64mm)’de orta bölgede CFRP sargı üst ucunda oluşan dirsek. 112
- Şekil 4.42 :** TB-5 numunesinin $9\delta_y$ (36.72mm) davranışı ve kopma sonrası görünüşleri: (a) $-9\delta_y$ (-36.72mm)’de düzlem içi ve dışı burkulma. (b) $-9\delta_y$ (-36.72mm)’de üst uç doğu yüzündeki CFRP plakanın yırtılması ve yüzeyden ayrılması. (c) $-9\delta_y$ (-36.72mm)’de alt uç doğu yüzündeki CFRP plakanın yüzeyden ayrılması. (d) Üst zayıflatılmış kesitteki kopma bölgesi. (e) Kopma sonrası genel görünüş. (f) Kopma sonrası alt uç birleşimi. 113
- Şekil 4.43 :** TB-6 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi. 115
- Şekil 4.44 :** TB-6 numunesi yükleme protokolü. 115
- Şekil 4.45 :** TB-6 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi. 116
- Şekil 4.46 :** TB-6 numunesinin deney öncesi görünüşler ve $1\delta_y$ (4.08mm), $2\delta_y$ (8.16mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışları: (a) Deney öncesi genel görünüş. (b) Deney öncesi alt zayıflatılmış kesit güçlendirmesi. (c) $-1\delta_y$ (-4.08mm)’de burkulma. (d) $-1\delta_y$ (-4.08mm)’de alt uç birleşimi. (e) $+2\delta_y$ ($+8.16\text{mm}$)’de numunenin davranışı. (f) $-2\delta_y$ (-8.16mm)’de burkulma. 120
- Şekil 4.47 :** TB-6 numunesinin $3\delta_y$ (12.24mm), $4\delta_y$ (16.32mm) ve $5\delta_y$ (20.04mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışları: (a) $+3\delta_y$ ($+12.24\text{mm}$)’de üst uç birleşimi. (b) $-3\delta_y$ (-12.24mm)’de burkulma. (c) $+4\delta_y$ ($+16.32\text{mm}$)’de orta bölgenin durumu. (d) $-4\delta_y$ (-16.32mm)’de düzlem içi ve dışı burkulma. (e) $-5\delta_y$ (-20.04mm)’de burkulma. (f) $-5\delta_y$ (-20.04mm)’de düzlem içi ve dışı burkulma. 121
- Şekil 4.48 :** TB-6 numunesinin $6\delta_y$ (24.14mm), $7\delta_y$ (28.2mm), $8\delta_y$ (32.28mm) ve $9\delta_y$ (36.72mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışları: (a) $+6\delta_y$ ($+24.14\text{mm}$)’de üst uç birleşimi. (b) $-6\delta_y$ (-24.14mm)’de burkulma. (c) $+7\delta_y$ ($+28.2\text{mm}$)’de alt uç birleşimi. (d) $-7\delta_y$ (-28.2mm)’de düzlem içi ve dışı burkulma. (e) $-8\delta_y$ (-32.28mm)’de orta bölgedeki CFRP sargının batı yüzünde yırtılma. (f) $+9\delta_y$ ($+36.72\text{mm}$)’de orta bölgedeki CFRP sargının dört yüzünde yırtılması. 122
- Şekil 4.49 :** TB-6 numunesinin $9\delta_y$ (36.72mm), $10\delta_y$ (40.8mm), $11\delta_y$ (44.88mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışları ve kopma sonrası görünüşler: (a) $-9\delta_y$ (-36.72mm)’de burkulma. (b) $-10\delta_y$ (-40.8mm)’de üst uç doğu yüzünde kopan CFRP plaka. (c) $-11\delta_y$ (-44.88mm)’de aşırı düzlem içi ve dışı burkulma. (d, e) Kopma bölgesi. (f) Kopma sonrası alt zayıflatılmış kesit güçlendirmesinin durumu. 123
- Şekil 4.50 :** TB-8 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi. 125

Şekil 4.51 : TB-8 numunesi yükleme protokolü.....	125
Şekil 4.52 : TB-8 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.....	126
Şekil 4.53 : TB-8 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.....	126
Şekil 4.54 : TB-8 numunesinin deney öncesi, $1\delta_y$ (4.75mm) ve $2\delta_y$ (9.5mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşimi. (c) Deney öncesi üst uç birleşimi. (d) $-1\delta_y$ (-4.75mm)'de burkulma. (e) $+2\delta_y$ (9.5mm)'de çekme etkisi. (f) $-2\delta_y$ (-9.5mm)'de burkulma.....	129
Şekil 4.55 : TB-8 numunesinin $3\delta_y$ (14.25mm), $4\delta_y$ (19mm) ve $5\delta_y$ (23.75mm) yatay yerdeğiştirme seviyesinde davranışı: (a) $+3\delta_y$ (+14.25mm)'de çekme etkisi. (b) $-3\delta_y$ (-14.25mm)'de burkulma. (c) $-4\delta_y$ (-19mm)'de burkulma. (d) $-4\delta_y$ (-19mm)'de alt gusenin burkulması. (e) $-5\delta_y$ (-23.75mm)'de burkulma. (f) $-5\delta_y$ (-23.75mm)'de yerel burkulma başlangıcı.....	130
Şekil 4.56 : TB-8 numunesinin $6\delta_y$ (28.5mm), $7\delta_y$ (33.25mm) ve $8\delta_y$ (38mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-6\delta_y$ (-28.5mm)'de burkulma. (b) $-6\delta_y$ (-28.5mm)'de yerel burkulma. (c) $+7\delta_y$ (+33.25mm)'de çekme etkisi. (d) $-7\delta_y$ (-33.25mm)'de burkulma. (e) $-7\delta_y$ (-33.25mm)'de yerel burkulma. (f) $+8\delta_y$ (+38mm)'de yırtılma/kopma başlangıcı.....	131
Şekil 4.57 : TB-8 numunesi $8\delta_y$ (38mm) yatay yerdeğiştirme seviyesinde davranışı ve kopma sonrası: (a, b, c) $+8\delta_y$ (+38mm)'de yırtığın ilerlemesi. (d) $-8\delta_y$ (-38mm)'de burkulma. (e, f) Kopma sonrası görünüşler.	132
Şekil 4.58 : TB-9 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi ve itme eğrisi.	134
Şekil 4.59 : TB-9 numunesi yükleme protokolü.....	134
Şekil 4.60 : TB-9 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.....	135
Şekil 4.61 : TB-9 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.....	135
Şekil 4.62 : TB-9 numunesi deney öncesi görünüşleri ile $1\delta_y$ (4.75mm) ve $2\delta_y$ (9.5mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşimi. (c) Deney öncesi üst uç birleşimi. (d) $-1\delta_y$ (-4.75mm)'de burkulma. (e) $+2\delta_y$ (9.5mm)'de çekme etkisi. (f) $-2\delta_y$ (-9.5mm)'de burkulma.	139
Şekil 4.63 : TB-9 numunesinin $3\delta_y$ (14.25mm) ve $4\delta_y$ (19mm) yatay yerdeğiştirme seviyesinde davranışı: (a) $+3\delta_y$ (+14.25mm)'de çekme etkisi. (b) $+3\delta_y$ (+14.25mm)'de alt zayıflatılmış kesit bölgesinde boya kabarması. (c) $-3\delta_y$ (-14.25mm)'de orta bölgede boya dökülmesi. (d) $-3\delta_y$ (-14.25mm)'de burkulma. (e) $+4\delta_y$ (+19mm)'de alt zayıflatılmış kesit bölgesinde boya dökülmesi. (f) $+4\delta_y$ (+19mm)'de üst zayıflatılmış kesit bölgesinin durumu.....	140
Şekil 4.64 : TB-9 numunesinin $4\delta_y$ (19mm) ve $5\delta_y$ (23.75mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-4\delta_y$ (-19mm)'de burkulma. (b) $-4\delta_y$ (-19mm)'de yerel burkulma. (c) $-4\delta_y$ (-19mm)'de alt zayıflatılmış kesitte yerel burkulma. (d) $+5\delta_y$ (+23.75mm)'de çekme etkisi. (e, f) $-5\delta_y$ (-23.75mm)'de alt uç zayıflatılmış kesitin üst ve alt görünüşleri.	141
Şekil 4.65 : TB-8 numunesi $5\delta_y$ (23.75mm) yatay yerdeğiştirme seviyesinde davranışı ve kopma sonrası: (a) $-5\delta_y$ (-23.75mm) ilk yükleme çevriminde yerel burkulma. (b) $+5\delta_y$ (+23.75mm) ikinci yükleme çevriminde yırtığın ilerlemesi. (c) $-5\delta_y$ (-23.75mm) ikinci yükleme çevriminde alt uçtaki yırtığın kapanması. (d, e) Kopma sonrası görünüşler. (f) Kopma sonrası orta yerel burkulma bölgesinde belirlenen kılcal yırtıklar.	142

Şekil 4.66 : TB-10 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi ve itme eğrisi.....	144
Şekil 4.67 : TB-10 numunesi yükleme protokolü.....	144
Şekil 4.68 : TB-10 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.....	145
Şekil 4.69 : TB-10 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.....	145
Şekil 4.70 : TB-10 numunesi deney öncesi, $1\delta_y$ (3.65mm) ve $2\delta_y$ (7.3mm) yerdeğiştirme seviyesinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşim detayı. (c) Deney öncesi orta bölgenin durumu. (d) $-1\delta_y$ (-3.65mm)'de burkulma. (e) $+2\delta_y$ (+7.3mm)'de çekme etkisi. (f) $-2\delta_y$ (-7.3mm)'de burkulma.	148
Şekil 4.71 : TB-10 numunesinin $3\delta_y$ (10.95mm) ve $4\delta_y$ (14.6mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $+3\delta_y$ (+10.95mm)'de alt zayıflatılmış kesitte akma. (b) $-3\delta_y$ (-10.95mm)'de burkulma. (c) $-3\delta_y$ (-10.95mm)'de üst uç zayıflatılmış kesit bölgesi. (d) $-3\delta_y$ (-10.95mm)'de alt uç zayıflatılmış kesit bölgesi. (e) $+4\delta_y$ (14.6mm) 'de alt uç zayıflatılmış kesit bölgesi. (f) $-4\delta_y$ (-14.6mm)'de genel burkulma.	149
Şekil 4.72 : TB-10 numunesi $5\delta_y$ (18.25mm) ve $6\delta_y$ (21.9mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $+5\delta_y$ (+18.25mm) etkisinde alt uç zayıflatılmış kesit bölgesi. (b) $+5\delta_y$ (+18.25mm) etkisinde üst uç zayıflatılmış kesit bölgesi. (c) $-5\delta_y$ (-18.25mm)'de burkulma. (d, e) $+6\delta_y$ (+21.09mm)'ye giderken alt uç zayıflatılmış kesitte boğum oluşması. (f) $+6\delta_y$ (+21.09mm)'ye giderken alt uç zayıflatılmış kesitte yırtık oluşması ve ilerlemesi.....	150
Şekil 4.73 : TB-10 Numunesi Kopma Sonrası Görünüşleri: (a, b) Kopan alt uç zayıflatılmış kesit görünüşleri. (c) Üst uç zayıflatılmış kesitin durumu (d) Üst uç zayıflatılmış kesitin alttan görünüşü (e) Orta bölgedeki kalıcı yerdeğiştirme. (f) Numune ortasında plastikleşen bölge.	151
Şekil 4.74 : TB-11 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi.....	153
Şekil 4.75 : TB-11 numunesi yükleme protokolü.....	153
Şekil 4.76 : TB-11 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.....	154
Şekil 4.77 : TB-11 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.....	154
Şekil 4.78 : TB-11 numunesinin deney öncesi, $1\delta_y$ ve $2\delta_y$ seviyelerinde görünüşleri : (a) Deney öncesi genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç zayıflatılmış kesit güçlendirmesi. (c) Deney öncesi üst uç zayıflatılmış kesit güçlendirmesi.(d) $-1\delta_y$ 'de burkulma başlangıcı. (e) $+2\delta_y$ 'de alt uç zayıflatılmış kesitte CFRP plakanın ayrılması. (f) $-2\delta_y$ 'de burkulma... ..	157
Şekil 4.79 : TB-11 numunesi $3\delta_y$ seviyesinde görünüşleri: (a) $+3\delta_y$ 'de üst uç zayıflatılmış kesitte CFRP plakanın numune yüzeyinden ayrılması. (b) $-3\delta_y$ 'de burkulan numunede alt uç güçlendirmesinin durumu. (c) $-3\delta_y$ 'de alt uç zayıflatılmış kesitte boya dökülmesi. (d) $-3\delta_y$ 'de orta bölgede kesit köşelerinde boya dökülmesi başlangıcı. (e) $-3\delta_y$ 'nin son çevriminde burkulma. (f) Yerdeğiştirmenin sıfır olduğu anda alt uç genel görünüşü.....	158
Şekil 4.80 : TB-11 numunesinin $4\delta_y$ seviyesinde ve kopma sonrasındaki görünüşleri: (a) $-4\delta_y$ 'de burkulma. (b) $-4\delta_y$ 'de alt uç zayıflatılmış kesitteki boğumun görünüşü. (c) $-4\delta_y$ 'de orta bölgedeki boya dökülmesi. (d, e, f) Numunenin kopma sonrası görünüşleri.	159
Şekil 4.81 : TB-12 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi.....	161
Şekil 4.82 : TB-12 yükleme protokolü.....	161
Şekil 4.83 : TB-12 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.....	162

- Şekil 4.84 :** TB-12 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi. 162
- Şekil 4.85 :** TB-12 numunesinin deney öncesi görünüşleri, $1\delta_y$ (3.65mm) ve $2\delta_y$ (7.30mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) Deney öncesi genel görünüş. (b) Deney öncesi alt zayıflatılmış kesit güçlendirmesi görünüşü. (c) Deney öncesi üst zayıflatılmış kesit güçlendirmesi görünüşü. (d) $-1\delta_y$ (-3.65mm)'de genel burkulma. (e) $-2\delta_y$ (-7.30mm)'de genel burkulma. (f) $-2\delta_y$ (-7.30mm)'de alt zayıflatılmış kesit güçlendirmesinin durumu. 165
- Şekil 4.86 :** TB-12 numunesinin $3\delta_y$ (10.95mm) ve $4\delta_y$ (14.60mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-3\delta_y$ (-10.95mm)'de genel burkulma. (b) $+3\delta_y$ (+10.95mm)'de üst uç doğu yüzündeki CFRP plakanın aderansını kaybetmesi. (c) $-4\delta_y$ (-14.60mm)'de genel burkulma. (d) $-4\delta_y$ (-14.60mm)'de alt uç doğu yüzündeki CFRP plakanın aderansını kaybetmesi. (e) $-4\delta_y$ (-14.60mm)'de alt uç batı yüzündeki CFRP plakanın aderansını kaybetmesi (f) $-4\delta_y$ (-14.60mm)'de üst uç batı yüzündeki CFRP plakanın aderansını kaybetmesi. 166
- Şekil 4.87 :** TB-12 numunesinin $5\delta_y$ (18.25mm) ve $6\delta_y$ (21.90mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $+5\delta_y$ (+18.25mm)'de davranış. (b) $-5\delta_y$ (-18.25mm)'de genel burkulma. (c) $-5\delta_y$ (-18.25mm)'de orta bölgenin batı yüzünde boya dökülmesi. (d) $-6\delta_y$ (-21.90mm)'de genel burkulma. (e) $-6\delta_y$ (-21.90mm)'de alt uç güçlendirmesinin durumu. (f) $-6\delta_y$ (-21.90mm)'de üst uç güçlendirmesinin durumu. 167
- Şekil 4.88 :** TB-12 numunesinin $7\delta_y$ (25.55mm), $8\delta_y$ (29.20mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı ve kopma sonrası görünüşleri: (a) $-7\delta_y$ (-25.55mm)'de genel burkulma. (b) $-7\delta_y$ (-25.55mm)'de üst uç güçlendirmesinin durumu. (c) $-7\delta_y$ (-25.55mm)'de orta bölgedeki düzlem içi düşey hareket. (d) $-8\delta_y$ (-29.20mm)'de genel burkulma. (e) Kopma sonrası genel görünüş. (f) Kopma sonrası alt uç birleşimive güçlendirmesinin durumu. 168
- Şekil 4.89 :** TB-13 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi ve itme eğrisi. 170
- Şekil 4.90 :** TB-13 numunesi yükleme protokolü. 170
- Şekil 4.91 :** TB-13 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi. 171
- Şekil 4.92 :** TB-13 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi. 171
- Şekil 4.93 :** TB-13 numunesinin deney öncesi, $1\delta_y$ (6.67mm) ve $2\delta_y$ (13.34mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Düzlemdışı yerdeğiştirme ölçerin konumu. (c) Deney öncesi alt uç birleşim. (d) Deney öncesi üst uç birleşim. (e) $-1\delta_y$ (-6.67mm)'de burkulma. (f) $-2\delta_y$ (-13.34mm)'de burkulma. 174
- Şekil 4.94 :** TB-13 numunesinin $3\delta_y$ (20.01mm) yatay yerdeğiştirme seviyesinde davranışı: (a) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de genel burkulma. (b) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de yerel burkulma başlangıcı. (c) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de batı yüzünde içeri çökme. (d) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de yerel burkulmanın üstten görünüşü. (e) Yerel burkulma sonucu numunede oluşan dirsek. (f) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de yerel burkulma bölgesinin alttan görünüşü. 175
- Şekil 4.95 :** TB-13 numunesinin $3\delta_y$ (20.01mm) ve $4\delta_y$ (26.68mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-3\delta_y$ (-20.01mm) son yükleme çevrimi basınç etkisinde aşırı yerel burkulma oluşması. (b,c) $+4\delta_y$ (+26.68mm)'de yerel burkulma bölgesinde köşelerde yırtığın ilerlemesi (d) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de genel burkulma (e) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de yerel burkulmanın doğudan

görünüşü. (f) $-4\delta_y$ (-26.68mm)’de yerel burkulmanın batıdan görünüşü.	176
Şekil 4.96 : TB-13 numunesi kopma öncesi ve sonrası görünüşleri: (a,b) $+4\delta_y$ ($+26.68\text{mm}$)’de son yükleme çevriminde çekme pikine giderken yırtığın ilerlemesi. (c,d) Kopma öncesi yırtığın aşırı duruma gelmesi. (e,f) Kopma sonrası görünüşler.	177
Şekil 4.97 : TB-14 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi.	179
Şekil 4.98 : TB-14 numunesi yükleme protokolü.	179
Şekil 4.99 : TB-14 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.	180
Şekil 4.100 : TB-14 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.	180
Şekil 4.101 : TB-14 numunesi deney öncesi, $1\delta_y$ (6.67mm) ve $2\delta_y$ (13.34mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranış: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşimi. (c) Deney öncesi orta bölge güçlendirmesi. (d) Deney öncesi üst uç birleşimi. (e) $-1\delta_y$ (-6.67mm)’de burkulma. (f) $-2\delta_y$ (-13.34mm)’de burkulma.	183
Şekil 4.102 : TB-14 numunesinin $3\delta_y$ (20.01mm) yatay yerdeğiştirme seviyesindeki davranış: (a) $-3\delta_y$ (-20.01mm)’de burkulma. (b) $-3\delta_y$ (-20.01mm)’de yerel burkulma başlangıcı. (c) $+3\delta_y$ ($+20.01\text{mm}$)’de ikinci yükleme çevriminde çekme etkisinde davranış. (d) $-3\delta_y$ (-20.01mm)’de ikinci çevrimde basınç etkisinde dirsek oluşumu. (e) $-3\delta_y$ (-20.01mm)’de yerel burkulma oluşan bölge. (f) $-3\delta_y$ (-20.01mm)’de yerel burkulma bölgesinin yakından görünüşü.	184
Şekil 4.103 : TB-14 numunesinin $4\delta_y$ (26.68mm) yatay yerdeğiştirme seviyesindeki davranış: (a) $+4\delta_y$ ($+26.68\text{mm}$)’de yerel burkulma bölgesinde köşelerde yırtık başlangıcı. (b) $+4\delta_y$ ($+26.68\text{mm}$)’de yerel burkulma bölgesinde köşelerde yırtığın ilerlemesi. (c) $-4\delta_y$ (-26.68mm)’de yerel burkulma. (d) $-4\delta_y$ (-26.68mm)’de genel burkulma. (e) $+4\delta_y$ ($+26.68\text{mm}$)’de ikinci çevrimde yırtığın ilerlemesi. (f) $-4\delta_y$ (-26.68mm)’de ikinci çevrimde yerel burkulma oluşması.	185
Şekil 4.104 : TB-14 numunesi kopma sonrası görünüşleri: (a,b,c,d) Kopan bölge görünüşleri. (e) Kopma sonrası alt uç birleşimi. (f) Kopma sonrası üst uç birleşimi.	186
Şekil 4.105 : TB-15 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi.	188
Şekil 4.106 : TB-15 numunesi yükleme protokolü.	188
Şekil 4.107 : TB-15 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.	189
Şekil 4.108 : TB-15 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.	189
Şekil 4.109 : TB-15 numunesinin deney öncesi durumu, $1\delta_y$ (6.67mm) ve $2\delta_y$ (13.34mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranış: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşimi. (c) Deney öncesi orta bölge güçlendirmesi. (d) Deney öncesi üst uç birleşimi. (e) $-1\delta_y$ (-6.67mm)’de burkulma. (f) $-2\delta_y$ (-13.34mm)’de burkulma.	191
Şekil 4.110 : TB-15 numunesinin $2\delta_y$ (13.34mm) ve $3\delta_y$ (20.01mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranış: (a) $-2\delta_y$ (-13.34mm)’de alt gusede dönme. (b) $+3\delta_y$ ($+20.01\text{mm}$)’de görünüş. (c) $-3\delta_y$ (-20.01mm)’de ilk çevrimde burkulma. (d) $-3\delta_y$ (20.01mm)’de ikinci çevrimde yerel burkulma başlangıcı. (e) $+3\delta_y$ ($+20.01\text{mm}$)’de orta bölgede CFRP’de enine yırtılma. (f) $-3\delta_y$ (-20.01mm)’de üçüncü çevrimde yerel burkulmanın belirginleşmesi ve dirsek oluşumu.	192
Şekil 4.111 : TB-15 numunesinin $4\delta_y$ (26.68mm) yatay yerdeğiştirme seviyesinde davranış: (a) $-4\delta_y$ (-26.68mm)’de yerel burkulma bölgesinde aşırı içe	

- çökme. (b) $-4\delta_y$ (-26.68mm)’de yerel burkulma bölgesinde yukarı ve aşağı doğru şişme. (c) $-4\delta_y$ (-26.68mm)’de yerel burkulma bölgesinde üst ve alt yüzlerde CFRP’de yırtılma. (d) $+4\delta_y$ ($+26.68\text{mm}$)’de ikinci çevrimde numunenin yırtılmaya başlaması. (e) $-4\delta_y$ (-26.68mm)’de ikinci çevrimde burkulma. (f) $-4\delta_y$ (-26.68mm)’de ikinci çevrimde yerel burkulma bölgesi alt yüzde CFRP’nin yırtılması. **193**
- Şekil 4.112 :** TB-15 numunesinin $+5\delta_y$ ($+33.35\text{mm}$) yatay yerdeğiştirme seviyesine giderken davranışı ve kopma sonrası görünüşleri: (a) $+5\delta_y$ ($+33.35\text{mm}$) pikine giderken yırtığın ilerlemesi. (b,c,d) Kopan bölge görünüşleri. (e) Kopma sonrası alt uç birleşimi. (f) Kopma sonrası üst uç birleşimi. **194**
- Şekil 4.113 :** TB-16 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi ve itme eğrisi. **196**
- Şekil 4.114 :** TB-16 numunesi yükleme protokolü. **196**
- Şekil 4.115 :** TB-16 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi. **197**
- Şekil 4.116 :** TB-16 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi. **197**
- Şekil 4.117 :** TB-16 numunesinin deney öncesi görünüşleri, elastik çevrimlerdeki, $1\delta_y$ (6.67mm) ve $2\delta_y$ (13.34mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerindeki davranışı: (a) Deney öncesi genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşimi görünüşü. (c) Elastik yükleme çevrimlerinde numunenin durumu. (d) $-1\delta_y$ (-6.67mm)’de genel burkulma. (e) $+2\delta_y$ ($+13.34\text{mm}$)’de numunenin davranışı. (f) $-2\delta_y$ (-13.34mm)’de genel burkulma. **200**
- Şekil 4.118 :** TB-16 numunesinin $3\delta_y$ (20.01mm) ve $4\delta_y$ (26.68mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerindeki davranışı: (a) $+3\delta_y$ ($+20.01\text{mm}$)’de numunenin davranışı. (b) $-3\delta_y$ (-20.01mm)’de genel burkulma. (c) $-3\delta_y$ (-20.01mm)’de ilk çevrim basınç etkisinde orta bölge. (d) $+4\delta_y$ ($+26.68\text{mm}$)’de numunenin davranışı. (e) $-4\delta_y$ (-26.68mm)’de genel burkulma. (f) $-4\delta_y$ (-26.68mm)’de alt uç bayrak levhası dönmesi. **201**
- Şekil 4.119 :** TB-16 numunesinin $5\delta_y$ (33.35mm) ve $6\delta_y$ (40.02mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerindeki davranışı: (a) $+5\delta_y$ ($+33.35\text{mm}$)’de üst uç zayıflatılmış kesit etrafında boğum oluşması. (b) $-5\delta_y$ (-33.35mm)’de genel burkulma. (c) $-5\delta_y$ (-33.35mm)’de yerel burkulma (d) $-6\delta_y$ (-40.02mm)’de yerel burkulma. (e) $+6\delta_y$ ($+40.02\text{mm}$)’de ikinci çevrim etkisinde orta bölgedeki yırtılma başlangıcı. (f) $-6\delta_y$ (-40.02mm)’de ikinci çevrim etkisinde basınç etkisinde yırtığın kapanarak yerel burkulma oluşması. **202**
- Şekil 4.120 :** TB-16 numunesinin $7\delta_y$ (46.69mm) seviyesine giderken davranışı ve kopma sonrası görünüşler: (a) $+7\delta_y$ ($+46.69\text{mm}$) çekme pikine giderken orta bölgedeki yırtığın durumu. (b) $7\delta_y$ ($+46.69\text{mm}$) çekme pikine giderken kopma öncesi orta bölge. (c) Kopma sonrası orta bölge. (d) Kopma sonrasında alt utaki gusedeki kalıcı şekildeğiştirme. (e) Alt uç zayıflatılmış kesitin kopma sonrası görünüşü. (f) Kopma sonrası üst uç zayıflatılmış kesit bölgesindeki boğum oluşumu ve yırtığın durumu. **203**
- Şekil 4.121 :** TB-17 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi. **205**
- Şekil 4.122 :** TB-17 numunesi yükleme protokolü. **205**
- Şekil 4.123 :** TB-17 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi. **206**
- Şekil 4.124 :** TB-17 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi. **206**
- Şekil 4.125 :** TB-17 numunesi deney öncesi, $+25\text{mm}$, $+32\text{mm}$ ve $+15\text{mm}$ yerdeğiştirme seviyelerinde numunenin görünüşleri; (a) Deney öncesi

- genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşimi. (c) Deney öncesi üst uç birleşimi. (d) +25mm (%0.088 görelî ötelenme oranı)'de numunenin durumu. (e) +32mm (%1.12 görelî ötelenme oranı)'de üst zayıflatılmış kesitinde boğum oluşması. (f) +15.1mm (%0.53 görelî ötelenme oranı)'de çekme etkisinde burkulma. 209
- Şekil 4.126 :** TB-17 numunesinin artan basınç yerdeğiştirmesi etkisindeki davranış: (a) Basınç etkisinde burkulmanın artması ve yerdeğiştirme ölçerin devre dışı kalması. (b) -23mm (%0.080 görelî ötelenme oranı)'de numunenin durumu. (c) -28.5mm (%1 görelî ötelenme oranı)'de alt gusedeki aşırı dönme. (d) -57.5mm (%2.01 görelî ötelenme oranı)'de yerel burkulma başlangıcı. (e) -101mm (%3.5 görelî ötelenme oranı)'de yerel burkulma bölgesi. (f) -101mm (%3.5 görelî ötelenme oranı)'de genel burkulma. 210
- Şekil 4.127 :** TB-17 numunesinin artan ve azalan basınç yerdeğiştirmelerindeki durumu: (a) -125mm (%4.38 görelî ötelenme oranı)'de genel burkulma. (b) -177.5mm (%6.21 görelî ötelenme oranı)'de yerel burkulma. (c) -177.5mm (%6.21 görelî ötelenme oranı)'de üst uç birleşim bölgesinin durumu. (d) -76.45mm (%2.67 görelî ötelenme oranı)'de orta bölgede yırtık oluşması. (e) -142.9mm (%5 görelî ötelenme oranı)'de yırtığın kapanıp genel burkulma oluşması. (f) -28.58mm (%1 görelî ötelenme oranı)'de yırtığın artması. 211
- Şekil 4.128 :** TB-17 numunesinin değişen basınç yerdeğiştirmelerindeki ve kopma sonrası görünüşleri: (a) -57.16mm (%2 görelî ötelenme oranı)'de yerel burkulma bölgesinde yırtıktaki açılma. (b) -171.48mm (%6 görelî ötelenme oranı)'de yırtığın kapanması. (c, d, e, f) Kopma sonrası görünüşler. 212
- Şekil 4.129 :** TB-18 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi. 214
- Şekil 4.130 :** TB-18 numunesi yükleme protokolü. 214
- Şekil 4.131 :** TB-18 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi. 215
- Şekil 4.132 :** TB-18 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi. 215
- Şekil 4.133 :** TB-18 numunesinin deney öncesi görünüşleri, +18.38mm, -1.5mm ve -78.3mm yerdeğiştirme seviyelerinde davranış: (a) Deney öncesi genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşim bölgesi. (c) Deney öncesi orta ve üst birleşim bölgeleri. (d) +18.38mm (+%0.64 görelî ötelenme oranı)'de davranış. (e) -1.5mm (-%0.052 görelî ötelenme oranı)'de burkulma. (f) -78.3mm (-%2.74 görelî ötelenme oranı)'de burkulma. 218
- Şekil 4.134 :** TB-18 numunesinin basınç yerdeğiştirmeleri etkisindeki durumu: (a) -132mm (%4.62 görelî ötelenme oranı)'de düzlem dışı hareket. (b) -132mm (%4.62 görelî ötelenme oranı)'de orta bölgede üst kısımda CFRP epoksisinde çatlak oluşumu. (c) -171.47mm (%6 görelî ötelenme oranı)'de genel burkulma. (d) -171.47mm (%6 görelî ötelenme oranı)'de yerel burkulma. (e) -171.47mm (%6 görelî ötelenme oranı)'de orta bölge alt köşe noktasında CFRP'deki yırtılma. (f) -28.56 (%1 görelî ötelenme oranı)'de numunenin durumu. 219
- Şekil 4.135 :** TB-18 numunesinin değişen basınç yerdeğiştirmeleri etkisindeki durumu: (a) -114.32mm (%4 görelî ötelenme oranı)'de orta bölgede CFRP üst kısmında artan yırtık. (b) -114.32mm (%4 görelî ötelenme oranı)'de orta bölge batı yüzünde CFRP'de liflerin ayrılması. (c) -57.4mm (%2 görelî ötelenme oranı)'de davranış. (d) -114.32mm

(%4 görelî ötelenme oranı)'de burkulma. (e) -57.4mm (%2 görelî ötelenme oranı)'de yerel burkulma bölgesi. (f) -171.50mm (%6 görelî ötelenme oranı)'de yerel burkulma bölgesi.	220
Şekil 4.136 : TB-18 numunesinin değışen basınç yerdeğıştirmeleri etkisindeki durumu ve kopma sonrası görünüşleri: (a) -171.50mm (%6 görelî ötelenme oranı)'de orta bölgede CFRP üst kısmında artan yırtık. (b) Yerdeğıştirmenin sıfır olduğu noktadaki kalıcı deplasman. (c, d, e) Kopma sonrası orta bölge. (f) Kopma sonrası alt uç birleşimi.	221
Şekil 4.137 : TB-19 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi ve itme eğrisi.	223
Şekil 4.138 : TB-19 numunesi yükleme protokolü.	223
Şekil 4.139 : TB-19 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğıştirme eğrisi.	224
Şekil 4.140 : TB-19 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.	224
Şekil 4.141 : TB-19 numunesi deney öncesi, $1\delta_y$ (6.67mm) ve $2\delta_y$ (13.34mm) yerdeğıştirme seviyelerinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşimi. (c) Deney öncesi üst uç birleşimi. (d) $+1\delta_y$ (+6.67mm)'de çekme etkisi. (e) $-1\delta_y$ (-6.67mm)'de burkulma. (f) $-2\delta_y$ (-13.34mm)'de burkulma.	227
Şekil 4.142 : TB-19 numunesinin $3\delta_y$ (20.01mm) yatay yerdeğıştirme seviyesinde davranışı: (a) $+3\delta_y$ (+20.01mm)'de alt uç birleşimi üst bölümünde boya dökülmesi ve yırtılma başlangıcı. (b) $+3\delta_y$ (+20.01mm)'de alt uç birleşimi alt bölümünde boya dökülmesi. (c) $+3\delta_y$ (+20.01mm) ikinci yükleme çevriminde alt uç birleşimi üst bölümünde yırtığın ilerlemesi. (d) $+3\delta_y$ (+20.01mm) ikinci yükleme çevriminde alt uç birleşimi alt bölümünde yırtık başlangıcı. (e) $+3\delta_y$ (+20.01mm)'de üst uç birleşiminin durumu. (f) $-3\delta_y$ (-20.01mm) ikinci yükleme çevriminde burkulma... ..	228
Şekil 4.143 : TB-19 numunesinin $4\delta_y$ (26.68mm) ve $5\delta_y$ (33.35mm) yatay yerdeğıştirme seviyelerinde davranışı: (a) $+4\delta_y$ (+26.68mm)'de alt uç birleşimi üst kısmında yırtığın ilerlemesi. (b) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de burkulma. (c) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de yerel burkulma. (d) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de son yükleme çevriminde yerel burkulmanın aşırı duruma gelmesi. (e) $+5\delta_y$ (+33.35mm)'de yırtığın ilerlemesi. (f) $-5\delta_y$ (-33.35mm)'de yerel burkulmanın aşırı duruma gelmesi.	229
Şekil 4.144 : TB-19 numunesi kopma öncesi ve sonrası görünüşleri: (a) Kopma öncesi alt uç birleşimi. (b) Kopma sonrası genel görünüş. (c, d) Kopan bölge görünüşleri. (e) Yerel burkulma bölgesinde oluşan kılcal yırtıklar. (f) Kopma sonrası üst uç birleşimi.	230
Şekil 4.145 : TB-20 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi.	232
Şekil 4.146 : TB-20 numunesi yükleme protokolü.	232
Şekil 4.147 : TB-20 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğıştirme eğrisi.	233
Şekil 4.148 : TB-20 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.	233
Şekil 4.149 : TB-20 numunesi deney öncesi, $1\delta_y$ (6.67mm) ve $2\delta_y$ (13.34mm) yerdeğıştirme seviyelerinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşimi. (c) CFRP ile orta bölge güçlendirmesi. (d) Deney öncesi üst uç birleşimi. (e) $-1\delta_y$ (-6.67mm)'de burkulma başlangıcı. (f) $+2\delta_y$ (+13.34mm)'de alt uç batı yüzünde CFRP'de yırtılma başlangıcı.	237
Şekil 4.150 : TB-20 numunesinin $2\delta_y$ (13.34mm), $3\delta_y$ (20.01mm) ve $4\delta_y$ (26.68mm) yatay yerdeğıştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-2\delta_y$ (-13.34mm)'de	

burkulma. (b) $-3\delta_y$ (-20.01mm)’de burkulma. (c) $+3\delta_y$ ($+20.01\text{mm}$)’de alt uç batı yüzünde CFRP’de yırtığın ilerlemesi. (d) $-3\delta_y$ (-20.01mm)’de basınç etkisindeki alt uç doğu yüzündeki CFRP’nin durumu. (e) $+3\delta_y$ ($+20.01\text{mm}$)’de alt uç doğu yüzünde CFRP’de yırtığın ilerlemesi. (f) $+4\delta_y$ ($+26.68\text{mm}$)’de alt uç batı yüzünde CFRP’de yırtığın ilerlemesi.

238

Şekil 4.151 : TB-20 numunesinin $4\delta_y$ (26.68mm) ve $5\delta_y$ (33.35mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $+4\delta_y$ ($+26.68\text{mm}$)’de alt uç birleşimi doğu yüzünde CFRP’de yırtığın ilerlemesi. (b) $+4\delta_y$ ($+26.68\text{mm}$)’de üst uç birleşiminin durumu. (c) $-4\delta_y$ (-26.68mm)’de genel burkulma. (d) $-4\delta_y$ (-26.68mm)’de yerel burkulmanın belirginleşmesi. (e) $+5\delta_y$ ($+33.35\text{mm}$)’de üst uç birleşiminde CFRP’de yırtılma. (f) $+5\delta_y$ ($+33.35\text{mm}$)’de orta bölgede CFRP’de enine yırtılma.

239

Şekil 4.152 : TB-20 numunesinin $5\delta_y$ (33.35mm), $6\delta_y$ (40.02mm) ve $7\delta_y$ (46.69mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı ve kopma sonrası görünüşleri: (a) $-5\delta_y$ (-33.35mm)’de yerel burkulma. (b) $+6\delta_y$ ($+40.02\text{mm}$)’de orta bölgede yırtılma başlangıcı. (c) $+7\delta_y$ ($+46.69\text{mm}$)’de orta bölgede yırtığın ilerlemesi. (d,e) Kopma sonrası görünüşler. (f) Kopmadan sonra belirlenen alt uç zayıflatılmış kesitteki yırtılma başlangıcı.

240

Şekil 4.153 : TB-21 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi.

242

Şekil 4.154 : TB-21 numunesi yükleme protokolü.

242

Şekil 4.155 : TB-21 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.

243

Şekil 4.156 : TB-21 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

243

Şekil 4.157 : TB-21 numunesi deney öncesi, $1\delta_y$ (6.67mm) ve $2\delta_y$ (13.34mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşimi. (c) Deney öncesi üst uç birleşimi. (d) Orta bölge güçlendirmesi. (e) $-1\delta_y$ (-6.67mm)’de burkulma başlangıcı. (f) $-2\delta_y$ (-13.34mm)’de burkulma.

246

Şekil 4.158 : TB-21 numunesinin $2\delta_y$ (13.34mm), $3\delta_y$ (20.01mm) ve $4\delta_y$ (26.68mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $+2\delta_y$ ($+13.34\text{mm}$)’de alt uç batı yüzünde CFRP’de oluşan yırtık. (b) $+3\delta_y$ ($+20.01\text{mm}$)’de alt uç batı yüzünde CFRP’nin yırtılması. (c) $-3\delta_y$ (-20.01mm)’de burkulma. (d) $+3\delta_y$ ($+20.01\text{mm}$)’de ikinci çekme etkisinde alt uçtaki CFRP’de doğu yüzünde yırtık. (e) $-3\delta_y$ (-20.01mm)’de alt uç batı yüzünde yırtık bölgesinde aderansını kaybeden CFRP liflerinin burkulması. (f) $-4\delta_y$ (-26.68mm)’de burkulma.

247

Şekil 4.159 : TB-21 numunesinin $4\delta_y$ (26.68mm) ve $5\delta_y$ (33.35mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-4\delta_y$ (-26.68mm)’de alt uç doğu yüzünde CFRP’de aderans kaybı. (b) $-4\delta_y$ (-26.68mm)’de alt uç doğu yüzündeki CFRP lifinin koparak dışarı fırlaması. (c) $+4\delta_y$ ($+26.68\text{mm}$)’de ikinci çevrimde üst uç birleşiminin durumu. (d) $-4\delta_y$ (-26.68mm)’de batı yüzde burkulan CFRP lifleri. (e) $+5\delta_y$ ($+33.35\text{mm}$)’de alt uç zayıflatılmış kesit hizasında CFRP’nin ayrılması. (f) $+5\delta_y$ ($+33.35\text{mm}$)’de orta bölgede CFRP’de enine yırtılma.

248

Şekil 4.160 : TB-21 numunesinin $5\delta_y$ (33.35mm) yatay yerdeğiştirme seviyesinde davranışı ve kopma sonrası görünüşleri: (a) $-5\delta_y$ (-33.35mm)’de burkulma. (b) $-5\delta_y$ (-33.35mm)’de orta bölgede oluşan dirseğin çekme

tarafında yırtılma başlangıcı. (c) $+5\delta_y$ ($+33.35\text{mm}$)’de ikinci çevrim etkisinde orta bölgede oluşan enine yırtık. (d) Kopma sonrası alt uç birleşimi. (e,f) Kopmadan sonra tespit edilen üst uç zayıflatılmış kesitteki CFRP’nin hasar durumu.....	249
Şekil 4.161: Deney düzeneğinin yatay yük-yatay yerdeğiştirme histeretik eğrisi...	250
Şekil 5.1 : Δ_1 ve Δ_2 tanımları (Lee ve Goel (1987)’den uyarlanmıştır) (Çelik ve diğ., 2004).....	252
Şekil 5.2 : $C_{r\text{ ilk}}$, $C_{r\text{ son}}$ ve C_r'' ’nün tanımları.	253
Şekil 5.3 : TB-1, TB-2, TB-3 numuneleri (Kutu 60x60x3) yatay yük - görelî öteleme oranı eğrileri, burkulma modları ve kopma sonrası hasar seviyeleri.	256
Şekil 5.4 : TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerine ilişkin zarf eğrileri.	257
Şekil 5.5 : TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerinin tükettikleri enerji miktarları.	257
Şekil 5.6 : TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerine ilişkin E_c/E_t – normalleştirilmiş yerdeğiştirme eğrileri.	259
Şekil 5.7 : TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerinin rijitlik değişim eğrileri.	259
Şekil 5.8 : TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerine ilişkin sönüm oranı eğrileri.....	260
Şekil 5.9 : TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerinin $C_r''/C_{r\text{ ilk}}$ eğrileri.....	261
Şekil 5.10 : TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerinin $C_r''/C_{r\text{ son}}$ eğrileri.....	261
Şekil 5.11 : TB-4, TB-5, TB-6 numuneleri (Kutu 50x50x4) yatay yük - görelî öteleme oranı eğrileri, burkulma modları ve kopma sonrası hasar seviyeleri.	262
Şekil 5.12 : TB-4, TB-5 ve TB-6 numunelerine ilişkin zarf eğrileri.	263
Şekil 5.13 : TB-4, TB-5 ve TB-6 numunelerinin tükettikleri enerji miktarları.	263
Şekil 5.14 : TB-4, TB-5 ve TB-6 numunelerine ilişkin E_c/E_t – normalleştirilmiş yerdeğiştirme eğrileri.	265
Şekil 5.15 : TB-4, TB-5 ve TB-6 numunelerinin rijitlik değişim eğrileri.	266
Şekil 5.16 : TB-4, TB-5 ve TB-6 numunelerine ilişkin sönüm oranı eğrileri.....	266
Şekil 5.17 : TB-4, TB-5 ve TB-6 numunelerinin $C_r''/C_{r\text{ ilk}}$ eğrileri.....	267
Şekil 5.18 : TB-4, TB-5 ve TB-6 numunelerinin $C_r''/C_{r\text{ son}}$ eğrileri.....	267
Şekil 5.19 : TB-8 ve TB-9 numuneleri (Kutu 60x60x4) yatay yük - görelî öteleme oranı eğrileri, burkulma modları ve kopma sonrası hasar seviyeleri.	268
Şekil 5.20 : TB-8 ve TB-9 numunelerine ilişkin zarf eğrileri.....	269
Şekil 5.21 : TB-8 ve TB-9 numunelerinin tükettikleri enerji miktarları.....	269
Şekil 5.22 : TB-8 ve TB-9 numunelerine ilişkin E_c/E_t – normalleştirilmiş yerdeğiştirme eğrileri.	270
Şekil 5.23 : TB-8 ve TB-9 numunelerinin rijitlik değişim eğrileri.....	271
Şekil 5.24 : TB-8 ve TB-9 numunelerine ilişkin sönüm oranı eğrileri.....	271
Şekil 5.25 : TB-8 ve TB-9 numunelerinin $C_r''/C_{r\text{ ilk}}$ eğrileri.....	272
Şekil 5.26 : TB-8 ve TB-9 numunelerinin $C_r''/C_{r\text{ son}}$ eğrileri.....	272
Şekil 5.27 : TB-10, TB-11, TB-12 numuneleri (Kutu 50x50x4) yatay yük - görelî öteleme oranı eğrileri, burkulma modları ve kopma sonrası hasar seviyeleri.	273
Şekil 5.28 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerine ait zarf eğrileri.	274
Şekil 5.29 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerinin tükettikleri enerji miktarları.	274
Şekil 5.30 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerine ilişkin E_c/E_t – normalleştirilmiş yerdeğiştirme eğrileri.....	275
Şekil 5.31 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerinin rijitlik değişim eğrileri.	276
Şekil 5.32 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerine ilişkin sönüm oranı eğrileri....	277
Şekil 5.33 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerinin $C_r''/C_{r\text{ ilk}}$ eğrileri.....	278
Şekil 5.34 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerinin $C_r''/C_{r\text{ son}}$ eğrileri.....	278

Şekil 5.35 : TB-13, TB-14, TB-15 numuneleri (Kutu 70x70x3) yatay yük - görelî öteleme oranı eğrileri, burkulma modları ve kopma sonrası hasar seviyeleri.	279
Şekil 5.36 : TB-13, TB-14 ve TB-15 numunelerine ait zarf eğrileri.	280
Şekil 5.37 : TB-13, TB-14 ve TB-15 numunelerinin tükettikleri enerji miktarları.	280
Şekil 5.38 : TB-13, TB-14 ve TB-15 numunelerine ilişkin E_c/E_t – normalleştirilmiş yerdeğiştirme eğrileri.	281
Şekil 5.39 : TB-13, TB-14 ve TB-15 numunelerinin rijitlik değişim eğrileri.	282
Şekil 5.40 : TB-13, TB-14 ve TB-15 numunelerine ilişkin sönüm oranı eğrileri. ..	282
Şekil 5.41 : TB-13, TB-14 ve TB-15 numunelerinin $C_r''/C_{r\text{ ilk}}$ eğrileri.	283
Şekil 5.42 : TB-13, TB-14 ve TB-15 numunelerinin $C_r''/C_{r\text{ son}}$ eğrileri.	283
Şekil 5.43 : TB-16, TB-17, TB-18 numuneleri (Kutu 70x70x4) yatay yük - görelî öteleme oranı eğrileri, burkulma modları ve kopma sonrası hasar seviyeleri.	285
Şekil 5.44 : TB-16 numunesine ait zarf eğrisi.	286
Şekil 5.45 : TB-16, TB-17 ve TB-18 numunelerinin tükettikleri enerji miktarları.	286
Şekil 5.46 : TB-16 numunesine ilişkin E_c/E_t – normalleştirilmiş yerdeğiştirme eğrisi.	288
Şekil 5.47 : TB-16, TB-17 ve TB-18 numunelerinin rijitlik değişim eğrileri.	289
Şekil 5.48 : TB-16, TB-17 ve TB-18 numunelerine ilişkin sönüm oranı eğrileri. ..	289
Şekil 5.49 : TB-16 numunesinin $C_r''/C_{r\text{ ilk}}$ eğrisi.	290
Şekil 5.50 : TB-16 numunesinin $C_r''/C_{r\text{ son}}$ eğrisi.	290
Şekil 5.51 : TB-19, TB-20, TB-21 numuneleri (Boru 76.1x3) yatay yük - görelî öteleme oranı eğrileri, burkulma modları ve kopma sonrası hasar seviyeleri.	292
Şekil 5.52 : TB-19, TB-20 ve TB-21 numunelerine ait zarf eğrileri.	293
Şekil 5.53 : TB-19, TB-20 ve TB-21 numunelerinin tükettikleri enerji miktarları.	293
Şekil 5.54 : TB-19, TB-20 ve TB-21 numunelerine ilişkin E_c/E_t – normalleştirilmiş yerdeğiştirme eğrileri.	294
Şekil 5.55 : TB-19, TB-20 ve TB-21 numunelerinin rijitlik değişim eğrileri.	295
Şekil 5.56 : TB-19, TB-20 ve TB-21 numunelerine ilişkin sönüm oranı eğrileri. ..	296
Şekil 5.57 : TB-19, TB-20 ve TB-21 numunelerinin $C_r''/C_{r\text{ ilk}}$ eğrileri.	296
Şekil 5.58 : TB-19, TB-20 ve TB-21 numunelerinin $C_r''/C_{r\text{ son}}$ eğrileri.	297
Şekil 6.1 : TB-8 ve TB-9 numunelerinin ilişkin $KL/r-b/t$ -TTY Y grafiği.	300
Şekil 6.2 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerinin $KL/r-b/t$ -TTY Y grafiği.	301
Şekil 6.3 : TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerinin $KL/r-b/t$ -TTY Y grafiği.	307
Şekil 6.4 : TB-3, TB-4 ve TB-5 numunelerinin $KL/r-b/t$ -TTY Y grafiği.	307
Şekil 6.5 : TB-13, TB-14 ve TB-15 numunelerinin $KL/r-b/t$ -TTY Y grafiği.	308
Şekil 6.6 : TB-16, TB-17 ve TB-18 numunelerinin $KL/r-b/t$ -TTY Y grafiği.	308
Şekil 6.7 : TB-19, TB-20 ve TB-21 numunelerinin $KL/r-D/t$ -TTY Y grafiği.	309
Şekil 6.8 : Tüm numunelerin $KL/r-D/t$ -TTY Y grafiği.	310
Şekil 7.1 : S4R kabuk elemanının genel görünüşü (ABAQUS, 2014).	312
Şekil 7.2 : TB-1 numunesini oluşturan parçalar: (a) Alt bayrak levhası. (b) Üst bayrak levhası. (c) Kutu 60x60x3 profil.	312
Şekil 7.3 : TB-10 numunesini oluşturan parçalar: (a) Alt bayrak levhası. (b) Üst bayrak levhası. (c) Kutu 50x50x4 profil.	313
Şekil 7.4 : TB-1 numunesine ilişkin analiz modeli.	314
Şekil 7.5 : Zayıflatılmış uç bölgesindeki sıklaştırılmış sonlu eleman ağı.	315
Şekil 7.6 : Orta bölgedeki sıklaştırılmış sonlu eleman ağı.	315
Şekil 7.7 : Üst bayrak levhasına yerdeğiştirmelerin uygulandığı nokta.	316

Şekil 7.8 : Gerçek ve mühendislik eğrileriyle karşılıklı noktaların değişimi (Ay (2012)'den uyarlanmıştır.).....	317
Şekil 7.9 : Pekleşme üstelinin değişimi ile gerçek gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin değişimi arasındaki ilişki (Karataş, 2012).....	318
Şekil 7.10 : TB-1 için deneysel ve kuramsal histeretik eğrilerlerinin karşılaştırılması.	321
Şekil 7.11 : TB-1 numunesinin basınç etkisindeki durumu: (a) Genel burkulma. (b) Yerel burkulma.	322
Şekil 7.12 : TB-1 numunesinin orta bölgesindeki şekildeğiştirme eğrileri.	323
Şekil 7.13 : Kopma sonrasında TB-1 numunesinin orta bölgenin durumu.	324
Şekil 7.14 : TB-10 için deneysel ve kuramsal histeretik eğrilerlerinin karşılaştırılması.	324
Şekil 7.15 : TB-10 numunesinin sonlu eleman analizi ve deneylerdeki genel davranış: (a) Analizde numunenin burkulmuş durumu. (b) Deneyde numunenin burkulma modu.(c) Analizde orta bölgede yerel burkulma oluşmaması.	325
Şekil 7.16 : TB-10 numunesinin zayıflatılmış uç bölgesinin durumu: (a) Sonlu eleman analizi sonucundaki gerilme yığılması. (b) Deneyde alt uç zayıflatılmış kesitindeki gerilme yığılması ve boğum oluşumu.	326
Şekil A.1 : TB-1 ve TB-2 numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri. ...	343
Şekil A.2 : TB-3 ve TB-4 numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri. ...	344
Şekil A.3 : TB-5 ve TB-6 numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri. ...	345
Şekil A.4 : TB-7, TB-8 ve TB-9 numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.	346
Şekil A.5 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.	347
Şekil A.6 : TB-13 ve TB-14 numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.	348
Şekil A.7 : TB-15 ve TB-16 numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.	349
Şekil A.8 : TB-17 ve TB-18 numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.	350
Şekil A.9 : TB-19,TB-20 ve TB-21 numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.	351
Şekil B.1 : TB-1 numunesi yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	353
Şekil B.2 : Deney düzeneği yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	355
Şekil C.1 : TB-2 numunesi yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	357
Şekil C.2 : Deney düzeneği yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	359
Şekil C.3 : Guse levhaları yatay kuvvet – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	359
Şekil C.4 : CFRP plakalar yatay kuvvet – eksenel şekil değiştirme histeretik eğrileri.	360
Şekil D.1 : TB-3 numunesi yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	361
Şekil E.1 : TB-4 numunesi yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	363
Şekil E.2 : Deney düzeneği yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	365
Şekil F.1 : TB-5 numunesi yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	367
Şekil G.1 : TB-8 numunesi yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	369

Şekil G.2 : Deney düzeneği yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	371
Şekil H.1 : TB-9 numunesi yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	373
Şekil H.2 : Deney düzeneği yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	375
Şekil I.1 : TB-10 numunesi yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	377
Şekil I.2 : Deney düzeneği yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	379
Şekil J.1 : TB-11 numunesi yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	381
Şekil J.2 : Deney düzeneği yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	383
Şekil K.1 : TB-12 numunesi yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	385
Şekil K.2 : Deney düzeneği yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	387
Şekil L.1 : TB-13 numunesi yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	389
Şekil M.1 : TB-14 numunesi yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	391
Şekil M.2 : Deney düzeneği yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	393
Şekil M.3 : Bayrak levhaları yatay kuvvet – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	393
Şekil M.4 : CFRP plakalar yatay kuvvet – eksenel şekil değiştirme histeretik eğrileri.	394
Şekil N.1 : TB-15 numunesi yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	395
Şekil N.2 : Deney düzeneği yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	397
Şekil N.3 : Bayrak levhaları yatay kuvvet – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	397
Şekil O.1 : TB-16 numunesi yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	399
Şekil P.1 : TB-17 numunesi yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	401
Şekil R.1 : TB-18 numunesi yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	403
Şekil R.2 : Deney düzeneği yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	405
Şekil R.3 : Bayrak levhaları yatay kuvvet – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	405
Şekil R.4 : CFRP plakalar yatay kuvvet – eksenel şekil değiştirme histeretik eğrileri.	406
Şekil S.1 : TB-19 numunesi yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	407
Şekil S.2 : Deney düzeneği yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	409
Şekil T.1 : TB-20 numunesi yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	411

Şekil U.1 : TB-20 numunesi yatay yük – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	
.....	413



CFRP ELEMANLARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ TÜP KESİTLİ ÇELİK ÇAPRAZLARIN HİSTERETİK DAVRANIŞI

ÖZET

Sismik olarak aktif bölgelerde inşa edilen çelik yapılarda uzun yıllardır yatay yük taşıyıcı sistemi olarak çaprazlı çerçeveler kullanılmaktadır. Tüp kesitli (kutu ya da boru) profillerin çapraz olarak kullanılması, bu profillerin özellikle basınç taşıma kapasitelerinin yüksek olması, üretimlerindeki kolaylık v.b. nedenlerle oldukça yaygındır. Yıkıcı depremler sonrası yapılan incelemelerde tüp çaprazların birçoğunun çekme etkisinde birleşim bölgeleri civarından kopmasına karşın bir bölümünün de çaprazların orta bölgelerinde oluşan yerel burkulmalar sonrasında koptuğu/göçtüğü belirlenmiştir. Bu incelemelere koşut olarak yapılan çalışmalar zayıflatılmış uç kesitlerin çelik plakalarla güçlendirilmesini ve çapraz kesitinin belirli bir yerel narinlikten daha küçük olarak seçilerek yerel narinlik (yerel burkulma) etkisinin azaltılmasını önermiştir. Özellikle mevcut çaprazların zayıflatılmış uç bölgeleri güçlendirilirken şantiyede kaynak prosesi dikkate alınmadan uygulanacak kaynak sonucunda ısı işlem görmüş (Heat Affected Zone – HAZ) gevrek bölgelerin oluşması kaçınılmazdır. Ayrıca, mevcut yapıların çoğunda tüp çaprazlarda yerel narinlik koşullarına uyulmadığı ve böylece erken yerel burkulma oluşma olasılığı bulunduğu görülmektedir. Buna ek olarak, güncel uluslararası deprem yönetmeliklerinde ve Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik-2007’de yerel narinlik sınırlarına uyulması durumunda, çapraz eleman basınç kapasitesine ulaşana kadar yerel burkulma oluşmaması garanti altına alınmıştır. Buna karşın, yapılan pekçok çalışmada bu sınır değerlere uyulsa bile yön değiştiren tekrarlı yükler altında yerel burkulmanın kaçınılmaz olduğu görülmüştür.

Çelik eğilme elemanlarının güçlendirilmesinde kullanımı pek de yeni olmayan CFRP elemanların çelik çaprazlarda kullanılması ve deneysel olarak incelenmesi sınırlı kalmıştır. Bu çalışmanın özgün yönlerinden biri, bu tür kompozitlerin burkulma elemanlara uygulanması ve böylece olası yerel burkulmanın ya da zayıflatılmış uç kesitten kopmanın geciktirilmesidir. Böylece, kompakt enkesitli ve genel narinliği yüksek tüp profillerde yalnızca zayıflatılmış uç kesitlerin, genel narinliği düşük ve yerel narinliği yüksek (kompakt olmayan enkesitli) çaprazlarda ise zayıflatılmış uç kesitlerle birlikte açıklık ortası kesitlerin (kritik kesitlerin) bölgesel olarak CFRP elemanlarla güçlendirilmesi önerilmektedir.

Yalnızca zayıflatılmış kesit güçlendirmesini incelemek için 5 adet kutu enkesitli numune ve zayıflatılmış kesit ile yerel burkulma bölgesi güçlendirmelerini incelemek için ise yerel olarak narin 12 adet kutu ve 3 adet boru enkesitli numune olmak üzere toplam 20 adet gerçeğe yakın ölçekli numune AISC yönetmeliklerine göre tasarlanmış ve üretilmişlerdir. Üretilen tüp çaprazlar, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı’nda bu tez için özel olarak tasarlanmış çok amaçlı deney düzeneğinde kopmaya ulaşınca kadar denenmişlerdir. Numuneler yedi gruba ayrılmış olup bu grupların altısında üç adet numune, yalnızca birinde ise iki adet numune yer almıştır. Her grupta bir numune kontrol (yalın,

güçlendirilmemiş) numunesi olarak tasarlanmıştır. Maksimum 250kN çekme ve itme kapasiteli, toplam ± 300 mm yerdeğiştirme uygulayabilen hidrolik veren ile numunelere çekme ve basınç kuvvetleri, akmadan önce ve sonra yerdeğiştirme kontrollü olarak uygulanmıştır. Numunelerden on sekiz adedi ATC-24 (1992)'te verilen yön değiştiren tekrarlı yükleme ve iki adedi ise SAC/BD-00/10 (Krawinkler ve diğ., 2000) yakın fay etkisi yükleme protokolleri kriterlerine uygun olarak denenmişlerdir. Numunelerin üretildiği çelik malzemelerin mekanik özelliklerini tam olarak belirleyebilmek için çok sayıda çekme deneyi numunesi öngörülen ASTM-A370-08a (2008) standardına uygun boyutlarda hazırlanmıştır. Malzeme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre hesaplar tekrarlanarak numunelerin akma noktaları belirlenmiştir.

Önerilen güçlendirme yöntemi, varolan literatür incelendiğinde bölgesel olması açısından özgünlüğünü korumaktadır. Deneyler sonucunda elde edilen veriler ışığında yerel narinliği 14 ila 17 arasında olan kutu kesitli çaprazların kopma ile yakından ilişkili tanımlanmış toplam yatay yerdeğiştirmeleri (TTY) ve yerdeğiştirme sünekliklerinin zayıflatılmış uç ve orta bölgelerinde CFRP elemanlarla yapılacak bölgesel güçlendirmeler ile etkili bir biçimde arttırılabileceği görülmüştür. Yerel narinliği 14'ten küçük olan numunelerde uç zayıflatılmış kesit bölgeleri daha kritik rol oynadığından bu çaprazlarda yalnızca zayıflatılmış uç bölgelerin CFRP ile güçlendirilmesi, çaprazın TTY'sine ve yerdeğiştirme sünekliğine katkı sağlamaktadır. Çaprazın orta bölgesi için önerilen güçlendirme; en az çaprazın temiz uzunluğunun üçte biri boyunda ve en az iki kat CFRP kumaş sargının uygulanmasıdır; CFRP kumaşın lifleri sargı yönünde olmalıdır. Zayıflatılmış uç bölgeler için ise, güvenlik faktörü en az 2 alınarak hesaplanan yapışma dayanımına ve yük taşıma kapasitesine sahip CFRP plakaların zayıflatılmış kesitin iki yanına uygulanması ve çapraz içine doğru olan bölgesinin aderansı arttırmak amacıyla en az 2 kat CFRP kumaş ile sarılması önerilmektedir. Yerel narinliğin 20 ve daha fazla olduğu çaprazlarda orta bölgeye yapılan güçlendirmenin TTY'ye katkı sağlamadığı, 17 ila 20 arasında etkinliğin düştüğü belirlenmiştir. Yükleme protokolü hem çaprazın genel davranışı hem de güçlendirmenin etkinliği üzerinde oldukça söz sahibidir. Yakın fay yükleme protokolü etkisinde yerel güçlendirmenin etkisiz olduğu görülmüştür. Ayrıca, çelik çaprazların yön değiştiren tekrarlı yükleme etkisindeki karmaşık olan histeretik davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesine katkı sağlamak amacıyla iki adet yalın numune ABAQUS 6.14 programı kullanılarak gerçeğe yakın olarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Bu kuramsal çalışma sonunda kararlı çapraz histeretik davranışına ulaşılmış ve deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak kopmanın modellenmesi dışında oldukça benzer oldukları görülmüştür. Çalışmanın ana bölümlerinin kapsamı aşağıda özetlenmiştir:

Birinci Bölüm'de çalışmanın amacı, konusu, kapsamından söz edilerek kullanılan yöntemler hakkında bilgiler verilmiştir.

Çaprazların karmaşık histeretik davranışları ve CFRP elemanların çelik ile birlikte kullanılmasındaki mevcut durumun anlaşılması amacıyla önceki çalışmalar İkinci Bölüm'de aktarılmıştır. Ayrıca, güncel yönetmeliklerde tüp çaprazların tasarımıyla ilgili verilen kurallar özetlenmiştir.

Üçüncü Bölüm'de bu çalışma için özel olarak tasarlanan L-biçimli çelik yükleme çerçevesinin tasarımı ve stabilitesinin sağlanmasıyla ilgili detaylar verilmiştir. Numunelerin kupon testleri, tasarımı, üretilmesi, CFRP ile güçlendirilmesi ve deney ölçüm düzeneği üzerinde detaylı olarak durulmuştur.

Deneylerde kullanılan yükleme protokolleri, numunelerin gerçek malzeme özellikleri dikkate alınarak yapılan itme analizlerinden elde edilen sonuçlar Dördüncü Bölüm’de verilmiştir. Ayrıca, herbir numunenin deney gözlemleri detaylı olarak sunulmuştur.

Bölüm 5’te ise çapraz numunelerin deneylerinin değerlendirilmesi için göz önüne alınacak performans kriterleri açıklanmıştır. Buna ek olarak deney sonuçları her numune grubu içinde incelenerek kapsamlı karşılaştırmalar yapılmıştır.

Deney sonuçlarının karşılaştırılmasından elde edilen çıkarımlar Bölüm 6’da verilmiştir.

Yedinci Bölüm’de kuramsal çalışmanın detaylarına yer verilerek sonlu eleman (FEM) modeli ve yapılan varsayımlar detaylı olarak aktarılmıştır. Ayrıca, analizi tamamlanan numunelerin deneysel ve sonlu eleman analizi sonunda elde edilen histeretik eğrilerinin karşılaştırılması verilerek değerlendirilmesi yapılmıştır.

Son bölüm olan Sekizinci Bölüm’de elde edilen genel sonuçlar değerlendirilerek sonraki araştırmacılar için önerilerde bulunulmuştur.

Deneysel sonuçlar, tüp çaprazların kümülatif enerji yutma kapasiteleri ve TTY’lerinin, CFRP elemanlarla yapılan bölgesel güçlendirmeyle artırılabilceğini göstermiştir. Üretilen tüp kesitli numunelerin belirli narinlik sınırı altında kalınması koşuluyla sünekliklerinde belirgin artış olabileceği ve buna bağlı olarak tükettikleri histeretik enerjinin de artacağı belirlenmiştir. Önerilen güçlendirme yönteminin mevcut tüp çaprazlı çelik binaların güçlendirilmesinde davranışın iyileştirilmesi bakımından etkin rol oynamanın yanında uygulamaya getirdiği kolaylık ile önemli üstünlük ve ekonomi sağlayacağı görülmüştür.



HYSTERETIC BEHAVIOR OF TUBULAR STEEL BRACES RETROFITTED WITH CFRP MEMBERS

SUMMARY

Steel braced frames have been used in structures located in seismic regions for many decades. Use of tubular sections (box or pipe) in structures as braces is widespread in construction industry due to their high compression capacity and ease of production. Reconnaissance investigations carried out following destructive earthquakes showed that most tubular braces failed from net sections of end connections under tension effects while some of them failed at mid-sections due to local buckling under repeated compression forces. In parallel with these findings, many previous studies suggest to retrofit net sections of tubular braces using steel plates and to decrease local buckling effects by selecting sections having local slenderness less than a certain limit. Specifically, brittle heat affected zones (HAZ) occur inevitably when existing tubular braces are retrofitted with on-site welded steel plates mainly due to inappropriate welding process. In addition, tubular braces in most of the existing older structures do not meet local slenderness requirements, leading to possibility of early local buckling. Moreover, updated international seismic codes and *Specification for Buildings to be Built in Seismic Zones-2007* state that brace members shall never suffer from local buckling until the braces reach their axial compression capacities, given that brace sections meet local slenderness limits. However, many studies have indicated that even when these limit values were met, local buckling was inevitable under reversed cyclic loading.

Application of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites in steel bracings and their experimental investigations have been somewhat limited when compared to their use on steel bending members. One of the original aspects of this work is the application of such composite materials to buckling of compression members, and thus to delay possible local buckling and fracture from net sections. Consequently, only net section reinforcement for compact and slender tubular sections and, local reinforcements at mid-section and net section for noncompact and stocky braces are recommended.

A total of 20 specimens was designed per AISC codes and produced; 5 specimens (box section) to investigate only net section reinforcements, 12 specimens (box section) and 3 specimens (pipe section) to investigate reinforcements of net sections and local buckling region were tested until fracture at Structural and Earthquake Engineering Laboratory (STEEL) of Istanbul Technical University (ITU) using a test set-up specially designed for this study. Specimens were divided into 7 groups of 3, only one group containing 2 specimens. Each group had one reference (unretrofitted or bare) specimen. Tension and compression forces were applied to all specimens with displacement controlled loading histories using a hydraulic actuator having a tension and compression capacities of 250 kN, and a total displacement capacity of ± 300 mm. 18 specimens were tested following the ATC-24 (1992) cycling loading protocol, and two specimens were tested per SAC/BD-00/10 near fault loading protocol. Coupon tests were carried out to get actual material properties per ASTM-

A370-08a (2008). Actual material properties were used to estimate yield points of the specimens.

The proposed retrofitting method preserves its originality in terms of being local when the existing literature is reviewed. Experiments showed that fracture lives and displacement ductilities of box specimens having local slenderness of between 14 and 17 were effectively increased using local CFRP reinforcements at mid and net sections. End net sections were more critical when local slenderness of box sections was less than 14, therefore only end section reinforcements contributed effectively to fracture lives and ductilities of such specimens. The proposed retrofit method at mid section of braces was partially wrapping this region at least 1/3 of clear brace length with at least two layers of CFRP; note that all fibres in CFRP is to be in the direction of wrap. Factor of safety was taken at least 2.00 while calculating the bond strength of adhesive and load carrying capacity of CFRP plate for end net sections. Also, two layers of CFRP sheet wrap were applied after having CFRP plates on two sides of end net section. Mid-span retrofit does not provide any improvement on fracture life when local slenderness equals to 20 or greater. In addition, effectiveness of mid-span retrofit significantly decreased when local slenderness was between 17 and 20. Local retrofitting method was ineffective under near fault loading history. Moreover, two reference specimens were modeled and analyzed using ABAQUS 6.14 in order to understand the complex hysteretic behavior of such braces under cyclic loading. Stable hysteretic behaviors were acquired and were quite similar when compared with experimental results. Note that fracture is not modeled in this work.

Contents of the main chapters of this thesis are given below:

In the first chapter, aim and scope of study are explained and information on the methods followed are elucidated.

Literature review on complex hysteretic behavior of braces and current situation of CFRP application on steel members are explained in Chapter 2. In addition, tubular brace design rules in current design codes are summarized.

Design steps of L-shaped test setup and special details providing stability to setup are given in Chapter 3. Moreover, coupon tests, design and manufacturing of specimens, CFRP retrofitting details, and instrumentation of the test setup are explained in detail.

Detailed information on loading histories and results from pushover analyses using actual material properties are given in Chapter 4. Furthermore, experimental observations for each specimen are presented herein chapter.

Chapter 5 is devoted to the explanations on performance criteria to evaluate the results of bracing tests. In addition, test results are discussed for each specimen and comprehensive comparisons are carried out.

Main findings derived from the test results are given in Chapter 6.

Chapter 7 includes details of the theoretical study, finite element model (FEM), and assumptions used in the analyses. Moreover, hysteretic curves from tests and finite element analyses are compared and interpreted.

In Chapter 8, general results are evaluated and suggestions for potential future studies are made.

Results from this experimental study showed that local/partial retrofitting using CFRP members could increase cumulative energy dissipation capacity of steel tubular braces and extend their fracture lives. It is determined that there will be significant increases in ductility and the hysteretic energy dissipation provided that the produced tube specimens are kept below a certain slenderness limit. The proposed retrofitting method plays an effective role in retrofitting of existing tube braced steel buildings in terms of improving their seismic behavior. Besides that, it is believed the proposed method could be cost effective since it provides significant advantages as discussed and also much easier to implement in practice.





1. GİRİŞ

1.1 Motivasyon

Çelik çaprazlı çelik çerçeveler yatay deprem yüklerinin karşılanmasında önemli rol oynamaktadırlar. Bu tür çerçevelerin davranışları her bir çaprazın histeretik davranışına büyük ölçüde bağlı olup büyük depremler sırasında sistemdeki çaprazlar büyük eksenel uzama ve kısalmalar (ya da çekme ve basınç gerilmeleri) etkisinde kalmaktadır (Çelik ve diğ., 2005; Tremblay, 2002). Çelik çaprazlar simetrik olmayan ve özellikle elastik olmayan bölgede karmaşık histeretik davranışa sahiptir. Tüp enkesitli çaprazlar ise yüksek dayanımları, rijitlikleri ve yüksek kapasite/ağırlık oranlarına sahip olmalarından dolayı çok tercih edilmektedir. Merkezi çelik çaprazlı çerçevelerin tüp enkesitli çaprazları, yatay yükler altında oluşan tekrarlı eksenel çekme ve basınç kuvvetleri etkisinde kaldıklarında, en çok uç ve orta bölgelerinde zorlanmaktadırlar (Han ve diğ., 2007a,b); bu bölgeler gerçekte plastik mafsalları oluşması beklenen bölgelerdir. Çapraz ve bayrak levhası birleşimlerinde oval uç detayının kullanılması, zayıflatılmış kesitin çapraz davranışını önemli ölçüde etkilemesine neden olur. Bunun yanında, özellikle yerel olarak kompakt olmayan kesitlerden üretilen çaprazlarda orta bölgede tekrarlı yükleme altında “yerel burkulma” beklenmektedir. Uygun olarak tasarlanmamış ya da üretim hataları içeren zayıflatılmış uç kesitlerde ya da yerel burkulmadan dolayı orta bölgede erkenden oluşan kopmalar, çelik çerçeve sistemlerinde ani rijitlik/dayanım azalmasına ve bunun bir sonucu olarak da yapısal sistemde istenmeyen yumuşak/zayıf kat düzensizliğinin meydana gelmesine yol açabilmekte, bu katın göçmesi ile sistem taşıma gücünü tümünden yitirebilmektedir.

Tüp kesitli çaprazların histeretik davranışlarının iyileştirilmesi ve zayıflatılmış uç kesitlerde oluşabilecek olası erken kopmaların geciktirilmesi ya da engellenmesi için bazı geleneksel ve kompozit malzemelerle yerel güçlendirme yöntemleri uygulanabilmektedir (Han ve diğ., 2007a,b). CFRP ya da GFRP kompozit malzemeler ile yapılan güçlendirmeleri içeren çalışmalarda, kritik bölgeler bu

çalışmada açıklanana benzer biçimde korunmuştur. Bunlardan en yaygını, mevcut çapraz elemanın zayıflatılmış uç kesitlerinin sağ ve solundaki düzlem dışı yüzeylere toplam iki adet çelik levhanın kaynaklanmasıdır. Mevcut çapraz elemana yapılacak olan kaynaklarda, ön ısıtma ve kontrollü soğutmadan oluşan kaynak işlemi uygulanmadığı zaman kaynak bölgesinin etrafında ısıl işleminden etkilenmiş bölge (Heat Affected Zone-HAZ) olarak isimlendirilen, oldukça gevrek bölgeler oluşmakta ve bu durum deprem etkilerine karşı güçlendirmeler gibi sünekliğin önemli olduğu durumlarda yapısal davranış açısından uygun olmamaktadır.

CFRP ya da GFRP, diğer malzemelerle karşılaştırıldıklarında, kesit kapasitelerinin arttırılmasında etkili olmalarına karşın çelik elemanlar üzerinde sınırlı uygulamalara sahiptir. Bunun yanı sıra, CFRP ve GFRP betonarme ve yığma/kargir yapıların deprem etkilerine karşı güçlendirmelerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, yoğun biçimde kullanılan çelik elemanlarla iyileştirmeye alternatif olarak, yüksek dayanımlı kompozit malzemelerden CFRP kumaş ve plakalarla çaprazların zayıflatılmış uç kesitlerinde ve yerel burkulma beklenen orta bölgelerinde yerel güçlendirmeler yapılarak histeretik davranışın iyileştirilmesi ve olası erken kopmaların geciktirilmesi ya da engellenmesi ilk kez önerilmiş ve bu yöntemin geçerliliği deneylerle kanıtlanmıştır. Deneysel çalışma, seçilen yalın numunelerin ABAQUS 6.14 (2014) programı kullanılarak oluşturulan sonlu eleman modelleri ile sayısal olarak desteklenmiştir.

1.2 Amaç

Mevcut kesit ve sistem özellikleri nedeniyle enerji yutma kapasiteleri ve kopmayla yakından ilişkili tanımlanmış toplam yatay yerdeğiştirmeleri (TTY) az olan tüp çaprazların enerji yutma kapasitelerinin ve TTY'lerinin, zayıflatılmış uç enkesit ve yerel burkulma olabilecek orta bölgelerinde, CFRP plaka ve/ya da kumaşlarla yeterli miktar ve uzunlukta güçlendirilerek arttırılması amaçlanmaktadır. Bu yolla, özellikle deprem yükleri altında çaprazlı sistemlerde daha sünek bir davranışın elde edilebileceği hedeflenmektedir. Genel narinlik, yerel narinlik ve CFRP sarılma bölgesi uzunluğu oranları çalışmanın ana parametreleri olarak seçilmiştir. Tüp çaprazlarda kopma öncesi yerel burkulmanın kompakt kesitler kullanılması durumunda bile engellenememesi, ancak geciktirilebileceği önceki çalışmalarda görülmüştür. Yerel burkulmayı tüp kesitin köşe noktalarından başlayan yırtılmalar

izlemektedir. Bu çalışma özellikle bu göçme mekanizmasını daha geciktirici bir önlem almaya yöneliktir.

Burkulması bir yolla önlenmiş ya da geciktirilmiş çaprazlı sistemlerin yoğun olarak incelendiği günümüzde böylesi bir çalışmanın yapılması seçilen tez konusunun güncelliğini ortaya koymaktadır.

Herbir numuneye ilişkin deneyden, eksenel kuvvet-eksenel boy değişimi histeretik eğrilerinin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu yolla, farklı şekillerde CFRP kumaş ile sarılmış ve sarılmamış yalın çaprazların histeretik eğrileri karşılaştırılacaktır. Şekildeğiştirme ölçer okumaları kesitlerdeki gerilme ve deformasyon ilişkisini verecektir. Bunları kullanarak deneysel burkulma boyları da hesaplanabilecektir. Histeretik eğrilerden herbir numuneye ilişkin enerji yutma kapasiteleri, çaprazların düzlem dışı yerdeğiştirmeleri, eksenel çekme ve basınç taşıma güçleri, bu değerlerin yükleme geçmişine bağlı olarak değişimleri ve TTY'leri elde edilip karşılaştırılabilecektir.

Bu verilere dayanarak CFRP kumaş ile sargılamanın etkinliğinin tartışılması amaçlanmaktadır. Uygun sargı bölgesi uzunluğu/çubuk uzunluğu oranlarının elde edilip buna yönelik olarak tasarım kriterlerinin geliştirilmesi hedeflenmektedir.

1.3 Kapsam ve Yöntem

Çelik çaprazlı sistemler deprem bölgelerinde yeterli rijitlik, dayanım ve süneklik elde etmek amacıyla sıkça kullanılmaktadır. Ancak, deprem yüklerinin yön değiştiren özelliği nedeniyle çaprazlarda çekme ve basınçta oluşan gerilmeler kritik değerlere ulaşmaktadır. Bu şekilde çaprazlar ardışık olarak akma ve burkulma etkisinde kalırlar ve sisteme giren enerjiyi büyük ölçüde yutarlar.

Çaprazlarda eksenel kuvvet-eksenel yerdeğiştirme histeretik eğrileri genelde simetrik değildir ve çubuğun genel ve yerel narinliğine çok bağlıdır. İkinci ve sonrasındaki yük çevrimlerinde, çaprazın basınç dayanımı Baushinger etkisine ve önceki yük çevrimlerinden kalan artık düzlem dışı deformasyonlara bağlı olarak ciddi bir şekilde azalmaktadır. Çaprazlarda oluşabilecek erken kopmalar yumuşak kat gibi düzensizliklerin oluşmasına neden olarak yapının depremde genel davranışını tamamen etkilemekte, enerji yutma kapasitesini ve genel stabilitesini azaltmaktadır.

Mart 2007’de yürürlüğe giren “*Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*”te yeni yapılacak binalarda tüp kesitler kullanılırken yerel burkulmaların önlenmesi için profilin b/t oranının belli bir değerden küçük olması kesit seçiminde ön koşul olarak kabul edilmiştir.

Tüp çaprazlardan kare kesitli olanlar uygun kesit özellikleri nedeniyle binalarda ve köprülerde yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada da olası diğer parametreleri azaltmak ve belirgin sonuçlara ulaşabilmek amacıyla kare tüp kesitler seçilmiştir. Buna ek olarak, dairesel tüp kesitlerin genel davranışını da incelemek için üç numuneden oluşan bir grup da denenmiştir.

Sonuçta, CFRP malzeme ile güçlendirilen çaprazların enerji yutma kapasiteleri ve TTY’lerinin artırılması, bu tür çaprazlarla oluşturulan yapıların deprem yükleri altındaki genel davranışını iyileştirecektir. Mevcut yapılarda bu tür bir uygulama rijitlik artışına neden olmayacağından, yapının dinamik özelliklerinde bir değişikliğe yol açmayacak olup, özellikle mevcut çaprazlı çerçevelerin yapıların güçlendirilmesinde bir üstünlük olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu çalışma, CFRP elemanlarla güçlendirilmiş çelik tüp çaprazların doğrusal olmayan histeretik davranışlarının deneysel olarak incelenmesinden elde edilen bulguları içermektedir. Elde edilen dayanım, rijitlik, en büyük yerdeğiştirme süneklikleri, tüketilen kümülatif enerji miktarları ve TTY’leri karşılaştırılmıştır. Yapılan deneyler yardımıyla çaprazlarla ilgili varolan deneysel veri tabanına önemli katkıda bulunulmuştur. Deneysel sonuçlar, aynı süneklik seviyesinde CFRP elemanlarla bölgesel olarak güçlendirilmiş numunelerde kümülatif tüketilen enerji miktarında ve TTY’lerinde belirgin miktarda artış olduğunu göstermiştir.

Bu tez çalışması büyük oranda deneysel ve sınırlı miktarda kuramsal çalışma olmak üzere başlıca iki ana bölümden oluşmaktadır.

Deneysel çalışma adımları şunlardır:

- Deney düzeneğinin tasarımı
- Numunelerin tasarımı
- Numunelerin ve deney düzeneğinin detaylarının belirlenmesi
- Gerekli ölçüm cihazlarının belirlenmesi ve konumlandırılması

Buna göre, Türkiye’de en çok kullanılan malzeme kalitesinde, on yedi adet kare ve üç adet dairesel t p kesit olmak üzere toplam yirmi adet gerçeğe yakın ölçekli numune İstanbul Teknik Üniversitesi, Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında (STEEL) y n de i tiren tekrarlı yükler altında kopmaya kadar denenmi lerdir. Yükleme protokolü olarak ATC-24 (1992) kullanılmıştır. Tüm numuneler AISC (2016a,b) (LRFD ve Seismic Provisions) yönetmeliklerine göre tasarlanmıştır. Deneyler yerdeğiştirme kontrollü olarak yapılmıştır.

Kuramsal çalışmada ise yeterliliği kanıtlanmış bir program olan ABAQUS 6.14 yardımıyla yalın deney numunelerin sonlu eleman modeli oluşturularak deney numunelerinin deneylerde kullanılan yükleme protokolleri etkisinde ve gerçek malzeme özellikleriyle doğrusal olmayan hesabı gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, deneysel çalışmadan elde edilen verilerle kuramsal çalışmadan elde edilenler kar ıla tırılmı tır.



2. ÇELİK ÇAPRAZLARIN HİSTERETİK DAVRANIŞI VE ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1 Genel

Çelik yapılarda deprem etkileri altında yeterli dayanım ve rijitlik ile sünek davranışın sağlanması ve görelî kat ötelemelerinin belirli sınırlar içinde tutularak kontrol altına alınması için değişik biçimlerde çaprazlı sistemler kullanılmaktadır. Çapraz elemanın karmaşık olan temel davranışının anlaşılmasının önemi yanında, bu tez kapsamında yapılan çalışmalar ile çok yakından ilgili olduğundan, burada öncelikle bu davranış kısaca özetlenecektir. Birçok kuramsal ve deneysel çalışmada çelik çaprazların karmaşık ve doğrusal olmayan davranışları incelenmiştir. Betonarme ve yığma kargir yapıların yapı bileşenlerinin iyileştirilmesinde yoğun olarak kullanılmaya başlanan CFRP ve GFRP gibi kompozit malzemeler çelik yapılarda da yerel ve genel stabilite sorunlarının önlenmesinde, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve rijitliklerin yanısıra yorulma dayanımının da arttırılmasında da sınırlı olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Çelik yapılarda ileri kompozitlerle iyileştirme üzerine araştırma ve uygulamalar başta ABD, Japonya ve Çin olmak üzere yaygınlaşmakta olup, Türkiye’de ise İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı’nda yürütölmektedir. Bölüm 2.2’de tipik bir çelik çaprazın temel histeretik davranışı özetlenmiştir. Bölüm 2.3’te çapraz elemanlarla ilgili önemli sayılabilecek önceki çalışmalara yer verilmiş, Bölüm 2.4’te çelik yapılar üzerine uygulanan FRP malzemelerle ilgili son çalışmalar üzerinde durulmuştur. Bölüm 2.5 ise güncel deprem ve çelik tasarım yönetmeliklerinde kutu ve boru profiller için verilen kurallara ayrılmıştır.

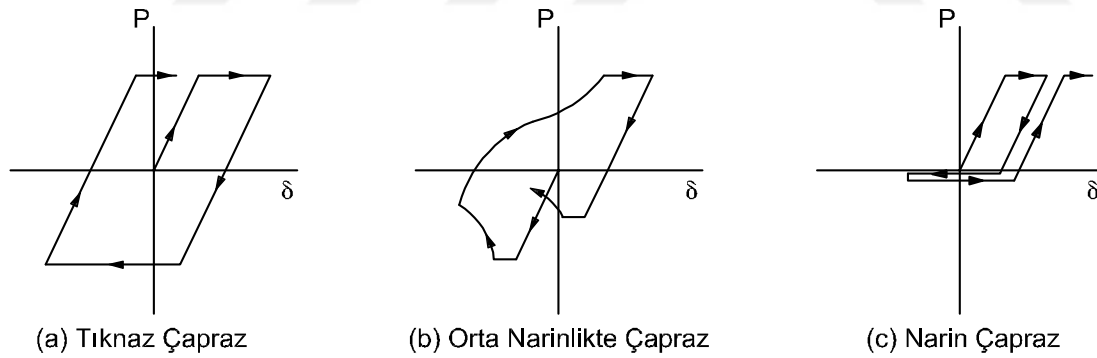
2.2 Çelik Çaprazın Histeretik Davranışı

Çelik yapılardaki çaprazlar, önemli depremler sırasında önemli noktalara varan yön değıştiren tekrarlı eksenel yükler etkisinde kalırlar. Bu yükler altında çaprazlarda doğrusal olmayan bölgede ardışık olarak tümsel ya da yerel olarak burkulma oluşabilir. Kuramsal ve deneysel çalışmalara göre, çelik çapraz tasarımında sünek

detayların kullanılmasıyla çaprazların deprem sırasında yüksek miktarda sismik enerji yutmaları mümkündür.

Tekrarlı yük etkisinde kalıcı/artık kusurların artması ve tanjant/teğet modülündeki histeretik azalma (Baushinger Etkisi) çapraz elemanın tekrarlı yükleme etkisinde burkulma dayanımının azalmasından kısmen sorumludur. Çapraz elemanların bu karmaşık burkulma ötesi davranışları çevre çerçevelerin ve çapraz birleşimlerinin tasarımında mutlaka göz önüne alınmalıdır.

Çaprazların histeretik eğrileri çelik eğilme elemanlarındakinden daha karmaşıktır. Herşeyden önce, aksel olarak yüklenmiş bir çaprazın histeretik eğrisi simetrik olmayıp kalıcı düzlem içi/dışı yerdeğiştirme nedeniyle her çevrimde burkulma dayanımında önemli azalmalar oluşmaktadır. Genel olarak değişik narinlik seviyelerine sahip çaprazların basitleştirilmiş davranışları Şekil 2.1’de şematik olarak gösterilmiştir. Burada P ve δ sırasıyla aksel yükü ve buna karşılık gelen aksel yerdeğiştirmeyi göstermektedir. Kısa çaprazlar belirgin bir burkulma göstermezler ve kuramsal olarak çekme ve basınç davranışları birbirlerine eşit/çok yakın olup uzun çaprazlara göre daha stabil bir davranış sergilerler. Burkulması önlenmiş çaprazların (BÖÇ) davranışları kısa çaprazlara oldukça benzerdir.

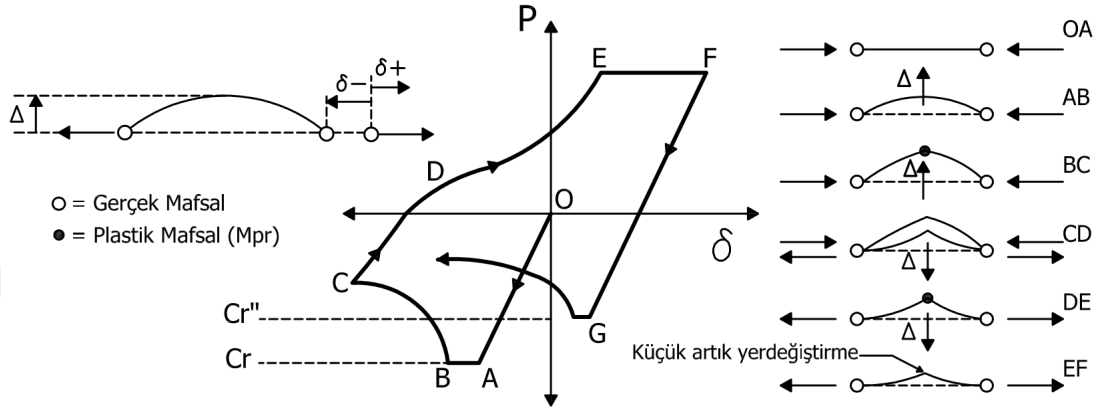


Şekil 2.1 : Narinliğe bağlı olarak çaprazların histeretik davranışlarının basitleştirilmiş gösterimi (Nakashima ve Wakabayashi (1992)’den uyarlanmıştır).

Tıknaz çaprazlardan farklı olarak, narin çaprazlar çekme etkilerinde akmalarına karşılık basınç dayanımına sahip değildirler ya da çekme dayanımları yanında ihmal edilmektedir. Orta narinlikteki çaprazlar ise tıknaz ve narin çaprazlar arasında bir davranışa sahiptir. Bu davranış çok daha karmaşık olup günümüze dek bir çok araştırmacının konusunu oluşturmuştur.

Çaprazların tekrarlı yükler etkisindeki davranışları Şekil 2.2’de detaylı olarak açıklanmıştır (Bruneau ve diğ., 2011). Yüklenebilirlik durumundaki O noktasından

itibaren basınç yükünün arttırılmasıyla burkulmanın olduğu varsayılan A noktasına kadar çapraz doğrusal elastik davranış sergilemektedir. Yeterince narın olması durumunda çapraz elastik olarak burkulabilir ve etkiyen eksenel yük etkisi altında, AB bölgesindeki gibi, düzlem dışına elastik deplasman yapmaktadır. Bu noktaya kadar çapraz elastik davranmış olup basınç yükü kalktığında BAO hattı üzerinde yükün boşalması gerçekleşebilir.



Şekil 2.2 : Tekrarlı eksenel yük etkisindeki bir çaprazın histeretik eğrisi (Bruneau ve diğ., 2011).

Burkulma sırasında çapraz düzlem dışı/içi deformasyon yapar. Çaprazın mafsallı uç noktasıyla orta bölgesi arasındaki yarı boyuna ilişkin serbest cisim diyagramı incelendiğinde, ikinci mertebeye etkileri nedeniyle çaprazın sabit yük etkisinde çapraz boyunca değişen eğilme momentleri etkisinde kaldığı anlaşılmaktadır. Çapraz üzerindeki en büyük momentin düzlem dışı/içi deformasyonun en fazla olduğu noktada olduğu görülmektedir. Kritik bir düzlem dışı/içi yer değiştirme (Δ) değerinde çapraz üzerindeki moment çapraz kesitin plastik moment taşıma kapasitesine ulaşır ve B noktasına gelindiğinde çaprazın orta noktasında plastik mafsallı oluşur. Eğilme plastik mafsallı ile ilişkili olan düzlem dışı/içi yer değiştirme çaprazdaki eğilme momenti-normal kuvvet etkileşiminin derecesine bağlıdır. Eksenel yer değiştirmedeki artış, orta bölgedeki plastik mafsalda oluşan dönmelerden dolayı Δ 'da da artışa neden olur. Çaprazın eksenel dayanımı BC bölümünde hızla azalır. Bunun nedeni orta bölgedeki momentin ($M=P\cdot\Delta$) kesitin plastik moment kapasitesini aşmamasıdır; Δ 'daki artışa karşılık P'de yine hızla azalma görülür. B noktasından C noktasına geçiş karmaşık olup eğilme ve eksenel yük etkileşiminden dolayı doğrusal olmayan bir davranış sergiler. Eksenel yükteki azalma moment kapasitesinde artışa neden olur.

Yükün boşaltılmasıyla C noktasından $P=0$ noktasına giderken çapraz üzerinde artık eksenel yerdeğiştirme (δ) ve gözle görülür biçimde, dirsek şeklindeki artık düzlem dışı/içi yerdeğiştirme (Δ) bulunmaktadır.

Çapraz $P=0$ noktasından D noktasına çekme ile yüklendiğinde elastik davranış sergilemektedir. D noktasında da, önceden B noktası için açıklandığı gibi, eksenel kuvvet ve düzlem dışı/içi yerdeğiştirmenin çarpımı çaprazın plastik moment kapasitesine eşittir ve çaprazın orta noktasında plastik mafsal oluşmaktadır. Buna karşılık, DE parçası boyunca plastik mafsal dönmeleri BC parçası boyunca oluşanların zıt yönünde oluşmakta olup bu davranış düzlem dışı/içi yerdeğiştirme miktarını etkili bir şekilde azaltmaktadır. Sonuç olarak D noktasındakinden daha büyük eksenel kuvvet uygulanabilir. Daha önce yapılan kuramsal modelleme çalışmalarında modellemenin en güç olduğu bölgenin CDE bölgesi olduğu belirtilmektedir (Ikeda ve Mahin, 1984).

Düzlem dışı/içi yerdeğiştirmenin ortadan tamamen kaldırılması mümkün değildir. Düzlem dışı/içi yerdeğiştirmenin sıfıra yaklaşmasıyla kuramsal eksenel kuvvet plastik mafsalda sonsuza giden ek dönmeler oluşturur. Ancak, çapraz üzerindeki kuvvet çaprazın akma çekme kuvvetini (AF_y) aşamayacağından, artık düzlem dışı/içi yerdeğiştirmeler engellenemez. Çapraz basınç etkisinde tekrar yüklendiğinde çapraz başlangıç koşulu olarak orta bölgesindeki düzlem dışı/içi yerdeğiştirmeye sahiptir; burkulma kapasitesi doğal olarak ilk burkulma yükünden çok daha düşüktür.

Çapraz davranışı elastisite modülü, çapraz ve guse elemanlar arasındaki dayanım farkları, birleşimlerin eğilme rijitlikleri gibi birçok parametreden etkilenirken, doğrusal olmayan çapraz davranışı en çok tümsel ve genişlik/et kalınlığı olarak tanımlanan yerel narinlikten etkilenmektedir.

2.3 Çelik Çaprazların Histeretik Davranışıyla İlgili Önceki Çalışmalar

Bu alt bölümde, merkezi çaprazlı çelik çerçevelerle ilgili önceden yapılan öncü/önemli kuramsal ve deneysel çalışmalara yer verilmiştir.

Zayas ve diğ. (1980a) altı adet boru profili yön değiştiren tekrarlı yükler etkisinde denemişlerdir. Numuneler açık deniz yapılarında kullanılan tipte olup 1/6 ölçeğinde üretilmiştir. Uç mesnet koşullarının çapraz davranışına etkisini incelemek için mafsallı, ankastre gibi değişik mesnet biçimleri çalışmanın parametrelerindendir.

Kesit özelliklerinin davranışa etkilerini incelemek için değişik çap/et kalınlığı oranlarına sahip ($D/t = 33$ ve 48) numuneler hazırlanmıştır. Özellikle burkulma dayanımındaki azalma ve yönetmeliklerde verilen burkulma dayanımı bağıntılarının etkileri üzerinde durulmuştur. Sonuç olarak, yön değiştiren tekrarlı yükleme her çevrimin sonunda burkulma yükünde düşüşe neden olmaktadır. Yerel burkulmanın ince cidarlı elemanların göçmesinde önemli rol oynadığı ve yerel burkulmadan dolayı göçmenin geciktirilmesi için daha küçük D/t oranına sahip kesitlerin kullanılması gerektiği önerilmiştir.

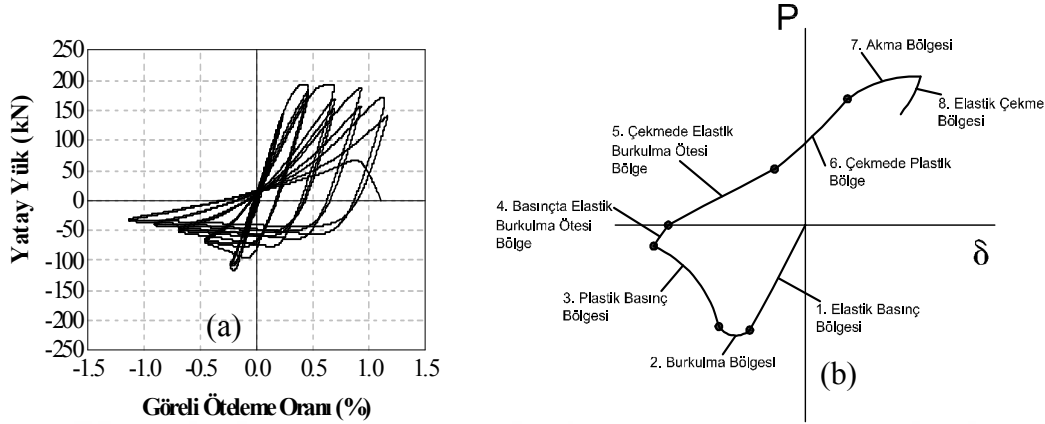
Zayas ve diğ. (1980b), iki adet $1/6$ ölçekli açık deniz kulesi modellerini yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki doğrusal olmayan histeretik davranışlarını incelemiştir. Çalışma kapsamında küçük KL/r ve D/t oranlarına sahip çaprazlar daha iyi performans göstermiştir. Burada K =Etkili burkulma boyu katsayısını, L =Çaprazın tutulu olmayan boyunu, r =Çapraz kesitinin atalet yarıçapını göstermektedir. Elde edilen histeretik eğriler daha dolu olup burkulma dayanımındaki azalma daha düşük miktarda olmuş ve yerel burkulmaya karşı dayanımda artış görülmüştür.

Ikeda ve diğ. (1984), çelik çapraz elemanların karmaşık burkulma davranışlarını elde edebilmek için bir model geliştirmiştir. Bu modele göre kesitler düz parçalardan oluşmaktadır. Modelde burkulma dayanımındaki azalmayı temsil etmek için her doğrusal olmayan çevrim sonunda plastik bölge uzunluğu arttırılmıştır. Önerilen modelin doğruluğunu kanıtlamak için birkaç seri numune test edilerek model kalibrasyonu sağlanmıştır. Sonuç olarak, basitleştirilmiş histeretik kuralları içeren ve deneylerde gözlenen eksenel yük-yerdeğiştirmeleri yeterince doğrulayan bir çapraz modeli ortaya konmuştur.

Ikeda ve Mahin (1984) çelik çaprazların doğrusal olmayan davranışları için fiziksel bir model ortaya koymuşlardır. Çaprazın fiziksel histeretik davranışını Şekil 2.3'de görüldüğü gibi bölgelere ayırmışlardır. Önerilen modelde davranışın daha detaylı olmasına karşın yerel burkulma etkileri terkedilmekte, plastikleşme çapraz boyunca yayılmakta ve Baushinger etkisi yalnızca bölgesel olarak hesaba katılabilmektedir. Bu model kullanılarak yapılan çapraz analizleri sonucunda narin çaprazlar yerine tıknaz çaprazların kullanılması önerilmiştir.

Tremblay (2002) geçmişte yaptığı deneysel çalışmaların sonuçlarından yararlanarak çelik çaprazların inelastik davranışlarını kapsamlı biçimde açıklamıştır. Çalışmada, merkezi çaprazlı çelik çerçevelerin davranışlarını etkileyen, ilk burkulmadaki

maksimum basınç dayanımı, çekmeye çalışan çapraz elemanlar akma durumundayken basınç etkisindeki çaprazlardaki kuvvet, çaprazın maksimum çekme dayanımı, burkulma ötesi minimum dayanım, yanal çapraz deformasyonları ve tüp



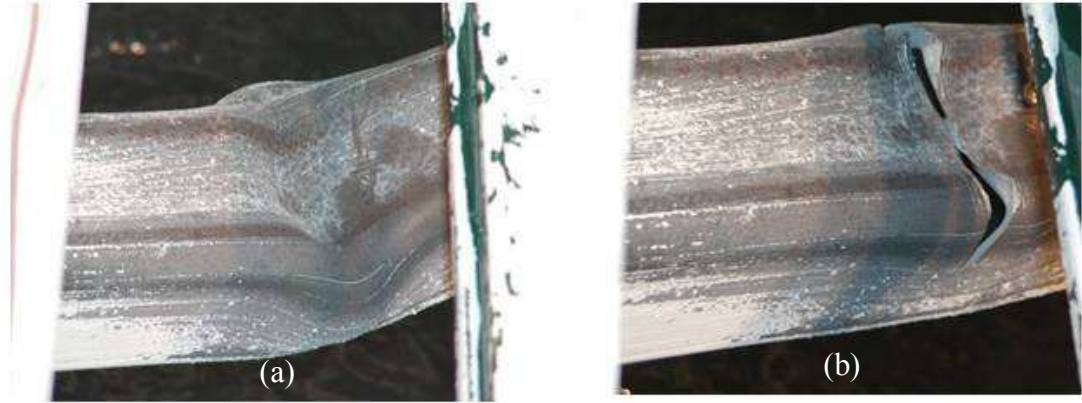
Şekil 2.3 : Çapraz histeretik davranışı: (a) Gerçek histeretik davranış örneği (bu çalışma). (b) Çaprazın histeretik eğrisinin fiziksel anlamı (Ikeda ve Mahin, 1984'ten uyarlanmıştır).

kesitlerin TTYT gibi faktörlerden sözedilmiştir. Tüp kesitlerin sınırlı TTYT'leri, kesitlerin soğuk şekil verme nedeniyle düşük kopma şekildeğiştirmesi kapasitesine sahip olduğu köşe bölgelerde oluşan yerel burkulmalara bağlı aşırı şekil değiştirmelere bağlanmıştır. Yırtılmalar/kopma başlangıcı basınç etkisinden sonra, çekme yüklemesinde yerel olarak burkulmuş bölgede oluşmaktadır. Yerel burkulma, kesitin genişlik/et kalınlığı oranından önemli bir şekilde etkilenmektedir. Ancak, çapraz elemanın global narinliği ve elemanın yüklenme yöntemi/protokolü yerel burkulma üzerindeki en etkili parametrelerdir. Yapılan deneyler sonucunda, kopma anındaki sünekliğin çapraz elemanın global narinliğiyle arttığı ve global narinliği yüksek olan çaprazların düşük olanlara göre TTYT'leri bakımından daha iyi performans gösterdikleri görülmüştür.

Lee ve Bruneau (2002) Çelik çaprazların özellikle basınç etkisinde enerji yutma kapasitelerinin belirlenmesi ve bunun depreme dayanıklı yapı tasarımında etkin olarak kullanılması üzerinde durmuştur. Yapılan hesaplar daha büyük deprem yükü azaltma katsayısı (R) ve KL/r ile tasarlanan binaların daha az kümülatif enerji enerji yuttuğunu göstermiştir. Çalışmada değişik enkesit biçimlerindeki çelik çaprazlar kullanılmıştır. Çalışmada R katsayısı 1, 2, 4, 6 ve 8 değerleri olarak seçilmiştir. KL/r oranları için ise 50, 100 ve 150 değerleri benimsenmiştir. Diğer araştırmacılar tarafından önerilen ve TTYT'lerini veren ampirik bağıntılar ile bu çalışmadan elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilmiştir.

Tremblay ve diğ. (2003) dikdörtgen tüp kesitli merkezi çaprazlı çelik çerçevelerin performanslarını deneysel olarak incelemişlerdir. Gerçek boyutlarda 24 adet numune üretilmiş ve yön değiştiren tekrarlı yükler altında denenmiştir. Numunelere iki türlü yükleme protokolü uygulanmıştır. Denenen tüm çaprazlar düzlem dışına doğru burkulmuştur. Düzlem dışı yerdeğiştirmeler ile sistemin süneklik seviyesi arasında bir ilişki kurulmuştur.

Çelik ve diğ. (2004) ile Çelik ve diğ. (2005)'e göre çoğunlukla tıknaz çaprazların performanslarının narin olanlara göre daha iyi olduğu düşünüldüğünden, çaprazların narinliklerinin soğukta şekil verilmiş ince cidarlı çelik dikmelerden oluşan duvar elemanlarıyla azaltılması yolu önerilmiştir. Böylece çaprazların burkulması bir derece önlenmiş ve daha dolu histeretik eğriler elde edilerek daha çok enerji yutulmuştur. Bu amaçla dört çaprazlı çerçeve üretilmiş olup deneylerde KL/r oranı,

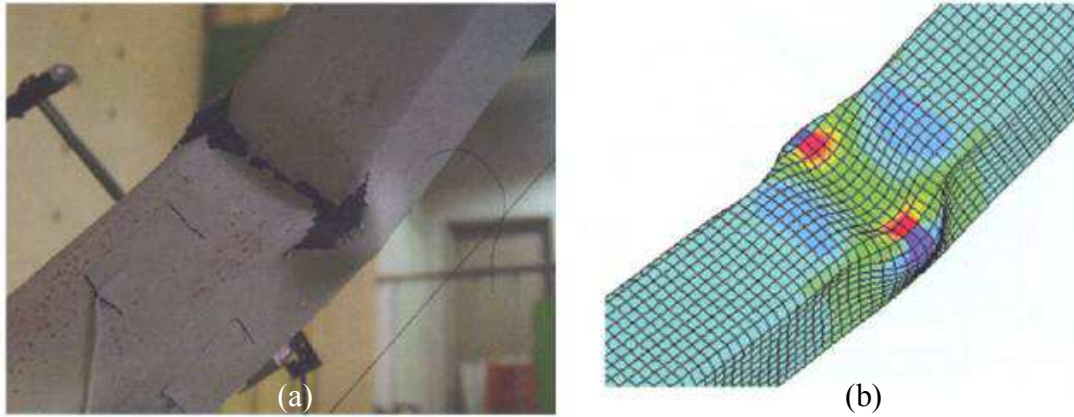


Şekil 2.4 : Kutu kesitli çapraz ortasında hasar oluşumu: (a) Yerel burkulma oluşumu. (b) Yırtılma/kopma başlangıcı (Çelik ve diğ., 2004).

çapraz konfigürasyonu ve kesit tipinin etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, kullanılan soğukta şekil verilmiş ince cidarlı dikmeli çaprazlı çerçevelerin performansları (özellikle histeretik enerji yutma kapasiteleri bakımından) dikmesiz olan çerçevelere göre daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Ancak, burkulma boyunun azaltılması, özellikle tüp kesitli numunelerde erken yerel burkulma nedeniyle TTY'lerinin kısılmasına neden olmuştur (Şekil 2.4).

Han ve diğ. (2007a,b) tüp kesitlerden oluşan çaprazların, genişlik/et kalınlığı oranlarının deprem davranışları üzerindeki etkisini belirlemek için genel narinlikleri (KL/r) 76 ile 90 arasında, yerel narinlikleri (b/t) 28 ile 8 arasında değişen 11 adet kare kesitli tüp numuneyi tekrarlı çekme-basınç etkisindeki simetrik yüklemeyle denemişlerdir. Küçük b/t oranına sahip numuneler büyük enerji yutma kapasitesine

ulaşmıştır. Bu durum, b/t oranı 14'ten küçük numuneler için geçerli değildir. b/t oranı 14'ten küçük numuneler için b/t oranı azaldıkça enerji yutma kapasiteleri de azalmıştır. Bu yüzden, küçük b/t oranına sahip çapraz elemanların daha fazla enerji yutma kapasitelerine sahip olmalarının garanti olmadığı ortaya çıkmıştır. b/t oranları 8 ve 11 olan numunelerde şekildeğiştirmelerin numune ile guse plakalarının birleşim bölgelerinde özel olarak tasarlanan zayıflatılmış uçlar çevresinde toplandığı tespit edilmiştir. AISC-LRFD'ye göre tasarlanan küçük b/t oranına sahip kutu çapraz elemanlarda zayıflatılmış uçlarda erken kopma gözlenmiştir.



Şekil 2.5 : Kutu çapraz ortasında oluşan yerel burkulma: (a) Deney. (b) Sonlu eleman modeli (Ding ve diğ., 2008).

Ding ve diğ. (2008) kutu tüp çaprazların genel narinliğinin, yerel narinliğinin ve çaprazların birleşimleriyle birlikte konfigürasyonlarının çaprazın davranışı üzerinde etkili olduğunu belirtmiştir. Çalışmada, yazarların önceden kutu çaprazlarla ilgili deneylerinin sonuçları dikkate alınarak sonlu eleman modelleri geliştirilmiştir. Yerel burkulmaları ve kesitte oluşacak kopmaların belirlenebilmesi için sonlu eleman ile modelleme önerisi yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda deney sonuçlarıyla örtüşen göçme modu (Şekil 2.5) elde edilmiştir.

Haddad ve diğ. (2011)'e göre çaprazların enerji yutma miktarlarını optimize etmek için çaprazlar ve bayrak levhalarının boyutları ile malzeme özelliklerinin çapraz üzerindeki etkileri anlaşılmalıdır. Bunun için güçlü bayrak levhası-zayıf tüp çapraz yaklaşımıyla tasarlanmış 10 adet numune yön değiştiren tekrarlı yükler etkisinde denenmiştir (Şekil 2.6). Bayrak levhasının kalınlaştırılmasının enerji tüketimi üzerindeki etkisinin, çaprazın etkili genel narinliğini azaltmanın etkisiyle aynı olmadığı belirlenmiş olup yeni TTYV ve enerji tüketimi bağıntıları önerilmiştir.



Şekil 2.6 : Deney gözlemleri: (a) Güçlü guse levhası–zayıf çapraz numune.
(b) Yırtılma/kopma başlangıcı (Haddad ve diğ., 2011).

Fell ve diğ. (2009); yerel ve genel narinlik oranları, çapraz kesiti, yükleme protokolü ve sıklığı ile çapraz içine yapılacak harç dolgusunun etkilerini incelemek için 18 adet çelik çapraz numune tasarlamış, bu numunelerin farklı yükleme protokolleri etkisinde doğrusal olmayan bölgedeki burkulmaları ve kopmaları incelemişlerdir. Kopma sünekliğinin daha kompakt ve genel narinlik açısından daha narin kesitlerin seçilmesiyle arttığı tespit edilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler ışığında AISC Çelik Yapılar Deprem Yönetmeliği (2005)'nde kutu ve boru profiller için verilen genişlik/kalınlık oranlarının çelik çapraz için yeterli şekilde değiştirme kapasitesi sağlayamayacağı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, yüksek dayanımlı beton dolgunun kesitlerin kopma dayanımını beklendiği kadar arttırmadığı görülmüştür. Beklendiği gibi, beton dolgu yerel burkulmaları geciktirmiş ve kopma dayanımını yakın fay etkisi yükleme protokolünde %160 oranında arttırmıştır.

Takeuchi ve Matsui (2011)'ye göre boru çaprazların performanslarının belirlenmesi için kopma öncesinde çevrimsel kümülatif deformasyon kapasitelerinin belirlenmesi gereklidir. Bu çalışmada değişik genel ve yerel narinliklerdeki boru kesitler kopmaya kadar çevrimsel yükleme etkisinde test edilmişlerdir. Ayrıca, elde edilen deneysel veriler sonlu eleman analiziyle karşılaştırılarak kopma mekanizması açıklanmaya çalışılmıştır. Genel narinliği 50-100 arasında ve yerel narinliği 20-30 arasında olan boru kesitli çapazlarda yaklaşık olarak aksenal deformasyon %0.5 civarındayken genel burkulma, %1-2 civarındayken yerel burkulma ve %2-3 civarındayken kopma oluşmuştur. Sonlu eleman analizi sonuçları yerel burkulma bölgesinde şekildeğştirmelerin belirgin miktarda arttığı ve kopma noktasına ortalama yerel

plastik şekildeğiştirme büyüklüğüne bağlı yorulma kriterine uygun olarak ulaşıldığı görülmüştür. Şekildeğiştirme indeksi tanımlanmış olup bu kavram kullanılarak boru çaprazların kopmaya kadar kümülatik deformasyon kapastelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır.



Şekil 2.7 : 2011 Tohoku depremi sonrası çelik çaprazda yerel burkulma ve yırtılma başlangıcı (Midorikawa ve Okazaki, 2012).

Midorikawa ve Okazaki (2012) 2011 Tohoku depremi sonrasında deprem ve tsunaminin çelik yapılara verdiği zararların araştırılması çalışmalarındaki gözlemlerini aktarmışlardır. Kutu kesitli profillerle tasarlanan çaprazlarda deprem sonrası yapılan gözlemlerde, Şekil 2.7’de de görüldüğü gibi, yerel burkulmalar ve kesit köşelerinde yırtılma başlangıcı oluşmuştur.

Sen ve diğ. (2017) çalışmalarında sünek olmayan merkezi çaprazlı çerçeveler için güçlendirme yöntemlerini değerlendirmişlerdir. Güçlendirme yöntemi olarak çaprazların değiştirilmesi, yerel olarak narin çaprazların içine beton doldurulması, plaka kaynatılması, bulonların güçlendirilmesi ve burkulması önlenmiş çaprazların kullanılması uygulanmıştır. Deneysel çalışma sonucunda tüm güçlendirme yöntemlerinde sistemin şekildeğiştirme kapasitesi artmıştır. Bu kapasite artışının çaprazların birleşim tipine, birleşimlerin istem/kapasite oranlarına ve çapraz tipine bağlı olduğu görülmüştür.

Bradley ve diğ. (2017) iki tam ölçekli merkezi çaprazlarla güçlendirilmiş çerçeve denenerek, göçme mekanizmalarının, inelastik çerçeve davranışının ve bütünsel göçme performansının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Normal süneklik düzeyinde sismik detaylara sahip X çapraz sistemi ve herhangi sismik detayı bulunmayan ters V

çapraz sistemi çevrimsel quasi-statik yükleme protokolü etkisinde göçene kadar denenmişlerdir. Bu deneyler sonucunda çaprazların histeretik davranışlarının yüksek oranda sistem tipine ve çapraz konfigürasyonuna bağlı olduğu sonucuna varmışlardır.

2.4 FRP Malzemeyle Güçlendirilen Çelik Elemanlarla İlgili Önceki Çalışmalar

Çelik yapılarda FRP malzemelerin güçlendirme elemanı olarak kullanılmalarının yanında CFRP kullanılarak üretilen burkulması önlenmiş çapraz (BÖÇ) benzeri uygulamalar da vardır. Bu bölümde konu ile ilgili sınırlı sayıda yapılan kuramsal ve deneysel çalışmalardan bir bölümü aktarılmıştır.

Tavakkolizadeh ve Saadatmanesh (2003) CFRP ile güçlendirilmiş kompozit kirişlerin statik yükleme altında davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Bunun için üç adet büyük ölçekli kompozit kiriş numunesi hazırlanmış olup kiriş alt başlığına yapıştırılacak olan CFRP elemanların kalınlıkları sabit tutulmuş, uygulanan katman sayısı bir, üç ve beş olmak üzere değiştirilmiştir. Sonuç olarak, epoksi ile yapıştırılan CFRP kumaşın kompozit kirişin maksimum yük taşıma kapasitesini ve plastikleşme rijitliğini arttırdığı görülmüştür.

Shaht ve Fam (2006) KL/r 'leri 68 olan beş adet çelik kare tüp kesiti denemişlerdir. Bu deneysel çalışmada bir numune kontrol numunesi olup diğerleri farklı sayıda katmanlarda lifleri tek doğrultulu CFRP elemanlarla güçlendirilmişlerdir. Güçlendirilmiş dört numunede $\%(13\sim23)$ arasında daha fazla eksenel yük taşıma kapasitesi elde edilmiştir.

Bambach ve Elchalakani (2007), CFRP katmanlarıyla sarılarak güçlendirilmiş 150-300mm aralığında değişen boylarda dört değişik çelik tüp kesiti monotonik olarak artan eksenel basınç yükü altında (crash test) denemiştir. Deneylerde tüp kesitli numunelerin cidarları katlanıp göçene kadar yüksek basınç uygulanmıştır (Şekil 2.8). Deneylerin sonucunda numunelerin, CFRP kumaş ile güçlendirme tipine bağlı olarak, basınç taşıma kapasitelerinin değişik oranlarda arttığı görülmüştür. Bu güçlendirme yönteminin farklı mühendislik alanlarında kullanılabilen tüp kesitlerin büyük deformasyonlara karşı dayanımlarının arttırılması için kullanılması önerilmiştir.



Şekil 2.8 : CFRP elemanlarla güçlendirilmiş çelik tüp kesitlerde göçme modları (Bambach ve Elchalakani, 2007).

Ekiz ve El-Tawil (2008) dikdörtgen enkesitli çekirdek elemanı harçla kapladıktan sonra katman sayısı değişen CFRP kumaşlarla kaplayarak BÖÇ'lere benzer şekilde basınç dayanımını arttırmayı hedeflemişlerdir. Deneyler ve sonlu eleman hesapları CFRP ile güçlendirilen numunelerin yalın numunelere göre eksenel kapasitelerinde iyileşmeler olduğunu göstermiştir. Davranıştaki bu iyileşme boyuna doğrultudaki CFRP katmanı sayısı ve çekirdek malzemesi kalınlığının bir fonksiyonudur. Yeterli sayıda CFRP katmanı ve yeterli kalınlıktaki çekirdek malzemesi ile basınç altında akmaya ulaşılmıştır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 : CFRP ile sarılmış numunelerin deney sonrası görünüşleri (Ekiz ve El-Tawil, 2008).

Eğilmez ve diğ. (2009) mevcut guseli ve alın levhalı moment aktaran çelik birleşimlerinde, plastik mafsallık bölgesinde kirişlerin başlıklarında oluşabilecek yerel burkulmaların geciktirilmesi için GFRP elemanlarla bu bölgelerin güçlendirilerek davranışın iyileştirilmesini önermişlerdir. Bu çalışma kapsamında 33 farklı kiriş-kolon noktası sonlu elemanlar programıyla modellenerek tekrarlı yükler etkisinde

hesaplanmıştır. GFRP elemanlar profil başlıklarında oluşabilecek yerel burkulmaların oluşumunu engellemiş ve plastik mafsallık bölgesindeki bu güçlendirmenin profilin dönme kapasitesini orta derecede arttırdığı belirlenmiştir.

ABD’de sıkça kullanılan WT tipindeki T kesitlerinden oluşan beş adet uzun ve kısa çapraz numuneler Harries ve diğ. (2009) tarafından eksenel basınç altında denenmiştir. Bu deneysel çalışma biri kontrol numunesi olmak üzere, değişik kat sayılarında CFRP ya da GFRP şeritlerle güçlendirilen numunelerden oluşmuştur. Kompozit elemanlarla güçlendirme sonucunda numuneler daha stabil duruma gelmiş, kritik yükleri artmış, tekrarlı yükler etkisinde kararlı bir histeretik davranış elde edilmiş ve plastikleşmenin başlık bölgelerine oluşması sağlanmıştır.

Shaht ve Fam (2009) b/t’leri aynı KL/r’ları farklı on sekiz numuneyi deneysel olarak incelemişlerdir. Güçlendirme için CFRP lamine elemanlar kullanılmışlardır. Numunelerin KL/r oranlarına bağlı olarak eksenel dayanımda %6 ila %71 arasında, eksenel rijitlikte ise %10 ila %17 arasında artış belirlenmiştir. CFRP lamine elemanların etkisi büyük oranda numunenin KL/r değerine bağlıdır.

El-Tawil ve diğ. (2011) gerçek boyutlarda çelik eğilme elemanlarını (U profil) tekrarlı yükler altında denemişlerdir. Numunelerden bazılarının plastik mafsallık bölgeleri CFRP ile sarılmıştır. Plastik mafsallık bölgesine uygulanan CFRP sargı, akmanın yayıldığı plastik mafsallık bölgesinin genişlemesini sağlamasının yanında, yerel burkulma oluşumunu yavaşlatmış ve yanal burulmalı burkulmanın oluşumunu geciktirmiştir.

Aguilera ve Fam (2013)’te T şeklindeki çelik kutu-kutu birleşimlerindeki stabilite problemlerini engellemek amacıyla deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, birleşim bölgesinin iki yüzüne de GFRP plakalar yapıştırılarak güçlendirme uygulanmıştır. GFRP plakalarla güçlendirme başlık üzerindeki basınç kuvveti sıfır ve başlığın basınç kapasitesinin %45 ve %80’i iken birleşim dayanımında sırasıyla %38, %46 ve %38 oranlarında artış olduğu belirlenmiştir.

Gao ve diğ. (2013) CFRP güçlendirmenin boru kesitli çelik çaprazların eksenel yük taşıma kapasiteleri üzerindeki etkisini deneysel olarak incelemiştir. Boyuna doğrultuda uygulanmış olan CFRP kumaş boru profilin basınç altındaki dayanımını ve rijitliğini arttırmıştır. Uygulanan CFRP kumaş katının sayısına bağlı olarak dayanım ve rijitlik sırasıyla %28-124 ve %25-105 aralıklarında değişmiştir. Ayrıca

güçlendirilmiş numunenin basınç kapasitesinin belirlenmesi için doğrusal olmayan bir model geliştirilmiştir.

Elchalakani (2016) korozyona uğramış boru kirişlerin eğilme etkisi altındaki kapasitelerinin CFRP elemanlarla iyileştirilmesini incelemek amacıyla 31 adet numune denemiştir. Numuneler %20, %40, %60 ve %80 olmak üzere dört farklı korozyon seviyesinde olup eğilme dayanımlarının arttırılması için boru kirişlere dışarıdan CFRP kumaşlar sarılmıştır. Çalışmada korozyon bölgesi uzunluğu ise boru çapıyla boru çapının üç katı arasında değişmektedir. Sonuç olarak dayanımdaki en büyük artış %282 oranıyla en çok korozyona uğramış numune grubunda elde edilmiş olup ortalama dayanım artışının %97 oranında olduğu belirlenmiştir.

Ghaemdoost ve diğ. (2016) düşey veya yatay doğrultuda kesit kaybı olan kutu profillerin yapısal davranışlarının iyileştirilerek yük taşıma kapasitelerinin arttırılması ve yerel burkulma oluşumunun geciktirilmesi amacıyla CFRP kumaş ile güçlendirilmiş 13 adet kısa numuneyi deneysel olarak incelemiştir. CFRP sargının kolonların yük taşıma kapasitelerini %55 oranına kadar arttırdığı belirlenmiştir. Uygulanan CFRP sargı kat sayısının arttırılmasıyla kolonun yük taşıma kapasitesi arttığı ve yerel burkulma oluşumunun daha da geciktirildiği anlaşılmıştır.

Alam ve diğ. (2017)'nin çalışmasında boru kesitli elemanlar yatay darbe etkilerine karşı CFRP ve GFRP kumaş ile güçlendirilerek denenmişlerdir. FRP ile güçlendirme yalın numunelere göre %29'a kadar yatay deplasmanı azaltarak boru profillerin darbe dayanımlarını arttırmıştır. Çalışmada FRP tipi, lif doğrultusu, kalınlığı, etkili yapışma boyu gibi değişkenlerin de yapısal davranıştaki etkileri ve sarılmış numunelerin göçme davranışları incelenmiştir.

Elchalakani ve diğ. (2017)'nin çalışmasında CFRP kumaşla güçlendirilmiş çelik plakalar aksel basınç altındaki performanslarını belirlemek amacıyla 5 adet yalın ve 16 adet güçlendirilmiş olmak üzere toplam 21 numune denemiştir. Numunelerin kalınlıkları 2, 3, 4 mm ve genişlik/kalınlık oranları 50, 66.7 ve 100'dür. CFRP kumaş lifleri yüke paralel olacak şekilde plakaların dış yüzlerine yapıştırılmıştır. Tüm güçlendirilmiş numunelerde CFRP'nin basınç yüzündeki çelik yüzeyden ayrılma şekildeğiştirmesinin %0.3-0.6 aralığında olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlar önerilen güçlendirmeye dayanımın, enerji tüketiminin ve sünekliğin sırasıyla %452, %259 ve %107 oranlarında arttığı görülmüştür.

Genelde alt yapı işlerinde kullanılıp korozyon etkisinde kalan boru profillerin yük taşıma kapasitelerinin ve yerel burkulma davranışlarının iyileştirilmesi amacıyla Huang ve diğ. (2017) CFRP ve yüksek dayanımlı harçla ayrı ayrı güçlendirilmiş 22 adet boru numuneyi deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler sonucunda CFRP sargının ve yüksek dayanımlı harçla güçlenirmenin boru profillerin dayanımlarının arttırılmasında oldukça etkili oldukları sonucuna ulaşılmıştır. 7 mm'lik kesit kaybı olan numunelerde CFRP ve yüksek dayanımlı harçla güçlendirmenin basınç kapasitesini sırasıyla %53 ve %83 oranlarında arttırdığı görülmüştür.

Yapılan kapsamlı taramada bu tez kapsamında ele alındığı şekliyle tüp (kare ya da dairesel) çapraz elemanların yön değiştiren tekrarlı yükler altında histeretik davranışlarının ve TTY'lerinin iyileştirilmesine yönelik olarak ileri kompozitlerin (CFRP, GFRP gibi) kullanılmadığı görülmüştür; tezin bu yönü, en özgün tarafını oluşturmaktadır. Ana hedef, bu elemanların kullanımı ile çapraz uçlarında erken kopmaların engellenmesi, orta bölgede ise yerel burkulmanın betonarme kolonlardakine benzer biçimde sargı etkisi ile geciktirilerek (bir bakıma yerel burkulması kısmen önlenmiş/geciktirilmiş çapraz) daha çok enerji yutması ve TTY'lerin arttırılmasıdır. Güçlendirmede kompozitlerin kullanımı genelde çelik eğilme elemanları üzerinde yoğunlaşmaktadır.

2.5 Çaprazlarla İlgili Tasarım Yönetmeliklerinin İncelenmesi

Deney numunelerinin tasarlanmasında ve deney sonuçlarının değerlendirilmesinde yararlı olacağı düşüncesiyle bu bölümde Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007), AISC Çelik Yapılar Deprem Yönetmeliği (2016b) ve mevcut yapıların değerlendirilmesinde ve performans seviyelerinin belirlenmesinde oldukça sık kullanılan FEMA 356 Mevcut Yapıların Değerlendirilmesi Yönetmeliği (2000)'nde tüp çaprazlarla ilgili verilen koşullar özetlenmiştir.

2.5.1 Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007)

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY, 2007) çaprazları süneklik düzeyi yüksek merkezi çelik çaprazlı çerçeveler, süneklik düzeyi normal merkezi çelik çaprazlı çerçeveler ve süneklik düzeyi yüksek dışmerkez çelik çaprazlı çerçeveler olmak üzere üç bölümde incelemektedir. Süneklik düzeyi yüksek çelik çerçevelerde enkesit koşulları kutu profiller için b/t ya da $h/t_w \leq 0.7\sqrt{E_s/\sigma_a}$, boru

profiller için $D/t \leq 0.05 E_s / \sigma_a$ 'dır. Çatı ve düşey düzlem çapraz sistemlerinin tüm basınç elemanlarında $KL/r \leq 4.0 \sqrt{E_s / \sigma_a}$ koşulu sağlanmalıdır. Süneklik düzeyi yüksek dışmerkez çelik çaprazlı çerçevelerin enkesit ve KL/r koşulları süneklik düzeyi yüksek merkezi çaprazlarıinkiyle aynıdır.

En kesit koşullarında verilen b ve h simgeleri kutu profillerin sırasıyla başlık ve gövdelerindeki düz bölgenin boyunu, D simgesi boru profilin dış çapını, t ve t_w ise profillerin ilgili bölümlerinin et kalınlıklarını göstermektedir. Çelik ile ilgili E_s ve σ_a simgeleri ise sırasıyla elastisite modülünü ve akma gerilmesini göstermektedir. Kutu profiller köşelerinde eğrisel bölgelere sahip olduklarından dolayı yönetmelik içerisinde kutu profillerin başlık ve gövdelerindeki düz bölge boylarının nasıl hesaplanacağı konusunda bilgi verilmemiştir. Burada Amerikan yönetmeliğine benzer şekilde kutu profilin başlık ve gövde toplam uzunluğundan et kalınlığının üç katının çıkartılmasıyla ($b=B-3t$, $h=H-3t_w$) kutu profillerin düz bölümlerinin uzunluklarının hesaplanması uygun olacaktır.

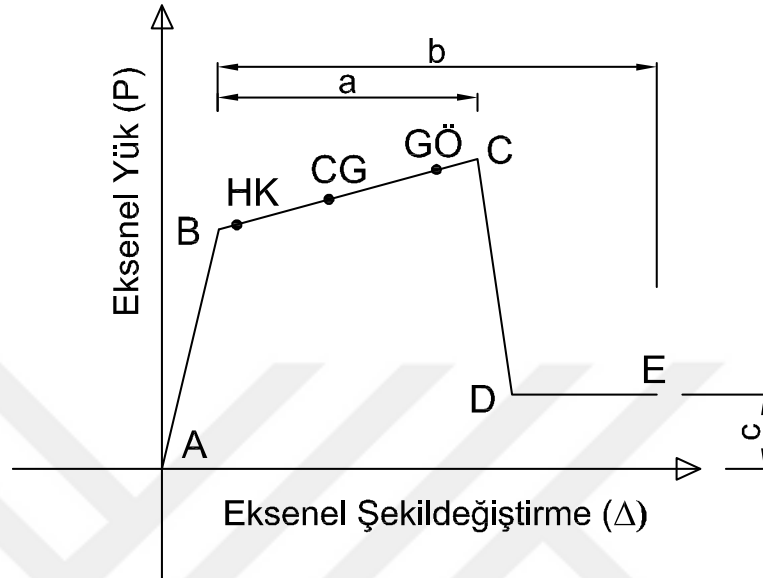
Süneklik düzeyi normal çelik çaprazlı çerçevelerde enkesit koşulları kutu profiller için b/t ya da $h/t_w \leq 1.2 \sqrt{E_s / \sigma_a}$, boru profiller için $D/t \leq 0.08 E_s / \sigma_a$ 'dır. Ancak, en çok iki katlı binalarda, gerekli yerel burkulma kontrollerinin yapılması koşulu ile bu sınırların aşılmasına izin verilmiştir. Çatı ve düşey düzlem çapraz sistemlerinin tüm basınç elemanlarında $KL/r \leq 4.0 \sqrt{E_s / \sigma_a}$ koşulu sağlanmalıdır.

2.5.2 Amerikan Çelik Yapılar Deprem Yönetmeliği (2016)

Amerikan Çelik Yapılar Deprem Yönetmeliği (AISC, 2016b) çaprazları özel merkezi çaprazlı çelik çerçeveler ve normal merkezi çaprazlı çelik çerçeveler olmak üzere iki bölümde incelemektedir. Normal merkezi çaprazlı çelik çerçevelerde elemanın genel narinliği, KL/r , $4.0 \sqrt{E_s / \sigma_a}$ ile sınırlandırılmıştır. Dikdörtgen kutu kesitlerin b/t ve h/t oranları $0.64 \sqrt{E_s / \sigma_a}$ 'dan, boru profillerde ise D/t oranı $0.044 E_s / \sigma_a$ 'dan büyük olmamalıdır. Özel merkezi çaprazlı çerçevelerde yüksek süneklik düzeyini sağlamak amacıyla enkesit koşulları biraz daha ağırlaştırılmış olup dikdörtgen kutu kesitlerde b/t ve h/t oranları $0.55 \sqrt{E_s / \sigma_a}$ 'dan, D/t oranı boru profillerde ise $0.038 E_s / \sigma_a$ 'dan büyük olmamalıdır. Burada, kutu profillerin düz kısımlarının genişlikleri olan b ve h , toplam kenar yüksekliklerinden kutu profilin et kalınlığının üç katının çıkartılmasıyla ($b=B-3t$, $h=H-3t$) elde edilmektedir.

2.5.3 FEMA 356 (2000)

FEMA 356 – Binaların Sismik Rehabilitasyonu Yönetmeliği (2000) çelik çaprazlı çerçeveleri, deprem etkilerini bileşenleri üzerinde oluşan aksenal kuvvetlerle aktaran sistemler olarak tanımlamaktadır.



Şekil 2.10 : Aksenal kuvvet – aksenal şekil değiştirme ilişkisi ve çaprazların performans seviyeleri (FEMA, 2000).

Çaprazların deprem yükleri altında performanslarını belirlemek amacıyla doğrusal olmayan akma ve burkulma yük-şekildeğiştirme davranışlarını dikkate alan doğrusal olmayan itme analizinin (pushover) yapılması önerilmiştir. Bu davranış biçimi deneylerden ya da hesaplardan elde edilen veriler esas alınarak hazırlanmış olan Şekil 2.10'daki ilişkide gösterildiği şekilde modellenir. Doğrusal olmayan kuvvet-şekildeğiştirme eğrisi sünek davranışı temsil etmekte olup Şekil 2.10'daki gibi A'dan E'ye beş nokta ile tanımlanır. a, b, c parametreleri ise modeli tanımlamakta kullanılır.

Çapraz, B ile C arasındaki "a" platosunda kararlı bir doğrusal davranış sergilemektedir. Toplam plastik deformasyon uzunluğu olan "b" pekleşme ve dayanım azalması bölgelerini içermektedir. C ile D arasında belirgin bir dayanım azalması/kayıbı oluşmakta ve D ile E arasında ise dayanım değişmemektedir. D-E aralığındaki "c" ile gösterilen sabit artık dayanım çaprazın aksenal akma dayanımının belirli bir yüzdesi olarak tanımlanmış olup çapraz kesit şekline, yükleme doğrultusuna ve kutu profillerde genişlik/et kalınlığı oranına bağlıdır. B-C parçası boyunca eleman deformasyonlarının bir fonksiyonu olarak performans

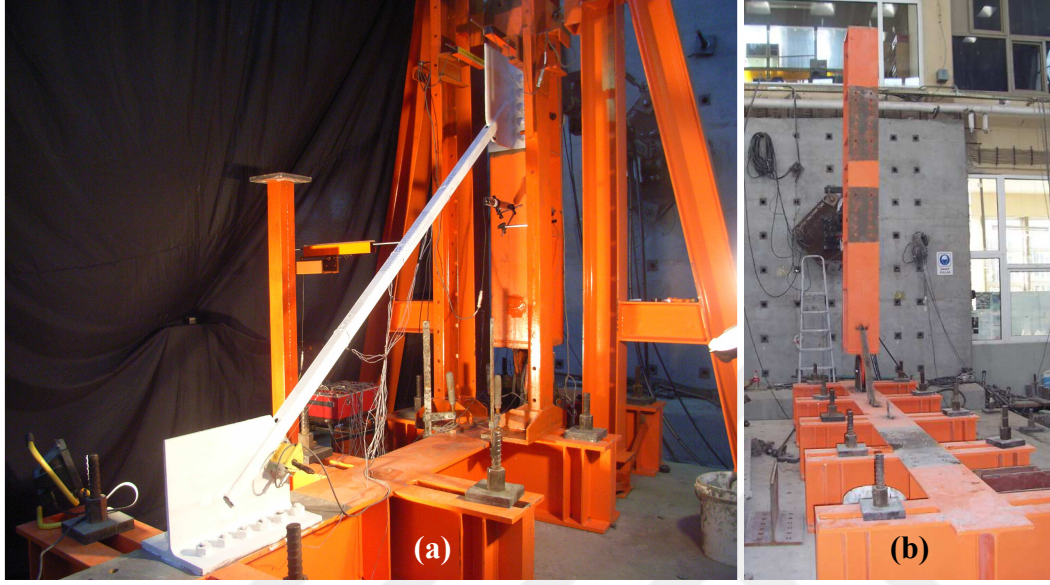
seviyeleri tanımlanmıştır. Hedef performans seviyelerinden HK: hemen kullanım, CG: can güvenliği, GÖ: göçme öncesi performans seviyelerini göstermektedir.

Soğukta şekil verilmiş dikdörtgen kutu enkesitli çaprazlarda basınç için $d/t \leq 90/\sqrt{F_y}$ (F_y MPa alındığında $d/t \leq 236.4/\sqrt{F_y}$ olup S235 kalitesinde çelik için $d/t=5.9$ 'dur.) durumunda a, b, c sırasıyla $0.5\Delta_c$, $7\Delta_c$ ve burkulma dayanımının 0.4 katı olarak belirlenmiştir. Şekildeğiştirmeler, performans seviyelerinden HK için $0.25\Delta_c$, CG için $4\Delta_c$ ve GÖ için $6\Delta_c$ ile sınırlandırılmıştır. Burada Δ_c beklenen burkulma yüküne karşılık gelen eksenel şekildeğiştirme olarak tanımlanmıştır. $d/t \geq 190/\sqrt{F_y}$ (F_y MPa alındığında $d/t \leq 499/\sqrt{F_y}$ olup S235 kalitesinde çelik için $d/t=32.5$ 'dir.) durumunda a, b, c sırasıyla $0.5\Delta_c$, $3\Delta_c$ ve burkulma dayanımının 0.2 katı olarak belirlenmiştir. Şekildeğiştirmeler, performans seviyelerinden HK için $0.25\Delta_c$, CG için $1\Delta_c$ ve GÖ için $2\Delta_c$ ile sınırlandırılmıştır. Verilen d/t oranlarının arasındaki değerler için doğrusal interpolasyon kullanılmaktadır. Verilen bağıntılarda F_y en düşük akma dayanımını göstermektedir.

Çekmedeki çaprazlar için a, b, c sırasıyla $11\Delta_T$, $14\Delta_T$ ve akma dayanımının 0.8 katı olarak belirlenmiştir. Burada Δ_T , çekmede beklenen akma yüküne karşılık gelen eksenel şekildeğiştirme olarak tanımlanmıştır. Şekildeğiştirmeler, performans seviyelerinden HK için $0.25\Delta_T$, CG için $7\Delta_T$ ve GÖ için $9\Delta_T$ ile sınırlandırılmıştır.

Bu çalışmada, FEMA 356'da önerilen statik doğrusal olmayan prosedür SAP2000 (CSI, 2005) programı kullanılarak deneyler öncesi yük-yerdeğiştirme eğrilerinin elde edilmesinde kullanılmıştır.

İ.T.Ü. Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'na kazandırılmıştır. Deney düzeneği, deneyler sırasında en elverişsiz numune varken oluşacak en elverişsiz kuvvetlere göre SAP2000'de modellenerek iç kuvvetler hesaplanmış ve kesitler kontrol edilmiştir. Deney düzeneğinin şematik yerleşimi Şekil 3.1'de, laboratuvardaki durumu ise Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2 : Deney düzeneğinin laboratuvarдан görünüşleri: (a) Tüm düzeneğin görünüşü. (b) Yalnız L-şeklindeki düzeneğin görünüşü.



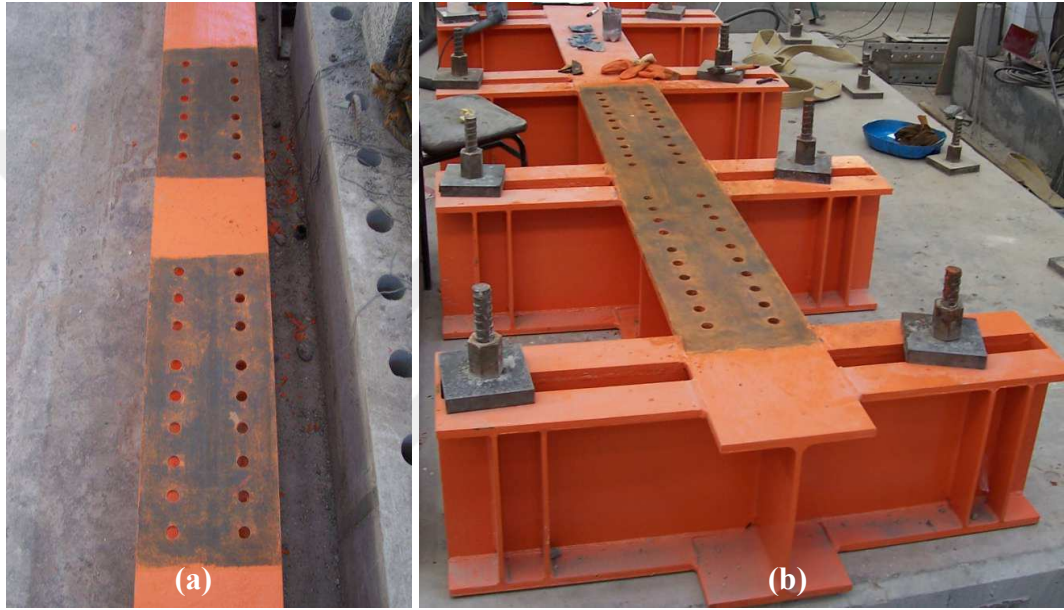
Şekil 3.3 : Deney düzeneğinin fabrikadaki durumu: (a) Yükleme kolunu ve temel kirişi. (b) Mafsal bölgesi.

Deney düzeneğinin kolon ve temel kirişi S275 çelik kalitesindeki HE400A profilinden üretilmiştir. Laboratuvar'da deney düzeneğinin kurulacağı bölgenin kapsamlı rölövesi alınmış, montajın kusursuz olması için Şekil 3.3'de görüldüğü gibi fabrikada kontroller yapılmıştır.

Deney düzeneği fabrikadaki boya atölyesinde tamamen boyanmış (Şekil 3.4) olarak İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'na ulaştırılmıştır.

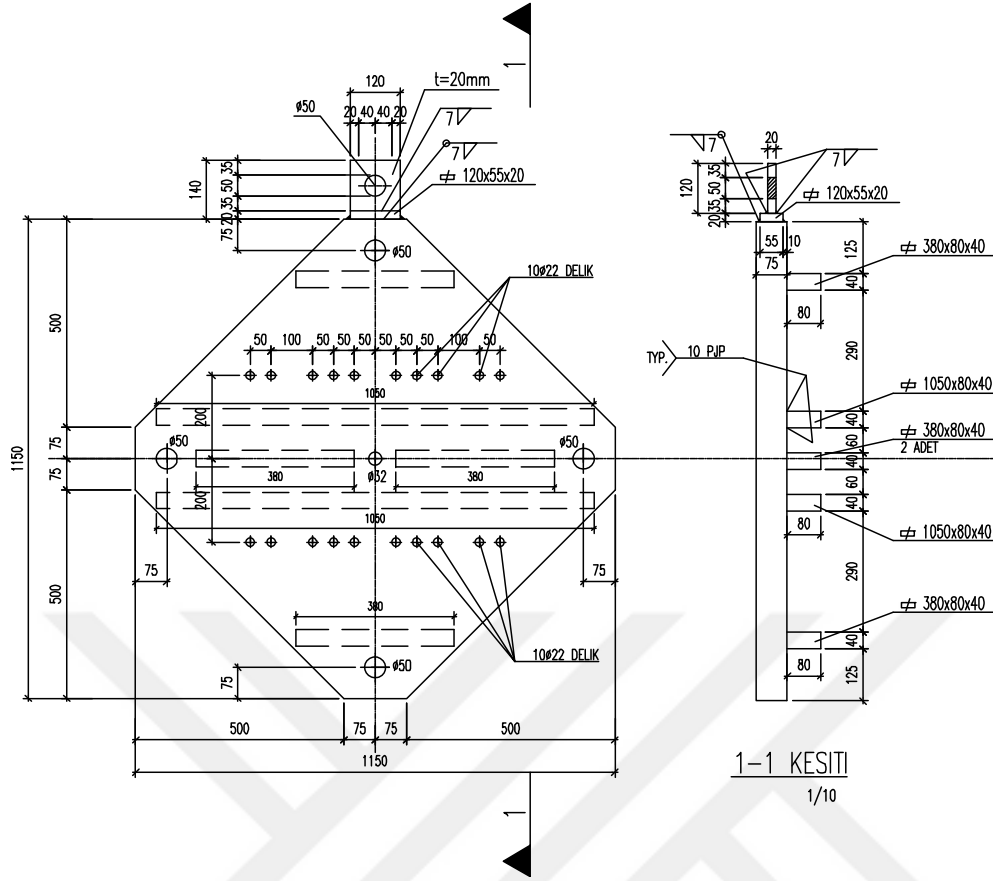


Şekil 3.4 : Tamamen boyanmış yükleme kolonu.

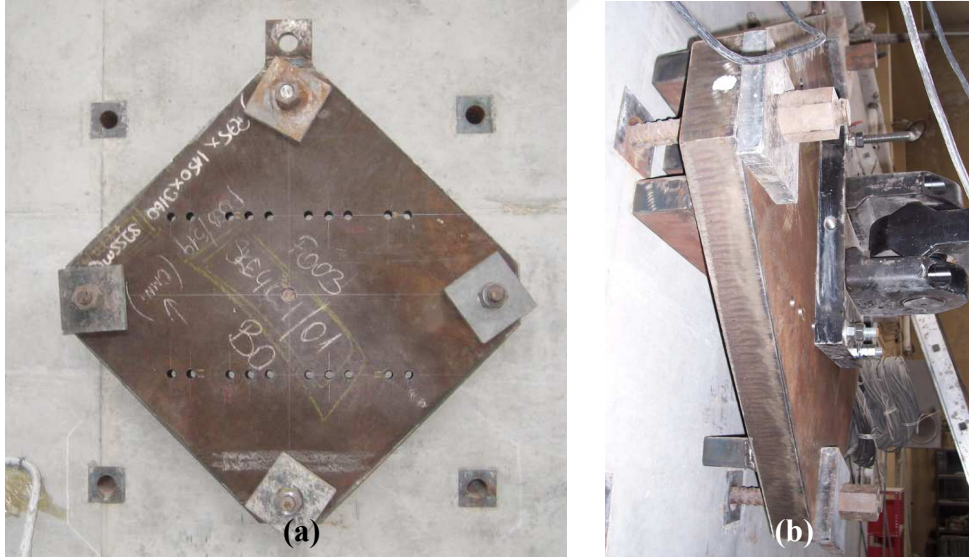


Şekil 3.5 : Boyaları temizlenmiş birleşim bölgeleri: (a) Yükleme kolonunun durumu. (b) Temel kirişinin durumu.

Numunelerin deney düzeneğine bağlantısında öngerme verilmiş sürtünme tipi M24 bulonlar kullanılmıştır. Sürtünme tipi bulonların kullanımındaki önemli koşullardan biri birleşim yüzeylerinin sürtünmeyi azaltacak şekilde boyanmamış olmasıdır. Bundan dolayı numune birleşimlerinin yapılacağı bölgelerde boya sökümü yapılarak çelik yüzeye ulaşılmıştır. Boya sökölürken Polisan marka boya sökücü, belirlenen bölgeye uygulanmış ve bir süre beklenmiştir. Asit içerikli boya sökücü etkisiyle kabaran bölgeler tel fırçayla fırçalanarak temizlenmiş olup gereken durumlarda boya sökücü uygulaması ve fırçalama işlemi tekrarlanarak birleşim yüzeylerinin olduğu bölgeler Şekil 3.5’de görüldüğü gibi boyadan arındırılmıştır.



Şekil 3.6 : Hidrolik veren ankraj plakası detayları.



Şekil 3.7 : Hidrolik veren ankraj plakasının laboratuvarındaki görünüşleri: (a) Önden görünüş. (b) Yandan görünüş.

Hidrolik verenin güçlü duvara bağlantısının sağlanması amacıyla detayları Şekil 3.6’te verilen özel bir ankraj plakası tasarlanmıştır. Ankraj plakası toplamda 680kg ağırlığında olup S235 kalitesindeki 75mm ve 40mm kalınlığındaki levhalardan Çimtaş Gemlik fabrikasında üretilmiştir. Ankraj plakasının güçlü duvardan 80mm

uzakta kalacak şekilde konumlandırılmasıyla, hidrolik verenin plakaya ankrajı sırasında plaka ile duvar arasından somunlara kolayca ulaşarak sıkılması amaçlanmıştır (Şekil 3.7).



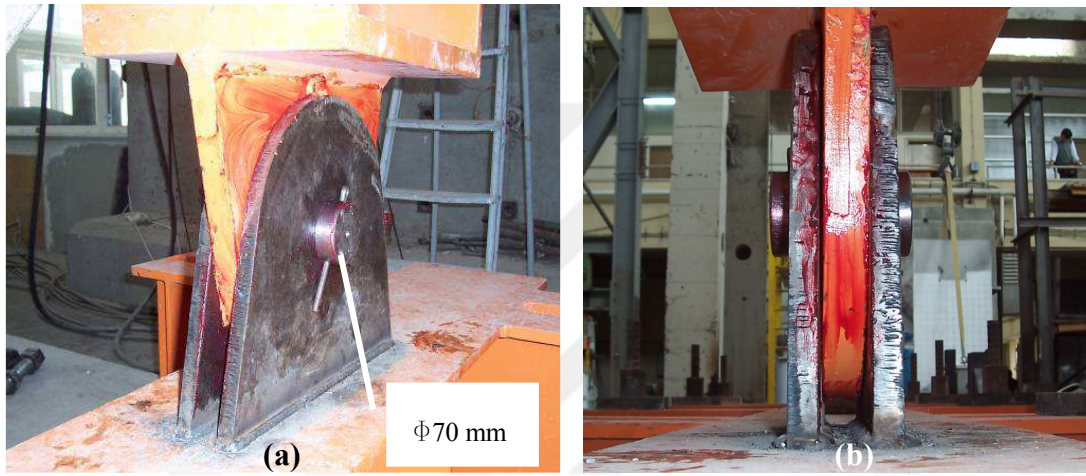
Şekil 3.8 : Ankraj ve hidrolik veren montajı: (a) ve (b) Teodolit ile eksen çakıştırma. (c) Hidrolik veren montajı.



Şekil 3.9 : Temel kirişinin güçlü döşemeye bağlanmış durumu.

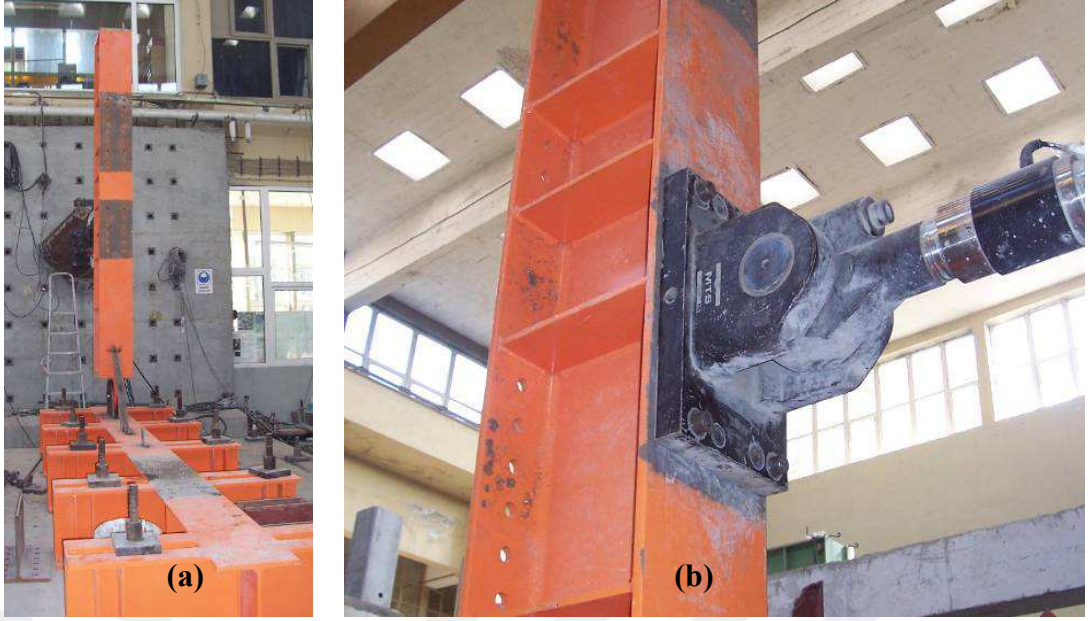
Deney düzeneğinin laboratuvardaki montajında temel kirişi ve yükleme kolonunun eksenlerinin hidrolik veren eksenleriyle çakıştırılması sağlanmıştır. Bunun için ilk olarak ankraj plakasının güçlü duvara bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Sonrasında İ.T.Ü. Geomatik Bölümü'nden destek alınarak Şekil 3.8'de görüldüğü gibi lazerli dijital teodolit yardımıyla ankraj plakası eksenini temel kirişi eksenine çakıştırılmış ve özel ankraj çubuklarıyla temel kirişi güçlü döşemeye öngerme verilerek bağlanmıştır (Şekil 3.9).

Yükleme kolonu ile temel kirişi birleşimi mafsallı olup düzeneğin en önemli noktalarından biridir. Mafsaldaki pim çapı, uzunluğu ve çelik kalitesi sırasıyla 70mm, 120mm ve S235'dir. Mafsal bölgesindeki temel kirişine bağlı iki plaka ve yüklem kolonuna bağlı tek plaka sırasıyla 20 mm ve 30 mm kalınlığında olup bu plakalar üstte kolon alt yüzüne, altta temel kirişinin üst başlığına tam penetrasyonlu küt kaynaklarla kaynaklanmıştır. Mafsallın sürtünmesiz olarak olabildiğince ideal mafsala yakın çalışabilmesi için yüklem kolonundaki mafsal plakasının her iki yüzü bol miktarda gress yağıyla yağlandıktan sonra vinç yardımıyla temel kirişindeki yerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 : Gress yağı uygulanmış mafsal bölgesi: (a) Yandan görünüş. (b) Önden görünüş.

Kolon, yerleştirildikten sonra vinçten ayırmadan su terazisi yardımıyla tam düşey pozisyona getirilmiştir. Kolonun konumunu korumak ve vinçten ayırmak için temel kirişiyle arasına çelik çapraz bir eleman kaynaklanarak konumları sabitlenmiştir. Vinç yardımıyla uygun konuma getirilen hidrolik veren başlığı yüklem kolonuna sekiz adet 10.9 kalitesindeki M24 bulonu yardımıyla bağlanmıştır. Yüklem kolonunun hidrolik verene bağlanmasından sonra kolon ile kiriş arasındaki çelik çapraz eleman spiral yardımıyla kesilerek deney düzeneği çalışır duruma getirilmiştir (Şekil 3.11).

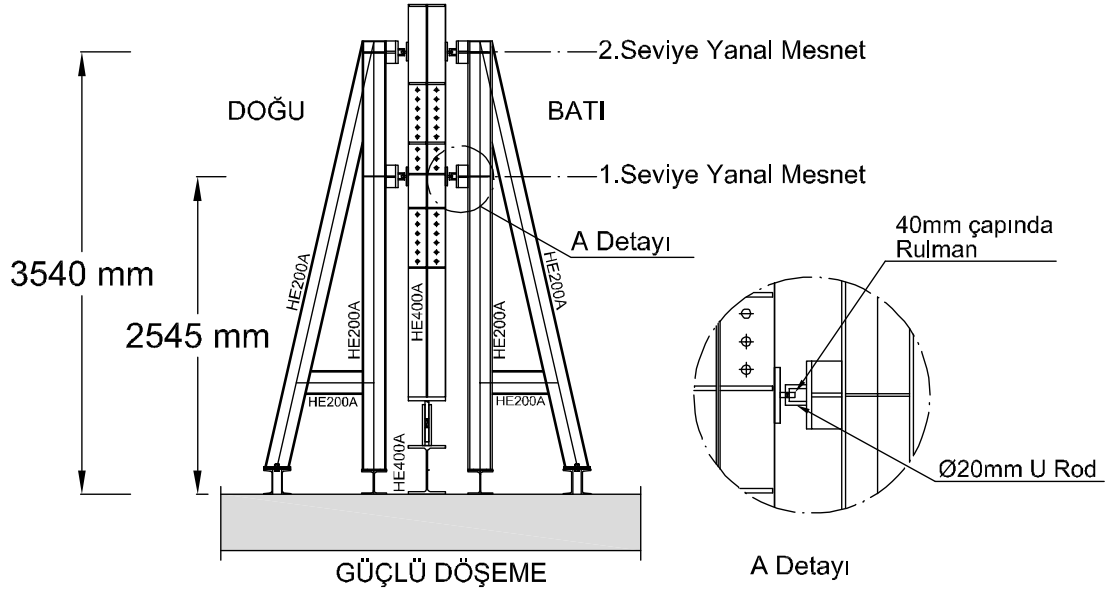


Şekil 3.11 : Düzenek montajı: (a) Yükleme kolonu montajı. (b) Hidrolik veren montajı.

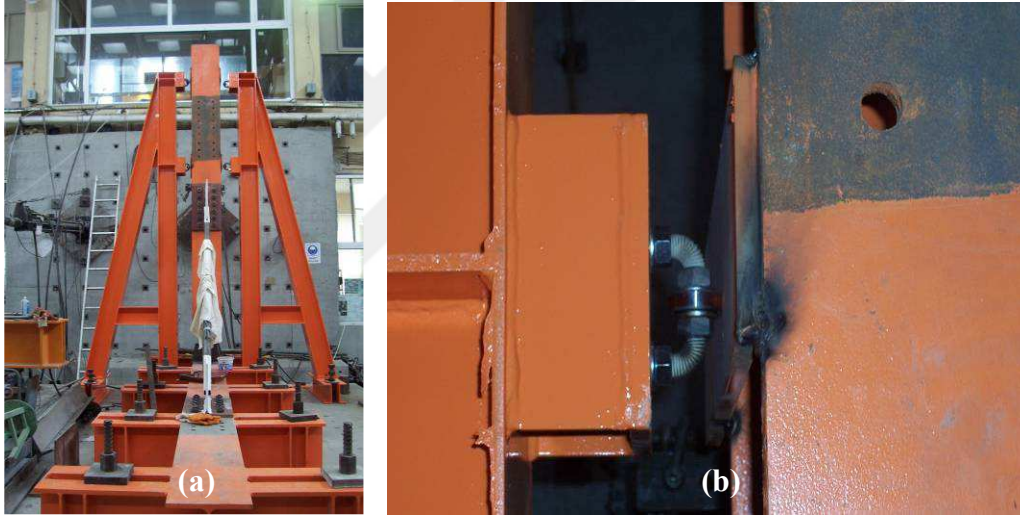
3.1.2 Düzlem dışı stabilitenin sağlanması

İki boyutlu deney düzeneklerinde deney sırasında yüksek yük ve yerdeğiştirme değerlerine ulaşıldığından, deney düzeneğinin kendi düzlemi içinde hareketine ek olarak değişik nedenlerle düzlem dışı hareketler de kaçınılmaz olmaktadır; deneyin sağlıklı olarak sonuçlandırılması için bu düzlem dışı yerdeğiştirmelerin sınırlandırılması gerekmektedir. Burada da elde edilen deneysel verilerin güvenilirliği bakımından deney düzeneğini oluşturan kolon elemanın iki farklı yükseklikte düzlem dışı olası yerdeğiştirmelerini engelleyecek biçimde üçgen biçimli yanal bir destek/payanda sistemi tasarlanmıştır. Bu amaçla HE200A'dan oluşturulan iki adet düşey payanda eleman düşünülmüştür (Şekil 3.12). Birinci destek güçlü döşemeden 2545mm, ikincisi ise 3543mm yukarıdadır. Sistem her kotta batı ve doğu tarafında olmak üzere iki noktadan desteklenmektedir. Yanal destek sağlayan sistem kayıcı bir sistem olup kolon ile arasında 2~3mm boşluk kalacak şekilde tasarlanmıştır.

Tam dişli M16 çubuğun belirlenen ölçülerde ısıyla bükülmesi ve orta kısmında 40mm çaplı rulmanın sabitlenmesiyle oluşturulan U biçimindeki elemanlar, HE200A profilden oluşturulan payanda sistemine bağlanmaktadır. Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de düzlem dışı sistemin genel ve detay görünüşleri verilmiştir.



Şekil 3.12 : Düzlem dışı destek/payanda sistemi şematik görünüşü.



Şekil 3.13 : Düzlem dışı destek sistemi: (a) Düzlem dışı payandaları. (b) Kayıcı sistem.

3.2 Deney Numuneleri

Üç değişik boyda, genel ve yerel narinlikleri birbirinden farklı yedi grup numune tasarlanmıştır. Her grup için üç numune bulunmakta olup toplam numune sayısı 21'dir. Altı grup numune kare kutu kesitli olup kesit tipinin etkisini de incelemek için yalnızca bir grup numune boru kesite sahiptir. Bütün numunelere ilişkin geometrik ve tasarımda varsayılan mekanik özellikler Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Deney düzeneği içine sığabilecek değişik geometrilerin belirlenmesinden sonra numuneler için üç farklı geometri seçilmiştir. Numunelerin Fe37 kalitesindeki çelikten olduğu varsayılarak güvenlik sınırları içerisinde bir ön boyutlandırma

yapılmıştır. Ön boyutlandırma sonrasında belirlenen kesitlerden alınan numunelerle çekme deneyleri yapılmış ve gerçek malzeme özelliklerine göre numunelerin ve birleşimlerinin detaylı tasarımları yapılmıştır.

Tüp kesitli yalın/güçlendirilmemiş profiller Borusan Mannesmann tarafından karşılıksız olarak, üretim ve malzeme konusunda destek sağlayan Tabosan firmasının Gölcük'te bulunan fabrikasına 6m'lik boylar halinde teslim edilmiş (Şekil 3.14) olup numune kesitlerinin genel görünüşü Şekil 3.15'te verilmiştir.



Şekil 3.14 : 6m boyundaki profillerin atölyede durumu.



Şekil 3.15 : Atölyedeki numunelerin kesitlerinin genel görünüşü

Çizelge 3.1 : Çapraz numunelerin geometrik, varsayılan malzeme ve güçlendirme özellikleri.

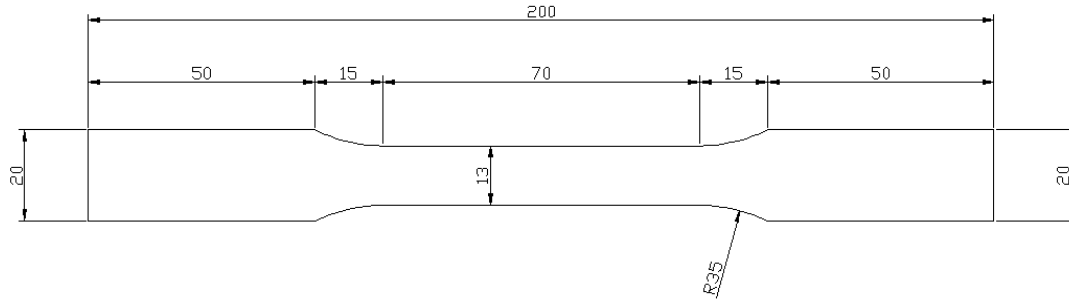
Numune	Kesit Tipi	Kesit	Boy [mm]	KL/r	b/t (D/t)	Çelik Kalitesi	Zayıflatılmış Kesitte Güçlendirme	Zayıflatılmış Kesitte CFRP Plaka Boyu [mm], CFRP Sargı Boyu [mm]	Orta Bölgede 2 kat CFRP Sargı (mm, %L)
TB-1		K60x60x3	3558	77.35	17	S235	Yalın	-	-
TB-2		K60x60x3	3558	77.35	17	S235	1 sıra CFRP Plaka + 2 kat CFRP kumaş sargı	620, 340	600, %17
TB-3		K60x60x3	3558	77.35	17	S235	1 sıra CFRP Plaka + 2 kat CFRP kumaş sargı	620, 340	1200, %33
TB-4		K50x50x4	3558	98.83	9.5	S235	Yalın	-	-
TB-5		K50x50x4	3558	98.83	9.5	S235	1 sıra CFRP Plaka + 2 kat CFRP kumaş sargı	760, 480	450, %13
TB-6		K50x50x4	3558	98.83	9.5	S235	1 sıra CFRP Plaka + 2 kat CFRP kumaş sargı	760, 480	900, %25
TB-7		K60x60x4	1936	42.09	12	S235	Üretim sırasında hasardan dolayı denenmemiştir.		
TB-8		K60x60x4	1936	42.09	12	S235	1 sıra CFRP Plaka + 3 kat CFRP kumaş sargı	620, 340	-
TB-9		K60x60x4	1936	42.09	12	S235	Yalın	-	-
TB-10		K50x50x4	1936	53.78	9.5	S235	Yalın	-	-

Çizelge 3.1 (devam) : Çapraz numunelerin geometrik, varsayılan malzeme ve güçlendirme özellikleri.

Numune	Kesit Tipi	Kesit	Boy [mm]	KL/r	b/t (D/t)	Çelik Kalitesi	Zayıflatılmış Kesitte Güçlendirme	Zayıflatılmış Kesitte CFRP Plaka Boyu [mm], CFRP Sargı Boyu [mm]	Orta Bölgede 2 kat CFRP Sargı (mm, %L)
TB-11		K50x50x4	1936	53.78	9.5	S235	2 sıra CFRP Plaka	760, 480	-
TB-12		K50x50x4	1936	53.78	9.5	S235	2 sıra CFRP Plaka + 3 kat CFRP kumaş sargı	760, 480	-
TB-13		K70x70x3	2667	49.39	20.33	S235	Yalın	-	-
TB-14		K70x70x3	2667	49.39	20.33	S235	1 sıra CFRP Plaka + 2 kat CFRP kumaş sargı	670, 370	450, %17
TB-15		K70x70x3	2667	49.39	20.33	S235	1 sıra CFRP Plaka + 2 kat CFRP kumaş sargı	670, 370	900, %33
TB-16		K70x70x4	2667	49.39	14.5	S235	Yalın	-	-
TB-17		K70x70x4	2667	49.39	14.5	S235	Yalın	-	-
TB-18		K70x70x4	2667	49.39	14.5	S235	1 sıra CFRP Plaka + 2 kat CFRP kumaş sargı	670, 370	600, %22
TB-19		D76.1x3	3558	68.69	25.37	S235	Yalın	-	-
TB-20		D76.1x3	3558	68.69	25.37	S235	1 şerit CFRP kumaş şerit + 2 kat CFRP kumaş sargı	635, 355	500, %14
TB-21		D76.1x3	3558	68.69	25.37	S235	1 sıra CFRP kumaş şerit + 2 kat CFRP kumaş sargı	635, 355	1000, %28

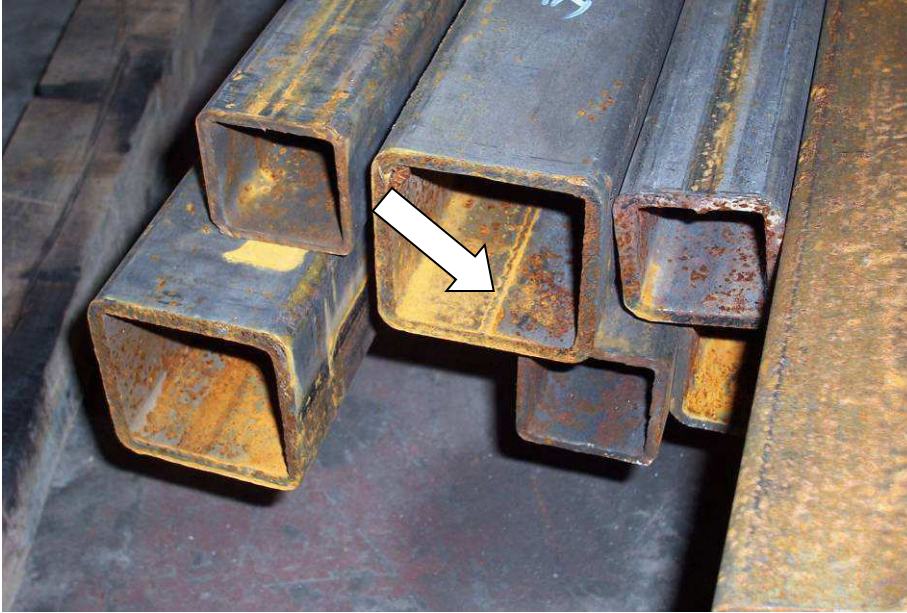
3.2.1 Çekme deneyleri

Çelik numunelerin malzeme özelliklerinin belirlenmesi için ASTM A370-08a standartına göre bütün çaprazları temsil edecek şekilde çok sayıda çekme deneyleri yapılmıştır. ASTM A370-08a standartına göre belirlenen çekme numunesi boyutları Şekil 3.16’da verilmiştir.



Şekil 3.16 : ASTM A370-08a standardına göre belirlenen çekme numunesi boyutları.

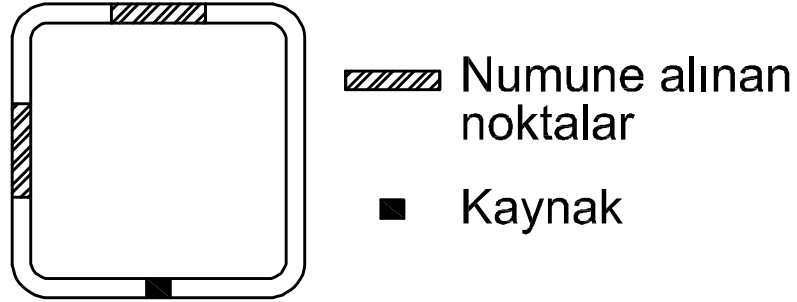
Tüp kesitler, çelik levhaların soğukta bükülerek kaynaklanmasıyla üretildiğinden bir kenarlarında kaynak çizgisi bulunmaktadır (Şekil 3.17).



Şekil 3.17 : Deney numunelerinin bir kenarındaki kaynak çizgileri.

Numuneler, kutu tüp kesitlerde kaynak çizgisi bulunmayan iki komşu kenardan alınmıştır (Şekil 3.18). Boru tüp kesitlerde ise kaynak çizgisine denk gelmeyecek şekilde yan yana iki noktadan alınmıştır. Deneylerde kullanılacak tüm tüp profiller fabrikada markalanmış ve bu profillerin tamamından, yapılan itme ve sonlu eleman

analizlerinde kullanılan gerçek malzeme özelliklerinin belirlenmesi, için çekme deneyi numuneleri alınmıştır (Şekil 3.19).

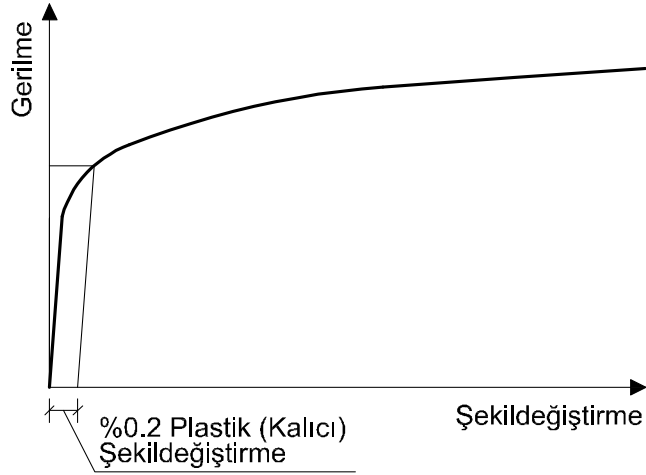


Şekil 3.18 : Kutu tüp kesitlerinde numune alınan noktalar.



Şekil 3.19 : Tüp kesitli profillerden alınan çekme numuneleri.

Soğukta şekil verilmiş tüp numunelerde, önceki çalışmalar hakkında yapılan literatür araştırmasından elde edilen bilgilerle, gerilme-şekildeğiştirme eğrisi belirgin akma özelliği göstermediğinden akma sınırı kalıcı deformasyon yöntemiyle hesaplanmıştır. Bu yöntemle akma gerilmesi, şekildeğiştirme ekseninde %0.2 değerindeki kalıcı plastik deformasyonu temsil eden noktadan gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin başlangıçta sahip olduğu doğrusal bölümüne çizilen paralelin eğriyi kestiği nokta ile tanımlanır (Şekil 3.20).



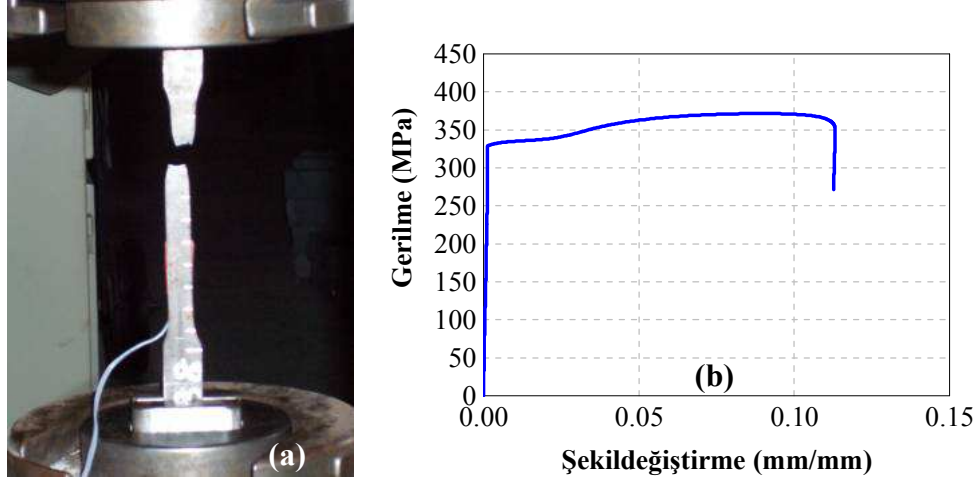
Şekil 3.20 : Belirgin akma göstermeyen çeliğin gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.

Malzeme çekme deneyleri, İ.T.Ü. Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda yapılmış olup deneylerde bir hidrolik piston ve silindirden oluşan 500kN çekme kapasitesine sahip JAMSLER-LAFFON&SOHN marka universal test cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.21).



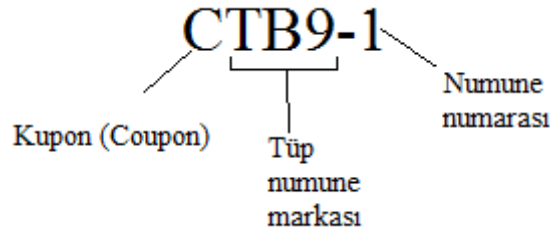
Şekil 3.21 : Çekme deneyi düzeneği.

Toplamda 42 adet çekme (kupon) numunesi deneyi yapılmış olup numunelerin tamamında şekildeğiştirmeler TML marka akma sonrası da ölçüm yapabilen YFLA-5 tipi şekildeğiştirme ölçerler ile okunmuştur. Şekil 3.22'de çekme numunesinin kopma sonrası durumu ve örnek bir gerilme-şekildeğiştirme eğrisi görülmektedir.



Şekil 3.22 : Çekme testi ve sonucu: (a) Kopma. (b) Gerilme-şekildeğiştirme grafiği.

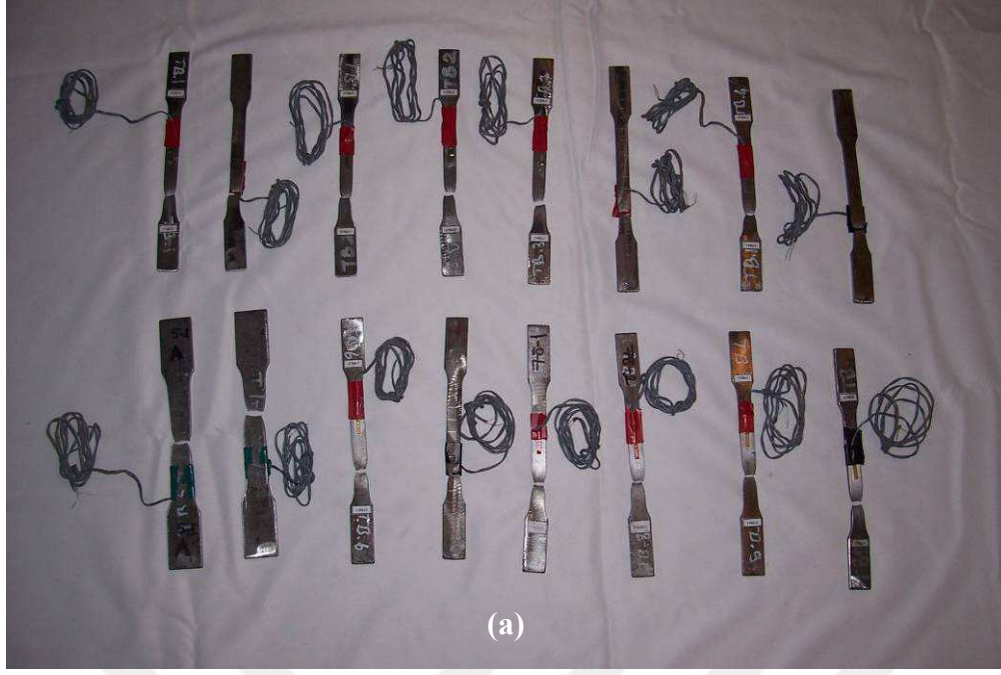
Çekme numunelerine “C” ile başlayan markalar verilmiştir. Sonraki “TB...” ise çekme numunesinin alındığı tüp çaprazın markasını göstermektedir. Son rakam ise çapraz üzerinden alınan numune numarasını göstermektedir (Şekil 3.23).



Şekil 3.23 : Çekme numunelerinin kod açılımı.

Tüm deneylerden belirlenen minimum akma gerilmesi 258 MPa, maksimum akma gerilmesi ise 373 MPa'dır. CTB20-2 ve CTB21-2 numunelerinin deneyleri sırasında şekildedğiştirme ölçerler erken hasar gördüğünden akma gerilmeleri ve çekme dayanımları tespit edilememiştir. Ayrıca 10 adet numunede şekildedğiştirme ölçerler numune çekme kapasitesine ulaşmadan göçtüğünden bu numunelerin çekme dayanımları belirlenememiştir. Buna karşın, elde edilen değerler malzeme özellikleri hakkında yeterince bilgi vermektedir. Şekil 3.24'de numunelerin deney sonrası durumları topluca görülmektedir.

CTB5-1 ve CTB5-2 numuneleri için üretim sırasında et kalınlığı farklı bir numuneden alındığı belirlenmiş ve yeni numuneler istenmiştir. Yeni numuneler üretici firma tarafından ilk olarak belirlenen çekme numunesi boyutlarından farklı olarak imal edilmiştir. İnceltilmiş boyun bölgesinin genişliği 20mm, kalınlığı 5mm'dir. Hesaplar bu kesit ölçülerine göre yürütülmüştür.



Şekil 3.24 : Deney sonrası çekme numunesi görünümleri: (a) İlk grup. (b) İkinci grup.

Çizelge 3.2 : Malzeme deneyi sonuçları.

Numune Adı	Profil	Çekme Numunesi Markası	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Alan (mm ²)	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	ϵ_y (mm/mm)	Toplam Uzama (%)
TB1	K60X60X3	CTB1-1	13.2	2.9	38.28	282	-	0.00253	14.23
		CTB1-2	13	2.9	37.7	302	-	0.00203	12.31
TB2	K60X60X3	CTB2-1	13.2	2.9	38.28	259	-	0.00269	19.58
		CTB2-2	13.15	2.9	38.135	289	-	0.00257	15.38
TB3	K60X60X3	CTB3-1	13.1	2.9	37.99	284	-	0.00257	16.6
		CTB3-2	13.2	2.9	38.28	295	-	0.00229	15.77
TB4	K50X50X4	CTB4-1	13.1	4	52.4	361	399	0.00387	8.46
		CTB4-2	13.2	4	52.8	372	409	0.00462	10.9
TB5	K50X50X4	CTB5-1	20	4	80	300	351	0.00270	13.85
		CTB5-2	20	4	80	320	356	0.00271	11.67
TB6	K50X50X4	CTB6-1	13.1	4	52.4	369	412	0.00324	10.38
		CTB6-2	13.1	4	52.4	373	414	0.00249	10
TB7-TB8	K60X60X4	CTB78-1	13	4	52	326	-	0.00231	12.5
		CTB78-2	13	4	52	349	-	0.00266	11.67
TB9	K60X60X4	CTB9-1	13.1	4	52.4	330	369	0.00249	12.69
		CTB9-2	13	3.9	50.7	329	368	0.00131	12.7
TB10-TB11	K50X50X4	CTB1011-1	13.1	4	52.4	315	346	0.00333	10.5
		CTB1011-2	13.1	4	52.4	317	346	0.00298	10
TB12	K50X50X4	CTB12-1	13.3	4	53.2	314	353	0.00338	9.2
		CTB12-2	13.2	4	52.8	329	364	0.00383	11.67

Çizelge 3.2 (devam) : Malzeme deneyi sonuçları.

Numune Adı	Profil	Çekme Numunesi Markası	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Alan (mm ²)	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	ϵ_y (mm/mm)	Toplam Uzama (%)
TB13	K70X70X3	CTB13-1	13.2	3	39.6	342	379	0.00278	10.7
		CTB13-2	13.1	3	39.3	327	369	0.00188	17.5
TB14	K70X70X3	CTB14-1	13.1	3	39.3	340	372	0.00220	13.5
		CTB14-2	13.2	3	39.6	322	369	0.00136	17.5
TB15	K70X70X3	CTB15-1	13.2	3	39.6	315	367	0.00234	19.5
		CTB15-2	13.2	3	39.6	334	372	0.00530	14.6
TB16	K70X70X4	CTB16-1	13.1	4.1	53.71	325	359	0.00302	13
		CTB16-2	13.2	4.1	54.12	321	356	0.00128	11.25
TB17	K70X70X4	CTB17-1	13.1	4.1	53.71	338	384	0.00264	15
		CTB17-2	13	4.1	53.3	330	368	0.00206	16
TB18	K70X70X4	CTB18-1	13.1	4	52.4	337	373	0.00364	12.5
		CTB18-2	13.1	4	52.4	331	370	0.00275	10.42
TB19	D76.1-3	CTB19-1	13.1	3.3	43.23	334	-	0.00172	22.72
		CTB19-2	13.1	3.3	43.23	334	420	0.00309	19.2
TB20	D76.1-3	CTB20-1	13.2	3.3	43.56	340	-	0.00194	23.18
		CTB20-2	13.2	3.3	43.56	-	-	-	20.8
TB21	D76.1-3	CTB21-1	13.1	3.3	43.23	354	425	0.00279	18.18
		CTB21-2	13.3	3.3	43.89	-	-	-	19.55

Çekme numunelerine ilişkin gerime-şekildeğiştirme grafikleri Ek A'da, deney sonuçları Çizelge 3.2'de verilmiştir. Her tüp numuneden alınan iki adet çekme numunesinden elde edilen değerlerin ortalaması alınarak tüp numunelere ilişkin malzeme özellikleri belirlenmiştir. Bazı tüp numunelere ilişkin çekme numunelerinden yalnızca birinden okuma alınmış olup sonuç malzeme değerleri olarak bu değerler varsayılmıştır. Çizelge 3.3'de sonuç malzeme özellikleri topluca verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Sonuç malzeme özellikleri.

Numune Adı	Profil	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	ϵ_y (mm/mm)	Toplam Uzama (%)
TB1	K60x60x3	292	351	0.00228	13.27
TB2	K60x60x3	273.5	351	0.0026295	17.48
TB3	K60x60x3	287	351	0.0024275	16.19
TB4	K50x50x4	366.5	404	0.00425	9.68
TB5	K50x50x4	299	353.5	0.0027045	12.76
TB6	K50x50x4	371	413	0.002867	10.19
TB7-TB8	K60x60x4	337.5	372	0.002487	12.09
TB9	K60x60x4	329.5	368.5	0.0019	12.7
TB10-TB11	K50x50x4	313.5	346	0.0027055	10.25
TB12	K50x50x4	321.5	358.5	0.003607	10.44
TB13	K70x70x3	334.5	374	0.00233	14.1
TB14	K70x70x3	331	370.5	0.001778	15.5
TB15	K70x70x3	324.5	369.5	0.003822	17.05
TB16	K70x70x4	323	357.5	0.002152	12.13
TB17	K70x70x4	334	376	0.0023475	15.5
TB18	K70x70x4	334	371.5	0.003196	11.46
TB19	D76.1-3	334	420	0.002407	20.96
TB20	D76.1-3	340	384	0.001936	21.99
TB21	D76.1-3	354	425	0.002786	18.87

Deney çerçevesi elastik olarak boyutlandırıldığından, deney çerçevesini oluşturan HE400A profiller ve plakalar için çekme deneyi yapılmamıştır. Ancak, daha sonra da belirtileceği üzere bu elemanlar üzerinde kritik noktalara yerleştirilen straingauge'ler ile şekildeğiştirmeler deney süresince kontrol edilmiştir. HE400A profilleri S275, kullanılan plakalar S235 kalitesindedir.

3.2.2 Numunelerin tasarımı

Numunelerin boyutlandırılmasında deneylerin yapıldığı tarihte yürürlükte olan AISC-LRFD (2016) yönetmeliği esas alınmıştır. Numunelerin çekme ve basınç etkisindeki kapasiteleri belirlenirken yönetmelikte verilen dayanım azaltma katsayıları, sırasıyla çekme ve basınç için $\Phi_t=\Phi_c=1$ olarak kullanılmışlardır. Bunun dışında kalan birleşim hesaplarında güvenli tarafta kalmak için yönetmeliğin verdiği azaltma katsayıları kullanılmıştır. Aşağıda numunelerle ilgili hesap esasları verilmiştir.

3.2.2.1 Çekme etkisindeki çaprazlar

Çekmeye çalışan çaprazların çekme dayanımlarını, birleşim bölgesinden uzakta brüt enkesitte meydana gelen akma ya da birleşim bölgesindeki etkili net alanda oluşan kopma kontrol eder. Tüp kesitli numunelerin hepsi için gerçek malzeme özellikleri kullanılarak her iki göçme durumu için gerekli kuvvetler hesaplanmış ve göçme modları tahmin edilmiştir. Birleşimlerde kaynak ve bulonlarda göçme oluşmaması ve sünek davranışın sağlanabilmesi için güvenlik katsayısı 2.00 olarak seçilmiştir.

Çekme dayanımı brüt enkesitte akma ve etkili enkesitteki kopma durumlarını oluşturan kuvvetlerden küçük olanıdır.

Brüt enkesitte akma durumunda:

$$P_n = F_y A_g \quad (3.1)$$

Etkili net kesitte kopma durumunda:

$$P_n = F_u A_e \quad (3.2)$$

Burada

A_g : Brüt enkesit alanı

A_e : Etkili enkesit alanı

F_y : Akma gerilmesi

F_u : Kopma gerilmesi

olarak tanımlanmaktadır.

3.2.2.2 Basınç etkisindeki çaprazlar

Basınç etkisinde çapraz uç birleşimlerinde herhangi bir göçme durumu beklenmemektedir. Basınç etkisinde yalnızca çapraz burkulma dayanımı dikkate alınmıştır. Çaprazların burkulma dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_n = F_{cr} A_g \quad (3.3)$$

$$F_e \geq 0.44F_y \text{ ise } F_{cr} = \left[0.658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y \quad (3.4)$$

$$F_e < 0.44F_y \text{ ise } F_{cr} = 0.877F_e \quad (3.5)$$

Burada

F_{cr} : Basınç yükü altındaki kritik burkulma gerilmesi

F_e : Elastik kritik burkulma gerilmesi

olarak tanımlanmakta olup kritik burkulma gerilmesi 3.6 bağıntısı ile verilmektedir.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2} \quad (3.6)$$

E ise elastisite modülüdür.

Çaprazların burkulma dayanımları malzeme özelliklerinden sonra tahmin edilen burkulma boyu katsayısına (K) çok bağlıdır. Uygun burkulma boyu katsayısını belirleyebilmek için bir literatür araştırması yapılmış ve Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Basınç çaprazlarının K katsayılarının incelenmesi (Çelik ve diğ., 2004).

Kaynak	Uç Mesnet Şartları	K (Düzlem içi)	K (Düzlem dışı)
Tremblay (2001)	Mafsallı - Mafsallı	0.5	0.5
FEMA 356 (2000)	Mafsallı - Mafsallı	0.8	1
AISC LRFD (2016)	Mafsallı - Mafsallı	1	1
Bruneau ve diğ. (2011)	Mafsallı - Mafsallı	0.5	1
Remennikov ve Walpole (1997)	Mafsallı - Mafsallı	0.7	0.7
Astaneh-Asl (1998)	Mafsallı - Mafsallı	0.65	1
El-Tayem ve Goel (1986)	Mafsallı - Mafsallı	0.40~0.45	0.425
Astaneh-Asl ve diğ. (1985)	Mafsallı - Mafsallı	1	1

Çizelge 3.5 : Kutu kesitli numunelerin çekme ve basınç dayanımları.

Numune	H (mm)	t (mm)	r (mm)	A_g (mm ²)	L (mm)	b (mm)	b/t	KL/r	F_y (MPa)	F_u (MPa)	P_t (kN)	P_c (kN)
TB1	60	3	23	660	3558	51	17.00	77.35	292.00	351.00	187.87	135.43
TB2	60	3	23	660	3558	51	17.00	77.35	274.00	351.00	180.84	129.88
TB3	60	3	23	660	3558	51	17.00	77.35	289.50	350.00	187.33	134.68
TB4	50	4	18	690	3558	38	9.50	98.83	366.50	404.00	220.89	122.73
TB5	50	4	18	690	3558	38	9.50	98.83	310.00	353.50	193.28	116.05
TB6	50	4	18	690	3558	38	9.50	98.83	371.00	413.00	225.81	123.14
TB7	60	4	23	850	1936	48	12.00	42.09	337.50	372.00	255.21	254.25
TB8	60	4	23	850	1936	48	12.00	42.09	337.50	372.00	255.21	254.25
TB9	60	4	23	850	1936	48	12.00	42.09	329.50	368.50	252.81	248.94
TB10	50	4	18	690	1936	38	9.50	53.78	313.50	346.00	189.18	180.12
TB11	50	4	18	690	1936	38	9.50	53.78	313.50	346.00	189.18	180.12
TB12	50	4	18	690	1936	38	9.50	53.78	321.50	358.50	196.01	183.86
TB13	70	3	27	780	2656	61	20.33	49.19	334.50	374.00	239.58	221.57
TB14	70	3	27	780	2656	61	20.33	49.19	331.00	370.50	237.33	219.63
TB15	70	3	27	780	2656	61	20.33	49.19	324.50	369.50	236.69	216.00
TB16	70	4	27	1010	2656	58	14.50	49.19	323.00	357.50	295.55	278.61
TB17	70	4	27	1010	2656	58	14.50	49.19	334.00	376.00	310.85	286.55
TB18	70	4	27	1010	2656	58	14.50	49.19	334.00	371.50	307.13	286.55

Çizelge 3.6 : Boru kesitli numunelerin çekme ve basınç dayanımları.

Numune	D (mm)	t (mm)	r (mm)	A_g (mm ²)	L (mm)	D/t	KL/r	F_y (MPa)	F_u (MPa)	P_t (kN)	P_c (kN)
TB19	76.1	3	25.9	689	3558	25.37	68.69	334	420	230.13	167.40
TB20	76.1	3	25.9	689	3558	25.37	68.69	340	384	234.26	169.44
TB21	76.1	3	25.9	689	3558	25.37	68.69	354	425	243.91	174.08

Çizelge 3.4’de listelenen K değerleri X çaprazlı çerçevelerde, çaprazların uç ve orta noktadaki birleşim detaylarına ya da birleşik olup olmadığına büyük oranda bağlıdır. Çaprazların burkulma dayanımlarının hesaplanmasında düzlem dışı ve içi burkulma boyu katsayıları güvenli tarafta alınarak 0.5 olarak alınmıştır. Gerçekte bu çalışmada önerilen uç bağlantıları mafsallı-mafsallı uç mesnet durumundan daha çok ankastre-ankastre uç mesnet koşuluna daha yakındır. Numuneler için tutulu olmayan boy (L) olarak iki uçtaki çapraz-bayrak levhası birleşim noktaları arasındaki temiz uzunluk dikkate alınmıştır. Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6’da numunelerin çekme ve burkulma dayanımları özetlenerek verilmiştir.

3.2.3 Birleşimlerin tasarımı

Deneylerde, 250 kN ve ± 300 mm strok kapasiteli MTS hidrolik veren kullanılmış olup deneyler sırasında birleşimlerde göçme durumu oluşmaması için güvenlik faktörü katsayısı 2.00 alınmıştır. Deney düzeneğinde iki farklı açıda ($\alpha_1=38^\circ$ ve $\alpha_2=49^\circ$) çapraz yerleşimi düşünülmüştür. En elverişsiz durumda birleşimlerde oluşabilecek kuvvet 635kN olarak hesaplanmıştır. Birleşimlerde ön tasarımda E70 kalitesinde kaynak elektrodu kullanılması kabul edilerek tasarım yapılmıştır. Uygulamada ise gaz altı kaynağı tercih edilmiş olup SG2 gaz altı kaynak teli kullanılmıştır. Bunun yanında yüksek dayanımlı 10.9 kalitesinde sürtünme tipi öngermeli (HSFG) bulonlar kullanılmıştır. Birleşim hesaplarında güvenli tarafta kalmak için AISC-LRFD (2016) yönetmeliğinde verilen Φ katsayıları kullanılmıştır.

Alt bölümlerde birleşimlerin tasarım esasları verilmiş olup örnek olması için bir çapraz yerleşim açısına ilişkin kuvvetler esas alınarak yapılan tasarımın hesap adımları da sunulmuştur.

3.2.3.1 Kaynakların tasarımı

Tüp çaprazlar uç bölgelerinde yarılarak içlerine bayrak levhaları sokulup kaynaklanmıştır. 3mm kalınlıklı köşe kaynakla kaynaklı birleşimin AISC-LRFD (2016)’ye göre dayanımı

$$\phi R_{kaynak} = \phi 0.6 F_{exx} l a \quad (3.7)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır. Burada

$\phi = 0.75$, AISC-LRFD’de verilen dayanım azaltma katsayısı,

$F_{exx} = 483 \text{ N/mm}^2$, E70 kaynak elektroduna ilişkin maksimum gerilme kapasitesi (SG2 gaz altı kaynak teli 550 N/mm^2 maksimum gerilme kapasitesine sahiptir.)

l : Kaynak boyu

a : Kaynak kalınlığı

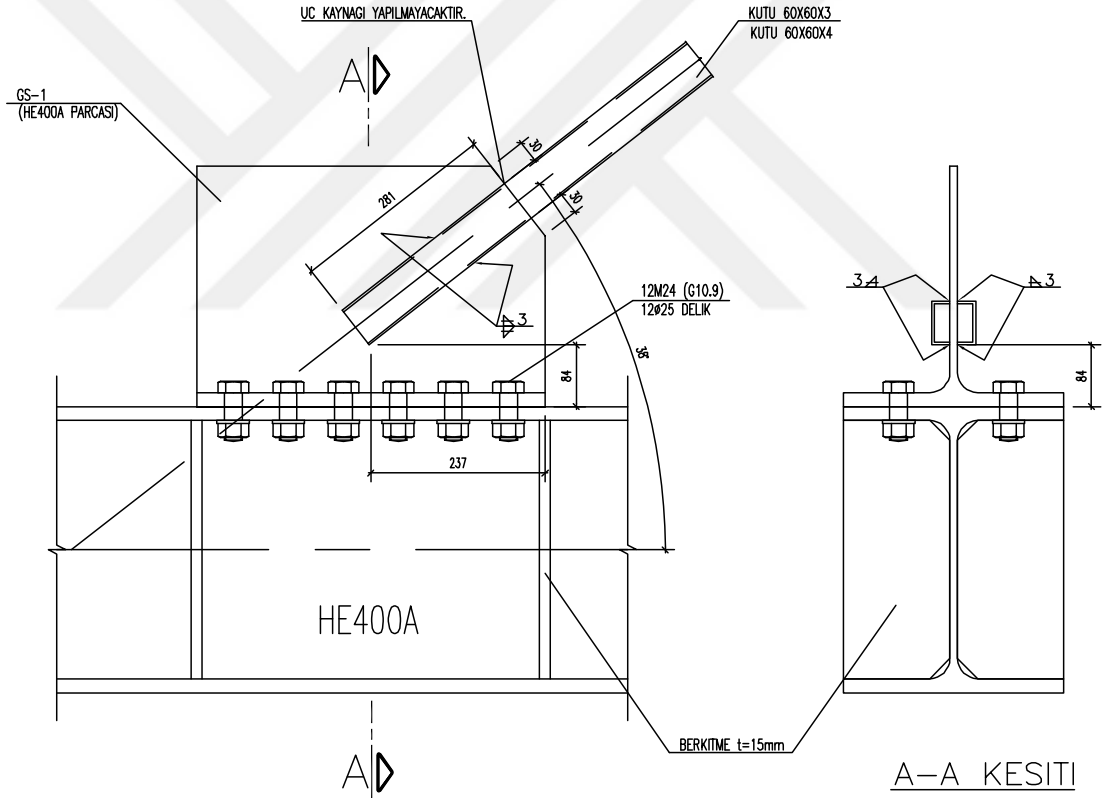
Kaynak boyu maksimum kaynak kalınlığının 100 katı kadar bir boyda etkili olarak çalışır.

$$280 \text{ mm} < 3 \times 100 = 300 \text{ mm} \text{ uygundur.}$$

Böylece kaynak boyu (l) 280mm seçilirse

$$\phi R_{kaynak} = 0.75 \times 0.6 \times 483 \times 4 \times 274 \times 3 = 714646 \text{ N} \approx 715 \text{ kN} > 635 \text{ kN} \text{ değeri}$$

hesaplanmış olup kaynakların yeterli kapasiteye sahip olduğu görülmüştür. Tipik alt uç birleşim detayı Şekil 3.25’de verilmiştir.



Şekil 3.25 : Tipik numune alt ucu birleşim detayı.

3.2.3.2 Bulonların tasarımı

Bulonlu birleşimlerde kesme kuvveti, sürtünme tipi öngermeli bulonlarla (HSFG) aktarılmaktadır. Birleşim için 12 M24 (10.9) HSFG bulon kullanılmış olup bulon kontrolleri bu bölümde verilmiştir.

Sürtünme tipi bulonların taşıma kapasitesi 3.8 bağıntısıyla hesaplanır.

$$\phi R_n = \phi \mu D_u h_{sc} T_b N_s \quad (3.8)$$

Burada;

$\phi = 0.85$, AISC-LRFD'ye göre birleşimde istenen dayanımda kaymanın oluşmaması için kullanılan dayanım azaltma katsayısı

$\mu = 0.35$, Ortalama sürtünme katsayısı

$D_u = 1.13$, Uygulanan ortalama öngermenin uygulanan minimum öngermeye oranını gösteren çarpan

$h_{sc} = 1$, Bulon deliği faktörü (Standart delikler için)

$N_s = 1$, Kayma düzlemi sayısı

T_b = Uygulanması gereken minimum öngerme kuvvetidir, bulonun çekme kapasitesinin 0.70 katı olarak verilmiştir.

Birleşimde çekme bulunması durumunda sürtünme azalacağından 3.8 bağıntısıyla hesaplanan bulon kesme kapasitesi, 3.9 bağıntısında verilen k_s sayısı ile çarpılarak azaltılır.

$$k_s = 1 - \frac{T_u}{D_u T_b N_b} \quad (3.9)$$

Burada

N_b : Çekme kuvvetini aktaran bulonların sayısı

T_u : Uygulanan çekme kuvvetini

göstermektedir. Bulonun çekme kapasitesinin hesabı ise 3.10 bağıntısıyla yapılır.

$$\phi R_n = \phi 0.75 F_u A_b \quad (3.10)$$

Burada

$\phi = 0.75$

$F_u = 1000 \text{ N/mm}^2$, Bulonun kopma gerilmesi

A_b : Bulonun alanı

olarak alınmaktadır.

Örnek olarak seçilen çapraz yerleşiminde üst ve alt uç bayrak levhası birleşimlerine etkiyecek maksimum kuvvetler iki yük durumu olarak aşağıda verilmiştir.

$N=500 \text{ kN}$ $V=391 \text{ kN}$1.Yükleme durumu

N=391kN V=500kN.....2.Yükleme durumu

Bir adet M24'ün çekme kapasitesi;

$$\phi R_n = 0.75 \times 0.75 \times 1000 \times \frac{\pi \cdot 24^2}{4} = 254469 N \approx 254 kN$$

Bir bulona verilecek tam öngerme kuvveti; $0.70 \times \phi R_n = 0.70 \times 254 = 178 kN$

Sürtünme tipi bulon taşıma kapasitesi; $\phi R_n = 0.85 \times 0.35 \times 1.13 \times 1 \times 178 \times 1 = 59.83 kN$

olarak hesaplanır. İki yük durumu için ayrı ayrı azaltma katsayıları hesaplanırsa

1.durum için

$$k_s = 1 - \frac{500}{1.13 \times 178 \times 12} = 0.792$$

değeri elde edilir. 1 adet sürtünme tipi M24(10.9) bulonun kesme kapasitesi ise $0.792 \times 59.83 = 47.38 kN$ olarak bulunur. Buna göre 12 adet bulon için

$12 \times 47.38 = 563.56 kN > 391 kN$ değeri elde edilir.

2.durum için;

$$k_s = 1 - \frac{391}{1.13 \times 178 \times 12} = 0.838$$

değeri elde edilir. 1 adet sürtünme tipi M24(10.9) bulonun kesme kapasitesi $0.838 \times 59.83 = 50.14 kN$ olarak hesaplanır. Benzer biçimde, 12 adet bulon için

$12 \times 50.14 = 601.68 kN > 500 kN$ değeri elde edilir.

Böylece, sonuç olarak iki yük durumu için elde edilen bulon taşıma kapasitelerinin uygulanan yükten büyük ve yeterli olduğu tespit edilmiştir. Bulonlara öngerilme vermek amacıyla bu çalışma kapsamında özel olarak Gedore marka mekanik tork cihazı alınmış (Şekil 3.26) ve tüm bulonların sıkılmasında (Şekil 3.27) kullanılmıştır.



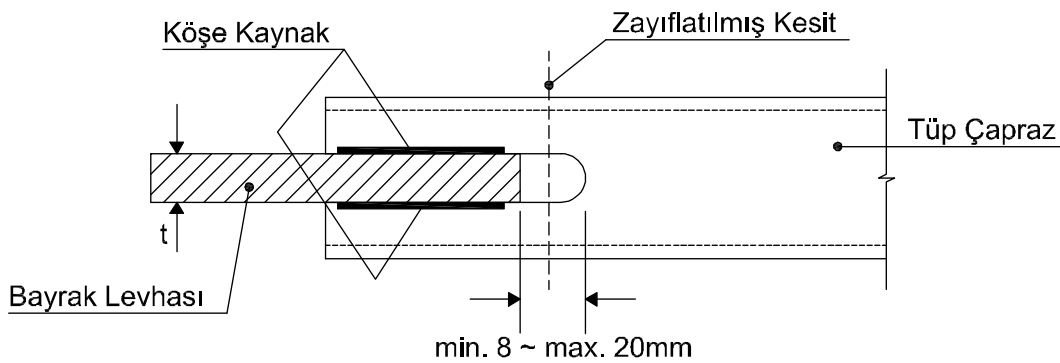
Şekil 3.26 : Gedore mekanik tork cihazı.



Şekil 3.27 : Bulonlara öngerme verilmesi.

3.2.4 Numune birleşim detayları

Kutu ve boru profilli numunelerin tamamında profil ile bayrak levhasının birleştiği bölgelerde numune yarılarak bayrak levhası numune içerisine sokulmuştur. Numune üzerindeki yarık boyu gerekli olan kaynak boyundan daha uzun alınmış, böylece kaynaklama işlemi tamamlandıktan sonra bayrak levhasından sonra uçta bir boşluk oluşturulmuştur (Şekil 3.28). Çekme akması boşluk etrafında yerel bir bölgede toplanmakta ve sünek davranışı sağladığı bilinmektedir. Daha uzun slot boyunun çapraz sünekliğine katkı sağlayabileceği düşünülmüştür (Yang ve Mahin, 2005). Boşluk bırakıldığından dolayı, çekme etkisinde çaprazın yük taşıma kapasitesi hesaplanırken zayıflatılmış enkesit kullanılmıştır. Bırakılan bu boşluk gerilme yığılmasını azaltmak amacıyla oval şekilde sonlandırılmıştır.



Şekil 3.28 : Zayıflatılmış kesit şematik gösterimi (Plan).

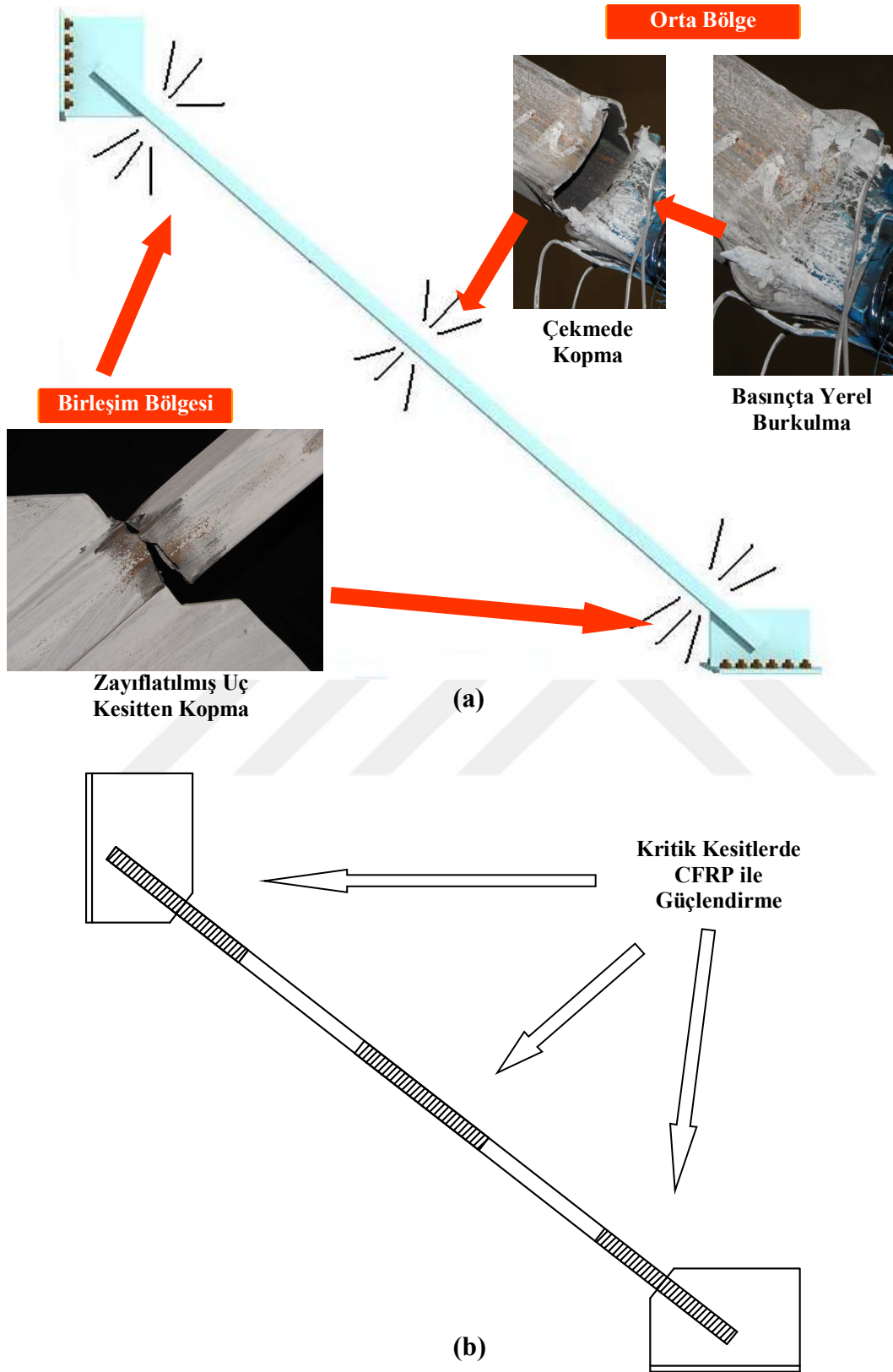
3.2.5 Numunelerin üretimi

Numunelerin deney düzeneğine montajının tam olarak hassas bir biçimde, gerçek boy ve yatay/düşey açılarda yapılması için numuneler yerinde kaynaklanmıştır. Alt ve üst bayrak levhaları yerlerine bulonlarla sabitlendikten sonra belirlenen açı ve konumda yerleştirilen tüp numuneler işkencelerle sıkılarak yerlerine sabitlenmiştir. Bu durumdayken punto kaynakla bayrak levhalarıyla birleştirilen numuneler yerlerinden sökülüp mevcut güçlü döşeme üzerine indirilmişlerdir. Kaynaklama işlemi yerde tamamlanmıştır. Şekil 3.29’da numunelerin kaynaklanma aşamaları görülmektedir. Kaynaklarda Lincoln Electric Power 500S gaz altı kaynak makinesi ve Askaynak tarafından üretilen SG2 gaz altı kaynak teli kullanılmış olup kaynak telinin emniyet gerilmesi 500N/mm^2 ’dir.



Şekil 3.29 : Numunelerin montajı: (a) Bayrak levhalarının montajı. (b) Yerinde punto kaynak yapılması. (c) Gazaltı kaynak makinesi. (d) Yerde kaynakların yapılması. (e) Tamamlanmış kaynak.

3.2.6 Kritik kesitler ve numunelerin güçlendirilmesi



Şekil 3.30 : Tüp çaprazlardaki kritik kesitler ve güçlendirme: (a) Beklenen göçme/kopma modları. (b) CFRP ile güçlendirme biçimleri.

Numunelerin zayıflatılmış uç kesitlerinde erken kopmanın ve orta bölgelerinde oluşabilecek yerel burkulma sonrası kopmanın geciktirilmesi ya da engellenmesi için CFRP plaka ve CFRP kumaş kullanılarak güçlendirme yapılması bu çalışmada önerilmektedir (Şekil 3.30). Zayıflatılmış uç kesit bölgelerinde esas olarak CFRP plaka ile güçlendirme yapılmış olup TB-11 numunesine yalnızca CFRP plaka ile güçlendirme yapılmıştır. Yalnızca zayıflatılmış uç kesitleri güçlendirilen TB-8 ve TB-12 numunelerinde CFRP plakanın çelik yüzeye/çapraza olan aderansını arttırmak için 3 kat, diğer tüm güçlendirilen numunelerde ise 2 kat CFRP kumaş sargısı yapılmıştır. Yerel olarak narin olan kesitlerde orta bölgeden kopmanın engellenmesi ya da geciktirilmesi için orta bölgelerde çapraz temiz boyunun belirlenen yüzdesi kadar uzunluklarda 2 kat CFRP sargı uygulaması yapılmıştır. Numunelerin güçlendirme durumları Çizelge 3.1’de detaylı olarak verilmiştir. Tüm CFRP malzemeler BASF YKS tarafından karşılıksız olarak temin edilmiştir.

3.2.6.1 Yüzey temizliği

Yüzey temizliği CFRP malzemenin yüzeye yapışma dayanımı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Laboratuvar ve atölyede uygulanan yöntemler olarak iki türden yüzey temizleme tekniği kullanılmıştır. CFRP plaka macun kıvamındaki epoksiyle, CFRP kumaş ise sıvı şeklindeki epoksiyle yapıştırılmaktadır. Laboratuvarda uygulanan yüzey temizliğinde CFRP plakanın yapıştırılacağı yüzeyler spiral ucuna takılan 80 numara zımpara taşıyla temizlenmiş, pürüzlendirilmiş ve macun kıvamındaki epoksinin yüzeye iyice tutunması sağlanmıştır. CFRP kumaşın sargı sırasında yapışacağı uç ve orta bölgelerdeki çelik yüzeyler ise matkap ucuna takılan zımpara ile kir ve pastan temizlenmiş ve pürüzsüz yüzey haline getirilmiştir. Çizelge 3.7’de numunelerin yüzey temizliği yöntemleri ve Şekil 3.31’de laboratuvarda uygulanan yüzey hazırlığı yöntemleri görülmektedir.

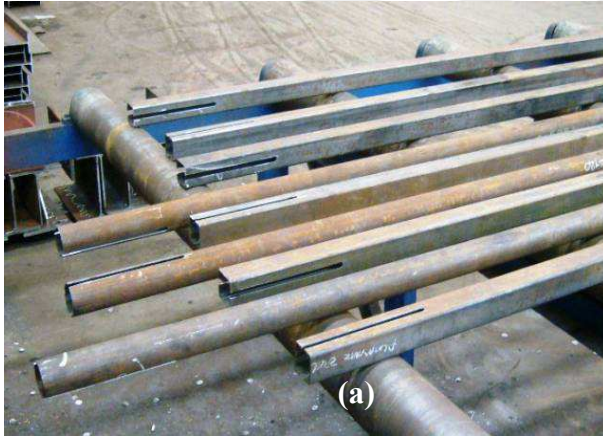
Çizelge 3.7 : Numunelerin yüzey temizliği yöntemleri

Numuneler	Yüzey Temizliği
TB-1 ... TB-12	Laboratuvarda
TB-13 ... TB-21	Atölyede



Şekil 3.31 : Laboratuvarda yüzey temizliği uygulamaları: (a) CFRP plaka yapıştırılacak bölgede yüzey hazırlığı. (b) CFRP kumaş yapıştırılacak bölgede yüzey hazırlığı.

Atölyede yapılan yüzey temizliğinde SA2.5 kalitesinde kumlama yapılmaktadır. Profillerin kumlama makinesine paslı şekilde girişi ve makineden temizlenmiş olarak çıkışları Şekil 3.32’de görülmektedir.



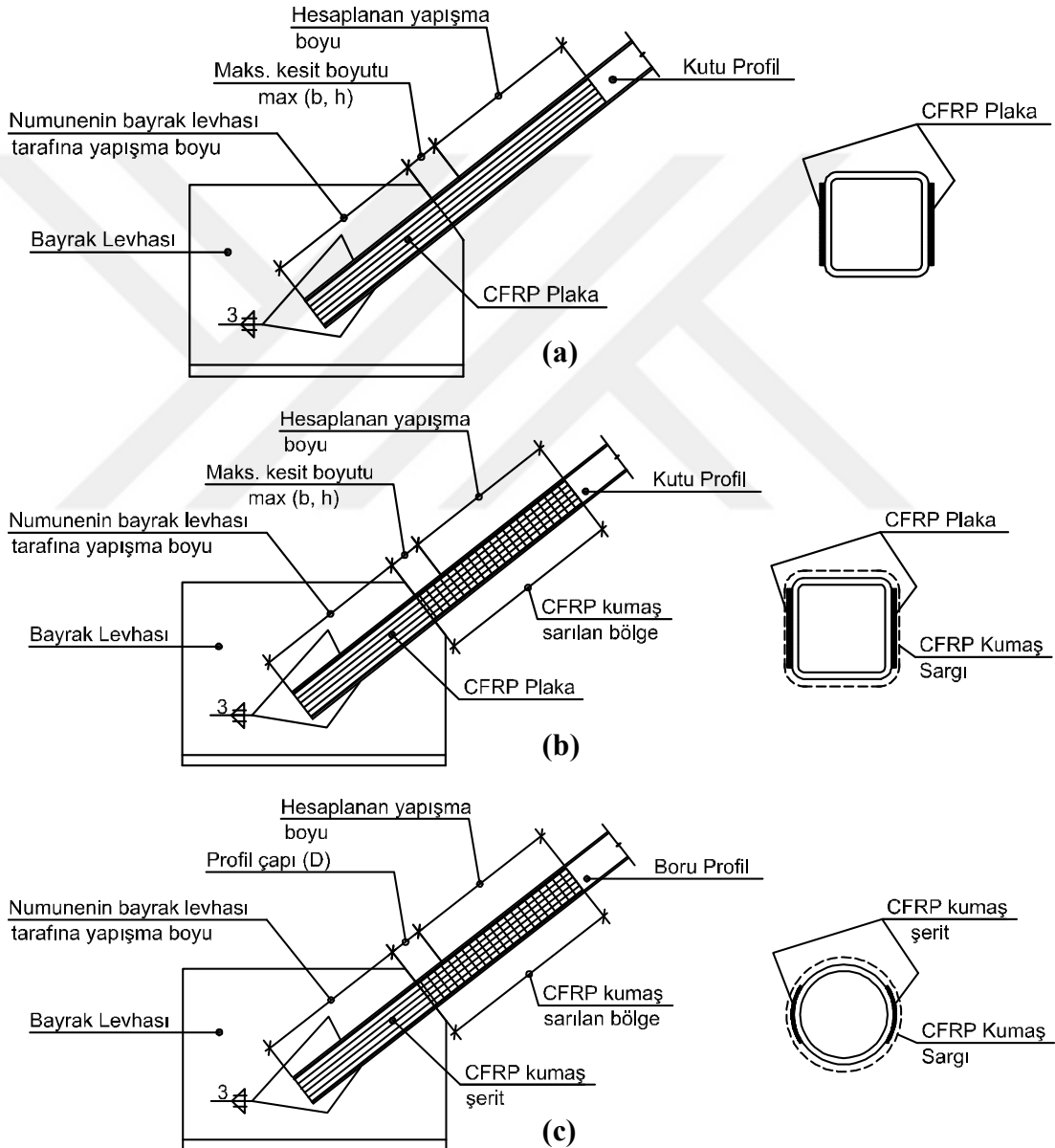
Şekil 3.32 : Numunelerin fabrikadaki durumları: (a) Kumlama öncesi. (b) Kumlama sonrası.

3.2.6.2 Güçlendirmenin uygulanması

Zayıflatılmış enkesitlerde kutu kesitlerde uygulanan CFRP plaka ve boru kesitlerde uygulanan CFRP kumaş şeriti boyları hesaplanırken, kesit kaybından dolayı profil kapasitesindeki azalma belirlenmiş ve bu değer güvenlik katsayısı olarak seçilen 2 ile artırılarak tasarım kuvveti hesaplanmıştır.

CFRP plakalar kutu kesitlerin zayıflatılmış kenarlarına komşu kenarlarının düz kısımlarına yapıştırılmışlardır. CFRP plaka enkesiti tasarım kuvvetine göre kontrol

edilmiştir. Epoksi yapışma boyu belirlenirken ise epoksi yapışma dayanımı dikkate alınarak her numune için tasarım kuvvetini karşılayacak yapışma boyu belirlenmiştir. Numunenin bayrak levhasından sonraki bölümünde belirlenen bu yapışma boyuna zayıflatılmış kesit bölgesinde oluşabilecek plastikleşme ve aderans kaybı dikkate alınarak, kesit boyutu eklenerek uygulanmıştır. Zayıflatılmış kesitin bayrak levhası tarafında ise ne kadar uzunluk varsa oraya CFRP plaka yapıştırılmıştır. Kutu profil için zayıflatılmış uç kesit güçlendirme detayları Şekil 3.33-a ve b detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 3.33 : Zayıflatılmış uç bölge güçlendirme detayları: (a) Kutu profiller için yalnızca CFRP plaka uygulaması. (b) Kutu profiller için CFRP plaka ve CFRP kumaş sargı uygulaması. (c) Boru profiller için CFRP kumaş şerit ve CFRP kumaş sargı uygulaması.

Boru kesitlerde yüzey eğrisel olduğundan CFRP plaka yerine CFRP kumaş şerit kullanılmıştır (Şekil 3.33-c). Şeritlerin lif doğrultusu profil eksenine paralel olacak şekilde düzenlemiş ve yapışma boyları CFRP plakalarda olduğu gibi belirlenmiştir.

Tasarım koşullarına uygun olarak BASF YKS'nin MBrace Laminate LM 10/1.4 tipi (BASF, 2008) CFRP plaka olarak seçilmiştir. Çizelge 3.8'da kullanılan CFRP plakanın teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.8 : CFRP plaka teknik özellikleri (BASF, 2008).

Teknik Özellikler	MBrace Laminate LM 10/1,4
Elastisite Modülü (N/mm ²)	165000
Çekme Dayanımı (N/mm ²)	2500
Kopma Uzaması (%)	1.5
Kalınlık S (mm)	1.4
Genişlik L (mm)	100
En Kesit Alanı (mm ²)	140

Çelik yüzey ve CFRP plaka arasındaki aderansı sağlamak için BASF YKS'nin MBrace Laminate Adesivo (BASF, 2008) epoksi esaslı yapıştırıcısı kullanılmıştır. Bu malzeme iki bileşenli, solventsiz ve yüksek dayanımlıdır. A bileşeni epoksi reçinesi ve B bileşeni epoksi sertleştiricisidir. Çizelge 3.9'da epoksi yapıştırıcının teknik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.9 : Epoksi esaslı CFRP plaka yapıştırıcısı teknik özellikleri (BASF, 2008).

Teknik Özellikler	MBrace Laminate Adesivo
Renk	Gri
Basınç Dayanımı (7 gün) (TS EN 196)	> 40 N/mm ²
Eğilme Dayanımı (7 gün) (TS EN 196)	> 20 N/mm ²
Betona Yapışma Dayanımı	> 3 N/mm ²
Çeliğe Yapışma Dayanımı	> 3 N/mm ²
Tam Kurlenme Süresi	7 gün

Yapıştırıcı hazırlanırken A ve B bileşenleri 1/1 oranında birleştirilmiştir. İki malzemedan A bileşeni beyaz, B bileşeni ise siyah renklidir. İki bileşen uygun bir

CFRP plaka uzun rulo halinde teslim alınmıştır. Plaka istenen boy ve genişlikte spiralle kesilmiştir. Gerekli boyda hazırlanan plakalar yapıştırma öncesinde aseton ile silinerek olası toz ve kirden temizlenmiştir.



(b)



(d)



(f)

59

CFRP plakanın yapıştırılması sırasında hazırlanan epoksi harcı bol miktarda spatula yardımıyla yüzey hazırlığı tamamlanmış çelik yüzey üzerine sürülmüştür. Hazırlanan CFRP plaka epoksi harcı üzerine yerleştirilip, orta kısmından başlayarak hafifçe kaydırarak epoksinin tüm plaka yüzeyine ulaşması ve içeride hava boşluğu kalmaması sağlanmıştır. Şekil 3.34’de CFRP plaka yapıştırılması adımları görülmektedir.

CFRP kumaş sargılar bazı numunelerin yalnızca zayıflatılmış kesit bölgelerine, bazılarında ise hem zayıflatılmış kesit bölgesine hem de orta bölgelerine uygulanmıştır. Basınç etkisindeki çapraz üzerinde genellikle orta bölgede ikinci mertebe etkileri nedeniyle plastik mafsall oluşumu görülmektedir. Oluşan bu plastik mafsall literatürde belirtildiği gibi kutu profilin büyük boyutu kadar bir bölgeye yayılmaktadır (Ding ve diğ., 2008). CFRP kumaş sargı, çaprazın uygulandığı bölgeye yerel bir rijitlik katmakta olup oluşan plastik mafsall rijit bölge dışına kayma eğiliminde olacaktır. Şekildeğiştirmelerin artışlarını sınırlamak, plastik mafsall uzunluğunu çapraz üzerine yaymak ve böylece yerel burkulma oluşumunu geciktirmek ya da engellemek için çapraz üzerinde oluşması olası plastik mafsall bölgesi CFRP kumaş ile çapraz boyuyla orantılı olarak sarılmıştır. Bu sargı boyu belirlenirken çapraz boyunun değişik yüzdeleri dikkate alınmıştır. Özellikle zayıflatılmış kesit bölgelerinde CFRP plakanın yapıştırılmasından sonra epoksinin katılaşması için bir gün beklenmiş ve sonra da CFRP kumaş sargı uygulaması yapılmıştır. Gerekli durumlarda belirlenen boyda sargının yapılabilmesi için CFRP sargılar minimum 50mm üst üste bindirilmiştir. CFRP kumaş malzeme olarak BASF YKS tarafından temin edilen MBrace Fiber C1-23 (BASF, 2008) kullanılmıştır. CFRP kumaşın genişliği 300mm olup, teknik özellikleri Çizelge 3.10’da verilmiştir.

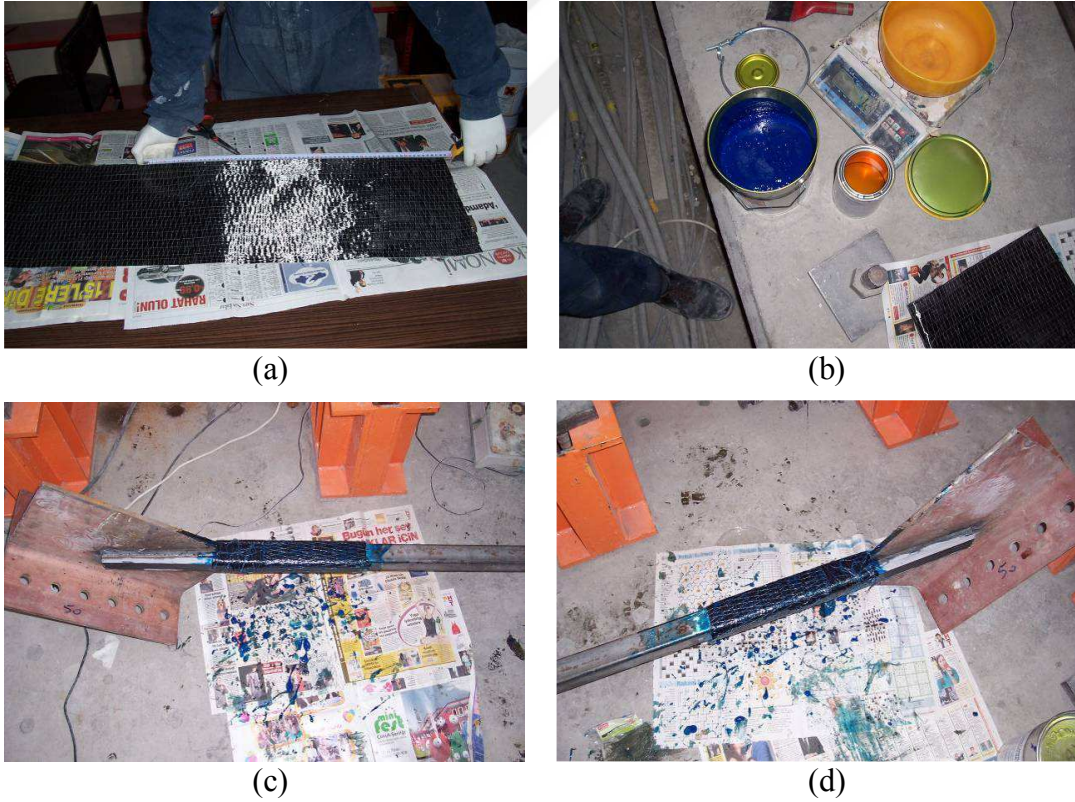
Çizelge 3.10 : CFRP kumaş teknik özellikleri (BASF, 2008).

Teknik Özellikler	MBrace Fiber C1-23
Elastisite Modülü (N/mm ²)	240000
Çekme Dayanımı (N/mm ²)	3800
Tasarım Kesit Kalınlığı (mm)	0.117
Toplam Ağırlık (g/m ²)	230
Kopmada Uzama (%)	1.55
Genişlik (mm)	300/600

Çizelge 3.11 : Epoksi esaslı CFRP kumaş yapıştırıcısı teknik özellikleri (BASF, 2008).

Teknik Özellikler	MBrace Adesivo (Saturant)
Renk	Mavi
Basınç Dayanımı (7 gün) (TS EN 196)	$> 60 \text{ N/mm}^2$
Eğilme Dayanımı (7 gün) (TS EN 196)	$> 50 \text{ N/mm}^2$
Yapışma Dayanımı (Betona) (7 gün)	$> 3 \text{ N/mm}^2$
Tam Kurlenme Süresi	7 gün

CFRP kumaş sargıların yapıştırılmasında BASF YKS'nin MBrace Adesivo (Saturant) yapıştırıcısı kullanılmıştır. Bu yapıştırıcı A bileşeni epoksi reçinesi, B bileşeni sertleştirici olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. A ve B bileşenleri 3/1 oranında karıştırılarak matkap ucuna takılan mikser ucuyla 2~3dk boyunca homojen mavi renkli karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır. Çizelge 3.11'te MBrace Adesivo (Saturant) epoksi esaslı yapıştırıcının teknik özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.35 : CFRP kumaş yapıştırma aşamaları: (a) CFRP kumaşın belirlenen boyda kesilmesi. (b) MBrace Saturant epoksi bileşenleri. (c) ve (d) CFRP kumaş sarıldıktan sonraki örnek görünüşler.

CFRP kumaş üzerine ilk olarak rulo yardımıyla epoksi sürülerek lifli yapıya sahip olan kumaşın lifleri arasına epoksinin yayılması sağlanmıştır. Tekrar rulo yardımıyla yapıştırılacak olan yüzeye epoksi sürüldükten sonra CFRP kumaş sarılmaya başlanmıştır. Birbirinin üzerine sargı ve bindirme yapılırken aralara tekrar rulo ile epoksi sürülerek yüzeye kumaş arasında boşluk kalmamasına dikkat edilerek yapıştırma işlemi tamamlanmıştır (Şekil 3.35).

CFRP plaka ve kumaşların yapıştırılmasında kullanılan reçine esaslı epoksilerin kürünü tamamlayabilmesi için numuneler denenmeden önce minimum 7 gün beklenmiştir.

3.3 Ölçüm Düzeneği

3.3.1 Şekildeğiştirme ölçerler (Straingauge'ler)

Deneylerde TML marka akma sonrası ölçüm yapabilen şekildeğiştirme ölçerler kullanılmıştır. Çelik yüzeye yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerler 10mm uzunlukta ölçüm yapabilen YFLA-10-3L tipindeki şekildeğiştirme ölçerler olup 120 ohm direnç göstermektedirler. Her numune üzerinde, numune boyunun $\frac{1}{4}$ 'ü , $\frac{1}{2}$ 'si ve $\frac{3}{4}$ 'ünde olmak üzere üç noktadan ve numunenin dört yüzünden şekildeğiştirme ölçümü yapılmıştır. Bu sistem tüm çapraz üzerindeki gerilme ve şekildeğiştirme dağılımını uygun bir biçimde vermektedir. Şekildeğiştirme ve yerdeğiştirme ölçerlerin yerleşimi Şekil 3.36 ve Şekil 3.37'de görülmektedir.

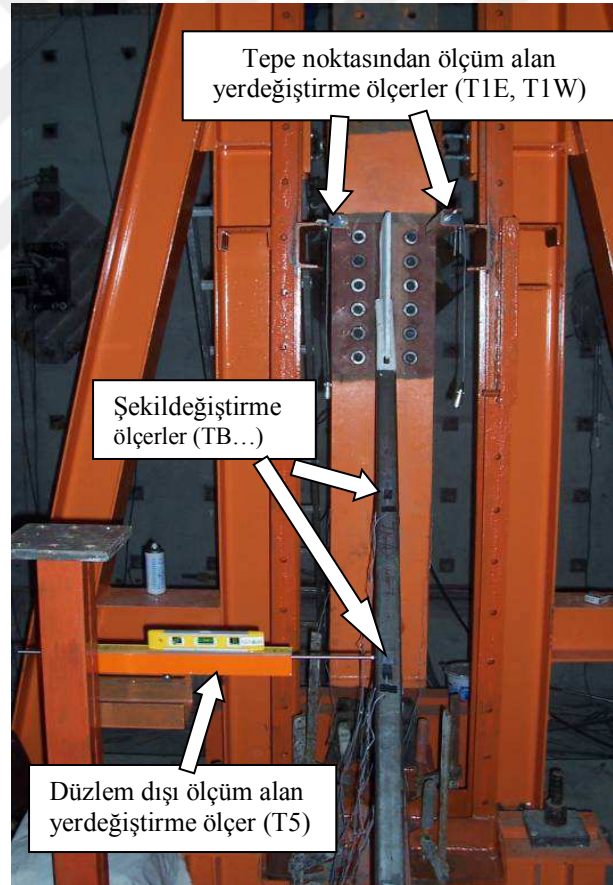
TB-2, TB-6, TB-14, TB-15, TB-17 ve TB-18 numunelerinde kontrol amaçlı olarak bayrak levhalarından da şekildeğiştirmeler okunmuştur. Ayrıca, TB-2, TB6, TB-14 ve TB-18 olmak üzere dört güçlendirilmiş numunede zayıflatılmış kesit bölgesinde CFRP plakalar üzerindeki şekildeğiştirme ölçerlerden kontrol amaçlı veri alınmıştır.

Deney düzeneğini oluşturan kolonun ve kirişin deney sırasında elastik davrandığını doğrulamak için ölçümler alınmıştır. Kolonun orta noktasında, ve çaprazın kirişe bağlantı noktasında, I kirişin üst ve alt başlıklarının her iki tarafında olmak üzere sekiz adet şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır.

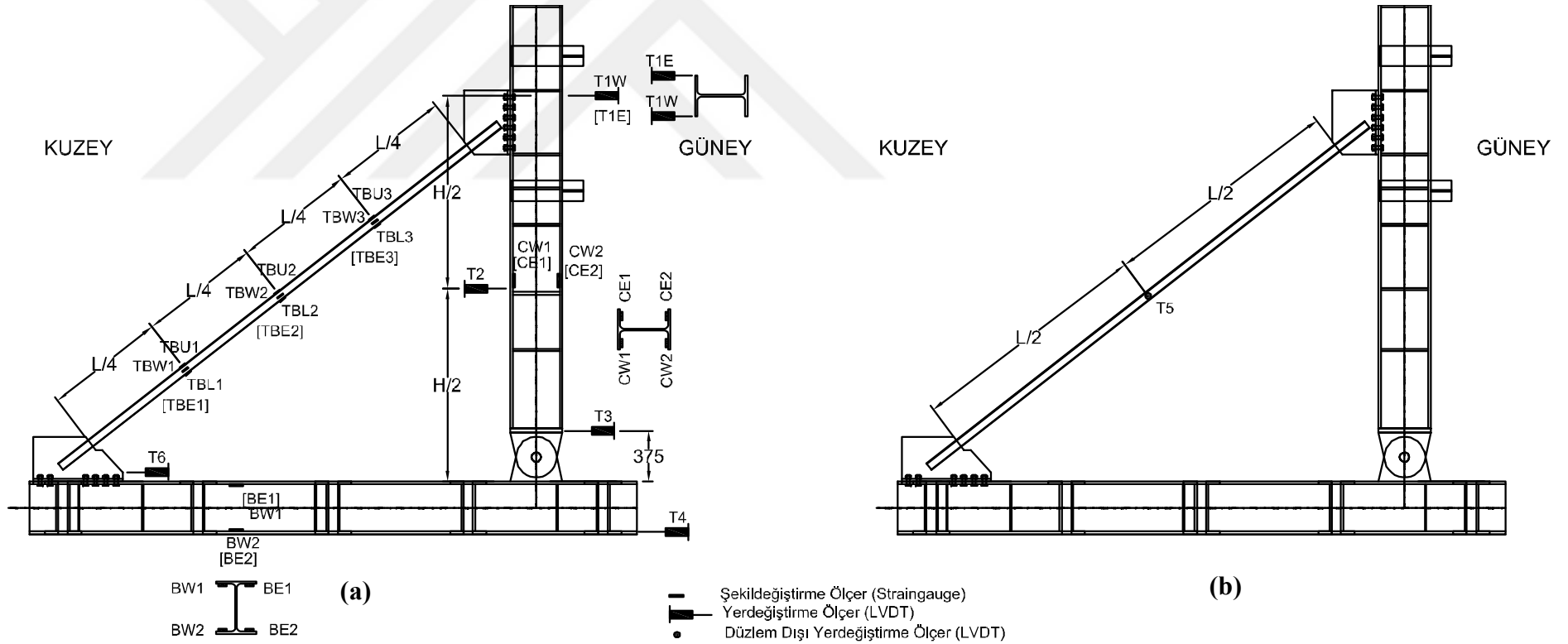
3.3.2 Yerdeğiştirme ölçerler (LVDT'ler)

Tez kapsamında kullanılmak üzere özel olarak satın alınan 2 adet 300mm kapasiteli yerdeğiştirme ölçerlerden yararlanılmıştır. Deneyler sırasında yine TML marka

yerdeğiştirme ölçerler kullanılmıştır. Bir adet 300mm kapasiteli ve bir adet 200mm kapasiteli yerdeğiştirme ölçer yarı stroklu (sırasıyla $\pm 150\text{mm}$ ve $\pm 100\text{mm}$) olarak hidrolik veren seviyesinde tepe yerdeğiştirmesini ölçmek için kullanılmıştır. Numunenin tam ortasında düzlem dışı yerdeğiştirmeyi ölçmek için diğeri 300mm kapasiteli yerdeğiştirme ölçer de yarı kapasiteli ($\pm 150\text{mm}$) olarak kullanılmıştır; yüksek strok kapasiteli yerdeğiştirme ölçerlerin düzlem dışı yerdeğiştirmelerin belirli bir değere kadar ölçümlerde kullanılması çapraz deneylerinde bir zorunluluktur. Kontrol için kolonun yarı yüksekliğinden 100mm kapasiteli yerdeğiştirme ölçer ile veri alınmıştır. Deney düzeneğinin çalışmasının kontrolü için mafsal noktası üzerinden 10mm kapasiteli, taban kirişinin alt noktasından 5mm kapasiteli ve alt bayrak levhasından 10mm kapasiteli yerdeğiştirme ölçerler yarı strok ile kullanılmıştır. Yerdeğiştirme ölçerlerin yerleşimi Şekil 3.36 ve Şekil 3.37’de görölmektedir.



Şekil 3.36 : Laboratuvar ortamında ölçüm düzeneğinin görünüşü.



Şekil 3.37 : Ölçüm cihazlarının yerleşimi: (a) Düzlem içi. (b) Düzlem dışı.

4. YALIN VE CFRP ELEMANLARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ ÇAPRAZ NUMUNELERE İLİŞKİN DENEYSEL SONUÇLAR

4.1 Giriş

Bu bölümde, deneylerde kullanılan yükleme protokolleri, numunelerin akma yüklerinin ve yerdeğiştirmelerinin tahmininde kullanılan hesap yöntemi ve tüm numunelere ilişkin deneysel histeretik davranış parametrelerini içeren gözlemler aktarılacaktır.

4.2 Yükleme Protokolleri

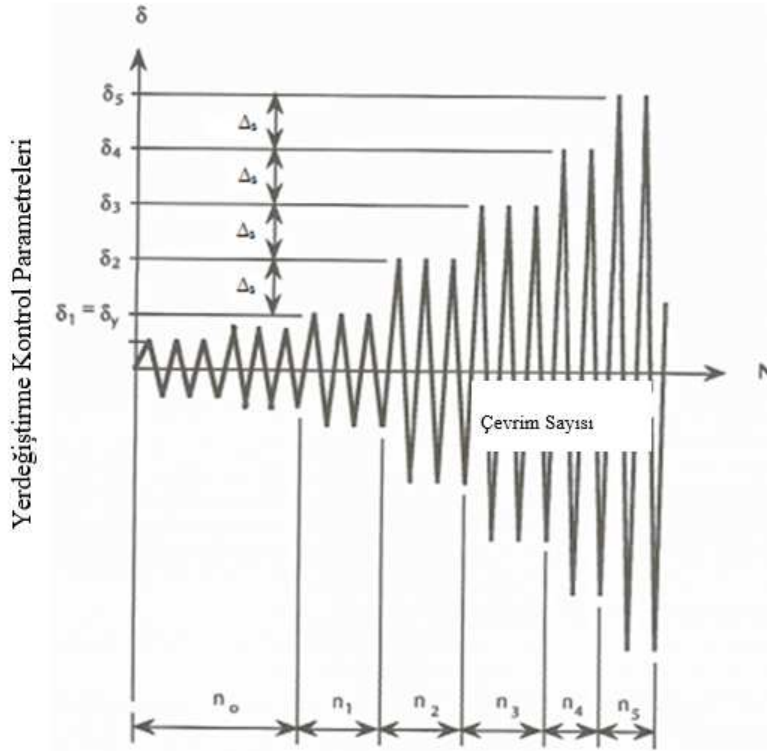
Çalışma kapsamındaki numunelerin denenmesinde seçilen yükleme protokolünün davranış üzerine etkisini göstermek amacıyla iki farklı yükleme protokolü kullanılmıştır. Bunlardan ilki ATC-24 (1992) diğeri ise yalnızca TB-17 ve TB-18 numuneleri deneylerinde kullanılan SAC/BD-00/10 yakın fay etkisi yükleme protokolüdür (Krawinkler ve diğ., 2000).

4.2.1 ATC-24 (1992) yükleme protokolü

Numunelerin büyük bir bölümü ATC-24 (1992) “Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures” protokolüne göre artan yerdeğiştirmeler etkisinde statik olarak denenmiştir. ATC-24 deney programında yükleme protokolü yerdeğiştirmenin belirli adımlarda artmasıyla oluşan çok adımlı bir yerdeğiştirme protokoldür. Çelik elemanların yerdeğiştirme esaslı deneylerinde en çok bu protokolden yararlanılmaktadır.

Bu yükleme protokolünde, çevrimler “simetrik” maksimum yerdeğiştirme değerlerine sahiptir. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi δ_j , j yükleme adımıdaki maksimum yerdeğiştirmedir. Benzer şekilde, n_j j yükleme adımıda uygulanan çevrim sayısıdır. Δ_s ise ardışık iki yükleme adımı arasında yerdeğiştirmedeki artıştır. n_0 , akmaya karşılık gelen yerdeğiştirme olan δ_y ’den küçük olan pik yerdeğiştirmelerin sayısıdır. n_2 , $\delta_2 = \delta_y + \Delta_s$ pik yerdeğiştirmesinin uygulanma sayısı

ve n_3 , $\delta_3 = \delta_y + 2\Delta_s$ pik yerdeğiştirmesinin uygulanma sayısı 3'tür. n_4 'ten n_m 'e kadar pik yerdeğiştirmelerin uygulanma sayısı ise 2 alınmaktadır. n_4 için deplasman $\delta_4 = \delta_y + 3\Delta_s$ olup n_m için deplasman $\delta_m = \delta_y + (m-1)\Delta_s$ şeklinde hesaplanmaktadır.



Şekil 4.1 : ATC-24 yerdeğiştirme protokolü (ATC,1992).

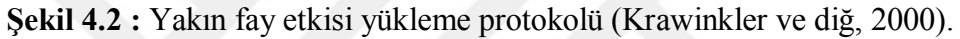
Deney numunelerinin aynı koşullarda değerlendirilmesi ve karşılaştırılabilmesi için yalın numunelere uygulanan yükleme protokolü aynı gruptaki CFRP elemanlarla güçlendirilmiş numunelere de aynı şekilde uygulanmıştır.

4.2.2 Yakın fay etkisi yükleme protokolü (SAC/BD-00/10)

Deney programının ve buna bağlı olarak yükleme protokolünün seçilmesi deneyin amacına, numunelerin tipine ve karşılaşılabilecek beklenen olası göçme modlarına büyük ölçüde bağlıdır. Numunelerin davranışları, dayanım azalmasının yavaş ve hızlı olduğu yükleme protokollerinin etkisinde farklılık göstermektedir.

Yakın fay etkisi yükleme protokolü “*Süneklik Düzeyi Yüksek Çelik Çerçevelerin*” hızlı (ani) dayanım azalması durumunda davranışlarının incelenmesi için Krawinkler ve diğ. tarafından 2000’de önerilmiştir (SAC/BD-00/10).

Yakın fay yükleme protokolü darbe türünden depremlerin yapılar üzerindeki etkilerini incelemeye yardım etmektedir. Şekil 4.2’de önerilen bir yakın fay etkisi yükleme protokolü görülmektedir. Yükleme protokolünün ilk yarısı olan başlangıçtan

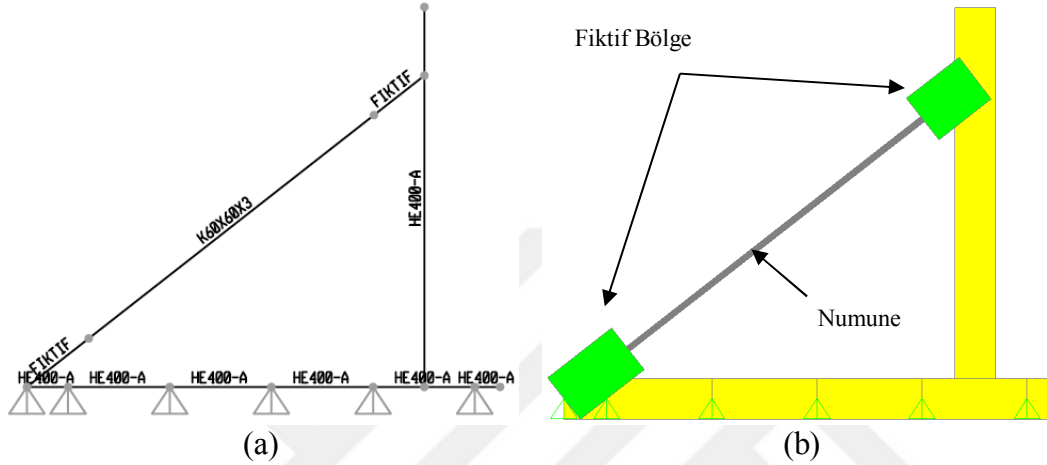


Şekil 4.2’de de görülebileceği gibi çekme ya da basınçla başlanacağı konusunda bilgi verilmemiştir. Burada numunenin ve incelenecek göçme modunu sağlayacak şekilde yükleme protokolü uygulanmaktadır. Örneğin, zayıflatılmış uç kesitleri ve birleşim bölgesinin çapraz performansına etkileri incelenecekse ilk adımda basınçla başlayıp çekmeye geçilmesi, çaprazdaki genel ve yerel burkulmaların çapraz performansına etkileri incelenecekse ilk adımda çekmeyle başlayıp basınçla devam edilmesi gereklidir.

67

4.3 Numunelere İlişkin İtme (Pushover) Eğrilerinin Hesaplanması

Numunenin çekme etkisinde akmada ve basınç etkisinde burkulmadaki yatay yük ve yerdeğiştirmelerini belirlemek için gerçek malzeme özellikleri kullanılarak SAP2000 yardımıyla itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Her numunenin gerçek geometrisi ve kesit özellikleri dikkate alınarak analiz modelleri oluşturulmuş, örnek bir model Şekil 4.3’de verilmiştir.



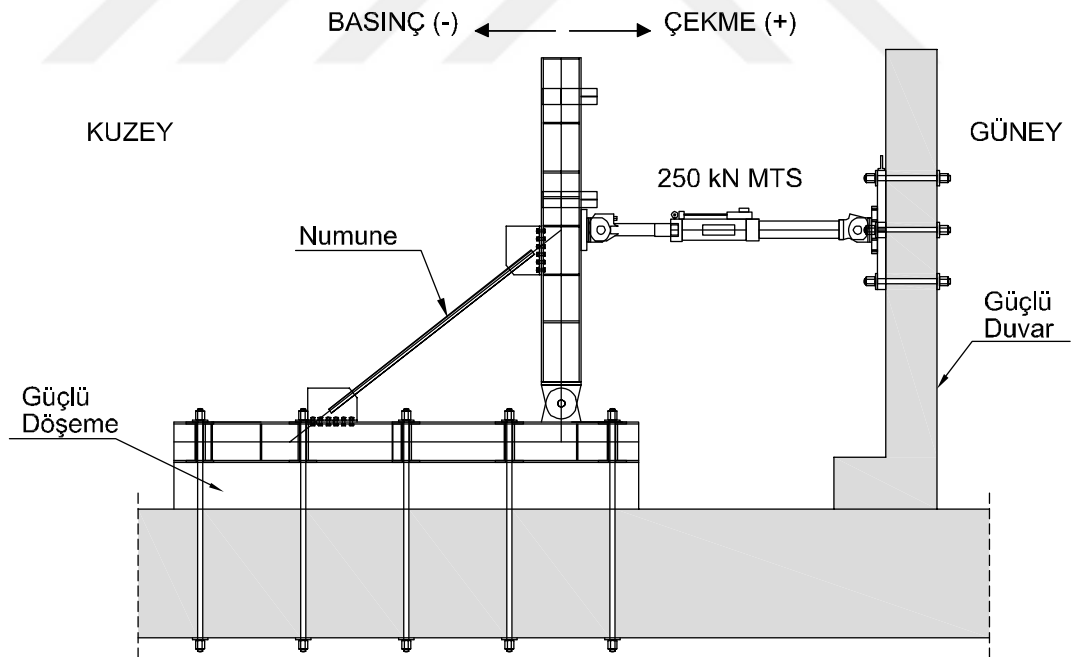
Şekil 4.3 : SAP2000’de oluşturulan örnek analiz modelinin: (a) Çubuk gösterimi. (b) Profil boyutlarının görünümü.

Programda numuneler elemanların eksenlerinin kesiştiği çalışma noktaları arasında tanımlanmıştır. Bu çalışma noktaları arasındaki çapraz eleman boyu gerçek boyundan daha uzun olduğundan, olabildiğince gerçek davranışı elde etmek için, numunelerin temiz boyu orta kısımda kalacak şekilde numunenin iki uç kısmına rijitliği yüksek fiktif kesitler tanımlanmıştır. Numunelerin uç birleşimleri mafsal ile ankastre arasında bir davranış sergilediğinden, deney sırasında güvenli tarafta kalmak ve hidrolik veren kapasitesini zorlamamak için bu noktalar ankastre olarak modellenmiştir. Böylece, gerçek durumdan daha fazla yatay yüklerin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Çapraz numuneler yalnızca eksenel yük taşıdıklarından FEMA 356 (2000)’e göre tanımlanan eksenel plastik mafsallar temiz numune uzunluğunun başına, ortasına ve sonuna atanmış, buna göre itme eğrileri elde edilmiştir. Eksenel mafsal tanımında kullanılan çapraz çekme ve basınç kapasitelerinin hesabı Bölüm 3.2.2’de açıklanmıştır.

4.4 Deney Gözlemleri

Bu bölüm her bir deney sırasında yapılan gözlemleri özetlemektedir. Deneyler değişik konumlardaki iki adet video kamera ile kaydedilmiş ve her yönden çok kapsamlı olarak fotoğraflanmıştır. Her numunenin doğrusal ve doğrusal olmayan bölgelerdeki davranışları aşağıda açıklanmıştır. Kuvvet ve yerdeğiştirmelerde bir işaret birliğinin olması için pozitif (+) yüklerin numune üzerinde çekme, negatif (-) yüklerin ise numune üzerinde basınç oluşturan kuvvetler olduğu varsayılmıştır. Şekil 4.4’de numunelere etkiyen kuvvetlerin yönleri gösterilmiştir. Deney sırasında uygulanan her yerdeğiştirme miktarı milimetre ve görelİ ötelenme oranı cinsinden verilmiştir. Aynı şekilde, deney numunesine ilişkin düzlem dışı yerdeğiştirmeler de yine milimetre cinsinden ve numune temiz boyunun (L) yüzdesel oranı olarak verilmiştir. Her numuneye ilişkin deneyel gözlemler açıklanırken, histeretik ve itme eğrilerinin çakıştırıldığı grafikler, yükleme geçmişi, düzlem dışı yerdeğiştirme ve kümülatif enerji tüketimi eğrilerinden yararlanılmıştır. Ayrıca deney öncesinde, deney sırasındaki önemli anlarda ve deney sonrasında çekilen ve davranışı detaylı olarak açıklayan fotoğraflar eklenmiştir.



Şekil 4.4 : Çekme ve basınç kuvvetlerinin yönleri.

4.4.1 TB-1 numunesi (Kutu 60x60x3 - Yalın)

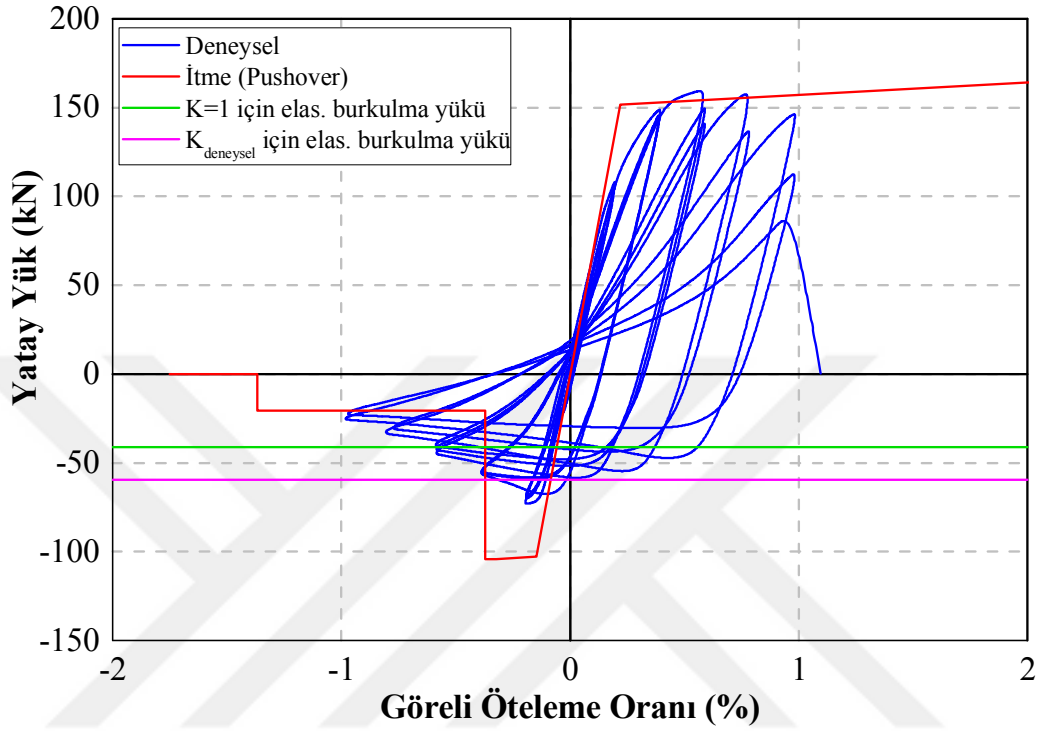
Yalın olarak üretilen TB-1 numunesine ilk olarak güney yönünde çekme uygulanarak deneye başlanmıştır. Deneysel olarak elde edilen yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi ve hesapla elde edilen itme eğrisi Şekil 4.5’de, yükleme protokolü Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Numunenin deney öncesi genel görünüşleri Şekil 4.9-a ve Şekil 4.9-b’de görülmektedir.

TB-1 numunesi $\pm 1.40\text{mm}$ yatay yerdeğiştirme ($\%0.049$ görelî öteleme oranı) etkisindeki ilk üç çevrimde ve tahmin edilen akma yerdeğiştirmesinin $2/3$ ’ündeki ($\pm 2.81\text{mm}$, $\%0.1$ görelî ötelenme oranı) üç çevrimde doğrusal elastik davranmıştır. Bu yerdeğiştirme seviyesinde batıya doğru 5.2mm ($\%0.146L$) düzlem dışı yerdeğiştirme ölçülmüştür. Zayıflatılmış uç birleşimlerinde ve birleşim elemanları olan kaynak ve bulonlarda herhangi bir sorun gözlenmemiştir. Şekil 4.9-c ve Şekil 4.9-d’de $+2.81\text{mm}$ yerdeğiştirme düzeyindeki elastik davranış görülmektedir.

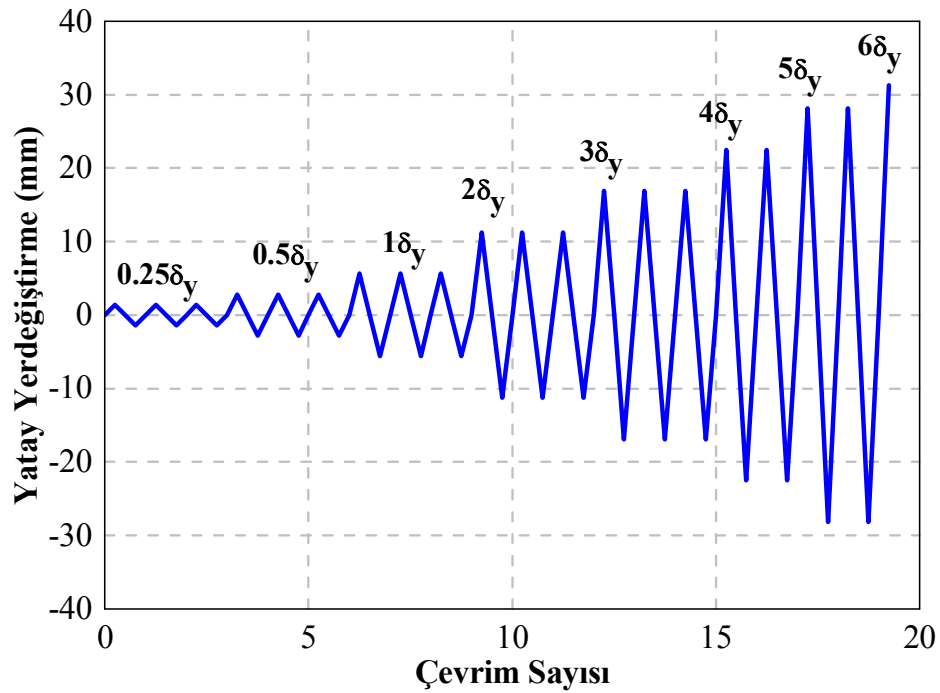
TB-1 numunesi için yapılan itme analiziyle tahmin edilen basınç akma yerdeğiştirmesi (δ_{yt}) -4.21mm ($\%0.15$ görelî öteleme oranı)’dır. İlk çekme etkisinde $+4.19\text{mm}$ yerdeğiştirmeye kadar yükleme yapılmıştır. İlk basınç yüklemesinde ise -4.21mm yerdeğiştirme seviyesinde numunede akma gözlenmemiştir. Bu seviyeden itibaren yerdeğiştirme miktarı azar azar arttırılarak kontrol odasından izlenen yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisinin yataylaştığı, doğrusal olmayan davranışın başladığı yerdeğiştirme seviyesi deney sırasında belirlenmiştir; bu değer, deneysel akma yerdeğiştirmesi (δ_{yd}) -5.63mm ($-1\delta_y$, $\%0.20$ görelî ötelenme oranı) olarak kabul edilmiştir. Bu yerdeğiştirme seviyesinde orta bölgedeki şekildeğiştirme ölçerlerden $-1000\mu\text{strain}$ civarında ölçüm alınmış olup bu yerdeğiştirme seviyesine karşı gelen yatay kuvvet -72.7kN ’dur. Guse levhaları batıya doğru dönmeye başlamış ve üst gusedeki dönmenin daha belirgin olduğu gözlenmiştir. İkinci ve üçüncü çevrimlerde çekme ve basınç yerdeğiştirmesi olarak $\pm 5.63\text{mm}$ ($\%0.20$ görelî ötelenme oranı) uygulanmıştır. Bu yerdeğiştirme seviyesinde numunede basınç etkisinde en fazla 47mm ($\%1.32L$) düzlem dışı yerdeğiştirme ölçülmüştür. Bu seviyede beyaz boya dökülmesi çevrimlerin hiçbirinde gözlenmemiştir. Şekil 4.9-e ve Şekil 4.9-f’de düzlem dışı burkulma başlangıcı görülmektedir.

$\pm 2\delta_y$ (11.26mm yerdeğiştirme, $\%0.39$ görelî öteleme oranı) seviyesi yerdeğiştirmesinin ilk çevriminde çekme etkisinde şekildeğiştirme ölçerlerde $+2000\mu\text{strain}$ ve üzeri büyüklüklerde şekildeğiştirmeler olduğu saptanmıştır. İlk

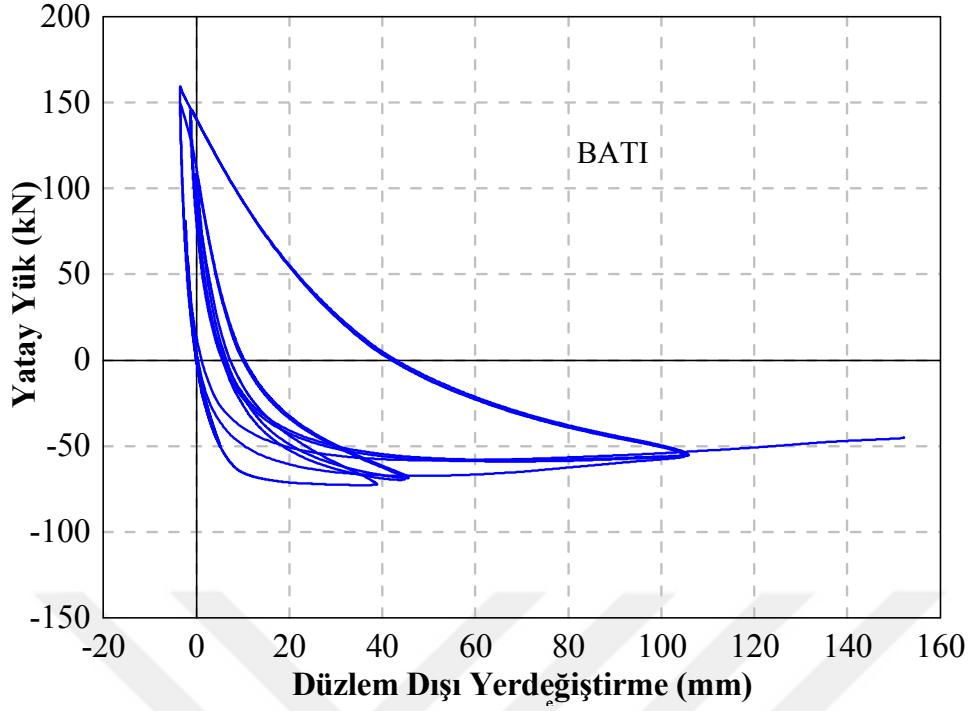
çevrimde basınç etkisinde alt ve orta bölgedeki şekildeğiştirmeler $-5000\mu\text{strain}$ 'i, üst bölgedekiler ise $-2500\mu\text{strain}$ 'i aşmıştır. Ulaşılan bu değerler, bu bölgelerde akma sonrası şekildeğiştirmelerin yoğunlaştığını göstermektedir. Basınç etkisinde numunede en fazla 107mm (%3L) düzlem dışı yerdeğiştirme ölçülmüştür.



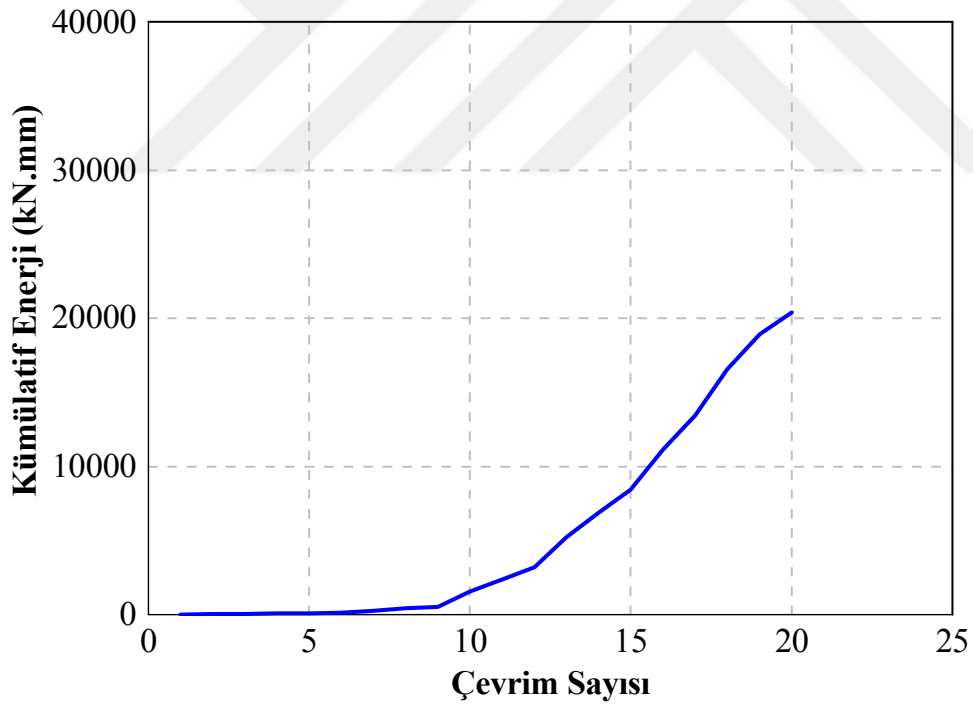
Şekil 4.5 : TB-1 numunesi yatay yük-görel öteleme oranı histeretik eğrisi.



Şekil 4.6 : TB-1 numunesi yükleme protokolü.



Şekil 4.7 : TB-1 düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil 4.8 : TB-1 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

Bu çevrimler sonunda önemli sayılması gereken değerlerde kalıcı yerdeğiştirme gözlenmemiştir. Basınç etkisinde bayrak levhalarında batıya doğru dönme devam etmiştir. Bu yerdeğiştirme adımımda çekmede ve basınçta ölçülen en büyük kuvvetler sırasıyla, +148.1kN ve -56.2kN'dur. $\pm 2\delta_y$ yerdeğiştirme seviyesinde burkulma Şekil 4.10-a'da görülmektedir.

Sonraki adım olan $\pm 3\delta_y$ ($\pm 16.89\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.59 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirmesi numuneye üç kez uygulanmıştır. Birinci çevrimin çekme etkisinde deneydeki en büyük yatay kuvvet olan $+163.3\text{kN}$ 'a ulaşılmıştır. Tüm şekildeğiştirme ölçerlerde $+3000\mu\text{strain}$ ve üzerinde şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. İlk çevrim sırasında basınç etkisinde 152mm (%4.27L) düzlem dışı yerdeğiştirme ölçülmüş ve bu noktadan sonra düzlem dışı yerdeğiştirme ölçerin kapasitesine ulaşıldığından, deney düzeneğinden çıkartılmıştır. Sistemin yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.7'de görülmektedir. Şekil 4.10-b'de $3\delta_y$ yatay yerdeğiştirme seviyesinde numunenin inelastik burkulma biçimi verilmiştir. Orta bölgede $-8000\mu\text{strain}$ civarında şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. Ulaşılan bu değer çaprazın orta bölgesinin, basınç etkisinde çok daha fazla zorlandığını ve tümsel burkulmanın yanında yerel burkulmanın da etkin olabileceğini göstermiştir. Üçüncü çevrimin çekme adımında üst uç zayıflatılmış kesit birleşiminin alt kısmında aşırı boya dökülmesi izlenmiş olup bu gözlem Şekil 4.10-c'de verilmiştir.

Numuneye, $\pm 4\delta_y$ ($\pm 22.52\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.79 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirmesi iki çevrim olarak uygulanmıştır. Bu adımdan itibaren numunenin çekme dayanımında da azalma başlamıştır. İlk çevrim çekme etkisinde üst uç zayıflatılmış kesitte boya dökülmesi devam etmiş, alt uç zayıflatılmış kesitte ise boya dökülmesi başlangıcı görülmüştür. Şekil 4.10-d'de alt uç zayıflatılmış kesit batı yüzündeki boya dökülmesi görülmektedir. İlk çevrimde ulaşılan en büyük çekme ve basınç kuvveti değerleri sırasıyla $+159.6\text{kN}$ ve -34.72kN 'dur. Şekil 4.10-e'de $-4\delta_y$ yerdeğiştirme seviyesinde burkulma görülmektedir. İkinci çevrimin çekme etkisinde uzama ve kısalmanın yoğunlaştığı alt zayıflatılmış kesitte yoğun boya dökülmesi gözlenmiş olup üst zayıflatılmış kesitte boya dökülmesi devam etmiştir. Alt zayıflatılmış kesitte batı tarafında yırtılma başlangıcı görülmüştür. Çekme etkisinde alt zayıflatılmış kesitte önemli uzama görülmüştür. Basınç etkisinde ise boy uzamasının olduğu zayıflatılmış kesitte yerel burkulma oluşmuştur (Şekil 4.10-f).

Numuneye iki kez uygulanan $\pm 5\delta_y$ ($\pm 28.15\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.98 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesindeki ilk çekme çevriminde alt uç zayıflatılmış kesit batı yüzünde tipik/beklenen boğum oluşmuş ve iyice artmıştır. Doğu yüzünde ise boya dökülmesi görülmüştür. Yırtılma miktarı hızla artmış ve üst zayıflatılmış kesitte aşırı plastikleşme görülmüştür. Bu seviyedeki çekme kuvveti $+145.2\text{kN}$, basınç kuvveti -25.5kN 'dur. İkinci çevrim çekme pikine giderken alt zayıflatılmış

kesitte başlayan yırtılma kesitin batı yüzünden yukarıya doğru ilerlemiştir. Basınç etkisinde, alt zayıflatılmış kesit batı yüzünde çok belirgin bir yerel burkulma gözlenmiştir. Numunenin $\pm 5\delta_y$ yatay yerdeğiştirme seviyesindeki davranışı Şekil 4.11'de aşama aşama verilmiştir.

Yatay yerdeğiştirme seviyesi arttırılarak $\pm 6\delta_y$ ($\pm 33.78\text{mm}$ yerdeğiştirme, %1.18 görelî öteleme oranı) değerinde uygulanmaya başlanmıştır. Bu seviyenin ilk çevrimi uygulanırken, çekme etkisinde alt zayıflatılmış kesitte yırtığın ilerlemesi hızlanmış ve bu adımda uygulanacak en büyük çekme yerdeğiştirmesi değerine ulaşmadan $+31.29\text{mm}$ 'de numune alt zayıflatılmış kesitten kopmuştur; kopma yükü $+92.5\text{kN}$ olarak belirlenmiştir. Numunenin kopma sonrasındaki fotoğrafları Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

Kopma sonrasında numunenin orta bölgesinde 47mm (%1.32L) düzlem dışı kalıcı yerdeğiştirme görülmüş olup uç birleşimlerde hasar oluşmamıştır. Deney sonunda TB-1 numunesi kümülatif olarak 20377kNmm enerji yutmuş olup yutulan kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi Şekil 4.8'de gösterilmiştir. TB-1 numunesine ve düzeneğin belirli noktalarına ilişkin şekildeğiştirme ölçer datası EK B'de verilmiştir.

Yalın TB-1 numunesi genel narinliği orta düzeyde olup bu tür narin çubukların tipik histeretik davranışını göstermektedir. Bu numune merkezi çaprazlı çerçevelerden beklenen süneklik düzeyinden daha yüksek 6 yerdeğiştirme sünekliğine ulaşmıştır. Yerel olarak da narin olmasına karşın numunenin göçmesi orta bölge yerine alt zayıflatılmış kesitte oluşmuştur. Bunun en önemli nedenlerinden birincisi zayıflatılmış uçta önceki yerdeğiştirme çevrimlerinde artan/azalan yükler altında meydana gelen yerel burkulma ve inelastik şekildeğiştirmelerin hızlıca yerel olarak artmasıdır.



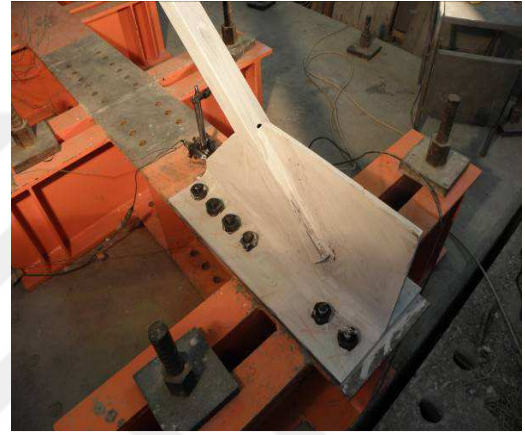
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.9 : TB-1 numunesi deney öncesi görüşleri, elastik çevrimleri ve $-1\delta_y$ (-5.63mm) yerdeğiştirme seviyesinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi kanal kontrollerinin yapılması. (c,d) $+0.5\delta_y$ ($+2.81\text{mm}$)’de elastik davranış. (e,f) $-1\delta_y$ (-5.63mm)’de burkulma.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.10 : TB-1 Numunesinin $2\delta_y (\pm 11.26\text{mm})$, $3\delta_y (\pm 16.89\text{mm})$ ve $4\delta_y (\pm 22.52\text{mm})$ yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-2\delta_y (-11.26\text{mm})$ 'de burkulma. (b) $-3\delta_y (-16.89\text{mm})$ 'de burkulma. (c) $+3\delta_y (+16.89\text{mm})$ 'de üst zayıflatılmış kesit alt kısmında boya dökülmesi. (d) $+4\delta_y (+22.52\text{mm})$ 'de alt zayıflatılmış kesit batı yüzünde boya dökülmesi. (e) $-4\delta_y (-22.52\text{mm})$ 'de burkulma. (f) $-4\delta_y (-22.52\text{mm})$ 'de yerel burkulma.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.11 : TB-1 numunesi $5\delta_y (\pm 28.15\text{mm})$ yatay yerdeğiştirme seviyesinde davranışı: (a) $+5\delta_y (+28.15\text{mm})$ 'de üst zayıflatılmış kesit batı yüzünde boya dökülmesi. (b) $+5\delta_y (+28.15\text{mm})$ 'de alt zayıflatılmış kesitte boğum oluşumu ve alt yüzde yırtığın ilerlemesi. (c) $-5\delta_y (-28.15\text{mm})$ 'de burkulma. (d) $+5\delta_y (+28.15\text{mm})$ 'de alt zayıflatılmış kesitte yırtığın batı yüzünde ilerlemesi. (e) $+5\delta_y (+28.15\text{mm})$ 'de üst zayıflatılmış kesitte plastikleşme. (f) $-5\delta_y (-28.15\text{mm})$ 'de alt zayıflatılmış kesit yan batı yüzünde yerel burkulma oluşumu.



(a)



(b)



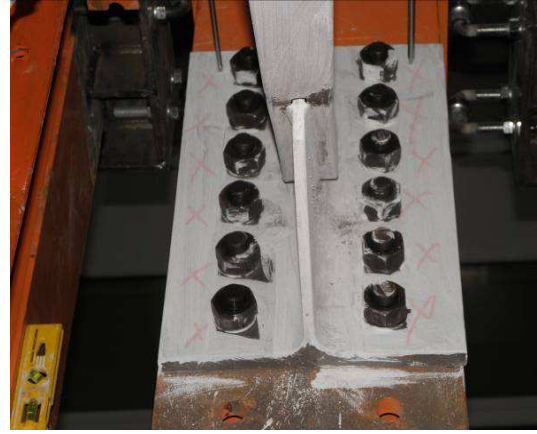
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.12 : TB-1 numunesi kopma sonrası görünümleri: (a,b,c) Alt zayıflatılmış kesitin kopma sonrası görünümleri. (d) Kopma sonrası numunenin ön cepheden görünümleri. (e,f) Kopma sonrası üst zayıflatılmış kesitin doğu ve alt yüzlerinin durumu.

4.4.2 TB-2 numunesi (Kutu 60x60x3 + Uçlar: CFRP plaka ve kumaş + Orta: %17L CFRP sargı)

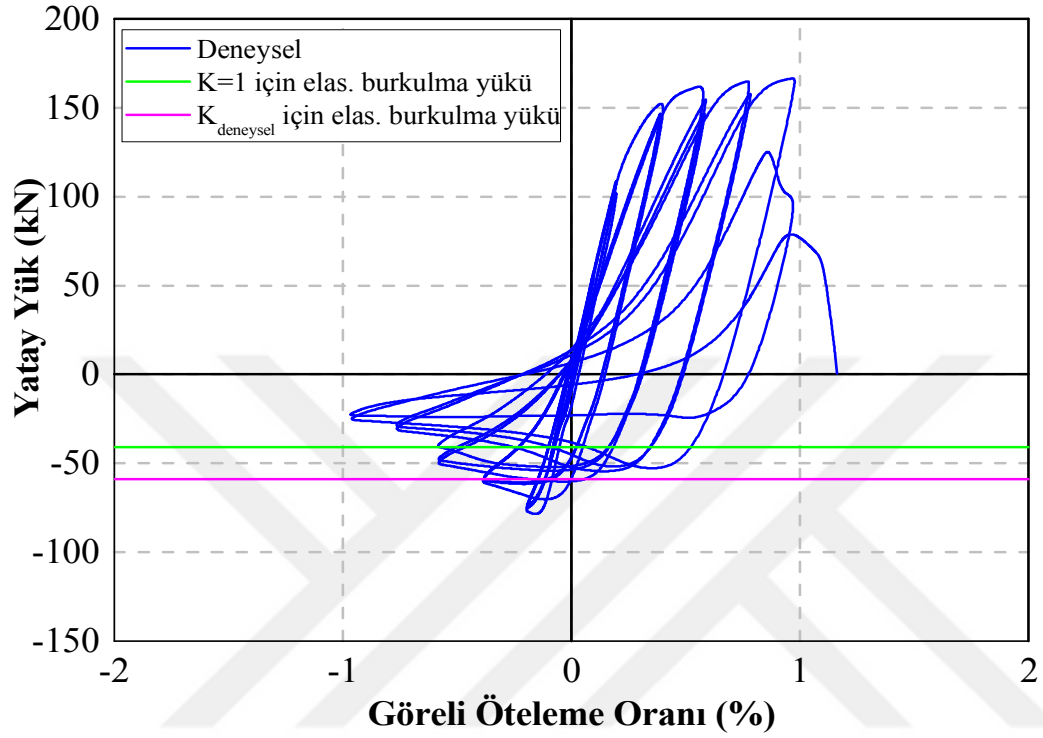
Uç bölgesinde CFRP plakayla, orta bölgesinde CFRP sargıyla güçlendirilen TB-2 numunesi deneyinde TB-1 numunesine uygulanan yükleme protokolü kullanılmış ve sonuçta iki numunenin özellikle histeretik enerji yutma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Deneysel olarak elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme histeretik eğrisi Şekil 4.13'de, uygulanan yükleme protokolü Şekil 4.14'de görülmektedir. Deney öncesindeki numunenin genel görünüşleri Şekil 4.17-a ve Şekil 4.17-b'de, alt zayıflatılmış kesitin CFRP elemanlarla güçlendirmesi Şekil 4.17-c'de, orta bölgenin CFRP elemanlarla güçlendirmesi ise Şekil 4.17-d'de görülmektedir.

$\pm 0.25\delta_y$ yatay yerdeğiştirme ($\pm 1.40\text{mm}$, %0.049 görelî öteleme oranı) etkisinde ilk üç çevrimde ve sonraki $\pm 0.50\delta_y$ ($\pm 2.81\text{mm}$, %0.1 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesindeki üç yükleme çevrimi etkisinde TB-2 numunesi elastik davranmıştır. Bu aşamalarda, zayıflatılmış uç kesitleri güçlendirmek üzere yapıştırılan CFRP plakalarda, CFRP kumaş sargılarda ve birleşim elemanlarında herhangi bir sorun görülmemiştir. Numunenin $+0.5\delta_y$ ($+2.81\text{mm}$)'de elastik davranışı Şekil 4.17-e'de görülmektedir.

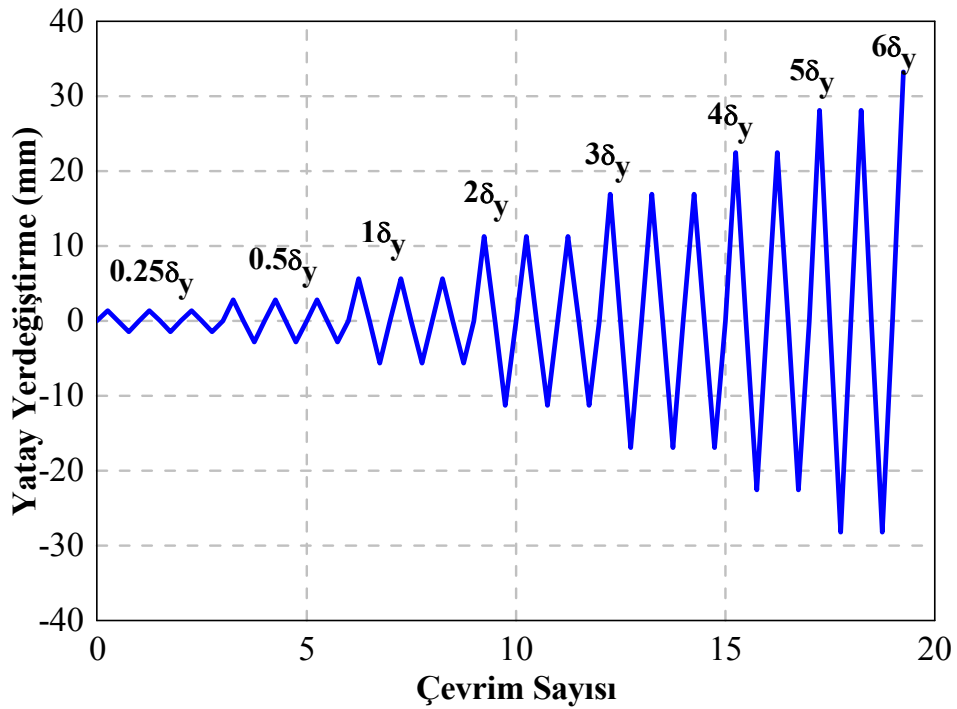
TB-2 numunesi $\pm 5.63\text{mm}$ ($\pm 1\delta_y$, %0.20 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme adımının ilk çevriminde basınç etkisinde, TB-1 numunesine benzer olarak, yatay yük-yatay yer değiştirme eğrisinde doğrusal olmayan davranışın başladığı ve numunenin basınç etkisinde aktığı gözlenmiştir. Burkulma -4.8mm yatay yerdeğiştirme seviyesinde, -78.6kN yatay yük etkisinde oluşmuştur. Şekil 4.17-f'de $-1\delta_y$ seviyesinde burkulma görülmektedir. Genel olarak bu yatay yerdeğiştirme seviyesinde beyaz boyada dökülme gözlenmemiştir. İkinci çevrimde çekme etkisinde şekildeğiştirme ölçerlerden $+1100 \sim +1200 \mu\text{strain}$ civarında ölçüm alınmış olup çekme etkisinde akma gözlenmemiştir. Bu yerdeğiştirme seviyesinde basınç etkisinde batıya doğru en fazla 44.9mm (%1.26L) düzlem dışı yerdeğiştirme ölçülmüştür. Bu yerdeğiştirme adımıyla ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla $+109\text{kN}$ ve -76.9kN 'dur.

Sonraki $\pm 2\delta_y$ ($\pm 11.26\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.39 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme adımının ilk yükleme çevriminde, çekme etkisinde uç birleşimlerindeki zayıflatılmış kesitlerde boya dökülmesi görülmemiştir. Bu çevrimde basınç etkisinde -60.5kN yük seviyesinde CFRP'lerden sesler gelmeye başlamıştır. Basınç etkisinde

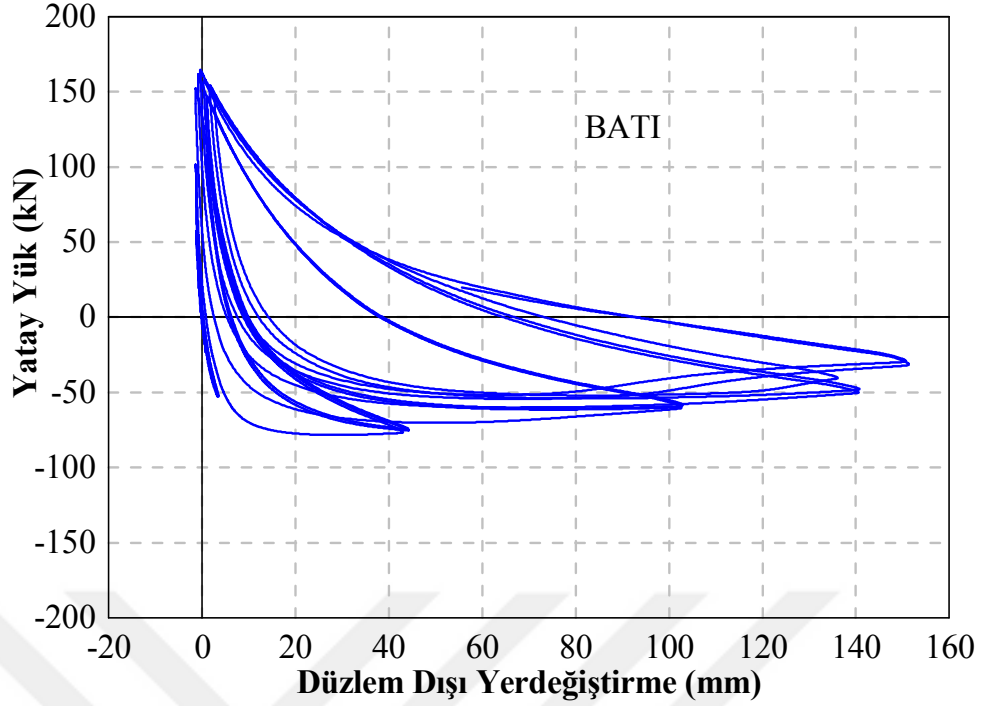
bayrak levhaları belirgin şekilde batıya doğru deformasyon yapmıştır. Şekil 4.18-a'da $-2\delta_y$ 'de genel burkulma görülmektedir. İkinci yükleme çevriminde çekme etkisinde numune üzerinde alt bölgede $+2500\mu\text{strain}$, orta bölgede $+2000\mu\text{strain}$ ve üst bölgede $+2600\mu\text{strain}$ civarında ölçümler alınmıştır. Basınç etkisinde, numunenin



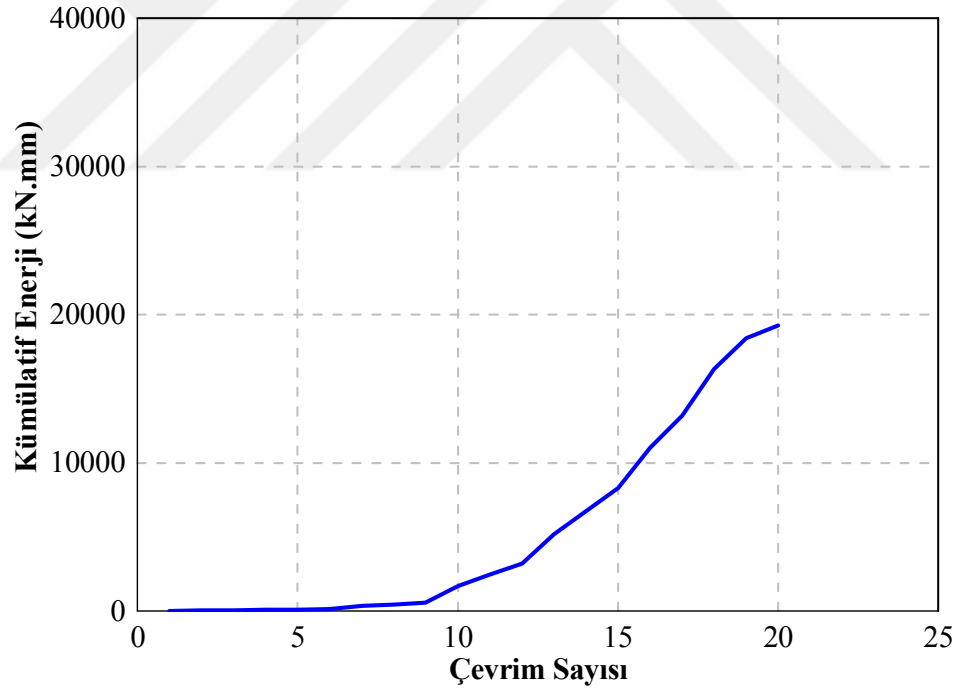
Şekil 4.13 : TB-2 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi.



Şekil 4.14 : TB-2 numunesi yükleme protokolü.



Şekil 4.15 : TB-2 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil 4.16 : TB-2 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

orta bölgesinde, batı yüzündeki TB2W2 ve doğu yüzündeki TB2E2 şekildeğiştirme ölçerlerden sırasıyla $-2000\mu\text{strain}$ ve $-4000\mu\text{strain}$ değerlerinde ölçümler alınmıştır. Bu seviyede, boya dökülmesi çevrimlerin hiçbirinde görülmemiştir. Basınç etkisinde en fazla 104.8mm (%2.94L) düzlem dışı yerdeğiştirme ölçülmüştür. Belirlenen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +155kN ve -60.5kN'dur.

Numuneye üç yükleme çevrimi olarak uygulanan son yerdeğiştirme seviyesi olan $\pm 3\delta_y$ 'nin ($\pm 16.89\text{mm}$ yer değiştirme, $\%0.59$ görelı öteleme oranı) ilk çevriminde çekme etkisinde yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme eğrisi maksimum yerdeğiştirmeye giderken yataylaşıp, çekme etkisinde akma görölmüş ve CFRP'lerden sesler duyulmaya devam edilmiştir. Zayıflatılmış kesitlerin güçlendirilmesi için yapıştırılan CFRP plakalar üzerine yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerlerden alt uçta $+1500\mu\text{strain}$, üst uçta $+1500\sim+1800\mu\text{strain}$ civarında ölçümler alınmıştır. İkinci çevrimin basınç etkisinde de CFRP'lerden aşırı sesler duyulmuştur. Numunenin $-3\delta_y$ 'de genel burkulması Şekil 4.18-b'de, orta bölgedeki güçlendirmenin durumu Şekil 4.18-c'de görölmektedir. Son yükleme çevriminin çekme etkisinde CFRP plaka ve kumaş sargıyla yapılan zayıflatılmış kesit güçlendirmelerinde aderans kaybı ve göçme görölmemiştir. Basınç etkisinde ise, orta bölgede CFRP sargının bittiği üst noktada, -40.3kN yük seviyesinde, yerel burkulma başlangıcı izlenmiştir (Şekil 4.18-d). Numunenin doğu yüzünde içeri çökme, alt ve üst yüzünde dışarı şişme oluştuğu belirlenmiştir. Bu yerdeğiştirme seviyesinde ölçölen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme 141.8mm ($\%3.99L$) olup ölçölen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla $+163\text{kN}$ ve -50.2kN 'dur.

$\pm 4\delta_y$ ($\pm 22.52\text{mm}$ yer değiştirme, $\%0.79$ görelı öteleme oranı) yatay yer değiştirme seviyesi numuneye iki kez uygulanmış olup ilk çevrim çekme etkisinde CFRP'lerden yüksek sesler duyulmuştur. Numune üzerinden ölçölen şekil değiştirmeler alt bölgede $+4700\sim+5000\mu\text{strain}$, orta bölgede $+4000\sim+4300\mu\text{strain}$, üst bölgede $+4900\sim+5100\mu\text{strain}$ civarlarındadır. Basınç etkisinde, yerel burkulma aşırı miktarda artmıştır. Şekil 4.18-e'de genel burkulma, Şekil 4.18-f'de ise daha da artan yerel burkulma görölmektedir. İkinci yükleme çevriminde, çekme etkisinde CFRP'lerden yüksek sesler duyulmaya devam edilmiştir. Şekil 4.19-a'da yerel burkulan bölgenin çekme etkisindeki durumu, Şekil 4.19-b'de ise alt zayıflatılmış kesitin durumu görölmektedir. Basınç etkisinde düzlem dışı yerdeğiştirme artmış ve yerel burkulma aşırı duruma gelmiş, bu bölgede ciddi boya dökölmesi görölmüştür. Bu adımda düzlem dışı yerdeğiştirme ölçer, kapasitesine ulaştığından deney düzeneğinden çıkartılmıştır. Yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.15'te görölmektedir.

$\pm 5\delta_y$ ($\pm 28.15\text{mm}$ yerdeğiştirme, $\%0.98$ görelı öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde çekme etkisinde zayıflatılmış kesitlerde ve güçlendirme elemanlarında

göçme görülmemiştir. Basınç etkisinde yerel burkulma aşırı artmış ve içe çöken bölgede boya dökülmesi devam etmiştir. Numunenin genel burkulması Şekil 4.19-c'de, yerel burkulması Şekil 4.19-d'de görülmektedir. Numunede yerel burkulmanın yayıldığı bölge yaklaşık olarak numunenin kesit genişliğine (b) eşit olup, 60mm civarındadır. İkinci yükleme çevriminde çekme etkisinde, yaklaşık +97.2kN yük seviyesinde, yerel burkulma bölgesinde köşelerden yırtılma/kopma başlamış ve çekme etkisinde hızla ilerlemiştir. Bu yerdeğiştirme seviyesindeki yırtılma başlangıcı Şekil 4.19-e'de, yırtığın hızla artması Şekil 4.19-f'de verilmiştir. İkinci yükleme çevriminde basınç etkisinde numune düzlem içi ve dışı karmaşık (iki doğrultuda) bir burkulma davranışı göstermiş ve bu davranış Şekil 4.20-a'da görülmektedir.

Numuneye $\pm 6\delta_y$ ($\pm 33.78\text{mm}$ yerdeğiştirme, %1.18 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirmesinin ilk çevrimi uygulanırken, yerel burkulma bölgesindeki yırtılma daha da hızlanmış (Şekil 4.20-b) ve bu adımda uygulanacak en büyük çekme yerdeğiştirmesi değerine ulaşmadan +33.24mm'de numune orta bölgede CFRP sargının üst bölümünden yüksek sesle kopmuştur. Şekil 4.20-b'de yırtığın artması, Şekil 4.20-c ve d'de ise kopma sonrası numune görülmektedir. Kopma yükü +64kN olarak belirlenmiştir.

Kopma, alt guse birleşiminden itibaren numune ortasına doğru 2144mm ileride meydana gelmiştir. Numunenin her iki uç birleşimindeki zayıflatılmış kesit güçlendirmelerinde herhangi bir göçme ya da aderans kaybı görülmemiştir; böylece uç güçlendirmelerin görevlerini yerine getirdikleri anlaşılmaktadır. Ayrıca uç birleşimlerdeki kaynak ve bulonlarda da hasar görülmemiştir. Şekil 4.20-e ve f'de sırasıyla üst ve alt zayıflatılmış kesitlerin ve birleşim elemanlarının durumları verilmiştir. Deney sonunda TB-2 numunesi kümülatif olarak 19288kNmm enerji yutmuş olup yutulan kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Numune üzerinden, bayrak levhalarından, CFRP güçlendirme plakalarından ve deney düzeneğinin belirli noktalarından deney süresince kaydedilen şekildeğiştirme ölçer datası EK C'de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.17 : TB-2 numunesi deney öncesi, elastik çevrimleri ve $-1\delta_y$ (-5.63mm) yerdeğiştirme seviyesinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi son kontrollerinin yapılması. (c) Alt zayıflatılmış kesit güçlendirmesi. (d) Orta bölge güçlendirilmesi. (e) $+0.5\delta_y$ ($+2.81\text{mm}$)’de elastik davranış. (f) $-1\delta_y$ (-5.63mm)’de burkulma.



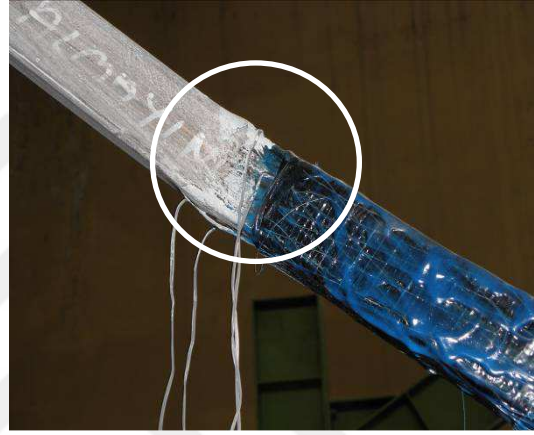
(a)



(b)



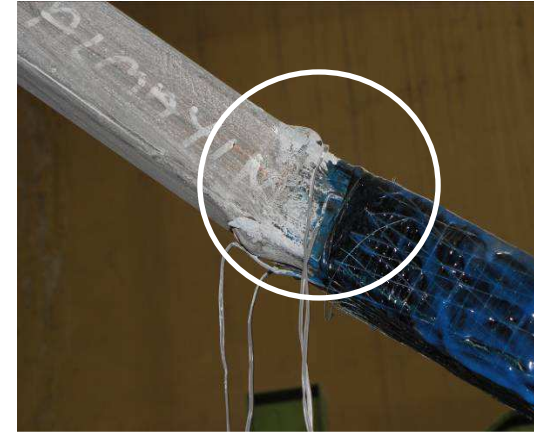
(c)



(d)

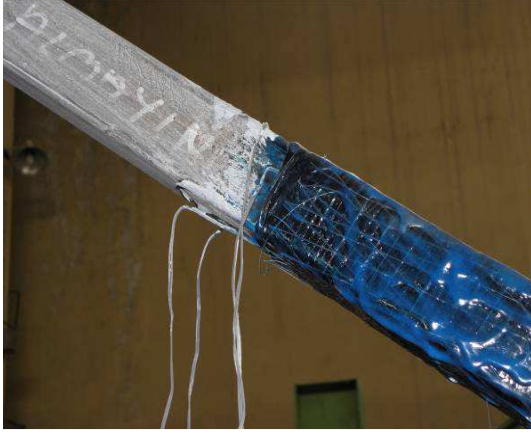


(e)



(f)

Şekil 4.18 : TB-2 numunesinin $2\delta_y$ (11.26mm), $3\delta_y$ (16.89mm) ve $4\delta_y$ (22.52mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-2\delta_y$ (-11.26mm)'de burkulma. (b) $-3\delta_y$ (-16.89mm)'de burkulma. (c) $-3\delta_y$ (-16.89mm)'de orta bölgedeki güçlendirmenin durumu. (d) $-3\delta_y$ (-16.89mm)'de yerel burkulma başlangıcı. (e) $-4\delta_y$ (-22.52mm)'de burkulma. (f) $-4\delta_y$ (-22.52mm)'de artan yerel burkulma.



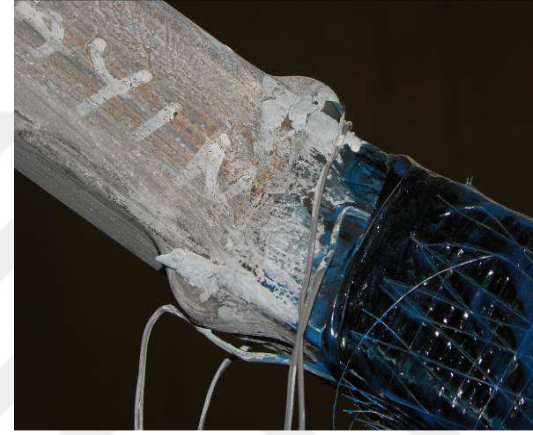
(a)



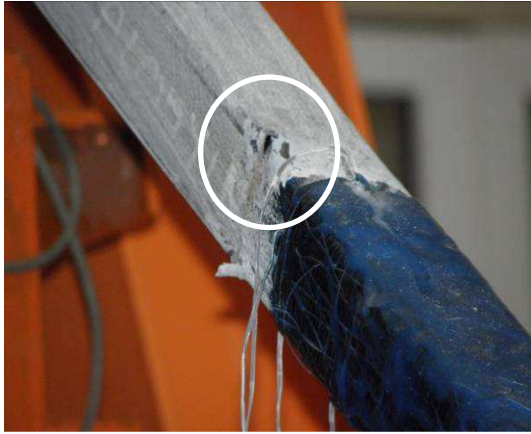
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

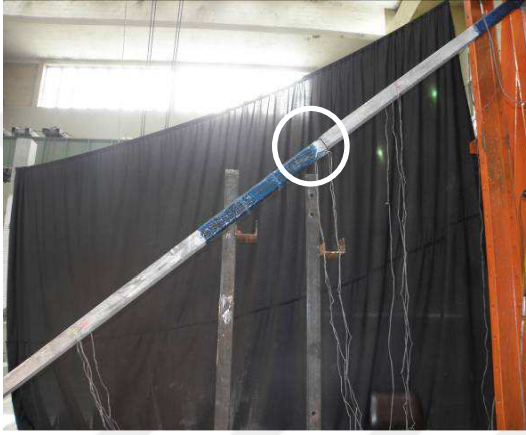
Şekil 4.19 : TB-2 numunesi $4\delta_y$ (22.52mm) ve $5\delta_y$ (28.15mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $+4\delta_y$ (+22.52mm)'de çekme etkisinde yerel burkulma bölgesinin durumu. (b) $+4\delta_y$ (+22.52mm)'de çekme etkisinde alt zayıflatılmış kesit güçlendirmesinin durumu (c) $-5\delta_y$ (-28.15mm)'de ilk çevrimde burkulma. (d) $-5\delta_y$ (-28.15mm)'de ilk çevrimde yerel burkulma. (e) $+5\delta_y$ (+28.15mm)'de ikinci çevrimde yırtılma başlangıcı (f) $+5\delta_y$ (+28.15mm)'de yırtığın hızla artması.



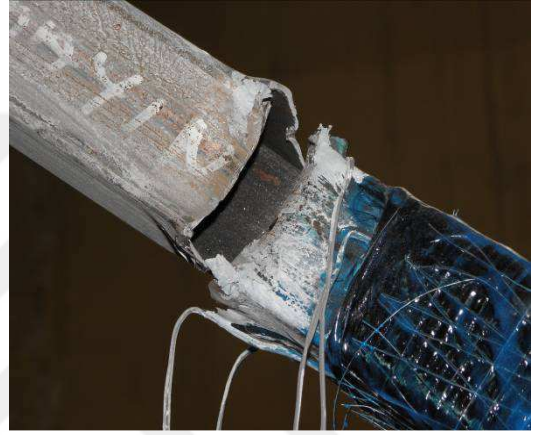
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.20 : TB-2 numunesi $5\delta_y$ (28.15mm) ve kopma öncesi – sonrası görünümleri: (a) $-5\delta_y$ (-28.15mm)'de düzlem içi ve düzlem dışı burkulma. (b) $+6\delta_y$ 'nin ilk çekme pikine giderken yırtığın ilerlemesi. (c) Kopma bölgesinin yandan görünüşü. (d) Kopma bölgesinin yakından görünüşü. (e) Kopma sonrası üst zayıflatılmış kesit güçlendirmesinin durumu. (f) Kopma sonrası alt zayıflatılmış kesit güçlendirmesinin durumu.

4.4.3 TB-3 numunesi (Kutu 60x60x3 + Uçlar: CFRP plaka ve kumaş + Orta: %33L CFRP sargı)

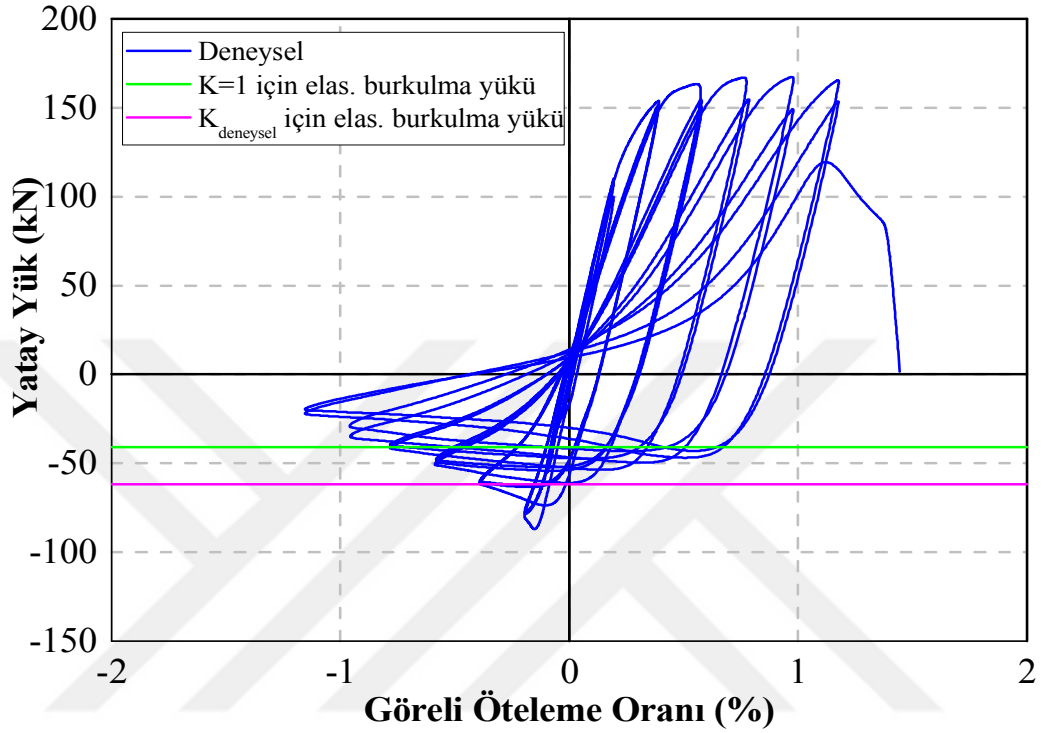
Uç bölgesinde CFRP plaka, orta bölgesinde daha geniş bir bölgede CFRP şeritlerle güçlendirilen TB-3 numunesi de TB-1 numunesinde kullanılan yükleme protokolüyle denenmiştir. Dolayısıyla, bu numune ile grubundaki diğer numunelerin göreceli histeretik enerji yutma kapasiteleri karşılaştırılabilecektir. Deneysel olarak elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.21’de, yükleme protokolü ise Şekil 4.22’de gösterilmiştir. Numunenin deney başlamadan önceki genel görünüşü ve güçlendirme biçimleri Şekil 4.25-a, b, c ve d’de görülmektedir.

Elastik bölgede TB-3 numunesine ilk olarak üç çevrim $\pm 0.25\delta_y$ yatay yerdeğiştirmesi (%0.049 göreceli öteleme oranı) uygulanmıştır. Sonraki adımda, $\pm 0.50\delta_y$ ($\pm 2.80\text{mm}$, %0.1 göreceli ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmeler etkisindeki üç yükleme çevrimi etkisinde de numune elastik davranmıştır. Bu yerdeğiştirme seviyesinde, basınç etkisinde batı yönünde 0.12mm (%0.003L) düzlem dışı yatay yerdeğiştirme ölçülmüştür. Numunenin elastik davrandığı yerdeğiştirme seviyelerinde, uç zayıflatılmış kesit etrafındaki ve orta bölgedeki CFRP elemanlarla, birleşim elemanları olan kaynak ve bulonlarda herhangi bir sorun gözlenmemiştir. Numunedeki elastik davranış Şekil 4.25-e’de görülmektedir.

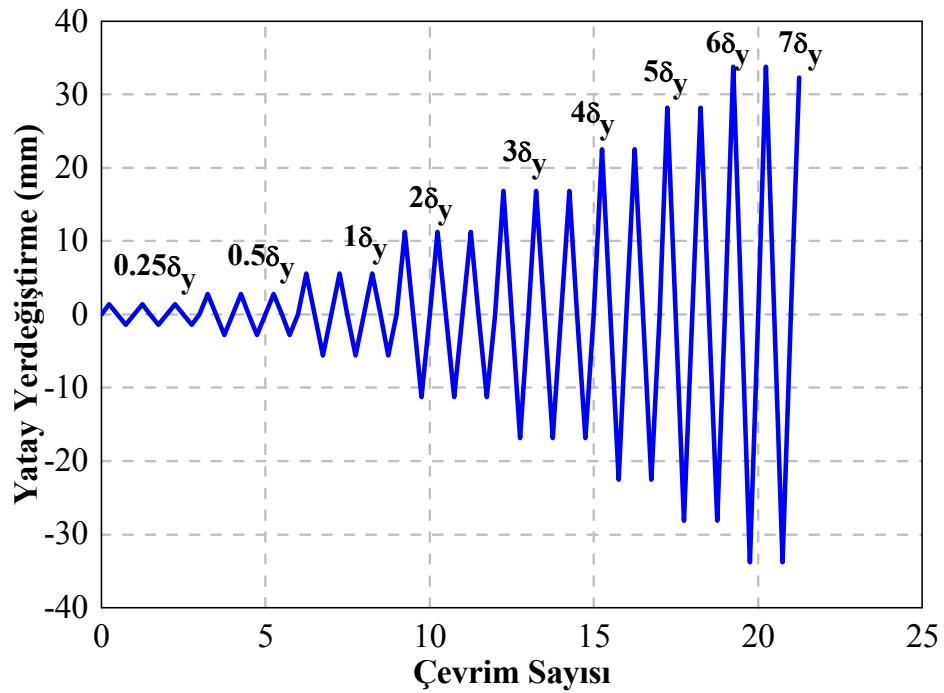
TB-3 numunesi $\pm 5.63\text{mm}$ ($\pm 1\delta_y$, %0.20 göreceli öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme adımının ilk çevriminde, basınç etkisinde -4.4mm yatay yerdeğiştirme seviyesinde ve -84kN yatay kuvvet etkisinde, Şekil 4.25-f’de görüldüğü gibi burkulma belirlenmiştir. İkinci yükleme çevriminde, çekme ve basınç etkisinde herhangi bir sorun gözlenmemiştir. Genel olarak $\pm 1\delta_y$ yerdeğiştirme seviyesinde uygulanan üç yükleme çevrimindeki maksimum çekme kuvvetleri dikkate alındığında, CFRP’lerden dolayı her yükleme çevriminde bir miktar artış olduğu görülmüştür. Bu yerdeğiştirme seviyesindeki maksimum çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla $+111.1\text{kN}$ ve -80.15kN ’dur. Maksimum basınç kuvvetine ilk, maksimum çekme kuvvetine üçüncü yükleme çevriminde ulaşılmış olup ölçülen maksimum düzlem dışı yerdeğiştirme 41.7mm (%1.17L)’dir.

Sonraki $\pm 2\delta_y$ ($\pm 11.26\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.39 göreceli öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme adımı ilk yükleme çevriminde, çekme etkisinde kalan CFRP’lerden artan sesler duyulmuştur; bu durum CFRP’lerin yük aldığını göstermektedir. Basınç etkisinde, üst bayrak levhasındaki dönmenin batıya doğru belirgin olmasına karşın alt

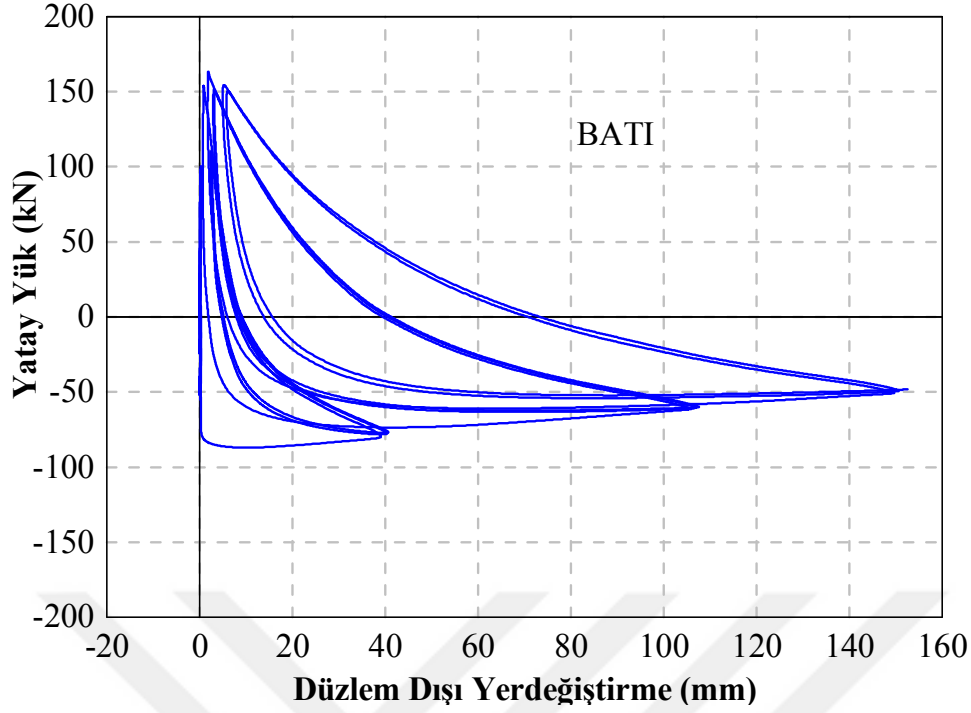
bayrak levhasındaki dönme azdır. Numunedeki doğrusal olmayan davranışın başlangıcı olan burkulma Şekil 4.26-a'da görülmektedir. $\pm 1\delta_y$ yerdeğiştirme seviyesinde, yükleme çevrimleri ilerledikçe çekme kuvvetinde de CFRP güçlendirmelerin etkisiyle artış görülmüştür. $\pm 2\delta_y$ yerdeğiştirme seviyesinden



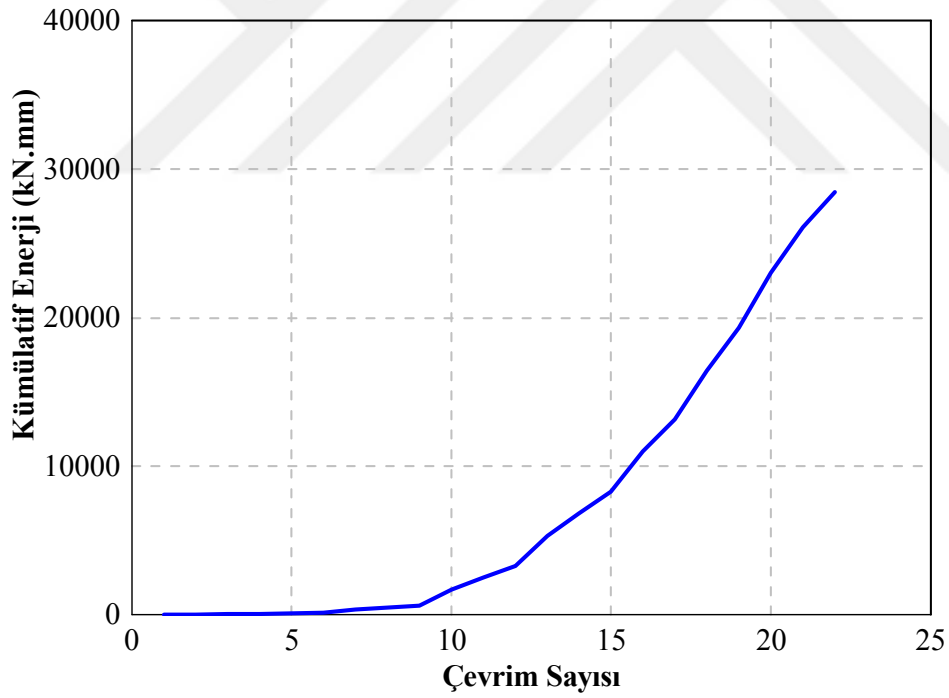
Şekil 4.21 : TB-3 numunesi yatay yüık-göırelı öıeleme oranı histeretik eğırsi.



Şekil 4.22 : TB-3 numunesi yükleme protokolü.



Şekil 4.23 : TB-3 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil 4.24 : TB-3 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

itibaren yükleme çevrimlerinin ilerlemesiyle, bu çevrimlerde ölçülen çekme kuvvetlerinde küçük miktarda azalmalar oluşmuştur. Ölçülen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme 108.1mm (%3.04L) olup, en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +153.6kN, -61kN'dur; bu değerlere ilk çevrimde ulaşılmıştır.

$\pm 3\delta_y$ ($\pm 16.89\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.59 görelı öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme adımımda ilk çevrimde çekme etkisinde CFRP'lerden aşırı sesler gelmiştir. şekildeğiştirmeler numunenin alt ve üst bölgelerinde $+4200 \sim +4600 \mu\text{strain}$, orta bölgede CFRP kumaş sargısı altında $+2700 \mu\text{strain}$ olarak ölçölmüştür. Basınç etkisinde, orta bölgede ve numunenin doğu yüzündeki şekildeğiştirmeler $-7200 \mu\text{strain}$ 'dir. İkinci ve üçüncü yükleme çevrimlerinde, çekme etkisinde CFRP'lerden aşırı sesler duyulmuştur. Üçüncü yükleme çevriminde basınç etkisinde, 152.5mm (%4.29L) düzlem dışı yerdeğiştirme ölçölmüştür. Bu adım sonunda düzlem dışı yerdeğiştirme ölçer kapasitesine ulaştığından deneyden çıkartılmıştır. Numunenin yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi şekil 4.23'te, $-3\delta_y$ 'deki burkulma şekli şekil 4.26-b'de görölmektedir.

İki çevrim olarak uygulanan $\pm 4\delta_y$ ($\pm 22.52\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.79 görelı öteleme oranı) yatay yerdeğiştirmesinin ilk çevriminde çekme etkisinde numunenin alt ve üst bölgelerinde ölçölen şekildeğiştirmeler $+5700 \sim +6000 \mu\text{strain}$, orta bölgede ölçölen şekildeğiştirmeler $+4700 \mu\text{strain}$ civarında olup çekme etkisindeki davranış şekil 4.26-c'de görölmektedir. Basınç etkisinde ise CFRP'lerden sesler duyulmasının yanında, orta bölgedeki şekildeğiştirmeler doğu ve batı yüzlerinde sırasıyla $-7200 \mu\text{strain}$ ve $-6500 \mu\text{strain}$ olarak ölçölmüş ve orta bölgede yerel burkulma gözlenmemiştir. İkinci ve son çevrimin çekme ve basınç etkisinde CFRP'lerde sorun izlenmemiştir. Bu yerdeğiştirme adımımda en büyük çekme ve basınç kuvveti ilk yükleme çevriminde ölçölmüş olup sırasıyla $+168\text{kN}$ ve -41.3kN 'dur. Bu yerdeğiştirme seviyesinde burkulma şekil 4.26-d'de görölmektedir.

Sonraki adım olan $\pm 5\delta_y$ ($\pm 28.15\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.98 görelı öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde ilk yükleme çevriminde çekme etkisinde CFRP'lerden aşırı seslerin duyulmasına karşın, numunenin zayıflatılmış uç kesitlerinde göçme gözlenmemiştir. Basınç etkisinde ise orta bölgedeki CFRP sargıdan yüksek sesler duyulmuş olmasına karşın bu bölgedeki CFRP kumaş sargıda kopma/göçme görölmemiştir; böylece çapraz üzerindeki güçlendirme bölgelerinde kullanılan CFRP elemanların etkin bir biçimde yük aldığı ortaya çıkmaktadır. İkinci yükleme çevriminde basınç etkisinde numunenin orta bölgesinde yerel burkulma oluşmaya başlamış olup CFRP altında oluşan yerel burkulmadan dolayı numunenin doğu yüzünde içeri doğru çökme görölmüştür. Yerel burkulma yaklaşık -29.5kN

yatay yük seviyesinde oluşmaya başlamıştır. $-5\delta_y$ yatay yerdeğiştirme seviyesindeki genel ve yerel burkulmalar sırasıyla Şekil 4.26-e ve Şekil 4.26-f’de görülmektedir.

Uygulanan $\pm 6\delta_y$ ($\pm 33.78\text{mm}$ yerdeğiştirme, %1.18 görelî öteleme oranı) yatay yer değiştirmesinin ilk çevriminde çekme ve basınç etkisinde CFRP’lerden yüksek sesler duyulmuş olup herhangi bir göçme belirlenmiştir. Numunenin genel burkulması Şekil 4.27-a’da görülmektedir. Basınç etkisinde CFRP kumaş altında oluşan yerel burkulmada artış gözlenmiş olup yerel burkulma oluşan bölgede CFRP’de maviden beyaza doğru renk değişimi gözlenmiştir. Numunenin orta bölgesinde üst ve alt yüzünde yerel burkulmadan dolayı oluşan şişkinliğin iyice artması sonucunda CFRP sargı şişkinlik bölgelerinde altta ve üstte yırtılmış ve bu gözlemler Şekil 4.27-b, c ve d’de verilmiştir. İkinci yükleme çevriminin çekme etkisindeki davranışı Şekil 4.27-e’de görülmekte olup basınç etkisinde orta bölgede yerel burkulmadan dolayı oluşan şişme iyice artmış ve bunun sonucunda CFRP sargıdaki enine yırtık aşırı miktarda ilerlemiştir.

Güçlendirilmiş çapraz $\pm 7\delta_y$ ($\pm 39.41\text{mm}$ yerdeğiştirme, %1.38 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme adımının ilk çekmesinde, en büyük yerdeğiştirmeye ulaşmadan $+32.2\text{mm}$ yatay yerdeğiştirme ve $+127.7\text{kN}$ yatay kuvvet seviyesinde, orta bölgedeki CFRP sargı bölgesinde enine doğrultuda yüksek sesle kopmuştur (Şekil 4.27-f). Bunun sonucunda yükte ani azalma olmuş, yük 100kN ’a düşmüştür. Hedef yatay yerdeğiştirmeye ulaşabilmek için çekmeye bu noktadan sonra devam edilmiş ve $+72\text{kN}$ yatay kuvvet ve $+40.03\text{mm}$ yatay yerdeğiştirme seviyesinde numune ortadan kopmuştur.

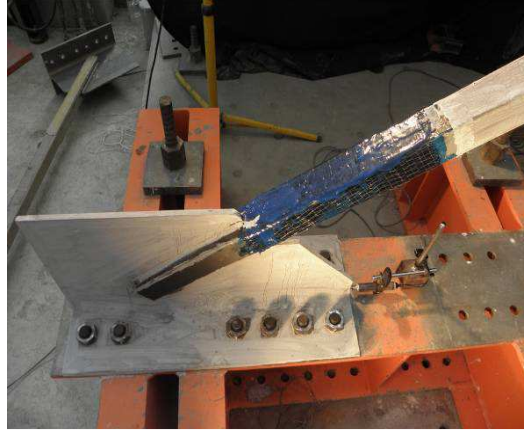
TB-3 numunesinde kopma, alt guse birleşiminden itibaren numune ortasına doğru 2014mm ileride, CFRP kumaş sargı altında meydana gelmiştir. Numunenin her iki uç birleşimindeki zayıflatılmış kesit güçlendirmelerinde herhangi bir göçme ya da aderans kaybı görülmemiştir. Deney sonunda TB-3 numunesi kümülatif olarak 28468kNmm enerji yutmuştur; yutulan kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi Şekil 4.24’te gösterilmiştir. Ayrıca, uç birleşimlerdeki kaynak ve bulonlarda da hasar görülmemiştir. Şekil 4.28’de numunenin kopma sonrasındaki durumu görülmektedir. Deney süresince numune üzerinden kaydedilen şekildeğiştirme ölçer datası EK D’de verilmiş olup deney düzeneği üzerinden bu numune için şekildeğiştirme ölçümü alınmamıştır.

Güçlendirilen TB-3 numunesinde orta bölgedeki plastik mafsallarda CFRP sargı altında oluştuğundan süneklik seviyesinde, enerji tüketiminde ve kopma ömründe artış tespit edilmiş olup CFRP elemanlarla yerel olarak yapılan güçlendirmenin oldukça etkili olduğu görülmüştür. Ulaşılan yerdeğiştirme sünekliği 7 seviyesinde olup merkezi çaprazlar için oldukça yüksek bir seviyedir.





(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.25 : TB-3 numunesi deney öncesi, elastik çevrimleri ve $-1\delta_y(-5.63\text{mm})$ yerdeğiştirme seviyesinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Alt zayıflatılmış kesit güçlendirmesi. (c) Orta bölge güçlendirilmesi. (d) Üst zayıflatılmış kesit güçlendirmesi. (e) $+0.5\delta_y(+2.81\text{mm})$ 'de elastik davranış. (f) $-1\delta_y(-5.63\text{mm})$ 'de burkulma.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

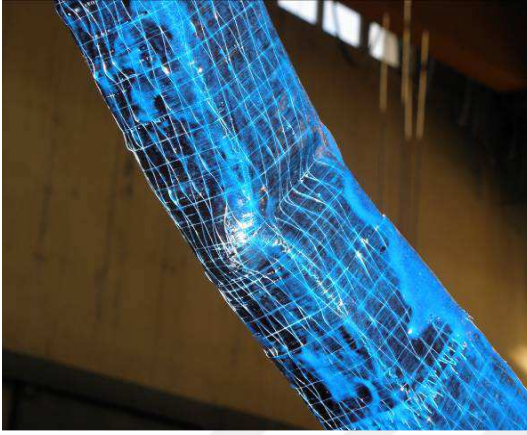
Şekil 4.26 : TB-3 numunesinin $2\delta_y$ (11.26mm), $3\delta_y$ (16.89mm), $4\delta_y$ (22.52mm) ve $5\delta_y$ (28.52mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-2\delta_y$ (-11.26mm)'de burkulma. (b) $-3\delta_y$ (-16.89mm)'de burkulma. (c) $+4\delta_y$ (+22.52mm)'de çekmedeki durum. (d) $-4\delta_y$ (-22.52mm)'de burkulma. (e) $-5\delta_y$ (-28.15mm)'de burkulma. (f) $-5\delta_y$ (-28.15mm)'de yerel burkulma başlangıcı.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.27 : TB-3 numunesi $6\delta_y$ (33.78mm) yatay yerdeğiştirme seviyesinde ve kopma öncesi davranışı: (a) $-6\delta_y$ (-33.78mm)'de burkulma. (b) $-6\delta_y$ (-33.78mm)'de yerel burkulan bölüm üst yüzde CFRP kumaşta yırtılma. (c) $-6\delta_y$ (-33.78mm)'de yerel burkulan bölüm alt yüzde CFRP kumaşta yırtılma. (e) $+6\delta_y$ (+33.78mm)'de ikinci çevrimde çekme etkisinde davranış. (f) $+7\delta_y$ pikine giderken kopma öncesinde çekme etkisinde CFRP kumaşın iki bölgeden enine doğrultuda yırtılması.



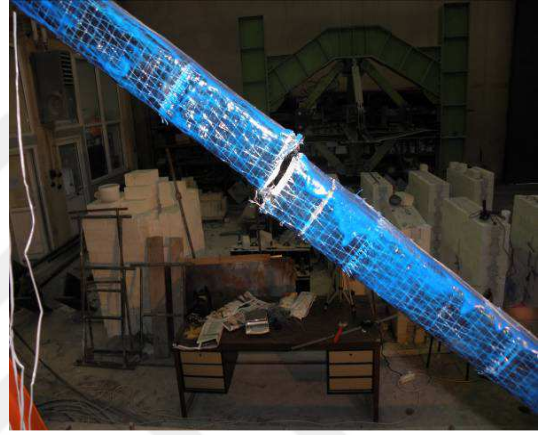
(a)



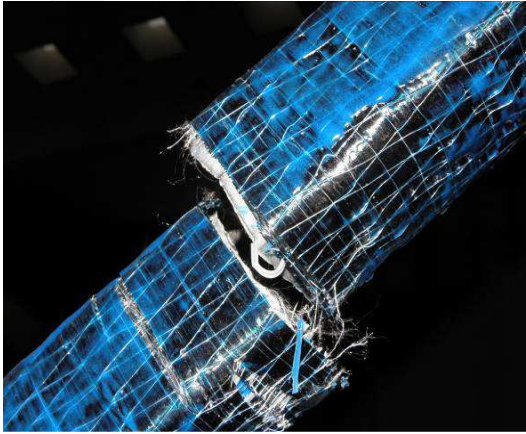
(b)



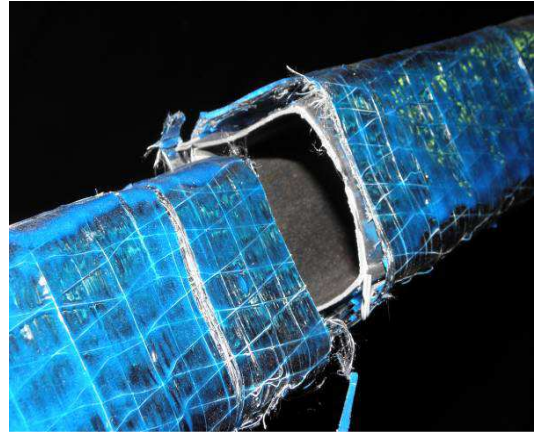
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.28 : TB-3 numunesi deney sonrası görüşleri: (a) Genel görünüş. (b) Alt zayıflatılmış kesit güçlendirmesinin durumu. (c) Üst zayıflatılmış kesit güçlendirmesinin durumu. (d) Kopma bölgesinin doğudan görünüşü. (e) Kopma bölgesinin batıdan görünüşü. (f) Kopma sonrası CFRP kumaşın çelik yüzeyden ayrılmış görünüşü.

4.4.4 TB-4 numunesi (Kutu 50x50x4 – Yalın numune)

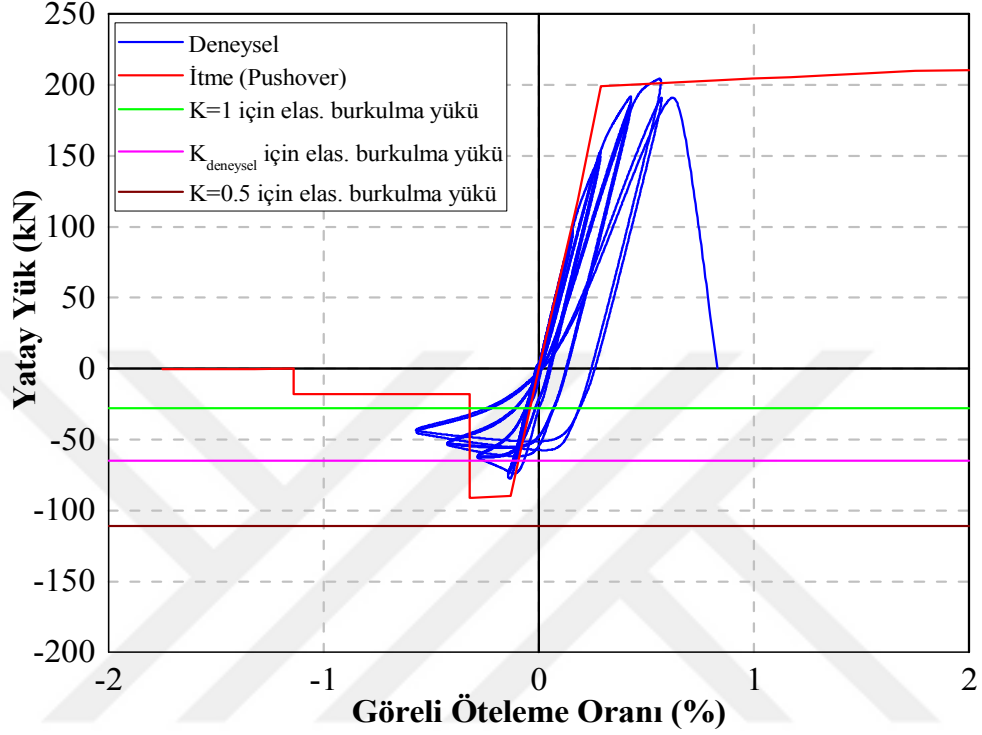
Yalın olarak üretilen TB-4 numunesi başlangıçta güney yönünde yüklenerek çekme etkisinde bırakılmıştır. Deneysel olarak elde edilen yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi ve itme analizi eğrisi Şekil 4.29’da, yükleme protokolü ise Şekil 4.30’da gösterilmiştir. Numunenin deney öncesi genel görünüşleri Şekil 4.33-a , b ve c’de görülmektedir.

TB-4 numunesi, tahmin edilen akma yerdeğiştirmesinin 1/3’ündeki ($\pm 1.14\text{mm}$, %0.040 görelî öteleme oranı) ilk üç çevrimde ve tahmin edilen akma yerdeğiştirmesinin 2/3’ündeki ($\pm 2.28\text{mm}$, %0.08 görelî ötelenme oranı) üç çevrimde doğrusal elastik davranmıştır. Zayıflatılmış uç birleşimlerinde ve birleşim elemanları olan kaynak ve bulonlarda herhangi bir sorun gözlenmemiştir.

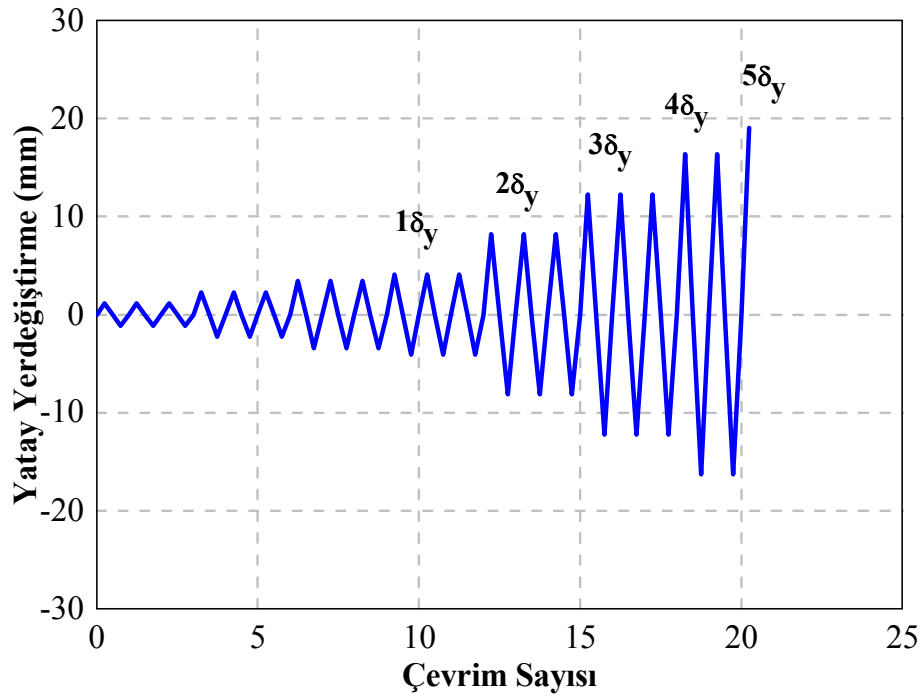
Kendi deney grubunun referans numunesi olan TB-4 için gerçek malzeme özellikleri kullanılarak itme analiziyle tahmin edilen basınç akma yerdeğiştirmesi (δ_{yt}) -3.42mm (%0.12 görelî öteleme oranı, $-0.84\delta_y$)’dir. Bu yerdeğiştirme seviyesinde basınç etkisindeki davranış Şekil 4.33-d’de görülmektedir. Bu yatay yerdeğiştirme seviyesi numuneye üç çevrim olarak uygulanmış olup akma gözlenmemiştir. Bu seviyeden itibaren tahmin edilen akma yerdeğiştirmesi artırılarak $\delta_{yt}+1/3\delta_{yt}$ ($+4.55\text{mm}$, %0.16 görelî öteleme oranı) seviyesinde yerdeğiştirme çekme olarak etkilmiştir. Basınç yüklemesinde ise yatay yerdeğiştirme -4.08mm ($-1\delta_y$, %0.14 görelî öteleme oranı) seviyesine ulaştığında numuneye ilişkin yatay yük-yerdeğiştirme eğrisinin yataylaştığı belirlenmiş ve doğrusal olmayan davranışın başladığı, genel burkulmanın olduğu gözlenmiştir. Bu yatay yerdeğiştirme seviyesi deneysel akma yerdeğiştirmesi olarak (δ_{yd}) kabul edilmiş olup numunenin burkulma yükü -76.1kN , düzlem dışı yerdeğiştirmesi ise 20mm (%0.56L) olarak ölçülmüştür. Şekil 4.33-e’de bu yerdeğiştirme seviyesinde burkulma görülmektedir. İkinci ve üçüncü yükleme çevrimleri, deneysel akma yerdeğiştirmesi dikkate alınarak numuneye uygulanmış olup son çevrimde çekme etkisinde numune üzerindeki şekildeğiştirmeler $+850\sim+1000\mu\text{strain}$ civarında okunmuştur. Beyaz boya dökülmesi çevrimlerin hiçbirinde gözlenmemiştir.

$\pm 2\delta_y$ (8.16mm yerdeğiştirme, %0.29 görelî öteleme oranı) seviyesi yerdeğiştirmesinin ilk çevriminde, çekme etkisinde şekildeğiştirme ölçerlerde $+1500\sim+1700\mu\text{strain}$ civarında şekildeğiştirmeler olduğu saptanmıştır. Basınç etkisinde üst ve alt bayrak levhalarında belirgin şekilde batıya dönme gözlenmiştir.

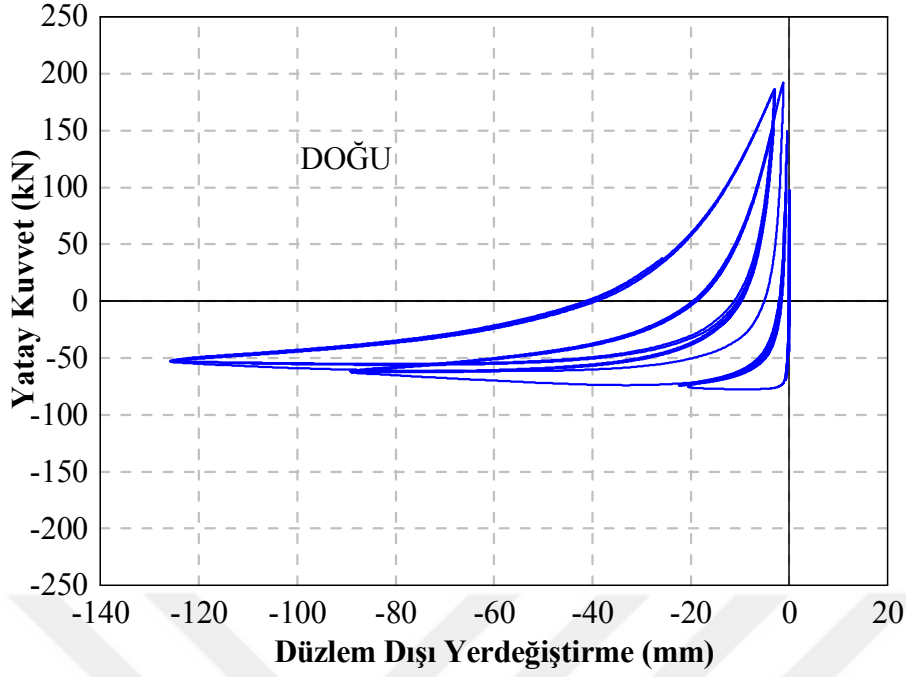
Numunenin $-2\delta_y$ 'deki burkulmuş durumu Şekil 4.33-f'de görülmektedir. İkinci ve üçüncü yükleme çevrimlerinde zayıflatılmış uç kesitlerde sorun görülmemiş, bayrak levhalarındaki dönmeler iyice belirginleşmiştir. Basınç etkisinde ölçülen en büyük düzlemdışı yerdeğiştirme 89.8mm (%2.33L) olup Şekil 4.31'de numuneye ilişkin



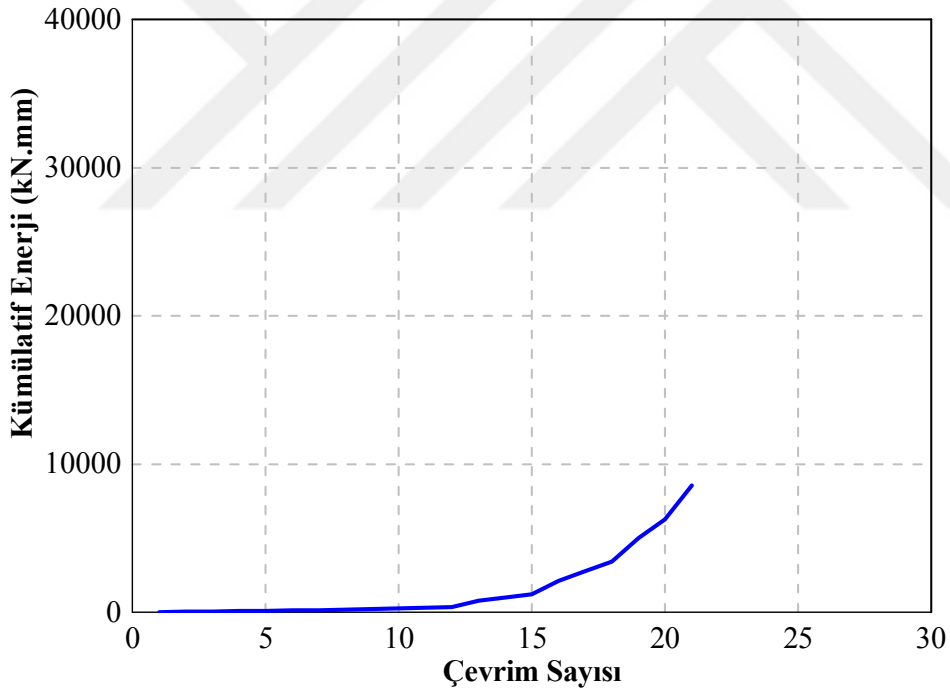
Şekil 4.29 : TB-4 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi ve itme eğrisi.



Şekil 4.30 : TB-4 numunesi yükleme protokolü.



Şekil 4.31 : TB-4 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil 4.32 : TB-4 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi

yatay yük – düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi verilmiştir. Bu seviyede ulaşılan en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +153.1kN ve -62.6kN'dur.

Sonraki adım olan $\pm 3\delta_y$ (12.24mm yerdeğiştirme, %0.42 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirmesi numuneye üç kez uygulanmıştır. Çekme etkisinde numunede zayıflatılmış uç kesitlerde zorlanma ve boya dökülmesi gözlenmemiştir. Basınç

etkisinde numune en fazla 126mm (%4.93L) düzlem dışı yerdeğiştirme yapmış, burkulmuş çubuk Şekil 4.34-a'da verilmiştir. Bu seviyede ulaşılan en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +191.5kN ve -53.7kN'dur.

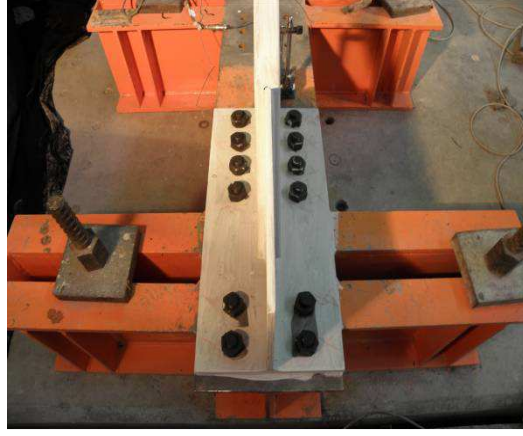
$\pm 4\delta_y$ (16.32mm yerdeğiştirme, %0.57 görelî öteleme oranı) seviyesi yerdeğiştirmesinin ilk çekme çevrimine başlamadan önce yükün sıfır olduğu noktadan geçerken numunede gözle görülecek şekilde kalıcı deplasman görülmüştür. İlk çekme çevrimi etkisinde numunede boya dökülmesine ve zayıflatılmış uç kesitler civarında soruna rastlanmamıştır (Şekil 4.34-b). Basınç etkisinde orta bölgedeki şekildeğiştirmeler -3000~-8000 μ strain aralığındadır. İkinci, son, çevrimin çekme etkisinde numune üzerindeki şekildeğiştirmeler +3600~+3900 μ strain civarında ölçülmüş olup numuneye ve deney düzeneğine ilişkin şekildeğiştirme ölçümleri EK E'de verilmiştir. Basınç etkisinde aşırı genel burkulma dışında herhangi bir yerel burkulmaya rastlanmamış olup çaprazın durumu Şekil 4.34-c'de görülmektedir. Bu seviyede ulaşılan en büyük çekme ve basınç kuvvetleri ise +205.3 ve -45.3kN'dur.

Numune $+5\delta_y$ (20.4mm yerdeğiştirme, %0.71 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinin ilk çekme pikine giderken, +19mm (%0.66 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde ve +193kN yatay yük etkisinde alt uç zayıflatılmış kesitten kopmuştur. Kopma sonrasında numunenin orta bölgesinde 17mm (%0.44L) düzlem dışı kalıcı yerdeğiştirme olduğu görülmüştür. Numunenin kopma sonrasındaki durumu Şekil 4.34-d, e ve f'de görülmektedir. Deney sonunda TB-4 numunesi kümülatif olarak 8550kNmm enerji yutmuştur; yutulan kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi Şekil 4.32'te gösterilmiştir.

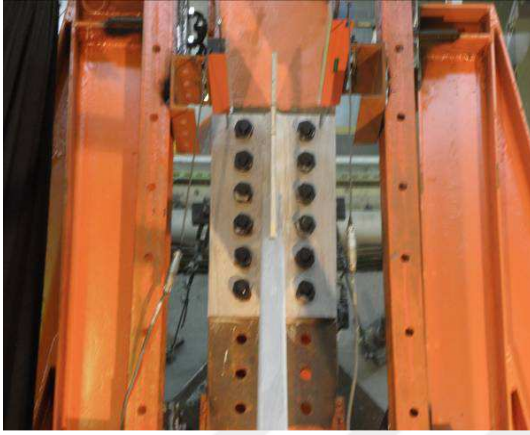
Yalın TB-4 numunesinin genel davranışı incelendiğinde yalnızca çekmeye çalışan çaprazlara oldukça benzer davranış göstermiş olup çekme bölgesinde oldukça etkili çalışırken basınç bölgesinde çabuk burkularak etkin olmayan davranış sergilemiştir; böylece elde edilen kümülatif enerji oldukça düşük seviyede kalmıştır.



(a)



(b)



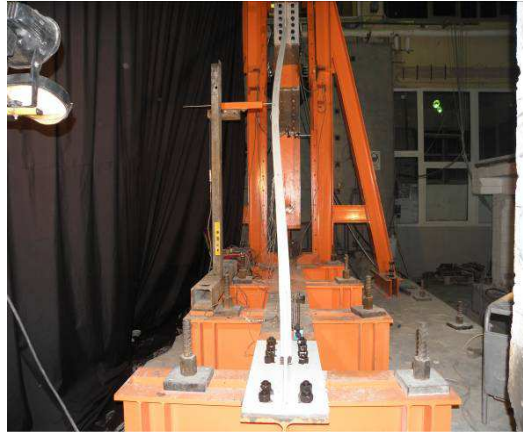
(c)



(d)

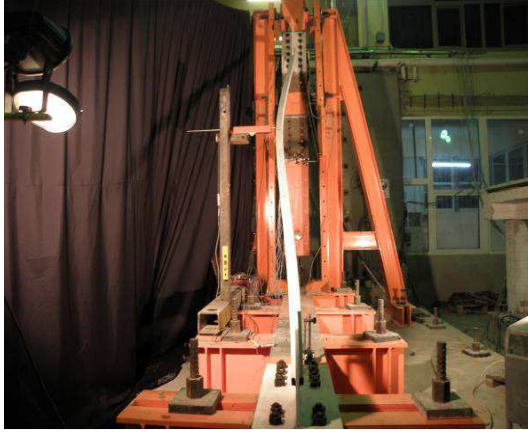


(e)

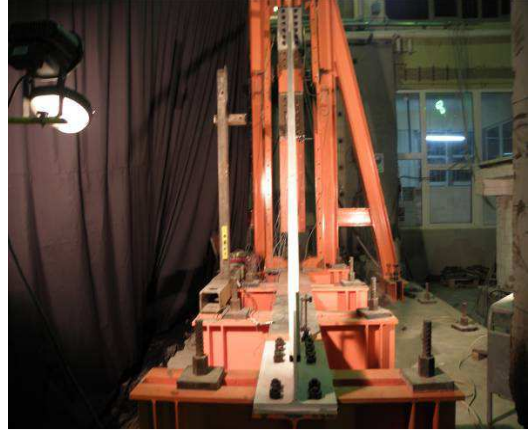


(f)

Şekil 4.33 : TB-4 numunesi deney öncesi, elastik çevrimleri, $-1\delta_y$ (-4.08mm) ve $-2\delta_y$ (-8.16mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Alt zayıflatılmış kesit görünüşü. (c) Üst zayıflatılmış kesit görünüşü. (d) $-0.84\delta_y$ (-3.42mm)'de elastik davranış. (e) $-1\delta_y$ 'de burkulma. (f) $-2\delta_y$ 'de burkulma.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.34 : TB-4 numunesinin $3\delta_y$ (12.24mm), $4\delta_y$ (16.32mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı ve kopma sonrası: (a) $-3\delta_y$ 'de burkulma. (b) $+4\delta_y$ 'de çekmedeki durum. (c) $-4\delta_y$ 'de burkulma. (d,e) Kopma sonrası görünüşler. (f) Kopma sonrası üst başlık görünüşü.

4.4.5 TB-5 numunesi (Kutu 50x50x4 + Uçlar: CFRP plaka ve kumaş + Orta: %13L CFRP sargı)

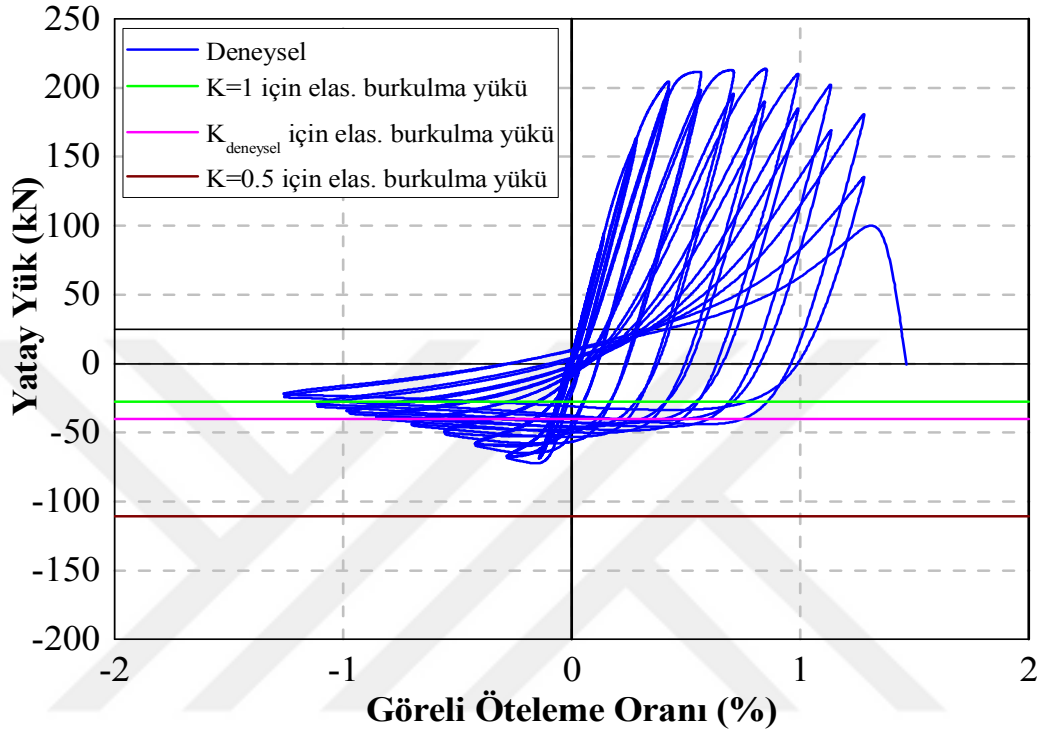
Kutu 50x50x4 kesitli, L=3558mm uzunluğunda ve deney grubunun ikinci numunesi olan TB-5, TB-4 numunesine benzer şekilde ilk adımda güney yönünde yüklenerek çekme etkisine maruz bırakılmıştır. Artan/azalan yatay yükler altında deneysel olarak elde edilen yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi Şekil 4.35’de, yükleme protokolü Şekil 4.36’da gösterilmiştir. Numunenin deney öncesi genel görünüşleri Şekil 4.39-a , b, c ve d’de görülmektedir.

TB-5 numunesi, elastik yerdeğiştirme etkisinde ilk kez yüklenirken ilk çevrimde GPIB kablосundaki temassızlıktan dolayı sorun çıkmış ve yüklemeye baştan başlanılmıştır. Sonrasında elastik olan $\pm 1.14\text{mm}$ ($\pm 0.28\delta_y$, %0.040 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde ilk çekmeye gidilirken hidrolik vereni çalıştıran sistemde yeni bir sorun belirlenmiş olup yüklemeye tekrar baştan başlanılmış ve ilk elastik çevrim numuneye üç kez uygulanmıştır. $\pm 2.28\text{mm}$ ($\pm 0.56\delta_y$, %0.08 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde çekme ve basınç etkisinde numuneden boya dökülmesi olmamış ve birleşimlerde herhangi bir sorun görülmemiştir. Basınç etkisinde numune batıya doğru 4.61mm (%0.13L) düzlem dışı yerdeğiştirmiş (Şekil 4.39-e) olup bu seviyede ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +56kN ve -42.1kN’dur. Son elastik yükleme çevriminde $\pm 0.84\delta_y$ ’lik ($\pm 3.42\text{mm}$, %0.12 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme numuneye üç kez uygulanmış olup numunede henahangi bir boya dökülmesi ve hasar görülmemiştir. İkinci yükleme çevriminde çekme etkisinde numune üzerindeki tüm veri alınan noktalardaki şekildeğiştirmeler +650~+750 μstrain civarında ölçülmüş ve bu seviyede basınç etkisindeki düzlem dışı yerdeğiştirme 14.4mm (%0.40L) olarak belirlenmiştir.

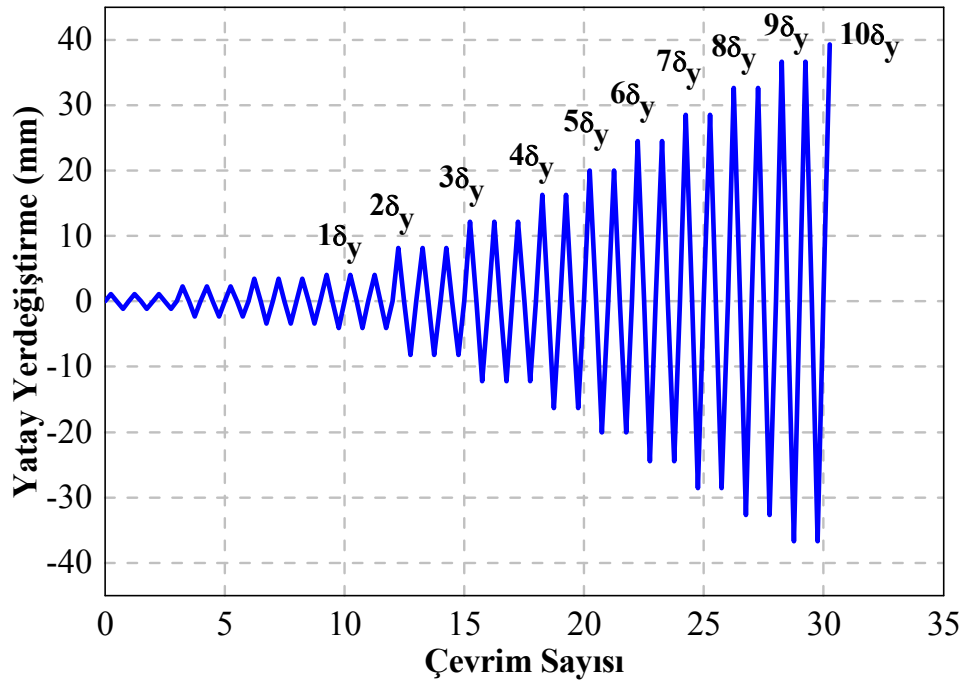
$\pm 1\delta_y$ ($\pm 4.08\text{mm}$, %0.14 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesindeki çekme ve basınç etkilerinde zayıflatılmış kesit ve orta bölge civarında boya dökülmesi ve FRP’lerde sorun görülmemiştir. Bu yerdeğiştirme seviyesinde Şekil 4.39-f’de görülen basınç etkisindeki burkulmada ölçülen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme 25.7mm (%0.72L) olup çekme ve basınç etkilerinde ölçülen en büyük kuvvetler sırasıyla +95.7kN ve -70kN’dur.

Sonraki $\pm 2\delta_y$ ($\pm 8.16\text{mm}$, %0.29 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde ilk çekme etkisinde FRP’lerden sesler duyulmuş ve bu sesler FRP’nin çalıştığıının

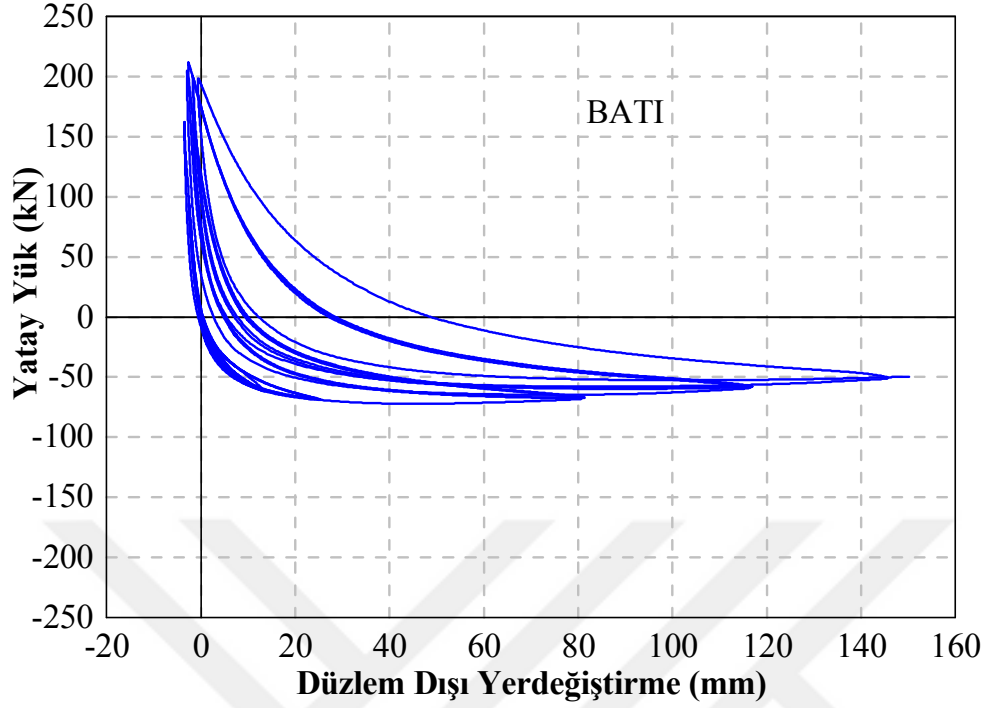
göstergesi olarak kabul edilmiştir. Şekil 4.40-a'da görüldüğü gibi basınç etkisinde ise üst bayrak levhası batıya doğru belirgin şekilde dönerken alt bayrak levhasında az miktarda dönme görülmüştür. Sonraki çekme etkisinde ise zayıflatılmış kesit bölgesinde boya dökülmesi görülmemiştir. Basınç etkisinde ölçülen en büyük



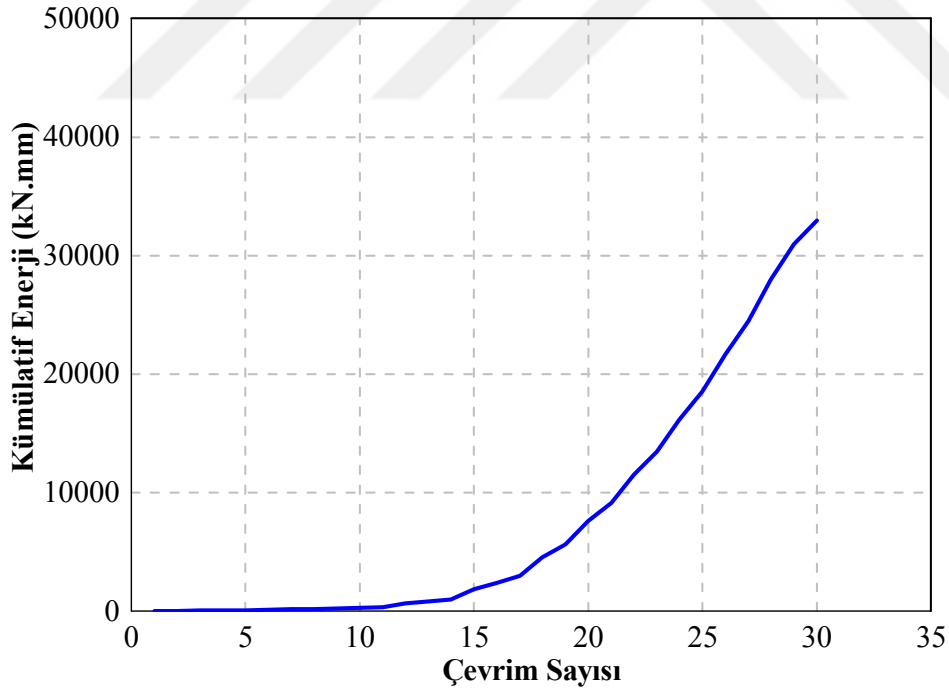
Şekil 4.35 : TB-5 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi.



Şekil 4.36 : TB-5 numunesi yükleme protokolü.



Şekil 4.37 : TB-5 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil 4.38 : TB-5 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

düzlem dışı yerdeğiştirme 81.2mm (%2.28L) olup çekme ve basınç etkilerinde ölçülen en büyük kuvvetler sırasıyla +164.9kN ve -67.6kN'dur.

Üç çevrim olarak uygulanan son yerdeğiştirme seviyesi $\pm 3\delta y$ ($\pm 12.24\text{mm}$, %0.33 görelî öteleme oranı) etkisindeki ilk çekme etkisinde FRP'lerden sesler gelmeye devam etmiş ve herhangi bir sorun tespit edilmemiştir. Bu seviyede numune üzerinde $+2300\sim +2600\mu\text{strain}$ arasında değişen şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. Sonrasındaki ikinci ve üçüncü çevrimlerde çekme etkisinde numune üzerinde boya dökülmesi ve FRP'lerde sorun görülmemiştir. İkinci çevrimde basınç etkisinde orta bölgede numunenin doğu ve batı yüzlerinde ölçülen şekildeğiştirmeler sırasıyla $-3500\mu\text{strain}$ ve $-2300\mu\text{strain}$ olup numunenin burkulmuş durumu Şekil 4.40-b'de görülmektedir. Ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla $+204\text{kN}$ ve -59.2kN olup en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme 118.2mm (%3.32L) olarak ölçülmüştür.

$\pm 16.32\text{mm}$ ($\pm 4\delta y$, %0.57 görelî öteleme oranı) olarak iki çevrim uygulanan yerdeğiştirmenin ilk çekme etkisinde (Şekil 4.40-c) şekildeğiştirme ölçerler ile alt bölgede $+3500\sim +4000\mu\text{strain}$, orta bölgede $+3000\mu\text{strain}$ ve üst bölgede $+5300\mu\text{strain}$ civarlarında ölçülmüş olup çekme etkisinde yatay yük – yerdeğiştirme eğrisi yataylaşmış ve böylece inelastik davranış belirginleşmiştir. Basınç etkisinde ise orta bölgede $-3000\mu\text{strain}$ civarında şekildeğiştirmeler ölçülmüş olup tüm şekildeğiştirme ölçerlere ait eğriler EK F'te verilmiştir. Son çekme etkisinde FRP'lerden yüksek sesler gelmesine karşın gözle görülür bir hasar belirlenmemiştir. Şekil 4.40-d'de görüldüğü gibi basınç etkisinde numune deney süresince ölçülen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme miktarı olan 150mm (%4.22L)'ye ulaştığında düzlem dışı yerdeğiştirme ölçer kapasitesine ulaştığından deneyden çıkartılmıştır. Numuneye ait yatay yük - düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.37'de görülmektedir. Bu seviyedeki en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla $+212\text{kN}$ ve -51.2kN 'dur.

$\pm 5\delta y$ ($\pm 20.4\text{mm}$, %0.71 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesine ulaşıldığında çekme etkisindeki davranış Şekil 4.40-e'de görülmekte olup FRP'lerden sesler duyulmuş ve herhangi bir aderans kaybı tespit edilmemiştir. Basınç etkisinde ise orta bölgede $-3000\mu\text{strain}$ civarında şekildeğiştirmeler ölçülmüş olup boya dökülmesi görülmemiştir. Bu seviyede numunenin burkulmuş durumu Şekil 4.40-f'de verilmiştir.

Yerdeğiştirmenin arttırılmasıyla ulaşılan $\pm 6\delta y$ ($\pm 24.48\text{mm}$, %0.86 görelî öteleme oranı) seviyesinde ilk çekme etkisinde FRP'lerden artan sesler duyulmuş olup orta

bölgede boya dökülmesi görülmüştür. Basınç etkisinde ise Şekil 4.41-a'da görüldüğü gibi burkulmada üst bayrak levhası aşırı miktarda dönmüştür. İkinci ve son çekme etkisinde alt kısımda +4000~+4200 μ strain, orta bölgede +3900~+4500 μ strain ve üst kısımda ise +7000 μ strain civarında şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. Basınç etkisinde ise numunede hem düzlem içi hem de düzlem dışı burkulma birlikte oluşmuş ve numune düşey doğrultuda aşağı doğru hareket etmiştir. Bu durum çapraz deneylerinde çok rastlanan bir durum olmamakla birlikte, hemen hemen her çalışmada bu davranış biçimine dikkat çekilmektedir.

$\pm 7\delta y$ (± 28.56 mm, %1 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde çekme etkisinde orta bölgeden artan sesler gelmedye devam etmiştir. FRP'lerde herhangi bir sorun ve boya dökülmesi tespit edilmemiştir. Basınç etkisindeki numune davranışı Şekil 4.41-b ve c'de görülmekte olup orta bölgede düzlem içi hareket devam etmiştir. Alt bayrak levhasında dönme aşırı miktarda artmış ve orta bölgedeki FRP sargısının üst tarafında numunede dirsek oluşmaya başlamıştır. Ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +212kN ve -36.2kN'dur.

Sonraki $\pm 8\delta y$ (± 32.64 mm, %1.14 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde çekme etkisinde boya dökülmesi görülmezken basınç etkisinde üst zayıflatılmış kesitin batı yüzündeki FRP plaka guse tarafından çelik yüzeyden ayrılmıştır (Şekil 4.41-e). Orta bölge FRP sargısından -33.3kN yük ve -23.62mm yerdeğiştirme etkisinde yüksek sesler duyulmuştur. Basınç etkisinde numunede düzlem içi ve dışı yerdeğiştirmeler hızla devam etmekte olup numunede üst uçtan itibaren düzlem içinde eğilme gözlenmiştir. Orta bölgedeki CFRP sargının üst bitiminde oluşan dirsek Şekil 4.41-f'de görülmektedir. Bu seviyede ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +204kN ve -31kN'dur.

Ulaşılan sonraki yerdeğiştirme seviyesi $\pm 9\delta y$ (± 36.72 mm, %1.28 görelî ötelenme oranı) olup ilk basınç etkisinde numune Şekil 4.42-a'da görüldüğü gibi hem düzlem içi hem de düzlem dışı burkulmuştur. Bu seviyede -25kN etkisinde üst zayıflatılmış kesitin doğu yüzündeki FRP plaka boyuna doğrultuda yırtılmış ve bayrak levhası tarafında aderans kaybı sonucu çelik yüzeyden ayrılmıştır (Şekil 4.42-b). Bu seviyede inceleme yapılması için yerdeğiştirme durdurulmuştur. Bu sırada alt zayıflatılmış kesitin doğu yüzündeki FRP plaka Şekil 4.42-c'de görüldüğü gibi

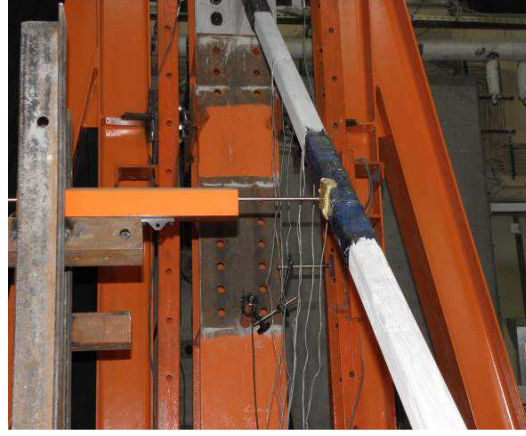
aniden elik yüzeyden ayrılmıştır. Bu seviyede llen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +181kN ve -25kN'dur.

Son yerdeğiştirme seviyesi olan $\pm 10\delta_y$ ($\pm 40.8\text{mm}$, %1.43 görelî öteleme oranı)'de ilk çekme etkisinde pik yerdeğiştirme seviyesine giderken numune st uç zayıflatılmış kesitten +111kN etkisinde yüksek sesle kopmuş, kopma sonrasındaki durum ise şekil 4.42-d, e ve f'de verilmiştir. Kümülatif olarak tüketilen enerji-çevrim sayısı eğrisi şekil 4.38'de verilen numune deney süresince 32931kNmm enerji tüketmiştir.

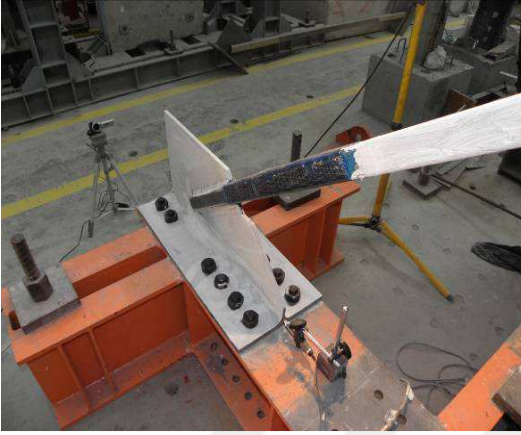




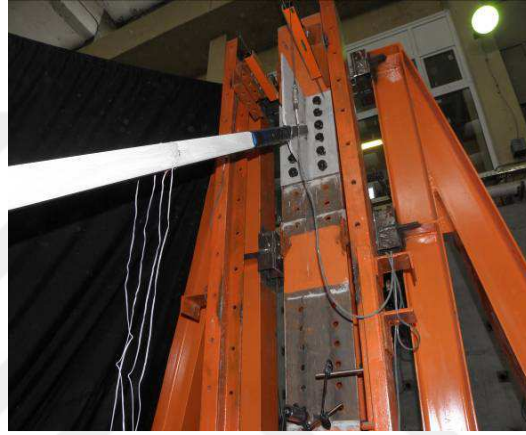
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.39 : TB-5 numunesinin deney öncesi görünüşleri, elastik çevrim ve $1\delta_y$ (4.08mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) Deney öncesi genel görünüş. (b) Deney öncesi orta bölge. (c) Deney öncesi alt güçlendirme bölgesi. (d) Deney öncesi üst güçlendirme bölgesi. (e) Elastik basınç etkisinde davranış. (f) $-1\delta_y$ (-4.08mm)’de burkulma.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.40 : TB-5 numunesinin $2\delta_y$ (8.16mm), $3\delta_y$ (12.24mm), $4\delta_y$ (16.32mm) ve $5\delta_y$ (20.4mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-2\delta_y$ (-8.16mm)'de burkulma. (b) $-3\delta_y$ (-12.24mm)'de burkulma. (c) $+4\delta_y$ (+16.32mm)'de davranış. (d) $-4\delta_y$ (-16.32mm)'de burkulma. (e) $+5\delta_y$ (+20.4mm)'de davranış. (f) $-5\delta_y$ (-20.4mm)'de burkulma.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.41 : TB-5 numunesinin $6\delta_y$ (14.48mm), $7\delta_y$ (28.56mm) ve $8\delta_y$ (32.64mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-6\delta_y$ (-14.48mm)'de burkulma. (b) $-7\delta_y$ (-28.56mm)'de burkulma. (c) $-7\delta_y$ (-28.56mm)'de orta bölge. (d) $-8\delta_y$ (-32.64mm)'de burkulma. (e) $-8\delta_y$ (-32.64mm)'de üst uç batı yüzündeki CFRP plakanın yüzeyden ayrılması. (f) $-8\delta_y$ (-32.64mm)'de orta bölgede CFRP sargı üst ucunda oluşan dirsek.



(a)



(b)



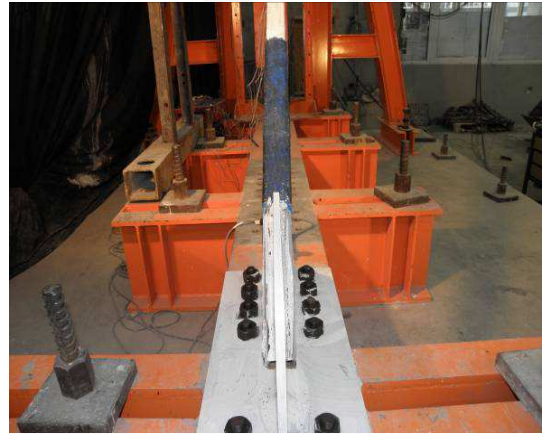
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.42 : TB-5 numunesinin $9\delta_y$ (36.72mm) davranışı ve kopma sonrası görüşleri: (a) $-9\delta_y$ (-36.72mm)'de düzlem içi ve dışı burkulma. (b) $-9\delta_y$ (-36.72mm)'de üst uç doğu yüzündeki CFRP plakanın yırtılması ve yüzeyden ayrılması. (c) $-9\delta_y$ (-36.72mm)'de alt uç doğu yüzündeki CFRP plakanın yüzeyden ayrılması. (d) Üst zayıflatılmış kesitteki kopma bölgesi. (e) Kopma sonrası genel görünüş. (f) Kopma sonrası alt uç birleşimi.

4.4.6 TB-6 numunesi (Kutu 50x50x4 + Uçlar: CFRP plaka ve kumaş + Orta: %25L CFRP sargı)

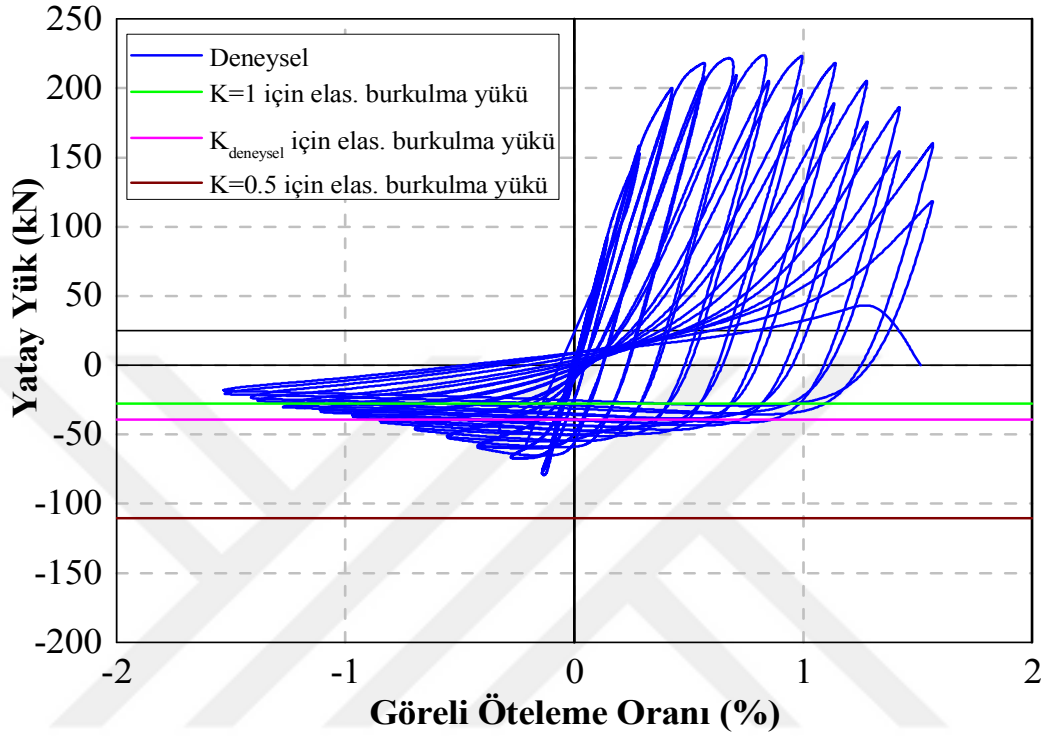
Kutu 60x60x3 kesitli, L=3558mm uzunluğunda olup grubunun son numunesi olarak denenen TB-6'ya ait yatay yük – görelî öteleme oranı eğrisi Şekil 4.43'de, uygulanan yükleme protokolü Şekil 4.44'de görülmekte olup numunenin deney öncesi durumu Şekil 4.46-a ve b'de verilmiştir.

Elastik yükleme çevrimleriyle yüklenen numunede $\pm 0.28\delta_y$ ($\pm 1.14\text{mm}$, %0.04 görelî öteleme oranı) ve $\pm 0.56\delta_y$ ($\pm 2.28\text{mm}$, %0.08 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyelerinde numunede sorun görülmemiş olup numunenin batıya doğru düzlemdışı yerdeğiştirme yaptığı belirlenmiştir. $\pm 3.42\text{mm}$ ($\pm 0.84\delta_y$, %0.12 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde çekme etkisinde numune üzerinden $+600\sim+750\mu\text{strain}$ civarında şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. Birleşim bölgelerinde ve numunede sorun gözlenmemiş olup basınç etkisinde en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme 3.3mm (%0.09L) olarak ölçülmüştür.

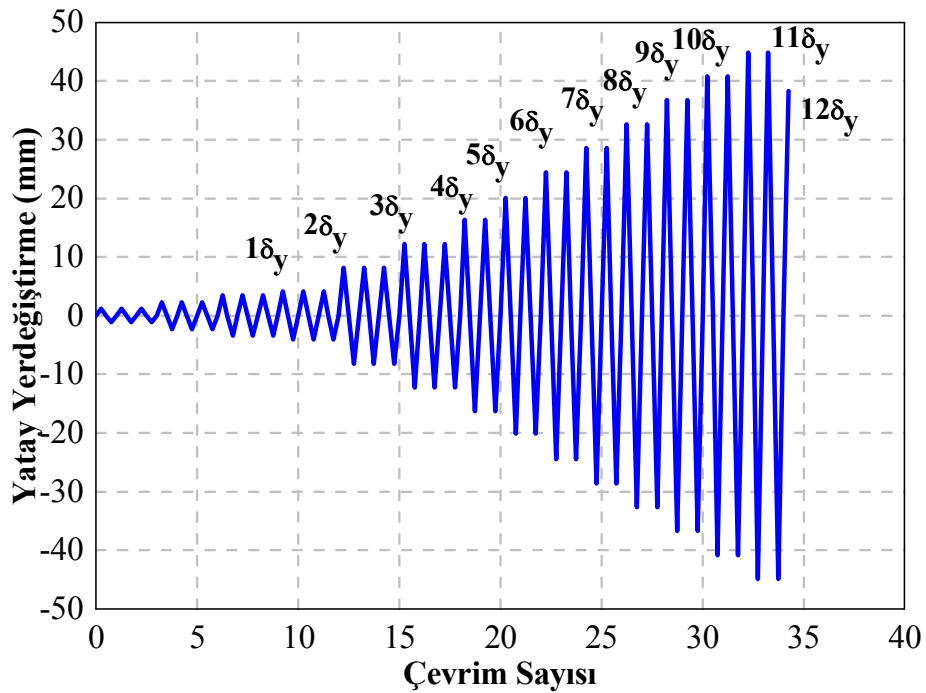
$\pm 1\delta_y$ ($\pm 4.08\text{mm}$, %0.14 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde ilk çekme etkisinde numune üzerinde $+800\sim+1000\mu\text{strain}$ civarında şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. İlk basınç etkisinde pik yerdeğiştirmeye giderken -3.63mm ($0.89\delta_y$, %0.13 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde ve -80.5kN yatay yük etkisinde numunede Şekil 4.46-c'de görüldüğü üzere burkulma görülmüştür. İkinci çevrimde çekme etkisinde yatay kuvvette yaklaşık %2 civarında artış belirlenmiş olup beklendiğı üzere bu durum CFRP güçlendirme elemanlarının çalıştığının bir göstergesidir. Son yükleme çevriminde boya dökülmesi ve CFRP elemanlarda sorun gözlenmemiştir. İkinci ve üçüncü yükleme çevrimlerinde basınç etkisinde ise ölçülen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme 27.5mm (%0.77L)'dir. Üst bayrak levhasında az miktarda, alt bayrak levhasında ise Şekil 4.46-d'de görüldüğü gibi belirgin olmayan bir miktarda dönme görülmüştür. Bu yerdeğiştirme seviyesinde ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla $+93\text{kN}$ ve -77.6kN 'dur.

Sonraki $\pm 2\delta_y$ ($\pm 8.16\text{mm}$, %0.28 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde ilk çekme etkisinde CFRP'lerden sesler gelmiş ve numune üzerindeki şekildeğiştirmeler $+1650\sim+1700\mu\text{strain}$ civarında ölçülmüştür (Şekil 4.46-e). Çekmede yerdeğiştirmenin sıfır olduğı noktaya giderken GPIB kablosunda yine sorun oluşmuş ve sistem tekrar başlatılarak deneye devam edilmiştir. Sistemin kapatıp açılmasından

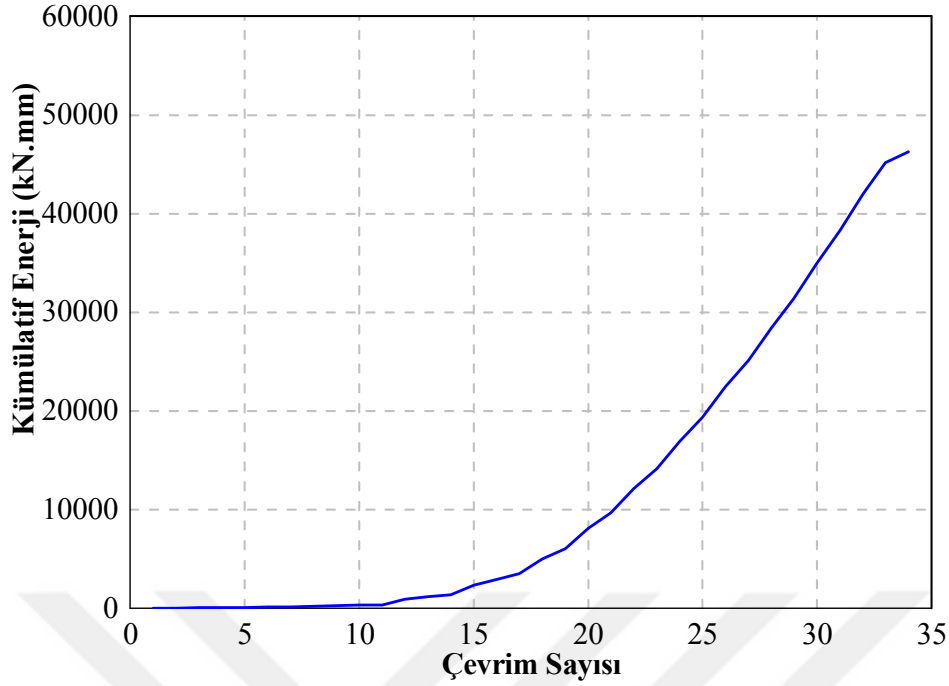
dolayı şekildeğiştirme ölçerlerde veri kaybı olduğundan bu numune için şekildeğiştirme ölçer datası verilmemiştir. İkinci çevrimde çekme etkisinde kuvvetin arttığının görülmesine karşın üçüncü çekme etkisinde CFRP’lerde herhangi bir sorun görülmemiştir. Zayıflatılmış kesit bölgelerinin güçlendirilmesinde kullanılan CFRP



Şekil 4.43 : TB-6 numunesi yatay yük-görel öteleme oranı histeretik eğrisi.



Şekil 4.44 : TB-6 numunesi yükleme protokolü.



Şekil 4.45 : TB-6 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

plakalar üzerinde ortalama $+1200\mu\text{strain}$ civarında şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. Bu çevrimde basınç etkisinde ölçülen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme 86.4mm (%2.43L) olup numunenin burkulmuş durumu Şekil 4.46-f’de verilmiştir. Bu yerdeğiştirme seviyesinde ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +159.4kN ve -68.1kN’dur.

Yerdeğiştirmenin arttırılmasıyla ulaşılan $\pm 3\delta_y$ ($\pm 12.24\text{mm}$, %0.42 göreceli öteleme oranı) seviyesinde ilk çekme etkisinde CFRP elemanlardan sesler duyulmuş olup numune üzerindeki şekildeğiştirmeler $+2400\sim+2550\mu\text{strain}$ ve CFRP plakalar üzerindeki ise $+1600\sim+2050\mu\text{strain}$ olarak ölçülmüştür. Bu seviyedeki çekme etkisinde üst uç birleşim bölgesinin durumu Şekil 4.47-a’da görülmektedir. İlk çevrimde basınç etkisinde şekildeğiştirmeler orta bölgenin doğu yüzünde -4800 μstrain , batı yüzünde ise -2700 μstrain olarak ölçülmüş olup numunenin burkulmuş durumu Şekil 4.47-b’de verilmiştir. Basınç pikine ulaşıp yerdeğiştirmenin sıfır olduğu noktaya geri dönerken hidrolik vereni kontrol eden sistemde sorun çıkmış olup sistem kapatılıp tekrar açılmıştır. İkinci çevrimde çekmeye giderken sistemdeki trigger tutukluk yapıp çalışmadığından bu kısımda elle data alınarak bu yerdeğiştirme adımı tamamlanmıştır.

Trigger sorununu gidermek için yerdeğiştirmenin sıfır olduğu noktada veri kaydedici cihaz değiştirilmiş ve sistemdeki dosya sıfırlanmıştır. Yapılan bu değişiklikten sonra

$\pm 4\delta_y$ ($\pm 16.32\text{mm}$, %0.56 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinin ilk çekme çevrimine devam edilmiş ve CFRP elemanlardan sesler duyulmuştur. Numune orta bölgesinin güçlendirmesinin durumu Şekil 4.47-c’de verilmiştir. Sistemde yapılan düzeltme ve değişikliklerden sonra tepe yerdeğiştirmesi ve ölçülen kuvvetin uygun değerlerde olduğu belirlenmiş olup deneye devam edilmiştir. Buna karşın şekildeğiştirme ölçerlerden alınan verilerin olması gerekenden çok büyük değerler oldukları belirlenmiş olup deney ve değerlendirme sürecinde bu noktadan sonraki veriler dikkate alınmamıştır. Yerdeğiştirmenin sıfır olduğu noktada düzlem dışı yerdeğiştirme ölçer sistemden çıkartılmış olup sistemin yeniden başlatılmasından dolayı düzgün bir yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi elde edilememiş, bu nedenle bu numune için bu eğri verilmemiştir. Buna karşın, eğrinin genel biçimi diğer numunelere oldukça benzemektedir. İkinci çevrimde çekme etkisinde CFRP’lerden sesler gelmeye devam etmiştir. Basınç etkisinde ise Şekil 4.47-d’de verildiği üzere hem düzlem dışı hem de düzlem içi yerdeğiştirmeler görölmüş olup CFRP’lerden sesler duyulmuştur. Bu seviyede ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +216.6kN ve -52.6kN’dur.

$\pm 5\delta_y$ ($\pm 20.4\text{mm}$, %0.70 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesindeki yükleme çevrimlerinde çekme etkisinde de CFRP’lerin çalıştığının göstergesi olan sesler duyulmuş ancak sistemde herhangi bir yapısal sorun görölmemiştir. Basınç etkisinde de sesler duyulmaya devam etmiş ve boya dökölmesi görölmemiştir. Numunenin basınç etkisindeki burkulmuş durumları Şekil 4.47-e ve f’de görölmektedir. Bu seviyede ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +223.6kN ve -20.5kN’dur.

Sonraki $\pm 6\delta_y$ ($\pm 24.48\text{mm}$, %0.84 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesindeki çekme çevrimlerinde orta bölgedeki CFRP sargıdan sesler gelmiş ve üst uç zayıflatılmış kesit bölgesinin durumu Şekil 4.48-a’da verilmiştir. Basınç çevrimlerinde de düzlem içi ve dışı burkulan (Şekil 4.48-b) numunede CFRP elemanlardan sesler gelmiş, ancak bir sorun gözlenmemiştir. Bu seviyede ölçülen en büyük çekme kuvveti +226kN, en büyük basınç kuvveti -41.3kN’dur.

Arttırılan yerdeğiştirmeyle ulaşılan $\pm 7\delta_y$ ($\pm 28.56\text{mm}$, %0.98 görelî öteleme oranı) seviyesinde ilk çevrimde çekme ve basınç etkisinde CFRP elemanlardan gittikçe artan sesler gelmesine karşın CFRP’lerde sorun tespit edilmemiştir. Alt uç zayıflatılmış kesit bölgesinin çekme etkisindeki durumu Şekil 4.48-c’de verilmiştir.

İkinci çevrimde de çekme etkisinde sesler gelmesine karşın boya dökülmesi görülmemiştir. Basınç etkisinde ise alt bayrak levhasında oldukça az miktarda dönme oluşmuş, üst bayrak levhasında ise belirgin bir dönme görülmüş ve Şekil 4.48-d'de görüldüğü gibi düzlem içi ve dışı burkulma belirlenmiştir. Bunun yanında, orta bölgede CFRP sargı altında dirsek oluşmaya başlamıştır. Ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +223kN ve -37.1kN'dur.

$\pm 8\delta_y$ ($\pm 32.64\text{mm}$, %1.12 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde ilk çevrimde çekme etkisinde CFRP'lerden sesler duyulmuştur. Basınç etkisinde burkulan numunenin orta bölgesinin üst, alt ve batı yüzlerinde (Şekil 4.48-e) CFRP kumaş sargı lifleri ayrılmıştır. İkinci çevrim çekme etkisinde de orta bölgede oluşan dirsek kısmında doğu yüzdeki CFRP kumaş sargı liflerinde ayrılma görülmüş olup ve zayıflatılmış kesit bölgelerindeki CFRP güçlendirmelerde sorun olmadığı görülmüştür.

Sonraki $\pm 9\delta_y$ ($\pm 36.72\text{mm}$, %1.26 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde ilk çekme etkisinde orta bölgede oluşan dirseğin dört yüzünde de CFRP'ler liflerinden tamamen ayrılmıştır (Şekil 4.48-f). Basınç etkisinde aşırı şekilde burkulan (Şekil 4.49-a) numune düzlem içi ve dışı yerdeğiştirmeler yaparak Z şeklini almıştır. İkinci çekme etkisinde numunenin boyu uzadığından yerdeğiştirmenin sıfır olduğu noktaya geri dönerken çekme yerdeğiştirmesinde belirgin şekilde burkulma oluşmuştur. Basınç etkisinde ise CFRP'lerden yüksek sesler gelmesine karşın zayıflatılmış kesitler çevresinde sorun görülmemiştir. Bu yerdeğiştirme seviyesinde ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +206.7 ve -30kN'dur.

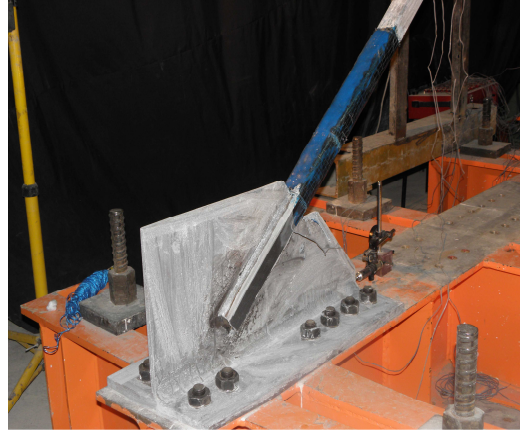
$\pm 40.8\text{mm}$ ($\pm 10\delta_y$, %1.4 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesine ulaşıldığında çekme etkisinde CFRP'lerden yüksek sesler gelmeye devam etmiştir. İlk basınç etkisinde alt uçtaki zayıflatılmış kesitin doğu yüzündeki CFRP plakanın bayrak levhası tarafındaki üst yüzünden ince birkaç lif yüksek miktarda sesle birlikte dışarı doğru fırlamıştır (Şekil 4.49-b). Buna karşın herhangi bir aderans kaybı olmamıştır. İkinci çevrimde çekme etkisinde numune pik noktaya ulaşp, yerdeğiştirme sıfır noktasına doğru geri gelirken numune burkulmaya devam etmiştir. İkinci basınç etkisinde ise -21kN yük etkisinde üst zayıflatılmış kesitin batı yüzündeki CFRP plaka bayrak levhası tarafındaki kısmından kırılmış ve epoksiden ayrılarak dışarı fırlamıştır.

$\pm 11\delta_y$ ($\pm 44.88\text{mm}$, %1.54 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesine ulaşıldığında ilk çevrimde çekme ve basınç etkisinde sorun görölmemiştir. İkinci çevrimde ise çekme etkisinde alt uçtaki güçlendirme bölgesinden yüksek ses gelmesine karşın herhangi bir sorun görölmemiştir. Basınç etkisinde Şekil 4.49-c’de görüldüğü gibi düzlem içi ve dışındaki yerdeğiştirmeler aşırı şekilde artmıştır. Bu seviyedeki en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla $+160.5\text{kN}$ ve -18.4kN ’dur.

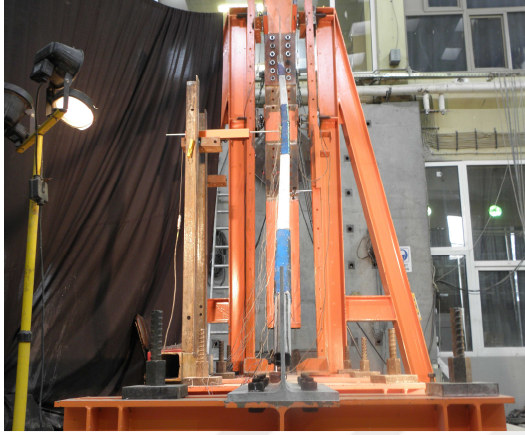
Göçme öncesi son yerdeğiştirme seviyesi olan $\pm 12\delta_y$ ($\pm 48.96\text{mm}$, %1.68 görelî öteleme oranı)’de ilk çekme pikine gidilirken numune $+38.3\text{mm}$ yerdeğiştirme seviyesinde ve $+48.7\text{kN}$ ’luk kuvvet etkisinde üst zayıflatılmış kesit bölgesinden yüksek sesle kopmuştur. Üst uç doğu yüzünde daha önceden az miktarda lifleri kopan CFRP plaka, CFRP kumaş sargının bittiğı noktadan koparak fırlamıştır. Ayrıca üst zayıflatılmış kesitin batı yüzündeki CFRP plaka bayrak levhası tarafından koparak fırlamıştır. Deney süresince 46252kNmm enerji tüketerek kopan numuneye ait kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi Şekil 4.45’de görölmektedir. Kopma sonrası fotoğraflar Şekil 4.49-d, e ve f’de verilmiştir.



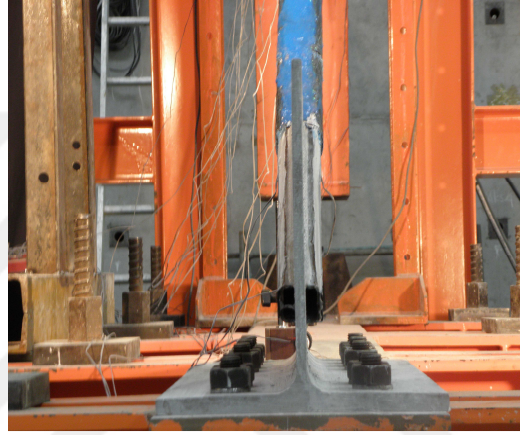
(a)



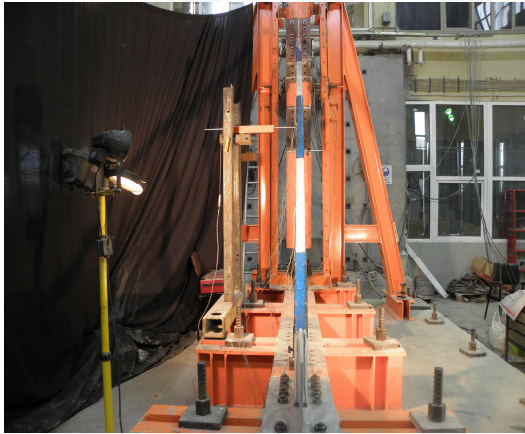
(b)



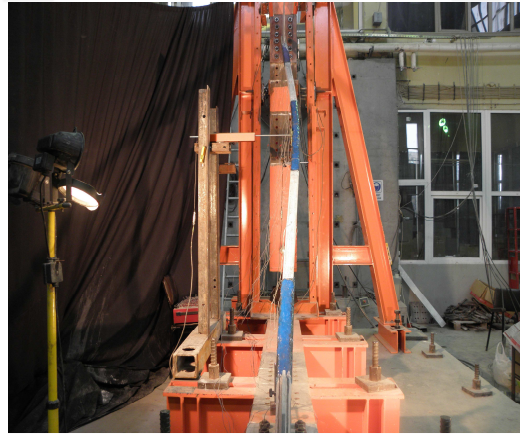
(c)



(d)

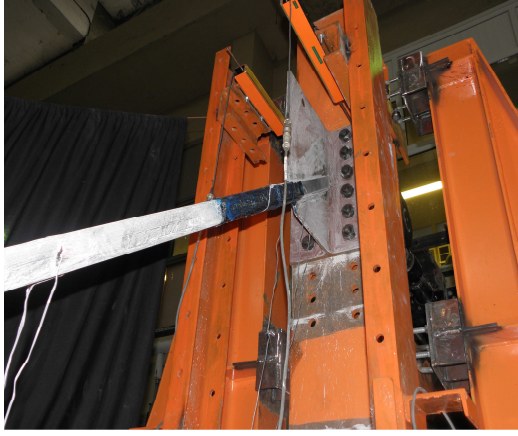


(e)

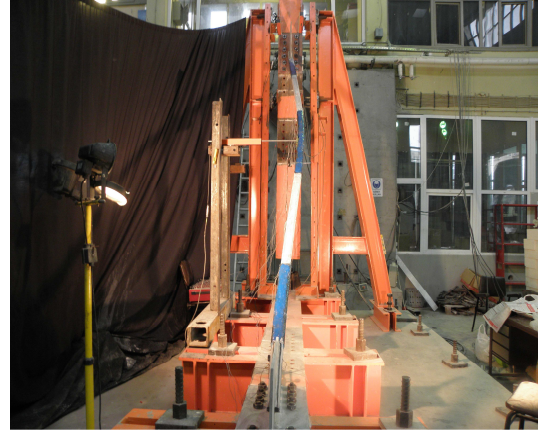


(f)

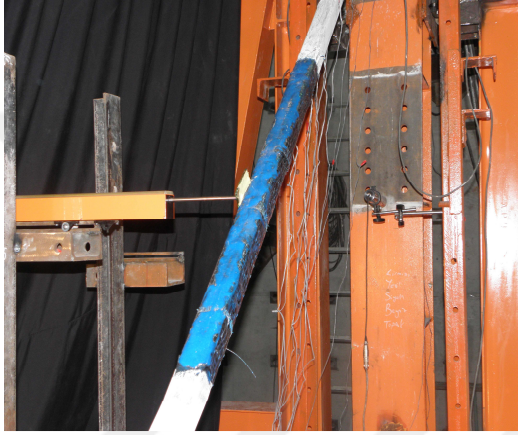
Şekil 4.46 : TB-6 numunesinin deney öncesi görünüşler ve $1\delta_y$ (4.08mm), $2\delta_y$ (8.16mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışları: (a) Deney öncesi genel görünüş. (b) Deney öncesi alt zayıflatılmış kesit güçlendirmesi. (c) $-1\delta_y$ (-4.08mm)'de burkulma. (d) $-1\delta_y$ (-4.08mm)'de alt uç birleşimi. (e) $+2\delta_y$ (+8.16mm)'de numunenin davranışı. (f) $-2\delta_y$ (-8.16mm)'de burkulma.



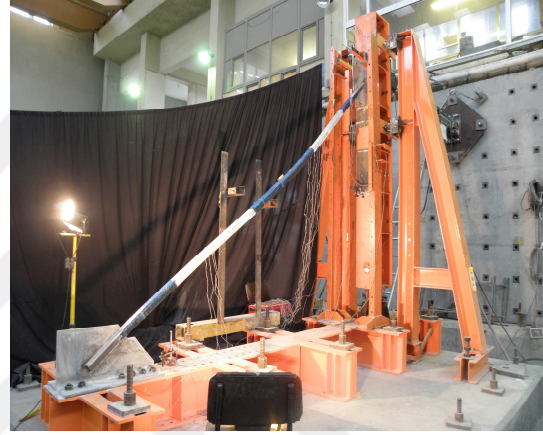
(a)



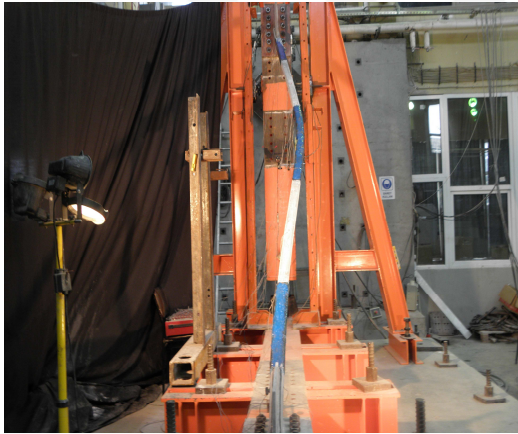
(b)



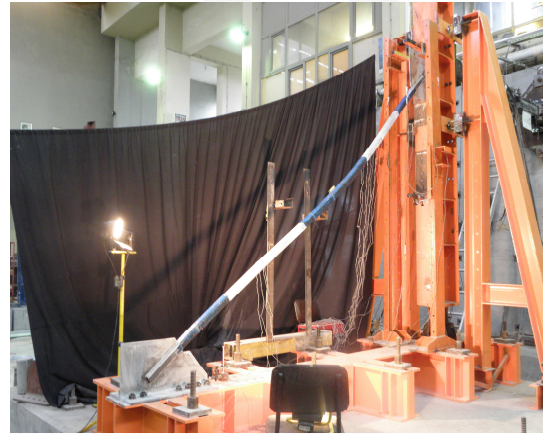
(c)



(d)

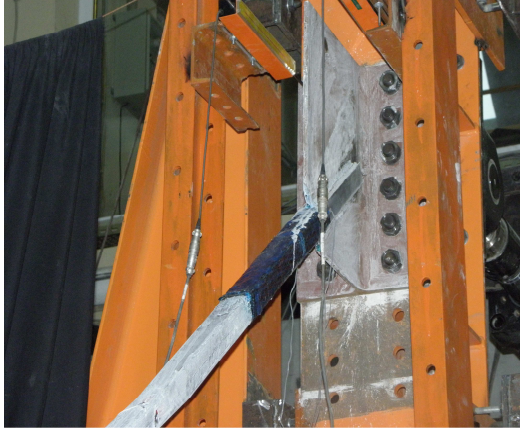


(e)



(f)

Şekil 4.47 : TB-6 numunesinin $3\delta_y$ (12.24mm), $4\delta_y$ (16.32mm) ve $5\delta_y$ (20.04mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışları: (a) $+3\delta_y$ (+12.24mm)'de üst uç birleşimi. (b) $-3\delta_y$ (-12.24mm)'de burkulma. (c) $+4\delta_y$ (+16.32mm)'de orta bölgenin durumu. (d) $-4\delta_y$ (-16.32mm)'de düzlem içi ve dışı burkulma. (e) $-5\delta_y$ (-20.04mm)'de burkulma. (f) $-5\delta_y$ (-20.04mm)'de düzlem içi ve dışı burkulma.



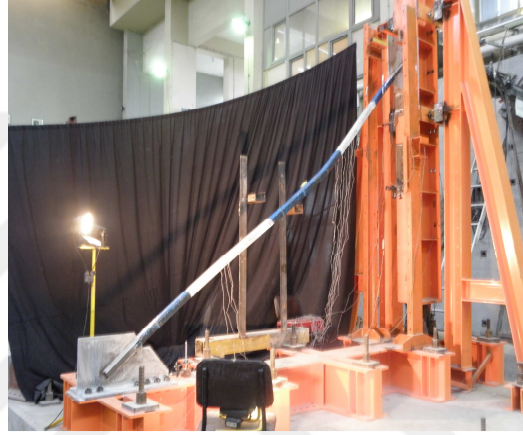
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

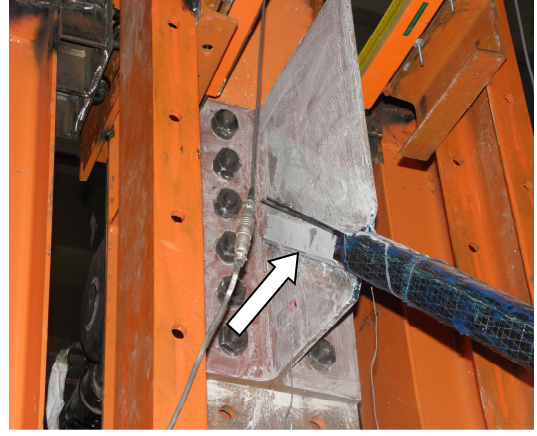


(f)

Şekil 4.48 : TB-6 numunesinin $6\delta_y$ (24.14mm), $7\delta_y$ (28.2mm), $8\delta_y$ (32.28mm) ve $9\delta_y$ (36.72mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışları: (a) $+6\delta_y$ (+24.14mm)'de üst uç birleşimi. (b) $-6\delta_y$ (-24.14mm)'de burkulma. (c) $+7\delta_y$ (+28.2mm)'de alt uç birleşimi. (d) $-7\delta_y$ (-28.2mm)'de düzlem içi ve dışı burkulma. (e) $-8\delta_y$ (-32.28mm)'de orta bölgedeki CFRP sargının batı yüzünde yırtılma. (f) $+9\delta_y$ (+36.72mm)'de orta bölgedeki CFRP sargının dört yüzünde yırtılması.



(a)



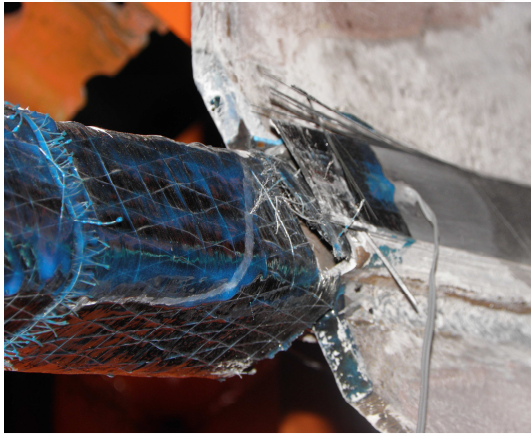
(b)



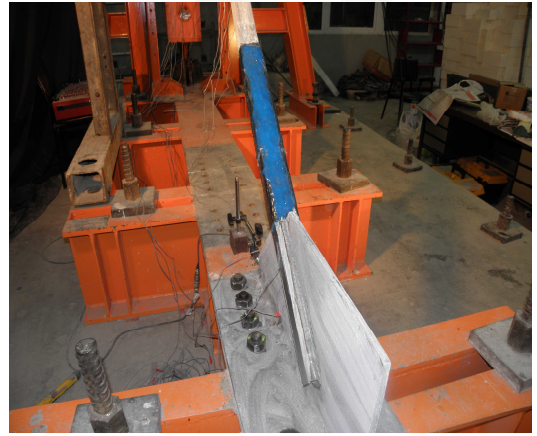
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.49 : TB-6 numunesinin $9\delta_y$ (36.72mm), $10\delta_y$ (40.8mm), $11\delta_y$ (44.88mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışları ve kopma sonrası görünüşler: (a) $-9\delta_y$ (-36.72mm)'de burkulma. (b) $-10\delta_y$ (-40.8mm)'de üst uç doğru yüzünde kopan CFRP plaka. (c) $-11\delta_y$ (-44.88mm)'de aşırı düzlem içi ve dışı burkulma. (d, e) Kopma bölgesi. (f) Kopma sonrası alt zayıflatılmış kesit güçlendirmesinin durumu.

4.4.7 TB-8 numunesi (Kutu 60x60x4 + Uçlar: CFRP plaka ve kumaş)

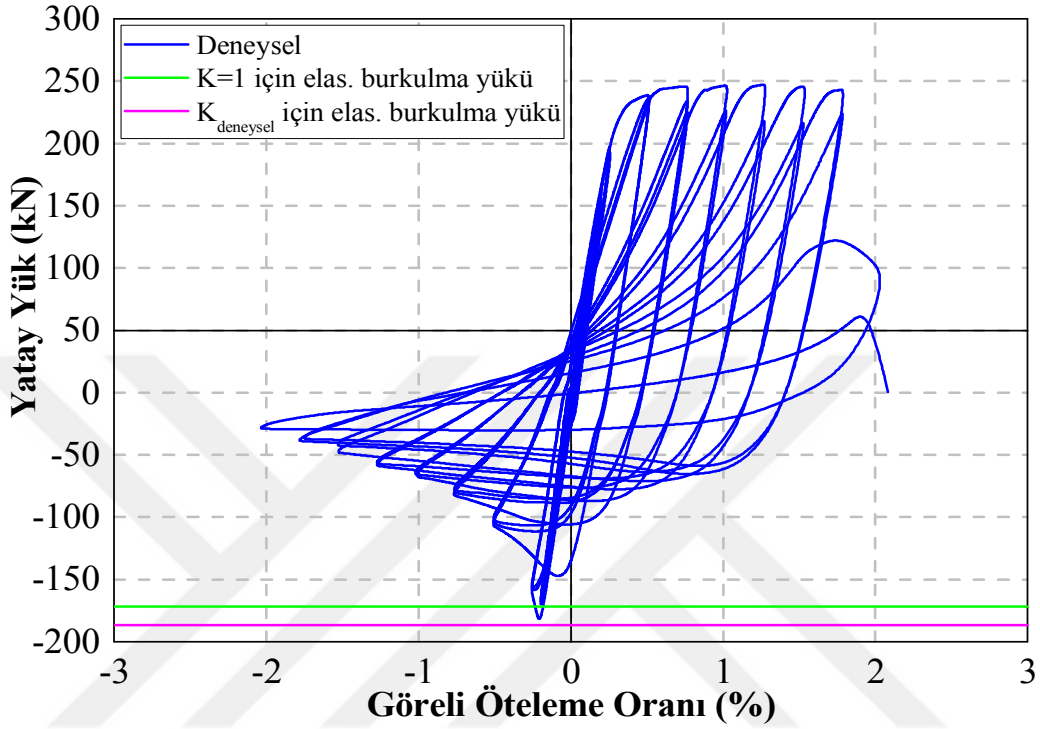
Yalnızca uç bölgelerde güçlendirilmiş olan ve güney yönünde ilk olarak çekme uygulanan TB-8 numunesinin deneysel olarak elde edilen yatay yük- görelî öteleme oranı histeretik eğrisi Şekil 4.50’de, yükleme protokolü Şekil 4.51’de ve düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.52’de gösterilmiştir. Numunenin deney öncesindeki durumu Şekil 4.54-a, b ve c’de görölmektedir.

TB-8 numunesi $\pm 0.26\delta_y$ yatay yerdeğiştirme ($\pm 1.22\text{mm}$, %0.066 görelî öteleme oranı) etkisinde ilk üç çevrimde ve sonraki $\pm 0.52\delta_y$ ($\pm 2.44\text{mm}$, %0.132 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesindeki üç yükleme çevrimi etkisinde elastik davranmıştır. Bunun yanında, numunede elastik $\pm 0.77\delta_y$ ($\pm 3.66\text{mm}$, %0.132 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde ulaşılan en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla 161.6kN ve 170.8kN’dur. Bu yerdeğiştirme seviyesinde gözle görölür burkulma oluşmamasına karşılık düzlem dışı yerdeğiştirme en fazla 2.8mm olarak ölçölmüştür.

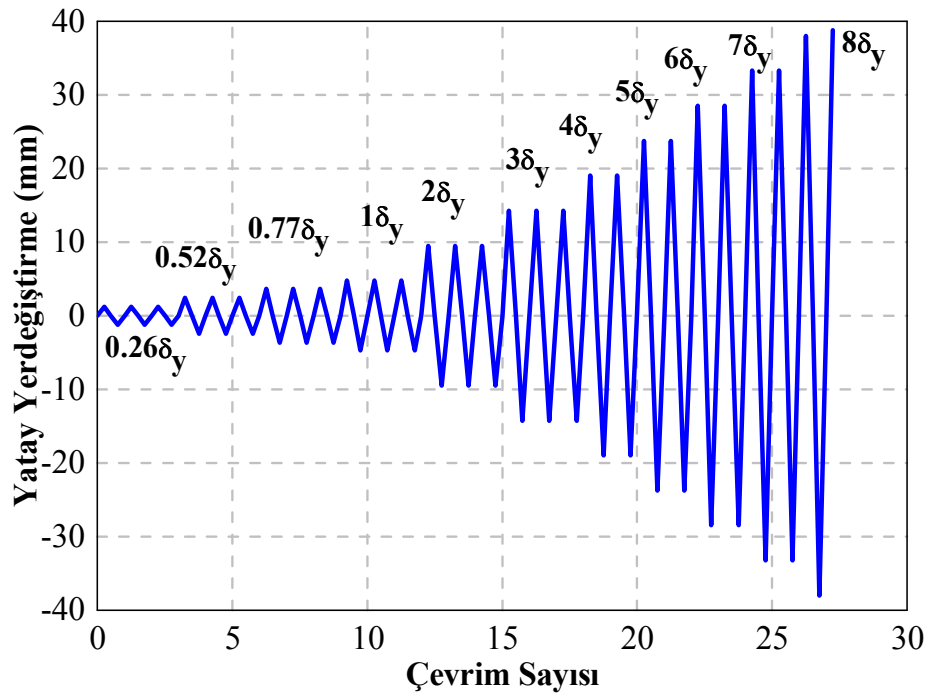
$\pm 4.75\text{mm}$ ($\pm 1\delta_y$, %0.26 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme adımının ilk çevriminde, çekme etkisinde numune üzerinde ortalama 1500~1600 μstrain civarında şekildeğiştirmeler ölçölmüştür. Basınç etkisinde, TB-9 numunesine benzer olarak, yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisinde doğrusal olmayan davranışın başladığı ve numunenin basınç etkisinde hedef yerdeğiştirme seviyesine ulaşmadan -3.91mm seviyesinde ve -184.42kN’da aktığı gözlenmiştir. -4.75mm yerdeğiştirme seviyesine ulaşıldığında düzlem dışı yerdeğiştirme 26mm olarak ölçölmüştür. İkinci çevrimde çekme ve basınç etkilerinde boyada ve CFRP elemanlarda sorun gözlenmemiştir. Son çevrimde çekme etkisinde numune üzerinde ortalama 1800 μstrain civarında şekildeğiştirmeler ölçölmüştür. Numunenin bu seviyedeki burkulmuş durumu Şekil 4.54-d’de görölmektedir. Numune üzerinde basınç etkisinde kalıcı şekildeğiştirme oluşmuş olup çekme etkisinde bu değer 1.3mm olarak ölçölmüştür. Basınç etkisinde burkulmanın fark edilir derecede hızlı oluşmasına karşın CFRP elemanlarda herhangi bir sorun izlenmemiştir.

Sonraki yerdeğiştirme adımı $\pm 2\delta_y$ ($\pm 9.50\text{mm}$, %0.52 görelî öteleme oranı) seviyesi ilk çevriminde çekme etkisinde pik yerdeğiştirmeye ulaşmadan yüksek sesler duyulmuş olup yükte herhangi bir kayıp olmamıştır. Numunenin çekme etkisindeki durumu Şekil 4.54-e’de görölmektedir. Bunun yanında, şekildeğiştirme ölçerlerden

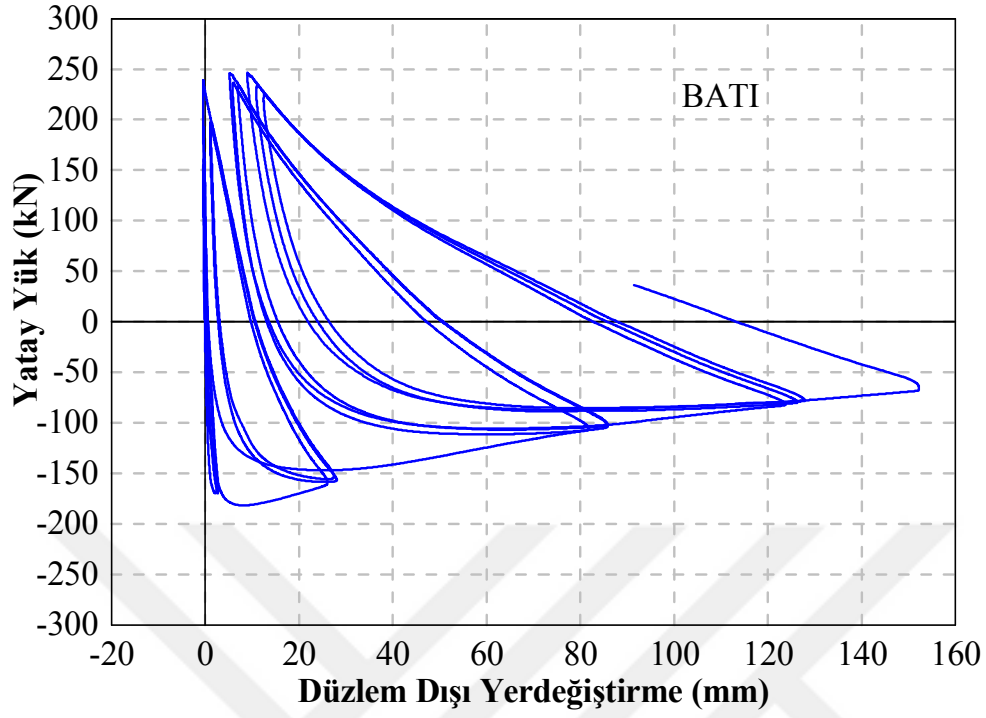
4000 μ strain civarında ölçüm alınmıştır. Şekil 4.54-f'de görüldüğü üzere basınç etkisinde alt ve üst guselerde batıya doğru gözle görülür dönmeler belirlenmiş ve düzlem dışı yerdeğiştirme 82mm olarak ölçülmüştür. İkinci çevrimin uygulandığı çekme etkisinde herhangi bir sorun görülmemiştir. Basınç etkisinde ise düzlem dışı



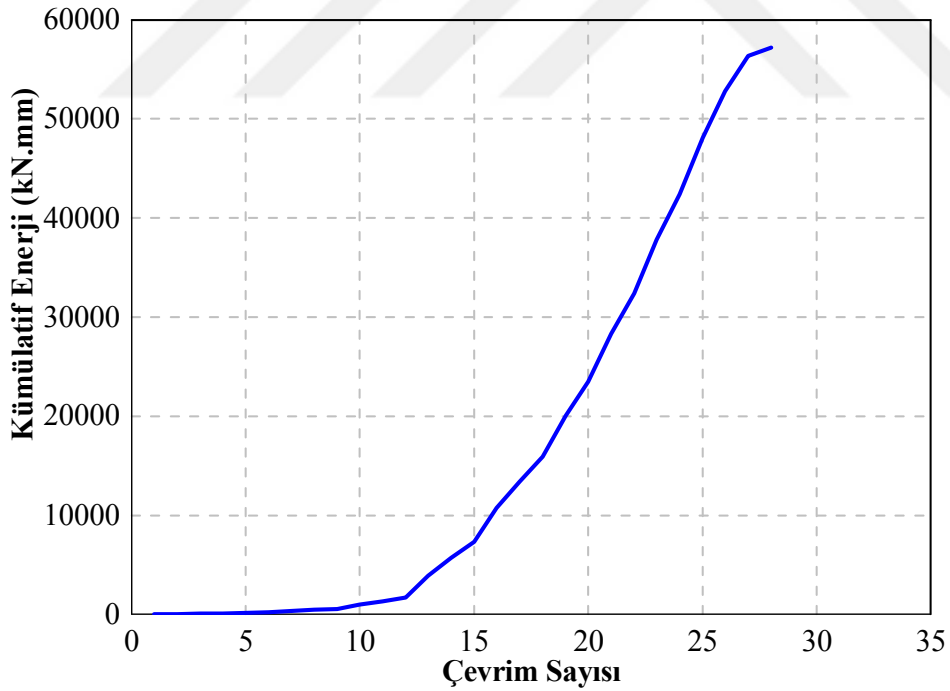
Şekil 4.50 : TB-8 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi.



Şekil 4.51 : TB-8 numunesi yükleme protokolü.



Şekil 4.52 : TB-8 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil 4.53 : TB-8 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

yerdeğiştirme 86mm olarak ölçülmüştür olup orta bölgede numunenin doğu yüzünde köşelerde inelastik davranışın bir göstergesi olan boya kabarması tespit edilmiştir. Üçüncü çevrimde çekme etkisinde CFRP elemanlarda ayrılma görülmemiştir. Basınç etkisinde ise orta bölgede ilerleyen boya kabarması gözlenmiştir.

Yerdeğiştirme miktarı arttırılarak bir sonraki yükleme adımında, $\pm 3\delta_y$ ($\pm 14.25\text{mm}$, %0.78 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde, Şekil 4.55-a'da görülen ilk çekme etkisinde CFRP elemanlarda ayrılma görülmemiş olup basınç etkisinde ise Şekil 4.55-b'de burkulmuş durumu verilen numunenin bayrak levhalarında aşırı derecede dönme belirlenmiştir. İkinci yükleme çevriminde, çekme etkisinde Şekildeğiştirmeler alt ve şt bölgelerde $8500\sim 9000\mu\text{strain}$, orta bölgede ise $6500\sim 7000\mu\text{strain}$ civarında llmştir. Basınç etkisinde ise düzlem dışı yerdeğiştirme 126mm olarak llmş olup orta bölgede boya dklmesi başlamıştır. nc ve son çevrimde, çekme etkisinde numunede sorun gözlenmemiş olup basınç etkisinde bayrak levhaları aşırı derecede dnmştir ve düzlem dışı yerdeğiştirme 128mm olarak llmştir.

$\pm 4\delta_y$ ($\pm 19\text{mm}$, %1.04 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesine ulaşıldığında çekmenin ilk çevriminde 240kN 'a ulaşıldığında CFRP'den sesler duyulmuştur. Bu seviyede orta bölgede llen düzlem dışı kalıcı yerdeğiştirme 9mm 'dir. Basınç etkisinde ise Şekil 4.55-c ve d'de grldğ gibi bayrak levhaları aşırı Şekilde eğilerek batıya doğru dnmştir. Bu aşamada, düzlem dışı yerdeğiştirme orta bölgedeki yerdeğiştirme ölçerin kapasitesini aştığından bu yerdeğiştirme ölçer deneyden çıkartılmıştır. Çekmenin ikinci çevriminde CFRP elemanlarda ve numunede sorun gözlenmemiştir. Basınç etkisinde numunenin doğu yüzünün köşe bölgelerinde boya kabarması ve dklmesi gözlenmiştir.

Yeni yerdeğiştirme seviyesi $\pm 5\delta_y$ ($\pm 23.75\text{mm}$, %1.30 görelî öteleme oranı)'de ilk çekme etkisinde CFRP'elemanlardan sesler duyulmuştur. Basınç etkisinde ise alt bölgede $6000\mu\text{strain}$, orta bölge batı yüzünde $3300\mu\text{strain}$ ve şt bölgede ise $8000\mu\text{strain}$ civarlarında Şekildeğiştirmeler llmş olup numunenin burkulmuş durumu Şekil 4.55-e'de grlmektedir. Numuneye ve deney düzeneğine ilişkin elde edilen Şekildeğiştirme grafikleri EK G'de verilmiştir. İkinci evrim çekme etkisinde CFRP'lerden sesler gelmeye devam etmiş, basınç etkisinde ise Şekil 4.55-f'de grldğ gibi orta bölgede belirgin yerel burkulma başlangıcı gözlenmiştir.

Sonraki yerdeğiştirme seviyesi $\pm 6\delta_y$ ($\pm 28.50\text{mm}$, %1.56 görelî öteleme oranı) ilk çekme etkisinde bayrak levhalarında kalıcı Şekildeğiştirmeler gözlenmiştir. Basınç etkisinde tp çaprazda yerel burkulma oluşumu ilerleyerek iyice belirginleşmiş ve boya dklmesi hızlanmıştır. Numunenin genel ve yerel burkulması sırasıyla Şekil 4.56-a ve b'de grlmektedir. İkinci evrim çekme etkisinde yerel burkulma

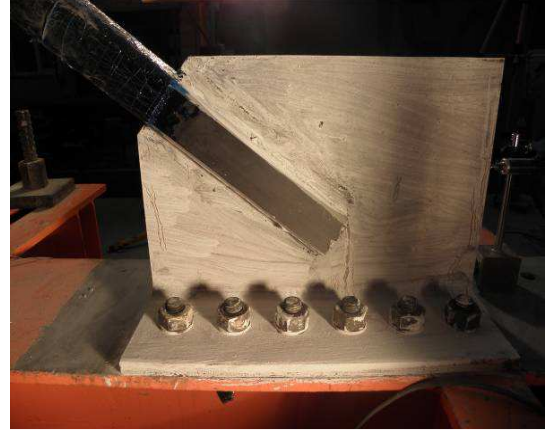
bölgesinde içe doğru çökme kalıcı duruma gelmiş, basınç etkisinde ise boya dökülmesi hızlanarak devam etmiştir.

$\pm 7\delta_y$ ($\pm 33.25\text{mm}$, %1.82 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde Şekil 4.56-c'de görülen ilk çekmede yerel burkulma bölgesinde belirgin kalıcı şekildeğiştirme görölmektedir. CFRP elemanlarda herhangi bir sorun gözlenmemiştir. Basınç etkisinde Şekil 4.56-d'de görülen genel burkulma oluşumuyla birlikte orta bölgedeki yerel burkulma Şekil 4.56-e'de göröldüğü gibi aşırı biçimde gelişmiştir.

Son yerdeğiştirme seviyesi olan $\pm 8\delta_y$ ($\pm 38\text{mm}$, %2.08 görelî öteleme oranı) hedef yerdeğiştirmesine giderken numuneden yüksek bir ses duyulmuş ve yük 12.5kN seviyesinden 8.5kN'a düşerek orta bölgede, Şekil 4.56-f'de görülen yırtılma/kopma başlangıcı oluşmuştur. Bu seviyeden sonra yerdeğiştirme arttırılarak hedef değere ulaşıldığında Şekil 4.57-a, b ve c'de görülen ilk çekme etkisinde yırtık giderek ilerlemiştir; kesitin yaklaşık 1/3'lük bölümünün yük aktardığı görölmüştür. Şekil 4.57-d'de görülen basınç çevriminde ortadaki yırtık kapanarak pik yerdeğiştirme değerine ulaşılmıştır. İkinci çevrim çekme etkisinde hedef yerdeğiştirmeye ulaşamadan, numune beklendiği üzere, orta bölgeden kopmuştur; Şekil 4.57-e ve f'de kopma sonrası durum görölmektedir. Uçta zayıflatılmış kesit güçlendirmelerinde sorun gözlenmemiştir; bu, önerilengüçlendirme yönteminin etkinliğini göstermektedir. Deney sonunda TB-8 numunesi 57211kNmm enerji tüketmiş olup kümülatif enerji grafiğı Şekil 4.53'te görölmektedir.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.54 : TB-8 numunesinin deney öncesi, $1\delta_y$ (4.75mm) ve $2\delta_y$ (9.5mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşimi. (c) Deney öncesi üst uç birleşimi. (d) $-1\delta_y$ (-4.75mm)'de burkulma. (e) $+2\delta_y$ (9.5mm)'de çekme etkisi. (f) $-2\delta_y$ (-9.5mm)'de burkulma.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.55 : TB-8 numunesinin $3\delta_y$ (14.25mm), $4\delta_y$ (19mm) ve $5\delta_y$ (23.75mm) yatay yerdeğiştirme seviyesinde davranışı: (a) $+3\delta_y$ (+14.25mm)'de çekme etkisi. (b) $-3\delta_y$ (-14.25mm)'de burkulma. (c) $-4\delta_y$ (-19mm)'de burkulma. (d) $-4\delta_y$ (-19mm)'de alt gusenin burkulması. (e) $-5\delta_y$ (-23.75mm)'de burkulma. (f) $-5\delta_y$ (-23.75mm)'de yerel burkulma başlangıcı.



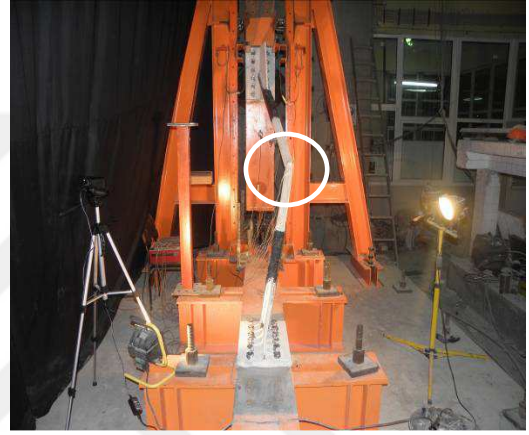
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.56 : TB-8 numunesinin $6\delta_y$ (28.5mm), $7\delta_y$ (33.25mm) ve $8\delta_y$ (38mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-6\delta_y$ (-28.5mm)'de burkulma. (b) $-6\delta_y$ (-28.5mm)'de yerel burkulma. (c) $+7\delta_y$ (+33.25mm)'de çekme etkisi. (d) $-7\delta_y$ (-33.25mm)'de burkulma. (e) $-7\delta_y$ (-33.25mm)'de yerel burkulma. (f) $+8\delta_y$ (+38mm)'de yırtılma/kopma başlangıcı.



(a)



(b)



(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 4.57 : TB-8 numunesi $8\delta_y$ (38mm) yatay yerdeğiştirme seviyesinde davranışı ve kopma sonrası: (a, b, c) $+8\delta_y$ (+38mm)'de yırtığın ilerlemesi. (d) $-8\delta_y$ (-38mm)'de burkulma. (e, f) Kopma sonrası görünüşler.

4.4.8 TB-9 numunesi (Kutu 60x60x4 – Yalın numune)

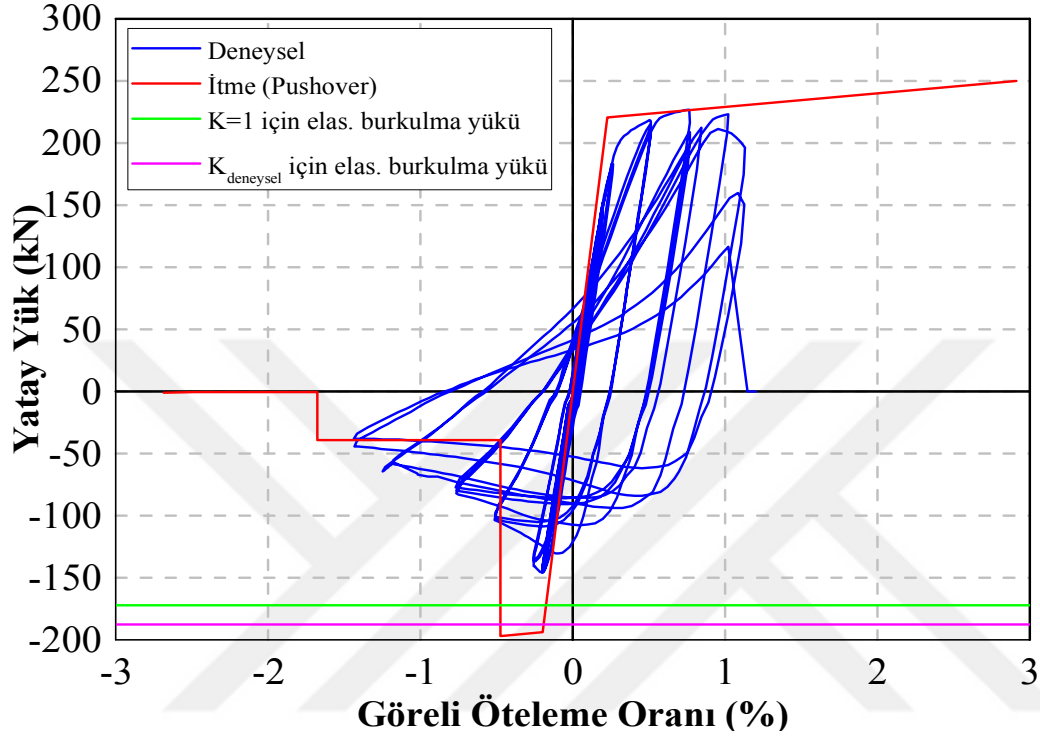
Yalın çelik tüp kesitli olarak üretilen ve ilk olarak çekme etkisine maruz bırakılan TB-9 numunesinin deneysel olarak elde edilen yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik ve itme analizi eğrileri Şekil 4.58’te, yükleme protokolü Şekil 4.59’de gösterilmiştir.

Deney öncesi genel görünüşleri Şekil 4.62-a, b ve c’de görülen TB-9 numunesine ilişkin itme analizi sonucu tahmin edilen akma yerdeğiştirmesi (δ_{yt}) dikkate alınarak yatay yerdeğiştirme uygulanmaya başlanmıştır. Buna bağılı olarak numune; $1/3\delta_{yt}$ ’lik $\pm 1.23\text{mm}$ yatay yerdeğiştirme (%0.066 görelî öteleme oranı) etkisindeki ilk üç çevrimde ve $2/3\delta_{yt}$ ’lik yatay yerdeğiştirme ($\pm 2.46\text{mm}$, %0.132 görelî öteleme oranı) etkisindeki üç çevrimde beklendiği üzere doğrusal elastik davranmıştır. %0.132 görelî ötelenme oranı etkisindeki üçüncü çevrimin basınç etkisi altında düzlem dışı yerdeğiştirme 6.9mm olarak ölçülmüştür. Bu elastik davranış sırasında uç birleşimleri oluşturan kaynaklarda ve bulonlarda herhangi bir sorun gözlenmemiştir.

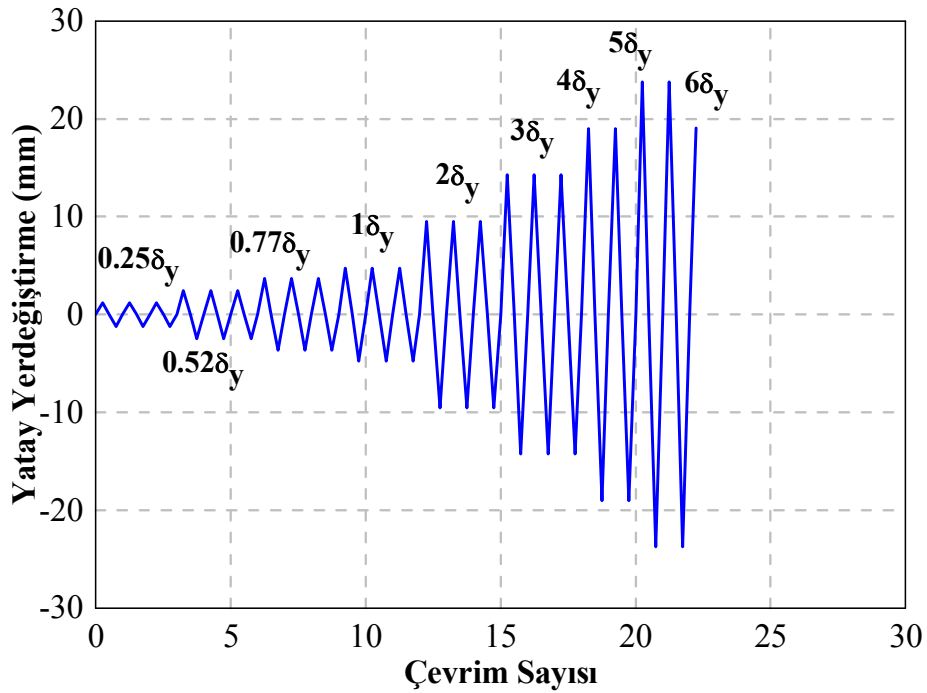
Deney başlangıcında yapılan itme analizi ile tahmin edilen basınç akma/burkulma yerdeğiştirmesi değerine (-3.65mm , %0.196 görelî öteleme oranı) ulaşılmasına karşın akma/burkulma gözlenmemiştir. Bu yatay yerdeğiştirme etkisindeki ilk çevrim sonunda şekildeğiştirme ölçerlerde yaklaşık olarak numune üst uç bölgesinde $-2000\mu\text{strain}$, orta bölgesinde $-1700\mu\text{strain}$ ve alt uç bölgesinde $-900\sim 1000\mu\text{strain}$ büyüklüğünde şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. Bu çevrimde numunede meydana gelen düzlem dışı yerdeğiştirme 18.7mm ’dir. Deneysel akma yerdeğiştirmesini belirlemek için hesaplanan akma yerdeğiştirmesi yavaş yavaş arttırılmıştır. Bu nedenle sonraki adımda $\delta_{yt}+1/3\delta_{yt}$ yatay yerdeğiştirmesi olan -4.89mm ’lik (%0.263 görelî öteleme oranı) çekme uygulanmıştır. Basınç etkisinde -4.75mm ($-1\delta_y$) yatay yerdeğiştirmede (%0.255 görelî öteleme oranı) yük-yerdeğiştirme grafiğinde yataylaşma görülmüş, böylece bunun doğrusal olmayan davranışa geçiş olduğu varsayılmıştır. Böylece, bu değer basınç akma yerdeğiştirmesi olarak alınmıştır. Bu yerdeğiştirmeye karşı gelen kuvvet -137kN ’dur. Numune batı yönünde Şekil 4.62-d’de görüldüğü gibi burkulmaya devam ederek düzlem dışı hareketini sürdürmüştür. Birinci çevrim sonunda meydana gelen düzlem dışı yerdeğiştirme 34.5mm olup zayıflatılmış kesit köşe bölgelerinde boya dökülmeleri başlamıştır. İkinci ve üçüncü çevrimlerde çekme ve basınç yerdeğiştirmesi olarak $\pm 4.75\text{mm}$ (%0.255 görelî öteleme oranı) uygulanmıştır. Basınç etkisinde numunenin ikinci çevriminde düzlem

dışı yerdeğiştirmesi 34.7mm, üçüncü çevrimde ise bu yerdeğiştirme 35.3mm olarak ölçülmüştür.

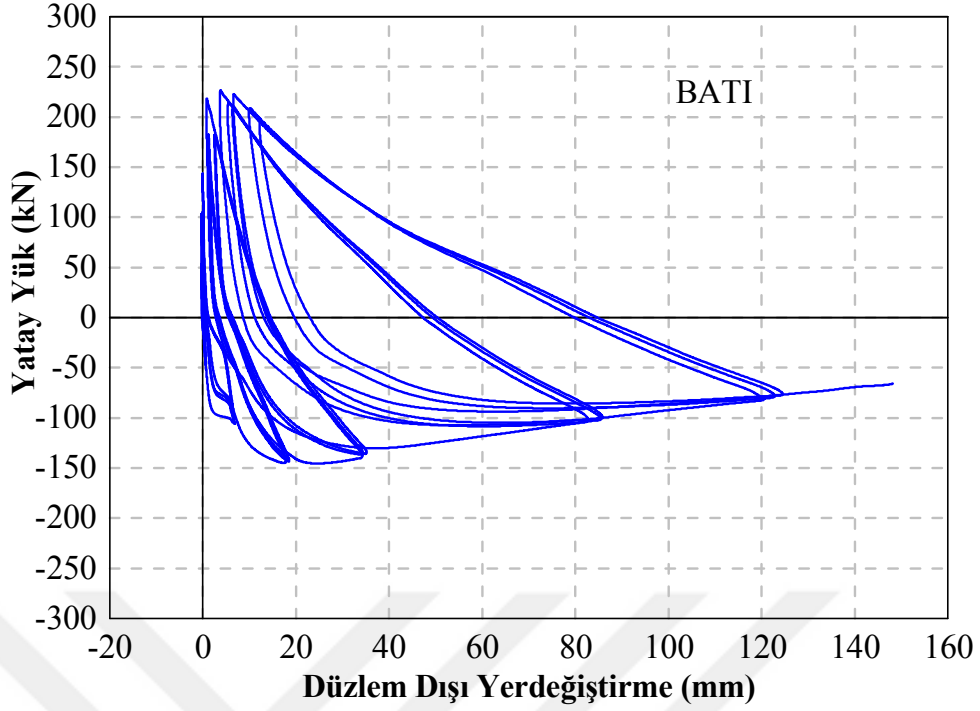
$\pm 2\delta_y$ ($\pm 9.5\text{mm}$, %0.511 görelü öteleme oranı) seviyesi yerdeğiştirmesinin ilk çevriminde şekildeğiştirme ölçerlerde çekmede $+2100\mu\text{strain}$, basınçta ise



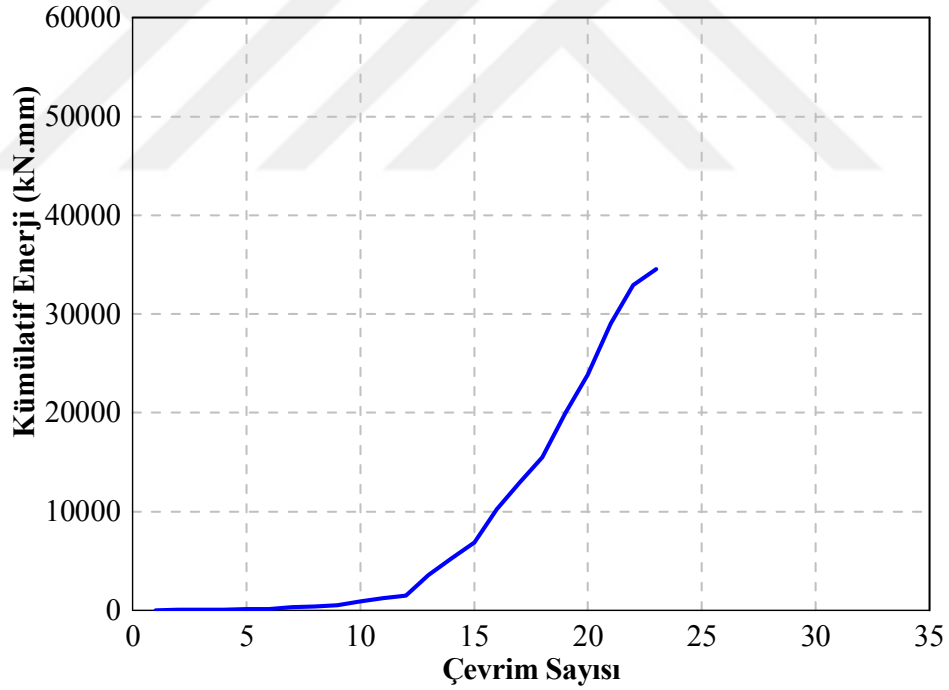
şekil 4.58 : TB-9 numunesi yatay yük-görelü öteleme oranı histeretik eğrisi ve itme eğrisi.



şekil 4.59 : TB-9 numunesi yükleme protokolü.



Şekil 4.60 : TB-9 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil 4.61 : TB-9 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

-4000 μ strain büyüklüğünde ölçümler alınmıştır. Ayrıca, +7.66mm'lik (%0.412 göreceli öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde +211kN'luk bir çekme etkisinde numunenin akmaya başladığı görülmüştür (Şekil 4.62-e). Basınç etkisinde numune Şekil 4.62-f'de görüldüğü gibi burkulmuş ve düzlem dışı hareket gözle fark edilecek seviyeye ulaşmıştır; ölçülen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme 86.6mm olup

numuneye ilişkin düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi Şekil 4.60’da verilmiştir. Önceki yatay yerdeğiştirme adımına göre basınç dayanımında bir miktar azalma görölmüştür. Basınç ve çekme etkisinde numunede herhangi bir hasar izlenmemiştir. Bu adımda çekmede kaydedilen en büyük yatay kuvvet +217.6kN’dur.

$\pm 3\delta_y$ ($\pm 14.25\text{mm}$, %0.766 görelı öteleme oranı) yatay yerdeğiştirmesi numuneye üç çevrim olarak uygulanmıştır. Birinci çevrimin çekme etkisinde, deney sırasındaki en büyük yatay kuvvet olan +226.9kN’luk değere ulaşılmış olup numunenin durumu Şekil 4.63-a’da verilmiştir. Alt uç zayıflatılmış kesitte akma belirlenmiş, Şekil 4.63-b’de göröldüğü gibi bu bölge civarında boya kabarması ve dökölmesi devam etmiştir. Üçüncü çevrimin basınç etkisinde (Şekil 4.63-c) numune orta bölgesinde boya dökölmeleri başlamıştır. Bu dökölmeler özellikle kesitin köşelerinde yoğunlaşmaktadır. Üst uçtaki guse levhasında basınç etkisi ile batıya doğru belirgin dönme meydana gelmiştir. Basınç etkisi altında numunede meydana gelen en büyük düzlem dışı hareket 125.2mm olarak ölçölmüş olup bu durum Şekil 4.63-d’de görölmektedir.

Numuneye $\pm 4\delta_y$ (19mm yerdeğiştirme, %1.022 görelı öteleme oranı) yatay yerdeğiştirmesi iki çevrim olarak uygulanmıştır. Bu adımdan itibaren numunenin çekme dayanımında da azalma belirlenmiş olup Şekil 4.63-e’de göröldüğü gibi alt uç zayıflatılmış kesit bölgesindeki aşırı şekildeğiştirmelerden dolayı boya dökölmesi gözlenmiştir. Çekme etkisinde numunenin üst uç zayıflatılmış kesit bölgesinin durumu Şekil 4.63-f’de görölmektedir. Birinci çevrimde, basınç etkisinde numunenin orta bölgesi Şekil 4.64-a’da göröldüğü gibi düzlem dışına doğru 125.2mm yerdeğiştirme yapmıştır. Bunun yanında, numune orta bölgesinde ve çekmede uzayan alt uç zayıflatılmış kesit bölgesinde yerel burkulmalar meydana gelmiş olup Şekil 4.64-b’de göröldüğü gibi orta bölgedeki yerel burkulma numunenin doğu yüzünde içeri çökme ve numunenin üst ve alt kısmında şişme şeklinde olmuştur. Alt uç zayıflatılmış kesit bölgesinde çekme etkisiyle oluşan uzama, basınç etkisinde Şekil 4.64-c’de göröldüğü gibi yerel burkulma oluşmasına neden olmuştur; bu davranış biçimine yönelik değerdendirmelere önceki çalışmalarda pek söz edilmemektedir. Oysa, bu numunede de gerçekteştiğı üzere davranışı kontrol eden bölge bu bölgedir. Bayrak levhaları düzlem dışı hareketten dolayı dönmeye devam etmiştir. Bir sonraki basınç adımında numunenin düzlem dışına yapacağı ani büyük yerdeğiştirmeden dolayı ortadaki yerdeğiştirme ölçerin zarar görmemesi için bu

cihaz bu adımda yerinden alınmış ve bundan sonraki yükleme adımlarında numunenin düzlem dışına yaptığı yerdeğiştirme ölçülememiştir. Aynı zamanda alt uçtaki bayrak levhasında bulunan yerdeğiştirme ölçer de zarar görmemesi için yerinden alınmıştır. İkinci çevrime geçileceği sırada kontrol sisteminde belirlenemeyen bir arıza meydana gelmiş ve sistem kapatılıp tekrar açılmıştır. Bu sorundan dolayı ölçülen yatay kuvvet ve yatay yerdeğiştirme değerlerinde bir miktar sapma görülmüştür. İlk dosyanın son değeriyle, ikinci dosyanın ilk değerleri arasındaki yerdeğiştirme farkı miktarı yerdeğiştirme değerlerinde düzeltilme yapılabilmesi için ikinci dosyadaki yerdeğiştirme değerlerine eklenmiştir. İkinci çevrimin basınç etkisinde numunenin orta bölgesinde aşırı yerel burkulma oluşmuş, bundan dolayı kılcal yırtıklar gelişmeye başlamıştır. Ciddi şekildeğiştirmeler gözle görünebilecek duruma gelmiştir.

$\pm 5\delta_y$ ($\pm 23.75\text{mm}$ yerdeğiştirme, %1.277 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirmesinin ilk çevrimi uygulanırken, Şekil 4.64-d’de görülen çekme etkisinde numunenin alt uç zayıflatılmış kesitinde gözle görünebilecek boğum oluşmuş ve bu bölgede alttan üstte doğru ilerleyen yırtık başlangıcı belirlenmiştir. Basınç etkisinde, alt uç zayıflatılmış kesit bölgesinin aşırı şekildeğiştirmiş durumu Şekil 4.64-e ve f’de görülmekte olup orta bölgede Şekil 4.65-a’da görüldüğü üzere yerel burkulma aşırı biçimde ilerlemiştir. Bu yerdeğiştirme etkisinde, ölçülen yük miktarında ciddi bir düşüş sözkonusu olmuştur. İkinci çevrimde çekme etkisinde alt zayıflatılmış kesit alt tarafında yırtık Şekil 4.65-b’de görüldüğü gibi artmaya devam etmiştir. Sonraki basınç etkisinde alt uç zayıflatılmış kesitinde oluşan yırtık Şekil 4.65-c’de görüldüğü gibi kapanmıştır. Bunun yanında sistem yük sıfır noktasından geçerken numunedeki kalıcı şekildeğiştirme gözle görünecek biçimde belirgindir. Numunede bu ana kadar kopma meydana gelmediği için $\pm 5\delta_y$ yatay yerdeğiştirme çevrimine devam edilmiş, yeni adımın çekme etkisinde pik yerdeğiştirme olan $+23.75\text{mm}$ yatay yerdeğiştirme miktarına ulaşmadan, Şekil 4.65-d ve e’de görüldüğü gibi numune alt uç zayıflatılmış kesitten kopmuştur; böylece göçme durumuna ulaşmıştır.

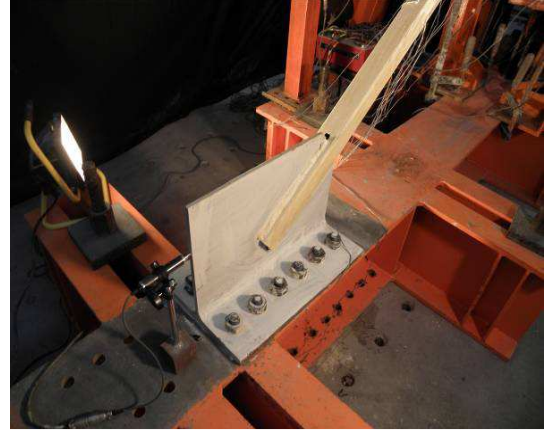
Kopma sonrasında numunenin orta bölgesinde 34mm kalıcı düzlem dışı yerdeğiştirme olduğu görülmüştür. Kopmanın olduğu net kesitte deney sonrası ölçümler alınmış ve oluşan boğumun 53mm genişliğinde olduğu belirlenmiştir. Yerel burkulmanın olduğu bölgede yaklaşık 60mm genişlikte numune üst ve alt tarafa

doğru şişmiş olup aynı bölgede deney sonrası yapılan incelemede çekme etkisinde oluşan ve Şekil 4.65-f’de görüldüğü gibi köşelerde başlayan kılcal yırtıklar belirlenmiştir. Orta bölümdeki plastikleşme yaklaşık 300mm’lik bir uzunluğa (5 x kesit genişliği) yayılmıştır. Yapılan incelemede uç birleşimlerdeki kaynak ve bulonlarda herhangi bir hasar gözlenmemiştir. Artan-azalan yükler altında denenen TB-9 numunesi deney sonunda toplam 34530kNmm histeretik enerji tüketmiş olup numunenin kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi Şekil 4.61’de verilmiştir. Numuneye ve deney düzeneğine ait şekildeğiştirme eğrileri EK H’da verilmiştir.





(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

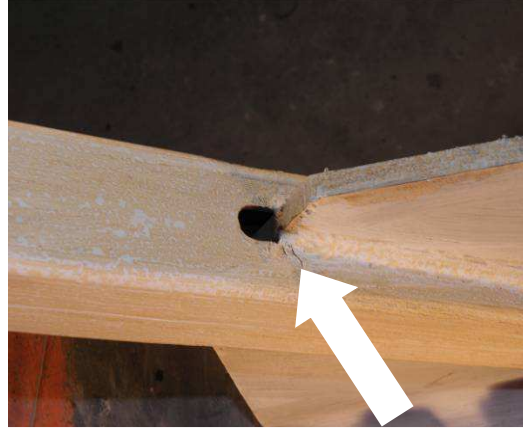


(f)

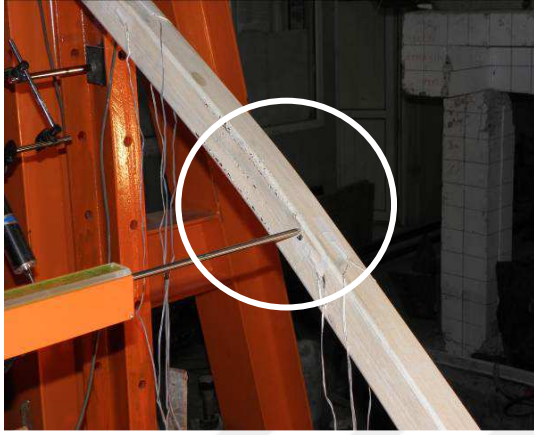
Şekil 4.62 : TB-9 numunesi deney öncesi görünüşleri ile $1\delta_y$ (4.75mm) ve $2\delta_y$ (9.5mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşimi. (c) Deney öncesi üst uç birleşimi. (d) $-1\delta_y$ (-4.75mm)'de burkulma. (e) $+2\delta_y$ (9.5mm)'de çekme etkisi. (f) $-2\delta_y$ (-9.5mm)'de burkulma.



(a)



(b)



(c)



(d)

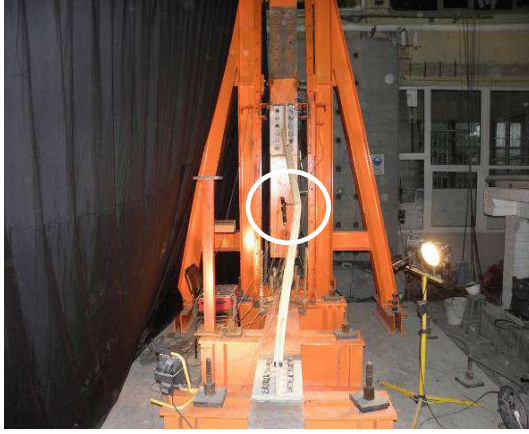


(e)



(f)

Şekil 4.63 : TB-9 numunesinin $3\delta_y$ (14.25mm) ve $4\delta_y$ (19mm) yatay yerdeğiştirme seviyesinde davranışı: (a) $+3\delta_y$ (+14.25mm)'de çekme etkisi. (b) $+3\delta_y$ (+14.25mm)'de alt zayıflatılmış kesit bölgesinde boya kabarması. (c) $-3\delta_y$ (-14.25mm)'de orta bölgede boya dökülmesi. (d) $-3\delta_y$ (-14.25mm)'de burkulma. (e) $+4\delta_y$ (+19mm)'de alt zayıflatılmış kesit bölgesinde boya dökülmesi. (f) $+4\delta_y$ (+19mm)'de üst zayıflatılmış kesit bölgesinin durumu.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.64 : TB-9 numunesinin $4\delta_y$ (19mm) ve $5\delta_y$ (23.75mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-4\delta_y$ (-19mm)'de burkulma. (b) $-4\delta_y$ (-19mm)'de yerel burkulma. (c) $-4\delta_y$ (-19mm)'de alt zayıflatılmış kesitte yerel burkulma. (d) $+5\delta_y$ (+23.75mm)'de çekme etkisi. (e, f) $-5\delta_y$ (-23.75mm)'de alt uç zayıflatılmış kesitin üst ve alt görünüşleri.



(a)



(b)



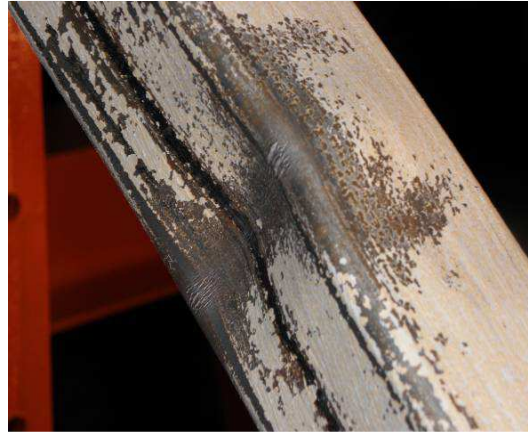
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.65 : TB-8 numunesi $5\delta_y$ (23.75mm) yatay yerdeğiştirme seviyesinde davranışı ve kopma sonrası: (a) $-5\delta_y$ (-23.75mm) ilk yükleme çevriminde yerel burkulma. (b) $+5\delta_y$ (+23.75mm) ikinci yükleme çevriminde yırtığın ilerlemesi. (c) $-5\delta_y$ (-23.75mm) ikinci yükleme çevriminde alt uçtaki yırtığın kapanması. (d, e) Kopma sonrası görünüşler. (f) Kopma sonrası orta yerel burkulma bölgesinde belirlenen kılcal yırtıklar.

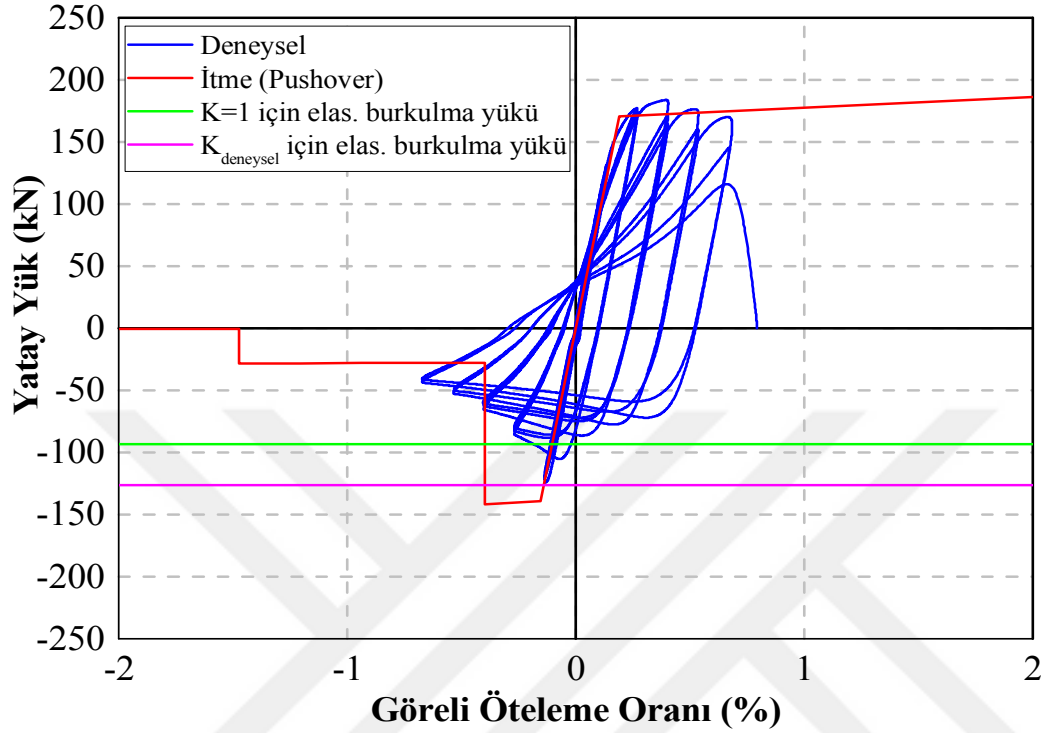
4.4.9 TB-10 numunesi (Kutu 50x50x4 – Yalın Numune)

Kutu 50x50x4 kesitli ve temiz numune uzunluğu $L=1936\text{mm}$ olup grubunun referans numunesi olan TB-10'nun denenmesine tüm numunelerde olduğu gibi ilk olarak çekme uygulanarak başlanmıştır. Numunenin deney öncesi durumu Şekil 4.70-a, b ve c'de görülmektedir. TB-10 numunesi $\pm 0.89\text{mm}$ yatay yerdeğiştirme (%0.048 görelî öteleme oranı) seviyesinde ilk üç çevrimde ve tahmin edilen akma yerdeğiştirmesinin 2/3 katındaki yatay yerdeğiştirme ($\pm 1.92\text{mm}$, %0,1 görelî öteleme oranı) seviyesindeki üç çevrimde beklendiği üzere doğrusal elastik olarak davranmıştır. Bu aşamada, uç birleşimlerini oluşturan kaynak ve bulonlarda herhangi bir sorun gözlenmemiştir. TB-10 numunesinin deneyden elde edilen histeretik ve itme analizi eğrileri Şekil 4.66'da, yükleme protokolü Şekil 4.67'de görülmektedir.

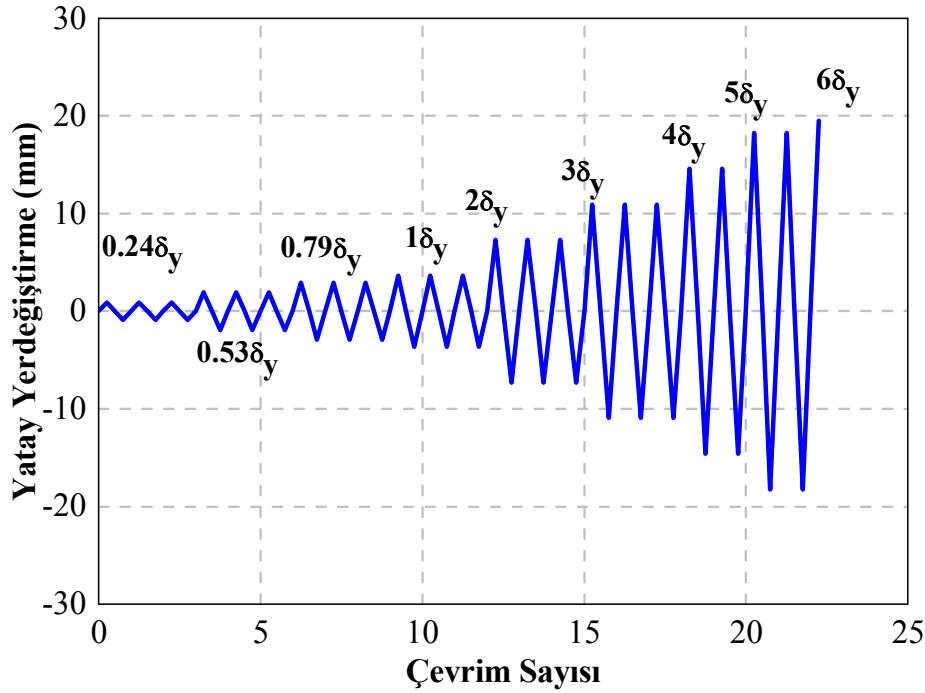
Deney başlangıcında yapılan itme analiziyle tahmin edilen basınç akma yerdeğiştirmesi (δ_{yt}) -2.89mm (%0.16 görelî öteleme oranı)'dır. Deney sırasında, basınç etkisinde bu yerdeğiştirmeye ulaşıldığında numunede doğrusal olmayan bir davranış gözlenmemiş olup deneysel akma deplasmanını belirlemek için, sistem hesaplanan akma yerdeğiştirmesinin ötesinde yavaş yavaş yüklenmiştir. Böylece $\delta_{yt}+1/3 \delta_{yt}$ yerdeğiştirmesi ($+3.85\text{mm}$, %0.21 görelî öteleme oranı) çekmede uygulanmıştır. Basınç etkisinde -3.65mm ($-1\delta_y$, %0.20 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde yük-yerdeğiştirme eğrisinde yataylaşma oluşmuş, doğrusal olmayan davranış başlamış ve bu değer basınç akma/burkulma yatay yerdeğiştirmesi olarak alınmıştır. Bu yerdeğiştirmeye karşı gelen yatay kuvvet -120.9 kN 'dur. Numune batı yönünde Şekil 4.70-d'de görüldüğü gibi burkularak 15mm düzlem dışı yerdeğiştirme yapmıştır. Bu aşamada boyada dökülme gözlenmemiştir. İkinci ve üçüncü çevrimlerde çekme ve basınç yerdeğiştirmesi olarak $\pm 3.65\text{mm}$ (%0.20 görelî öteleme oranı) uygulanmış olup bu yerdeğiştirme seviyesinde ölçülen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme ise 16.8mm olarak okunmuştur.

$\pm 2\delta_y$ ($\pm 7.3\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.39 görelî öteleme oranı) seviyesi yerdeğiştirmesinin ilk çevriminde, çekme etkisinde $+2200\mu\text{strain}$ civarında şekildeğiştirmeler ölçülmüş olup kesit çekme etkisinde akmaya başlamıştır. Basınç etkisinde ölçülen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme 67.6mm 'dir; numuneye ilişkin düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.68'te verilmiştir. İkinci çevrim sırasında, çekme etkisindeki numune davranışı Şekil 4.70-e'de görülmekte olup herhangi bir sorun gözlenmemiştir. Basınç dayanımında ise önceki yatay yerdeğiştirme adımına

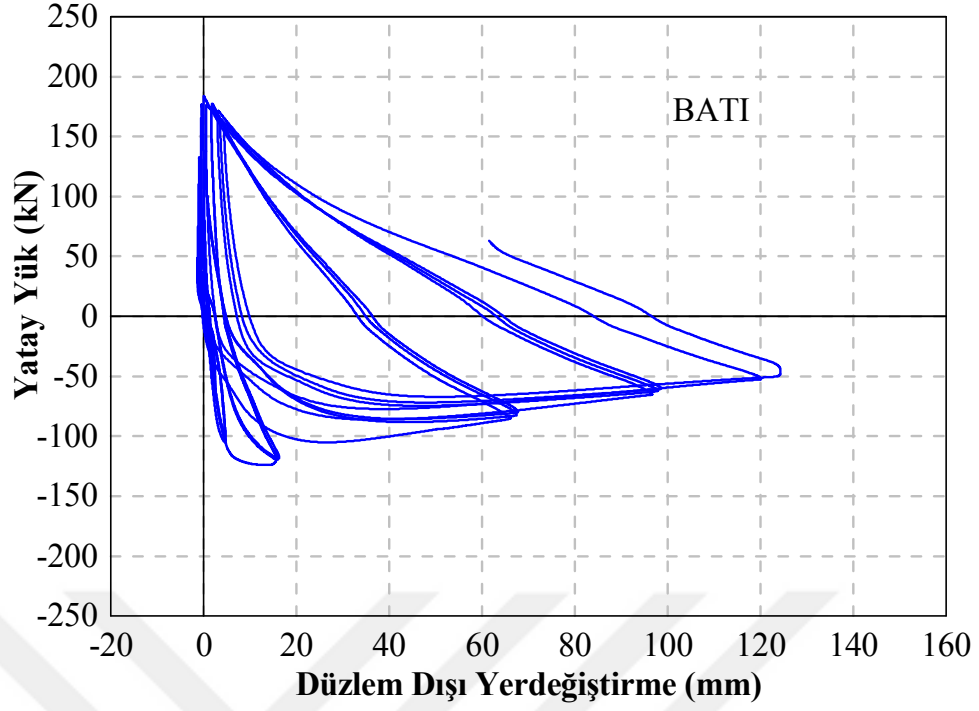
göre azalma görülmüş olup numunenin burkulmuş durumu Şekil 4.70-f'de görülmektedir. Bu çevrimden sonra yük sıfırlandığında, basınç etkisinde oluşan kalıcı şekildeğiştirme gözle görülür duruma gelmiş olmasına karşın birleşim



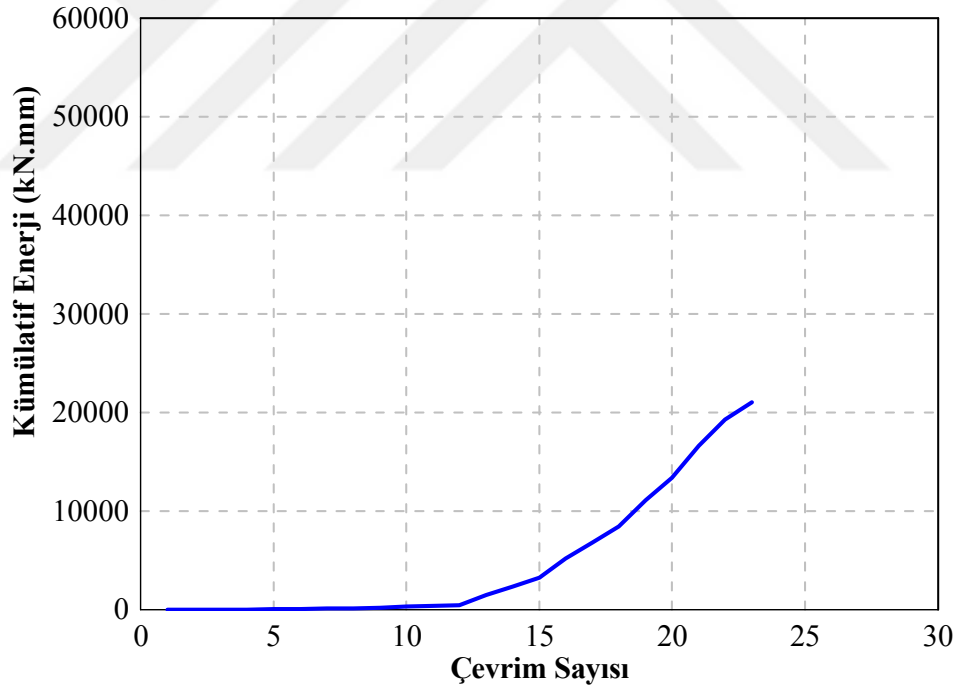
Şekil 4.66 : TB-10 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi ve itme eğrisi.



Şekil 4.67 : TB-10 numunesi yükleme protokolü.



Şekil 4.68 : TB-10 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil 4.69 : TB-10 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

bölgelerinde hasar belirlenmemiştir. Bu adımda çekmede ölçülen en büyük yatay kuvvet +176.3kN'dur.

Sonraki adım olan $\pm 3\delta_y$ ($\pm 10.95\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.59 görelî öteleme) yatay yerdeğiştirmesi numuneye üç kez uygulanmıştır. Birinci çevrimde, çekme etkisinde deneydeki en büyük yatay kuvvet olan +179.1kN'a ulaşılmış ve alt zayıflatılmış

kesitte akma başlamış olup bu durum Şekil 4.71-a'da görülmektedir. Zayıflatılmış kesit çevresinde beyaz boyada gözle görülür dökülmeler başlamıştır. İlk çevrimin basınç etkisinde ise numunenin orta bölgesinde köşelerden başlayan beyaz boya dökülmesi izlenmiş olup numunenin burkulmuş durum Şekil 4.71-b'de verilmiştir. Bu adımda üretimden de kaynaklanan bir nedenle, üst uçtaki bayrak levhasında basınç etkisinde Şekil 4.71-c'de görüldüğü gibi batıya doğru bir dönme izlenmiştir. İkinci ve üçüncü çevrimlerde basınç etkisinde orta bölgede boya dökülmeleri devam etmiştir. Alt uç zayıflatılmış kesit bölgesinin basınç etkisindeki davranışı Şekil 4.71-d'de görülmekte olup basınç etkisinde çekmeye çalışan doğu yüzde boyadaki dökülmeler belirginleşmiştir.

Numuneye $\pm 4\delta_y$ ($\pm 14.6\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.78 görelî öteleme) yatay yerdeğiştirmesi iki çevrim olarak uygulanmıştır. Bu adımdan itibaren numunenin çekme dayanımında da azalma başlamış olup çekme etkisinde alt uç zayıflatılmış kesitin davranışı Şekil 4.71-e'de verilmiştir. Birinci çevrimde, basınç etkisinde alt uç zayıflatılmış kesitin doğu yüzünde akma başlamıştır. İkinci çevrimde ise çekme etkisinde üst uç zayıflatılmış kesitte akma belirlenmiş ve boyada dökülmeler görülmüştür. Basınç etkisinde numune düzlem dışına doğru en fazla 124mm yerdeğiştirme yapmış olup burkulma modu Şekil 4.71-f'de görülmektedir. Bir sonraki basınç adımında numunenin düzlem dışına yapacağı büyük yerdeğiştirmeden dolayı yerdeğiştirme ölçerin zarar görmemesi için cihaz bu adımda yerinden alınmış ve sonraki yükleme adımlarında düzlem dışı yerdeğiştirme ölçümü yapılmamıştır. Bu adımda ölçülen en büyük kuvvetler çekmede +173.1kN, basınçta -49.5kN'dur.

Numuneye iki kez uygulanan $\pm 5\delta_y$ ($\pm 18.25\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.98 görelî öteleme) yerdeğiştirmesi seviyesinde çekme etkisinde alt uç zayıflatılmış kesitte belirgin uzama görülmüş ve bu bölgede inelastik davranışın göstergesi olan boğum artmıştır. Basınç etkisinde üst uç, alt uç birleşimleri zayıflatılmış kesit bölgelerinde ve orta bölgede Şekil 4.72-a ve b'de görüldüğü üzere boya dökülmeleri hızlanmıştır. Numunenin basınç etkisindeki burkulmuş durumu Şekil 4.72-c'de görülmektedir. Bu adımda çekmede ve basınçta ölçülen en büyük yatay kuvvetler sırasıyla +166.7kN ve -40.5kN'dur.

$\pm 6\delta_y$ ($\pm 21.9\text{mm}$ yerdeğiştirme, %1.18 görelî öteleme) yatay yerdeğiştirmesinin ilk çevrimi uygulanırken, çekme etkisinde alt uç zayıflatılmış kesitinde ani uzama gözlenerek Şekil 4.72-d ve e'de görüldüğü üzere boğum oluşmuştur.

Yerdeğiştirmenin artmasıyla zayıflatılmış kesitteki boğum/ovalleşme artmış ve bu bölgede çekme etkisinde köşelerden başlamak üzere alttan üste doğru ilerleyen yırtık görölmüşür (Şekil 4.72-f). Kesit hedef yerdeğiştirme seviyesine ulaşmadan alt uç zayıflatılmış kesitinden kopmuştur.

Kopma sonrasında numunenin orta bölgesinde düzlem dışı 20mm kalıcı yerdeğiştirme olduğı görölmüşür. Kopmanın oluştuğı zayıflatılmış kesitin doğı ve batı yüzlerinde yerel burkulmaların oluştuğı belirlenmiş ve numunenin kopma sonrası durumu Şekil 4.73'te kapsamlı olarak verilmiştir. Yerel burkulmalar yükleme çevrimlerinde çekme etkisiyle oluşan uzamanın sonraki adımda basınç etkisinde kısılmasıyla oluşmuştur. Deney süresince uç birleşimlerdeki kaynak ve bulonlarda hasar gözlenmemiştir. Numune ve deney düzeneğı üzerindeki şekildeğiştirme ölçerlerden deney boyunca alınan verilerle çizilmiş yatay yük – şekildeğiştirme grafikleri EK I'da görölmektedir. Uygulanan yükleme protokolü etkisinde numune toplam olarak 21043kNmm enerji tüketerek kopmuş olup numunenin kümülatif enerji tüketme grafiğı ise Şekil 4.69'da görölmektedir.

Yalın olarak tasarlanan TB-10 numunesi 10 yerdeğiştirme sünekliğı seviyesine ulaşarak oldukça sünek bir davranış göstermiştir. Bu davranış belirlenmiş kurallara (örneğin kompakt kesitlerin kullanılması böylece erken yerel burkulmaların engellenmesi; uygun zayıflatılmış uç birleşiminin oluşturulması ve uç birleşim kaynak ve bulonlarının kapasiteye göre tasarlanması) göre tasarlanan çaprazların oldukça sünek davranacağını göstermektedir.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.70 : TB-10 numunesi deney öncesi, $1\delta_y$ (3.65mm) ve $2\delta_y$ (7.3mm) yerdeğiştirme seviyesinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşim detayı. (c) Deney öncesi orta bölgenin durumu. (d) $-1\delta_y$ (-3.65mm)'de burkulma. (e) $+2\delta_y$ (+7.3mm)'de çekme etkisi. (f) $-2\delta_y$ (-7.3mm)'de burkulma.



(a)



(b)



(c)



(d)

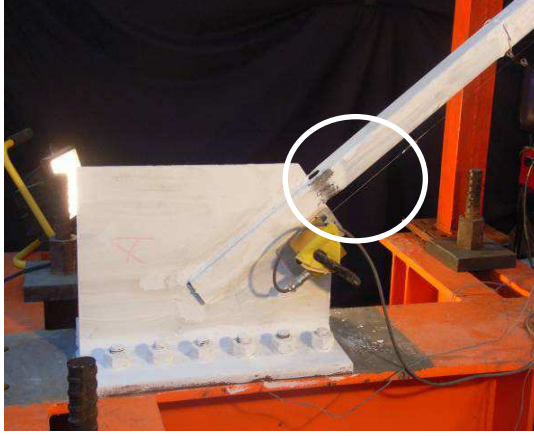


(e)



(f)

Şekil 4.71 : TB-10 numunesinin $3\delta_y$ (10.95mm) ve $4\delta_y$ (14.6mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $+3\delta_y$ (+10.95mm)'de alt zayıflatılmış kesitte akma. (b) $-3\delta_y$ (-10.95mm)'de burkulma. (c) $-3\delta_y$ (-10.95mm)'de üst uç zayıflatılmış kesit bölgesi. (d) $-3\delta_y$ (-10.95mm)'de alt uç zayıflatılmış kesit bölgesi. (e) $+4\delta_y$ (14.6mm)'de alt uç zayıflatılmış kesit bölgesi. (f) $-4\delta_y$ (-14.6mm)'de genel burkulma.



(a)



(b)



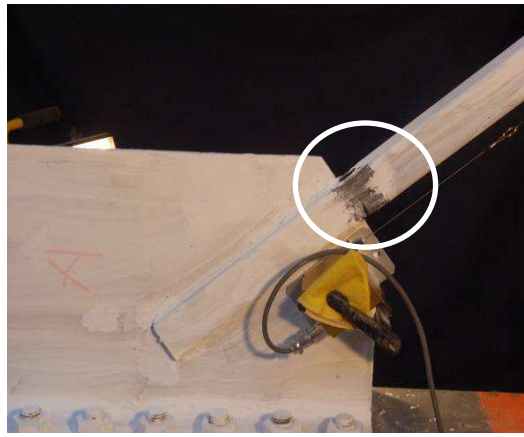
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.72 : TB-10 numunesi $5\delta_y$ (18.25mm) ve $6\delta_y$ (21.9mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $+5\delta_y$ (+18.25mm) etkisinde alt uç zayıflatılmış kesit bölgesi. (b) $+5\delta_y$ (+18.25mm) etkisinde üst uç zayıflatılmış kesit bölgesi. (c) $-5\delta_y$ (-18.25mm)'de burkulma. (d, e) $+6\delta_y$ (+21.09mm)'ye giderken alt uç zayıflatılmış kesitte boğum oluşması. (f) $+6\delta_y$ (+21.09mm)'ye giderken alt uç zayıflatılmış kesitte yırtık oluşması ve ilerlemesi.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.73 : TB-10 Numunesi Kopma Sonrası Görünüşleri: (a, b) Kopan alt uç zayıflatılmış kesit görünüşleri. (c) Üst uç zayıflatılmış kesitin durumu (d) Üst uç zayıflatılmış kesitin alttan görünüşü (e) Orta bölgedeki kalıcı yerdeğiştirme. (f) Numune ortasında plastikleşen bölge.

4.4.10 TB-11 numunesi (Kutu 50x50x4 + Uçlar: CFRP plaka)

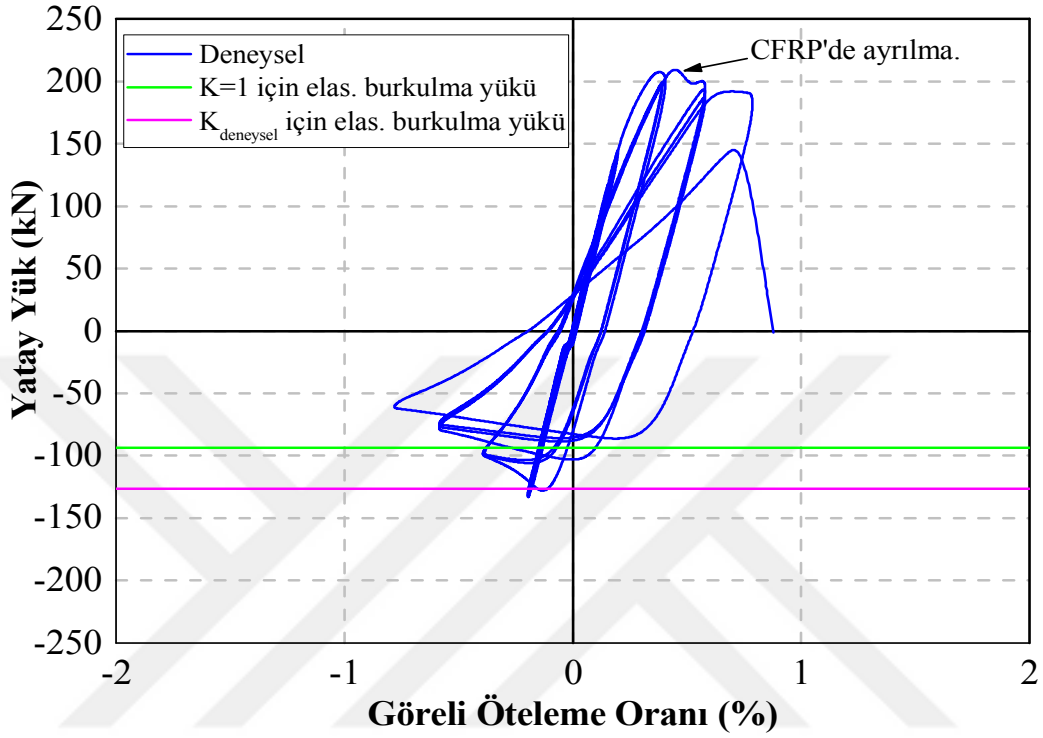
Kesit özelliği Kutu 50x50x4, temiz uzunluğu $L=1936\text{mm}$ ve yalnızca uç bölgesi CFRP plakalarla güçlendirilmiş TB-11 numunesi, TB-10 numunesiyle aynı yükleme protokolüyle denenmiştir. Bu sayede iki numunenin histeretik enerji yutma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. CFRP plakaların tasarım ölçütleri Bölüm 3.2.6'da verilmiştir. TB-11 numunesinin deney öncesindeki durumu Şekil 4.78-a, b ve c'de görülmektedir. Numunenin deneysel olarak elde edilen histeretik eğrisi Şekil 4.74'de, yükleme protokolü ise Şekil 4.75'de verilmiştir.

TB-11 numunesi $\pm 0.24\delta_y$ yatay yerdeğiştirme ($\pm 0.89\text{mm}$, %0.048 görelî öteleme oranı) etkisindeki ilk üç çevrimde ve izleyen $\pm 0.49\delta_y$ ($\pm 1.92\text{mm}$, %0.1 görelî öteleme) ve $\pm 0.79\delta_y$ ($\pm 2.89\text{mm}$, %0.16 görelî öteleme oranı) seviyelerindeki üçer çevrimlerde elastik davranmıştır. Bu seviyelerde, zayıflatılmış uç kesitlerin güçlendirilmesinde kullanılan CFRP elemanlarda ve birleşimlerde herhangi bir sorun gözlenmemiştir. Numune $-0.49\delta_y$, $-0.79\delta_y$ yatay yerdeğiştirme seviyelerinde basınç etkisinde sırasıyla en fazla 1.9mm ve 4.62mm düzlem dışı yerdeğiştirme yapmıştır.

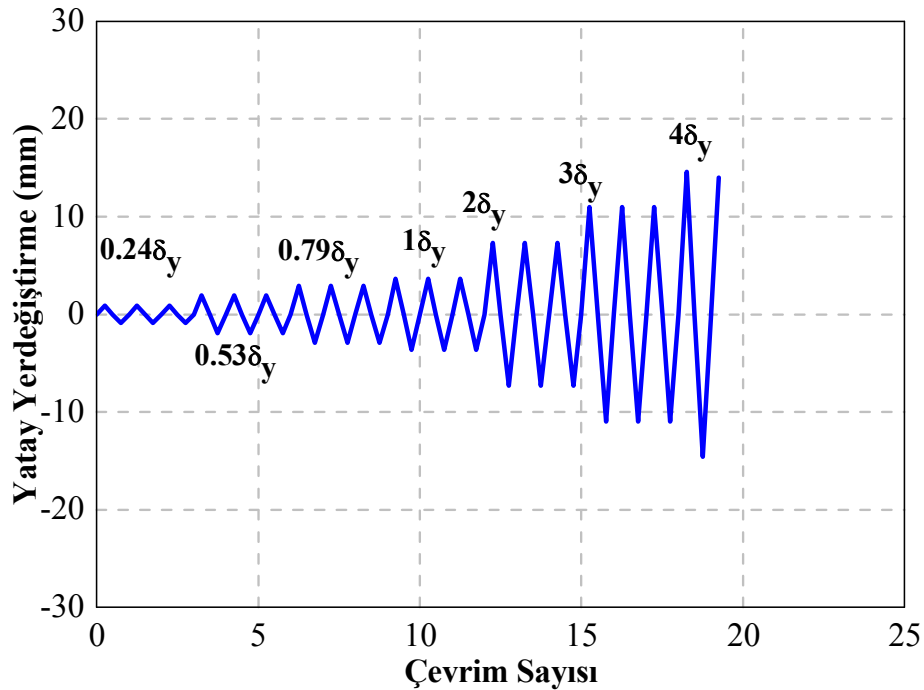
Numunede $\pm 3.65\text{mm}$ ($\pm 1\delta_y$, %0.20 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinin ilk çevriminde basınç etkisinde, TB-10 numunesine benzer olarak, yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisinde doğrusal olmayan davranış başlamış ve numunenin basınç etkisinde aktığı/burkulduğu gözlenmiştir. Numunenin burkulmaya başladığı an Şekil 4.78-d'de görülmektedir. Şekildeğiştirme ölçer değerlerine göre de numunede çekme etkisinde akma ve boyada dökülme gözlenmemiştir.

$\pm 2\delta_y$ ($\pm 7.3\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.39 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde ilk çekme çevrimi etkisinde 200kN 'luk yatay yüke ulaşıldığında Şekil 4.78-e'de görülen alt uç güçlendirilmiş bölgede numunenin batı yüzündeki CFRP plaka yüksek sesle çelik yüzeyden ayrılmaya başlamıştır. Ayrılma, CFRP'nin çaprazın açıklık bölümünde ve epoksi ile çelik temas yüzeyinde olmuş, CFRP plakalarda herhangi bir göçme durumu gözlenmemiştir; başka bir deyişle, ayrılma aderans kaybı sonucu oluşmuştur. Aynı uç birleşiminde doğu yüzündeki ve üst uç birleşimdeki CFRP plakalarda ayrılma olmamıştır. İlk çevrimde basınç etkisinde Şekil 4.78-f'de görüldüğü gibi gözle görülür düzlem dışı hareket belirlenmiştir. İkinci çevrimde çekme etkisinde üst uça batı yüzündeki CFRP plakayı çelikle birleştiren epokside yaklaşık 200mm 'lik ayrılma gözlenmiştir. Bu yerdeğiştirme çevrimlerinde basınçta gözlenen maksimum düzlem dışı yerdeğiştirme 65mm 'dir.

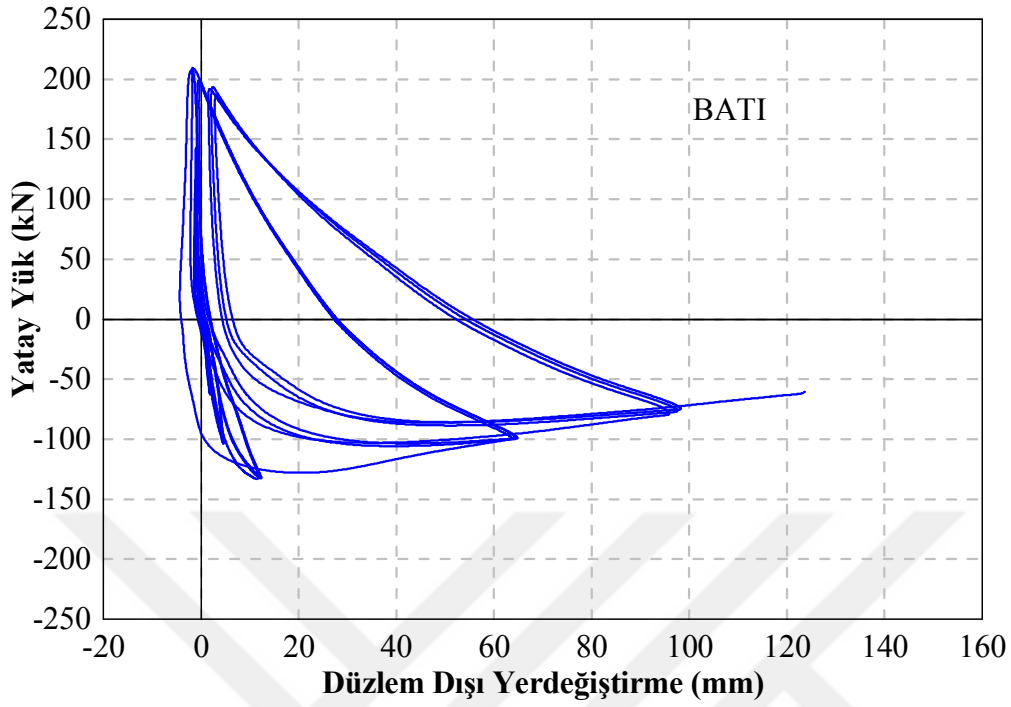
Sonraki $\pm 3\delta_y$ (10.95mm yerdeğiştirme, %0.59 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinin ilk çevriminde, çekmede pik yerdeğiştirmeye ulaşmadan üst uç batı yüzündeki CFRP plaka +8.6mm yatay yerdeğiştirme ve +210kN yatay yük etkisinde, Şekil 4.79-a'da görüldüğü gibi zayıflatılmış numune tarafından, çelik



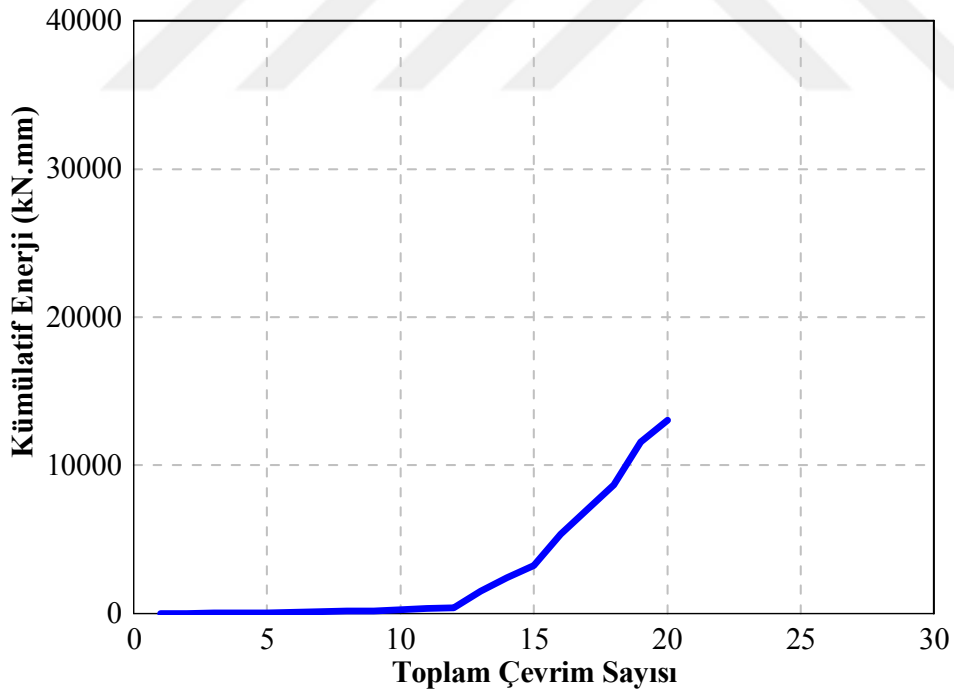
Şekil 4.74 : TB-11 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi.



Şekil 4.75 : TB-11 numunesi yükleme protokolü.



Şekil 4.76 : TB-11 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil 4.77 : TB-11 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

yüzeyden ayrılmıştır. CFRP plaka epoksi ve çeliğin birleşim yüzeyinde ayrılmış olup plakalarda göçme görülmemiştir. Yatay yerdeğiştirmenin artmasıyla yine pik yerdeğiştirmeye ulaşılmadan +9.53mm yerdeğiştirme ve +212kN yatay yük seviyesinde alt uç doğu yüzdeki CFRP plaka da zayıflatılmış kesitin açıklık tarafında

epoksi ile çelik birleşim yüzeyinden ayrılmıştır. Plakalar birleşimin açıklık tarafından ayrılmış olup guse tarafında numuneye bağlı olmalarına karşın bu yerdeğiştirme düzeyinden sonra numuneye herhangi bir katkıları olmamıştır. Çelik yüzeyinden ayrılan CFRP plakaların dayanıma etkisinin ortadan kalkmasının sonucunda pik yatay yerdeğiştirmeye ulaşıldığında yatay yükte bir miktar azalma gözlenmiş ve yatay yük +201.7kN olarak ölçülmüştür. Bu yükleme çevriminde alt uç zayıflatılmış kesitte çekme etkisinde uzama ve boya dökülmesi gözlemlenmiştir. Numunenin orta bölgesinde de gözle görülür miktarda ve kesitin köşelerinden başlayan boya dökülmeleri izlemiştir. İlk çevrimin basınç etkisinde üst uç doğu yüzündeki CFRP plakanın çelik ile birleşim bölgesinde epoksida belirgin ayrılma gözlenmiştir. Alt uç doğu yüzünde Şekil 4.79-b’de görüldüğü gibi yalnızca guse tarafında numuneye bağlı olan CFRP plakanın birleşimindeki epoksida bayrak levhasına doğru ilerleyen yaklaşık 100mm uzunluğunca ayrılma gözlenmiş olup zayıflatılmış bölge civarında Şekil 4.79-c’de görüldüğü üzere boya dökülmeleri belirlenmiştir. İkinci yük çevriminde çekme etkisinde üst uç doğu yüzünde CFRP plaka çelik birleşiminde, numune tarafında, gözle görülür ayrılma oluşmuştur. Bu birleşimde zayıflama gözlenmiş olmasına karşın plaka çelik yüzeyden ayrılmamıştır. Bu çevrimde basınç etkisinde orta bölgede beyaz boyada kabarmaların arttığı görülmüştür (Şekil 4.79-d). Üçüncü yük çevriminde ise basınç etkisinde numunenin burkulmuş durumu Şekil 4.79-e’de verilmiş, üst uç bayrak levhasında batıya doğru belirgin bir dönme görülmüştür. Şekil 4.79-f’de yerdeğiştirmenin sıfırlandığı andaki alt uç birleşim bölgesinin durumu vardır.

Numunede $\pm 4\delta_y$ ($\pm 14.6\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.78 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinin ilk çevriminde alt uç zayıflatılmış kesitte belirgin şekilde inelastik davranış belirlenmiştir. Çekme etkisinde zayıflatılmış kesit bölgesinde oluşan boğumun/uzamanın hızla ilerlediği izlenmiştir. Basınç etkisinde çubuğun ilerlemiş burkulmuş durumu Şekil 4.80-a’da, alt uç zayıflatılmış kesit bölgesinde oluşan boğum Şekil 4.80-b’de ve orta bölgede kesitin köşelerinden başlayan ve belirgin şekilde devam eden beyaz boya dökülmesi Şekil 4.80-c’de verilmiştir. Alt zayıflatılmış kesit bölgesinde çekme etkisinde oluşan aşırı uzama sonrasında, basınç etkisiyle bu bölgede yerel burkulma oluşmuştur. Basınç etkisinde ölçülen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme 123mm olup deney süresince elde edilen yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.76’da görülmektedir. Numune ikinci

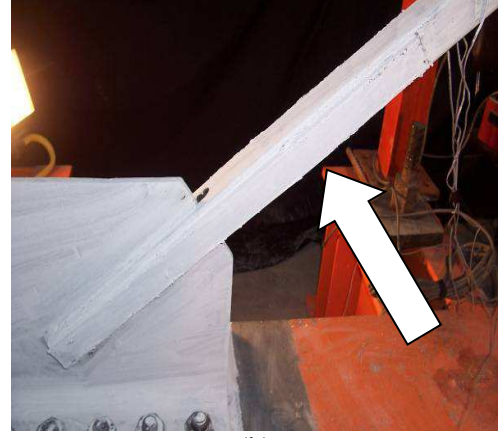
çevrimin çekme etkisinde pik yerdeğiştirmeye ulaşmadan +14.02mm yerdeğiştirme seviyesinde ve +152kN yatay yük etkisinde alt zayıflatılmış kesitten batı yüzündeki çelikten ayrılmış CFRP plaka ile birlikte yüksek sesle kopmuştur.

Kopma sonrasındaki durumu Şekil 4.80-d, e ve f’de görülen numunenin orta bölgesinde 17mm kalıcı yerdeğiştirme olduğu görülmüştür. Numunenin deney süresince tükettiği kümülatif enerji 13033kNmm olup çevrim sayısı – kümülatif tüketilen enerji eğrisi Şekil 4.77’de verilmiştir. Deney sonunda uç birleşimlerdeki kaynak ve bulonlarda hasar gözlenmemiştir. EK J’de numune ve deney düzeneği üzerindeki şekildeğiştirme ölçerlerden deney boyunca alınan verilerle çizilmiş yatay yük – şekildeğiştirme grafikleri görülmektedir.

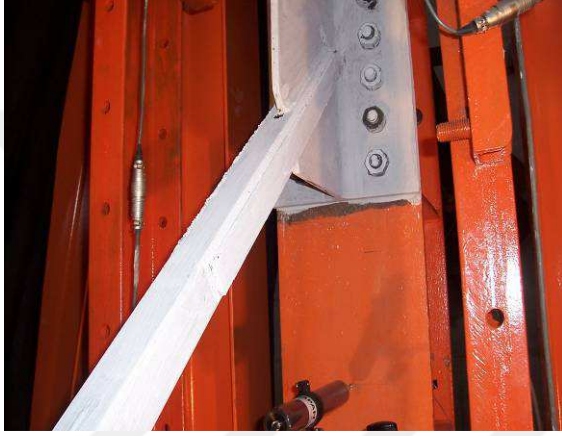
Zayıflatılmış uç bölgeleri yalnızca CFRP plakalarla güçlendirilen TB-11 numunesinde CFRP elemanlar etkili olarak çalışarak çaprazın yük taşıma kapasitesini bir miktar arttırmasına karşın çelik yüzeyden erken ayrılarak bu bölgede çeliğin daha yüksek inelastik şekildeğiştirmeler ve yükler etkisinde kalmasına neden olmuştur. Buna bağlı olarak güçlendirilmiş çapraz, yalın güçlendirilmemiş olan çaprazdan daha düşük bir yerdeğiştirme süneklilik seviyesine ulaşabilmiştir. Bu deney serisi tüm seriler içinde yapılan ilk deney serisi olduğundan deney sonucunda bundan sonraki serilerde CFRP plakaların yapışma yüzeylerinde çelikle olan aderanslarının arttırılarak erken göçmeyi önlemek amacıyla CFRP kumaş ile dıştan sarılmasına karar verilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

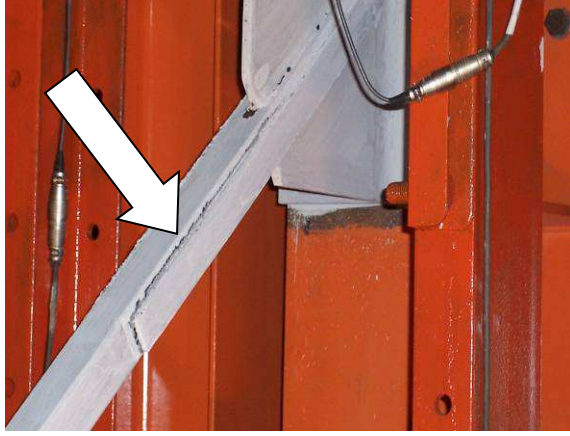


(e)



(f)

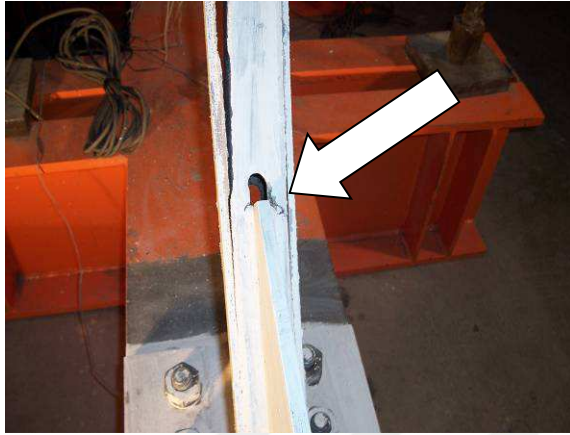
Şekil 4.78 : TB-11 numunesinin deney öncesi, $1\delta_y$ ve $2\delta_y$ seviyelerinde görünüşleri :
 (a) Deney öncesi genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç zayıflatılmış kesit güçlendirmesi. (c) Deney öncesi üst uç zayıflatılmış kesit güçlendirmesi. (d) $-1\delta_y$ 'de burkulma başlangıcı. (e) $+2\delta_y$ 'de alt uç zayıflatılmış kesitte CFRP plakanın ayrılması. (f) $-2\delta_y$ 'de burkulma.



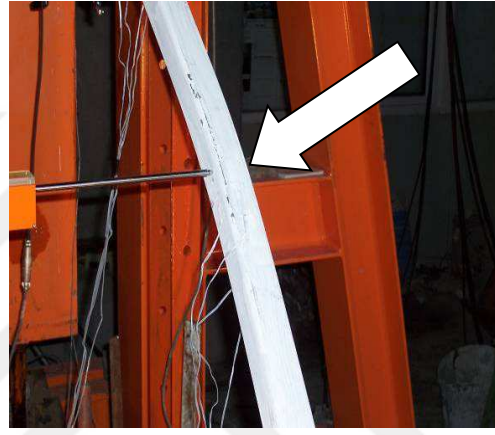
(a)



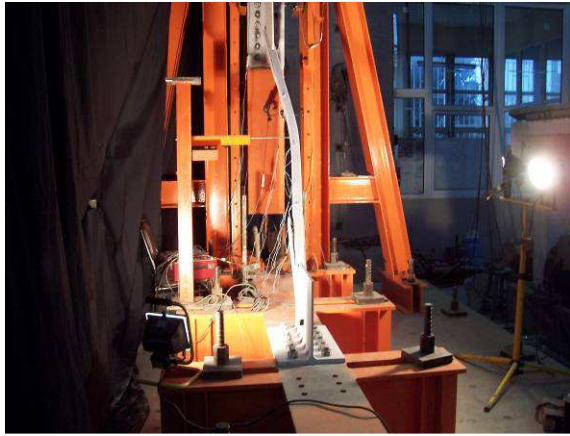
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

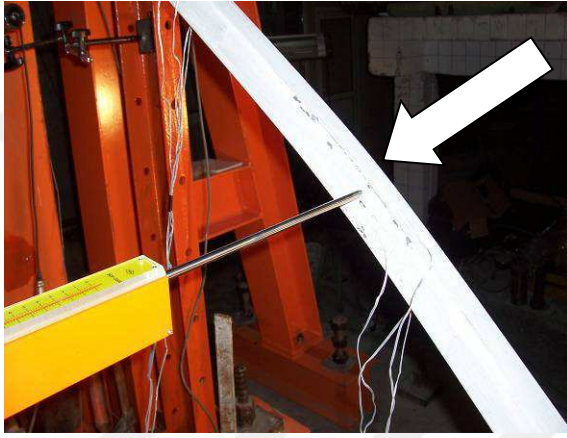
Şekil 4.79 : TB-11 numunesi $3\delta_y$ seviyesinde görünüşleri: (a) $+3\delta_y$ 'de üst uç zayıflatılmış kesitte CFRP plakanın numune yüzeyinden ayrılması. (b) $-3\delta_y$ 'de burkulan numunede alt uç güçlendirmesinin durumu. (c) $-3\delta_y$ 'de alt uç zayıflatılmış kesitte boya dökülmesi. (d) $-3\delta_y$ 'de orta bölgede kesit köşelerinde boya dökülmesi başlangıcı. (e) $-3\delta_y$ 'nin son çevriminde burkulma. (f) Yerdeğiştirmenin sıfır olduğu anda alt uç genel görünüşü.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.80 : TB-11 numunesinin $4\delta_y$ seviyesinde ve kopma sonrasındaki görünümleri:
 (a) $-4\delta_y$ 'de burkulma. (b) $-4\delta_y$ 'de alt uç zayıflatılmış kesitteki boğumun görünüşü.
 (c) $-4\delta_y$ 'de orta bölgedeki boya dökülmesi. (d, e, f) Numunenin kopma sonrası görünümleri.

4.4.11 TB-12 numunesi (Kutu 50x50x4 + Uçlar: CFRP plaka ve kumaş)

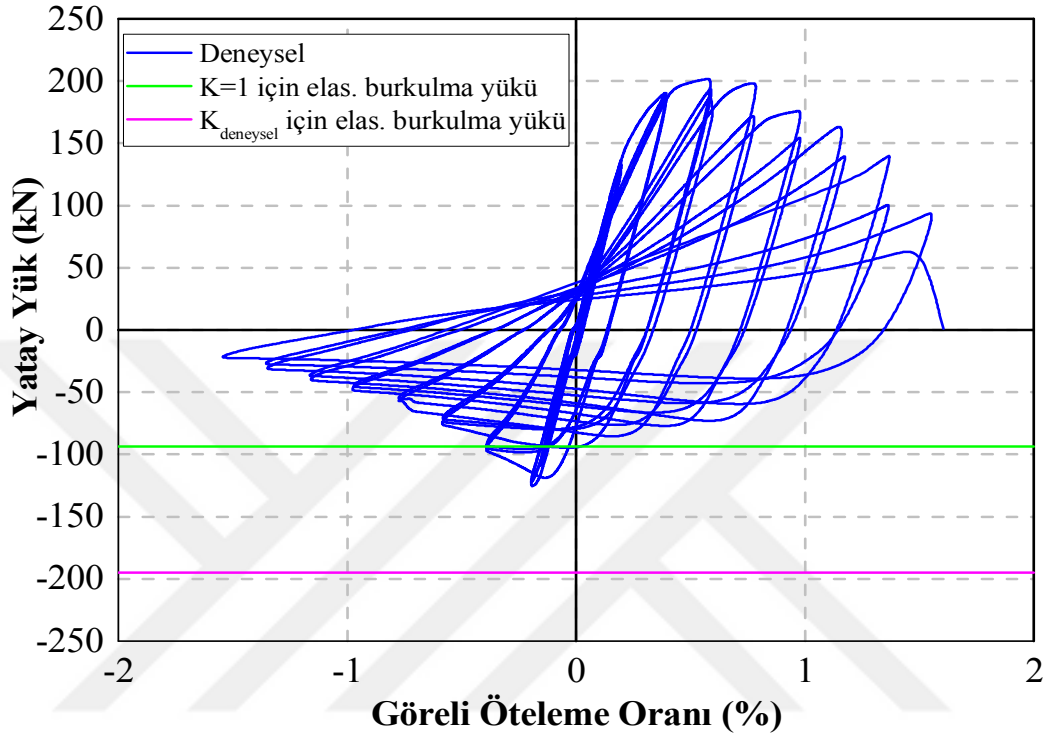
Kutu 50x50x4'lük kesitli ve L=1936mm temiz uzunluğundaki TB-12 numunesine grubunun referans numunesi olan TB-10 ve TB-11 ile aynı yükleme protokolü uygulanmıştır. Numuneye ilişkin yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi Şekil 4.81'de, yükleme protokolü Şekil 4.82'de görölmektedir. Numunenin deney öncesi görünüşleri Şekil 4.85-a, b ve c'de verilmiştir. Bu seride kompakt bir kesit kullanıldığından ve dolayısıyla orta bölgede yerel burkulma beklenmediğinden, orta bölgede CFRP ile güçlendirme seçeneğı üzerinde durulmamıştır.

İlk elastik yerdeğıştirme olan $\pm 0.89\text{mm}$ ($\pm 0.24\delta_y$, %0.048 görelî öteleme oranı) numunede, birleşimlerde ve CFRP güçlendirme bölgelerinde sorun görölmemiştir. Sonraki $\pm 1.92\text{mm}$ ($\pm 0.49\delta_y$, %0.10 görelî öteleme oranı) yerdeğıştirme seviyesinde numune en fazla 1.92mm ($\sim\%0.1L$) düzlem dışı yerdeğıştirme yapmış olup çekme etkisinde numune üzerindeki tüm şekildeğıştirme ölçerlerden +600 μstrain civarında ölçüm alınmıştır. Bu aşamada 21 nolu kanaldan alınan şekildeğıştirme okumaları diğerlerinden çok farklı olduğı için hatalı/anlamsız olduğuna karar verilmiş ve bu şekildeğıştirme ölçer deney süresince dikkate alınmamıştır. Son elastik yerdeğıştirme seviyesi olan $\pm 0.79\delta_y$ ($\pm 2.89\text{mm}$, %0.16 görelî öteleme oranı) seviyesinde çekme etkisinde numune üzerinde +1000 μstrain civarında şekildeğıştirmeler ölçölmüş ve aynı yerdeğıştirme seviyesinde çevrim sayısı arttıkça yük azalması yerine yük artışı belirlenmiş, bu durum CFRP elemanların etkin biçimde çalıştığının göstergesi olarak yorumlanmıştır. Basınç etkisinde üst bayrak levhasının belirgin şekilde doğuya dönmesine karşın alt bayrak levhasında dönme izlenmemiştir. Bu seviyede basınç etkisinde en fazla 6.5mm (%0.34L) düzlem dışı yerdeğıştirme ölçölmüştür.

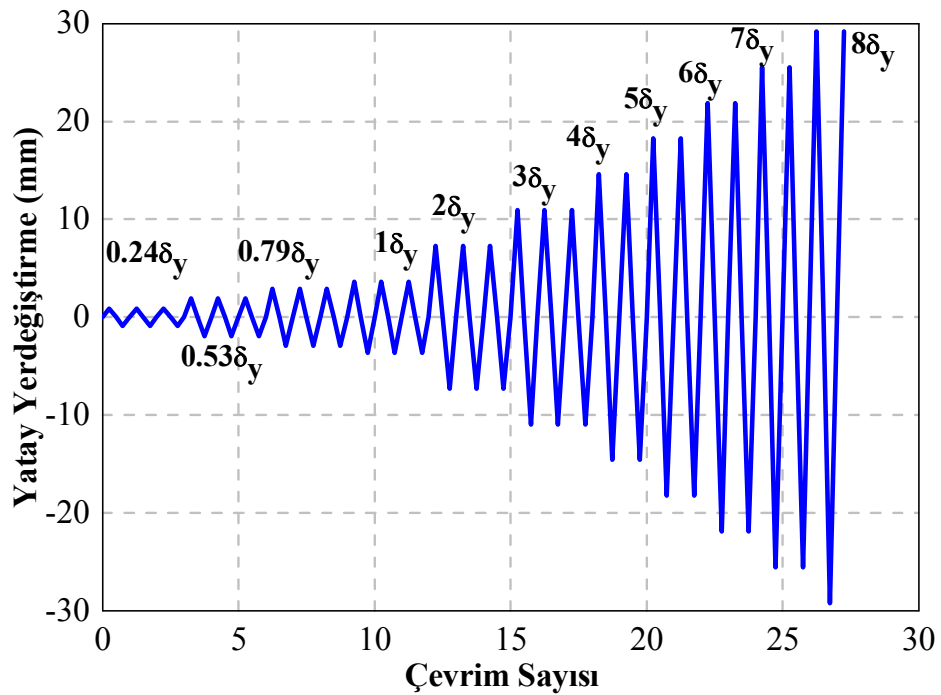
$\pm 1\delta_y$ ($\pm 3.65\text{mm}$, %0.20 görelî öteleme oranı) yerdeğıştirme seviyesinde ilk çekme etkisinde ölçölen şekildeğıştirmeler +1250~+1300 μstrain civarında olup çekme etkisinde doğrusal olmayan davranışın başladığı belirlenmiştir. İlk basınç etkisinde çekme etkisinden daha belirgin bir doğrusal olmayan davranış başlangıcı gözlenmiştir. İkinci çevrim çekme etkisinde çekme kuvvetinin artarak bu çevrimdeki en büyük değeri olan +137kN'a ulaştığı görölmüştür. Basınç etkisinde de, Şekil 4.85-d'de göröldüğü gibi, daha belirgin bir burkulma görölmüş, boya dökölmesi tespit edilmemiştir. Son çevrimde, çekme etkisinde CFRP'leri çelik yüzeye bağlayan epoksilerde ve basınç etkisinde CFRP elemanlarda sorun görölmemiştir. Bu seviyede

ölçülen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme 17.6mm (%0.91L) ve ölçülen en büyük basınç kuvveti -125.6kN'dur.

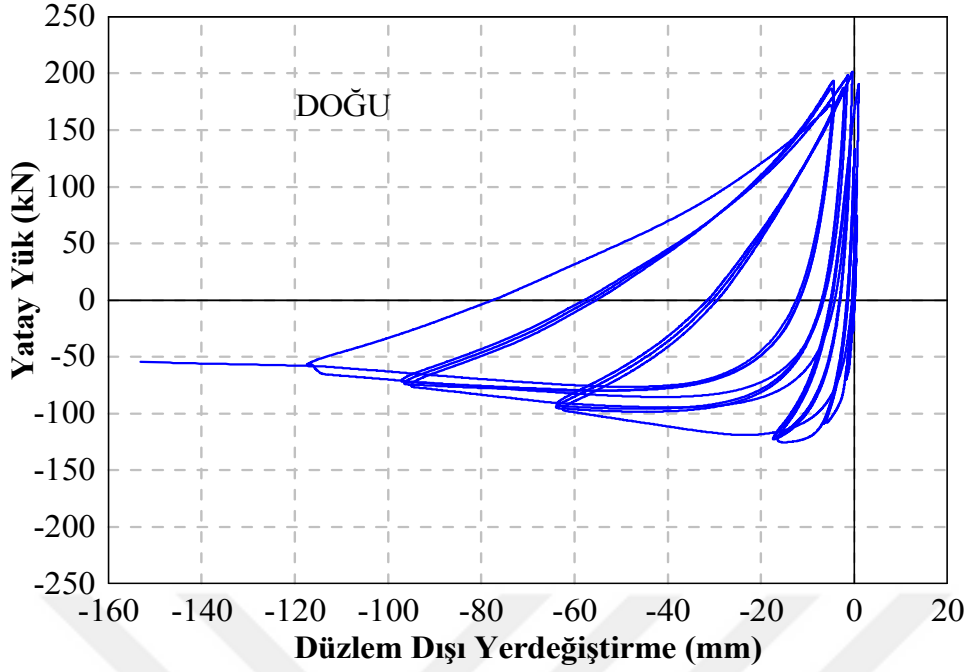
Sonraki $\pm 7.30\text{mm}$ ($\pm 2\delta_y$, %0.40 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme adımımda ilk çekme pikine giderken +6.2mm (%0.33 görelî öteleme oranı) seviyesinde ve +179kN



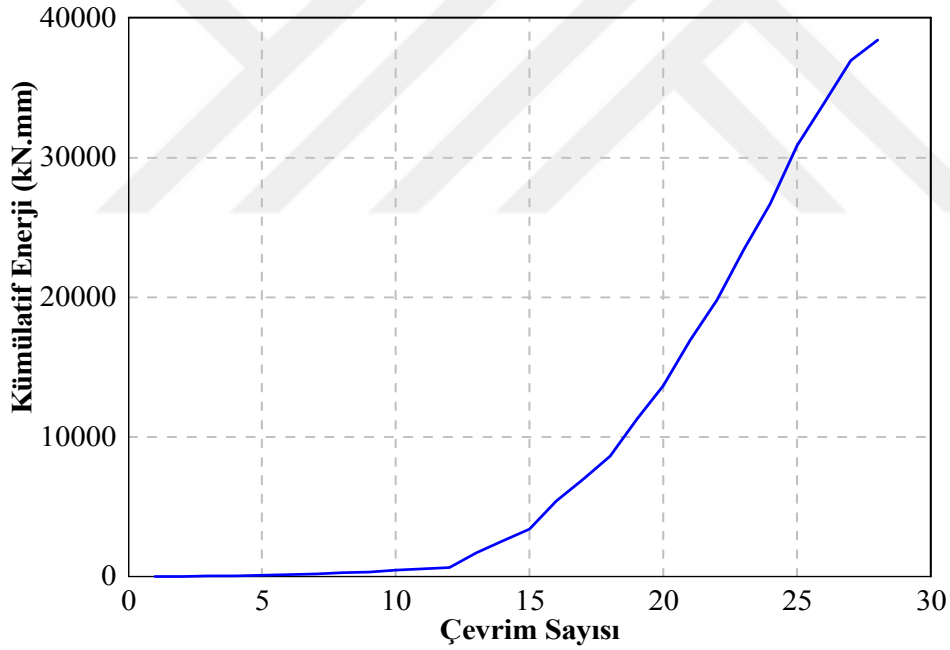
Şekil 4.81 : TB-12 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi.



Şekil 4.82 : TB-12 yükleme protokolü.



Şekil 4.83 : TB-12 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil 4.84 : TB-12 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

kuvvet etkisinde alt uç CFRP güçlendirme elemanlarından yüksek sesler gelmiş ve pik yerdeğiştirmeye ulaşıldığında numune üzerinde $+2600 \sim +2700 \mu\text{strain}$ büyüklüğünde şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. İlk basınç etkisinde de numuneden sesler gelmiş ve orta bölgede boya dökülmesi görülmemiş olup numunenin burkulmuş durumu Şekil 4.85-e’de görülmektedir. İkinci ve üçüncü çevrimlerde çekme etkisinde gözle görülür kalıcı düzlem dışı yerdeğiştirmeler belirlenmiştir. Son çevrimde basınç etkisinde ise alt uçtaki bayrak levhasında aşırı dönme görülmüştür

(Şekil 4.85-f). Bu çevrimde basınç etkisinde ölçülen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme 65mm (%3.4L) olup en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +190kN ve -96.6kN'dur.

Yerdeğiştirme seviyesinin arttırılmasıyla $\pm 10.95\text{mm}$ ($\pm 3\delta_y$, %0.60 görelî öteleme oranı)'ye ulaşılmış olup ilk çevrimde çekme etkisinde numune üzerinde +4500 μstrain civarında şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. İlk basınç etkisinde Şekil 4.86-a'da görüldüğü gibi burkulan numunenin orta bölgesinde boya dökülmesi görülmemiştir. İkinci çevrimde çekme ve basınç etkilerinde CFRP elemanlardan herhangi bir ses duyulmamış, boya dökülmesi de görülmemiştir. Son çevrimde ise çekme etkisinde pik yerdeğiştirmeye ulaştığında üst zayıflatılmış kesitin doğu yüzündeki CFRP plaka bayrak levhası tarafında epoksi aderansını kaybederek yüksek sesle yüzeyden ayrılmıştır (Şekil 4.86-b). Ayrılma sonrasında yük aniden -175kN'a düşmüştür. Basınç etkisinde ise orta bölge batı yüzünde köşelerde boya dökülmesi başlamış olup 97.7mm (%5.0L) düzlemdışı yerdeğiştirme ölçülmüştür. Son kez üç çevrim olarak uygulanan bu adımda ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +202kN ve -76kN'dur.

$\pm 4\delta_y$ ($\pm 14.60\text{mm}$, %0.80 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde, ilk çekme etkisinde pik noktaya ulaşılırken CFRP'lerin çalıştığını gösteren sesler gelmiştir. Basınçta Şekil 4.86-c'de görüldüğü gibi burkulan numunenin etkisiyle alt levhasında doğruya doğru belirgin bir dönme görülmüştür. Alt zayıflatılmış kesitteki CFRP plakalar önce batı yüzündeki (Şekil 4.86-d) sonra da doğu yüzündeki (Şekil 4.86-e) olmak üzere ard arda bayrak levhası üzerindeki aderanslarını kaybetmiş, düzlem dışı yerdeğiştirme 118mm (%6.1L) olarak ölçülmüştür. Numuneye ait yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.83'de görülmektedir. İkinci çevrimde de çekme etkisinde CFRP'lerden sesler gelmeye devam etmiştir. Basınç etkisinde ise düzlem dışı yerdeğiştirmeler arttığından yerdeğiştirme ölçer sistemden çıkartılmıştır. -58kN basınç yükü etkisinde, pik seviyeye ulaşmadan, üst zayıflatılmış kesitin batı yüzündeki CFRP plaka bayrak levhası tarafında çelik yüzeyle aderansını kaybetmiş (Şekil 4.86-f) olup yük -54kN'a düşmüştür. Bu seviyede ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +199kN ve -58kN'dur.

Numunede iki çevrim olarak uygulanan ikinci yerdeğiştirme seviyesi $\pm 5\delta_y$ ($\pm 18.25\text{mm}$, %1.0 görelî öteleme oranı)'de, iki çevrimde de, çekme etkisinde Şekil 4.87-a'da görüldüğü üzere herhangi bir göçme tespit edilmemiştir. İlk çevrimde

basınç etkisinde Şekil 4.87-b’de görüldüğü gibi burkulan numuneye ait alt bayrak levhası aşırı şekilde doğuya doğru dönmüştür. Orta bölgenin batı yüzünde ise çok hafif içeri göçme ve Şekil 4.87-c’de görüldüğü gibi boya dökülmesi belirlenmiştir. İkinci çevrim basınç etkisinde ise orta bölgede köşelerde boya dökülmeleri izlenmiştir. En büyük ölçülen çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +176kN ve -48kN’dur.

$\pm 6\delta_y$ ($\pm 21.90\text{mm}$, %1.20 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesindeki çekme çevrimleri etkisinde sesler gelmesine karşın CFRP sargılarda herhangi bir sorun gözlenmemiştir. İlk basınç etkisinde numune Şekil 4.87-d’de görüldüğü gibi burkulmuş olup alt (Şekil 4.87-e) ve üst (Şekil 4.87-f) bayrak levhalarında belirgin doğu yönüne dönme ve orta bölgede yerel burkulma başlangıcı görülmüştür. İkinci çevrim basınç etkisinde ise orta bölgede beyaz boyada belirgin kabarmalar belirlenmiştir.

Sonraki $\pm 7\delta_y$ ($\pm 25.55\text{mm}$, %1.40 görelî öteleme oranı) seviyesindeki iki çevrimde de çekme etkisinde pik yerdeğiştirme seviyesine ulaşmadan CFRP’lerden yüksek sesler gelmiştir. Basınç etkisinde ise Şekil 4.88-a’da görüldüğü üzere burkulma daha hızlı oluşmaya başlamıştır. Bayrak levhalarında aşırı şekilde doğuya dönme gözlenmiş (Şekil 4.88-b) olup numunede Şekil 4.88-c’de görüldüğü gibi hem düzlem içi hem de düzlem dışı burkulma belirlenmiştir; diğeri bir deyişle, daha öncede açıklandığı üzere, burkulma yön değiştirmiş, sonrasında çapraz bu iki doğrultuda birleşik olarak burkulmay devam etmiştir. Burada da görüldüğü gibi bu durum yüksek öteleme oranlarında gerçekleşmektedir. Bu seviyede ulaşılan en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +140kN ve -32kN’dur.

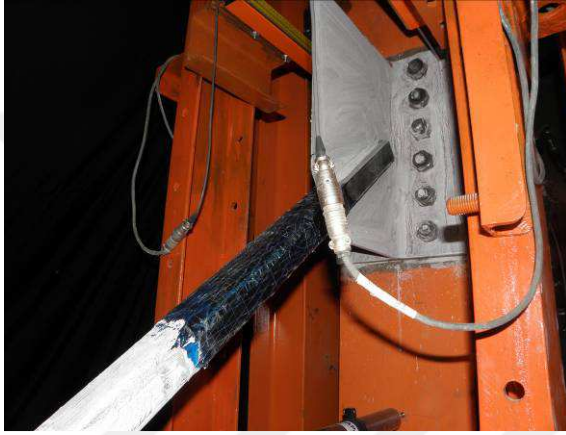
Son yerdeğiştirme seviyesi olan $\pm 8\delta_y$ ($\pm 29.20\text{mm}$, %1.60 görelî öteleme oranı)’de ilk çekme etkisinde +96kN yatay yüke ulaşılmış olup basınç etkisinde orta bölgede oldukça belirgin düzlem içi (Şekil 4.88-d) ve düzlem dışı burkulma gözlenmiştir. İkinci çekme pikine ulaşıldığında numune kopmuş (Şekil 4.88-e ve f), ancak kopma CFRP’lerin altında bir yerde olduğundan deney sırasında nereden koptuğu görülememiştir. Deney sonrasında CFRP sargıların açılmasından sonra numunenin üst zayıflatılmış kesit bölgesinden ve deney süresince, Şekil 4.84’de görüldüğü üzere, toplam 37407kNmm enerji tüketerek koptuğu anlaşılmıştır. Numuneye ait şekildeğiştirme eğrileri EK K’da verilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

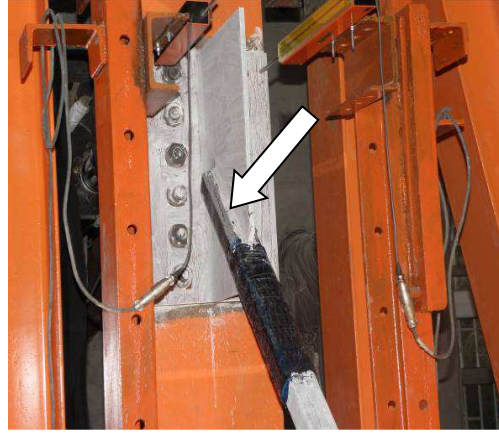


(f)

Şekil 4.85 : TB-12 numunesinin deney öncesi görüşleri, $1\delta_y$ (3.65mm) ve $2\delta_y$ (7.30mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) Deney öncesi genel görüş. (b) Deney öncesi alt zayıflatılmış kesit güçlendirmesi görüşü. (c) Deney öncesi üst zayıflatılmış kesit güçlendirmesi görüşü. (d) $-1\delta_y$ (-3.65mm)'de genel burkulma. (e) $-2\delta_y$ (-7.30mm)'de genel burkulma. (f) $-2\delta_y$ (-7.30mm)'de alt zayıflatılmış kesit güçlendirmesinin durumu.



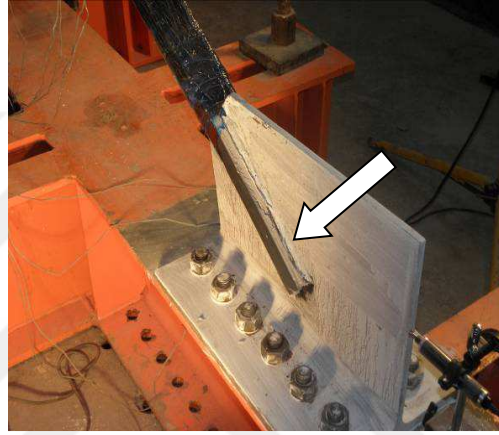
(a)



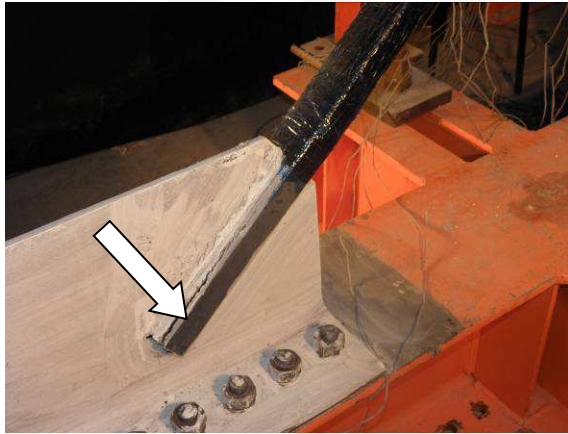
(b)



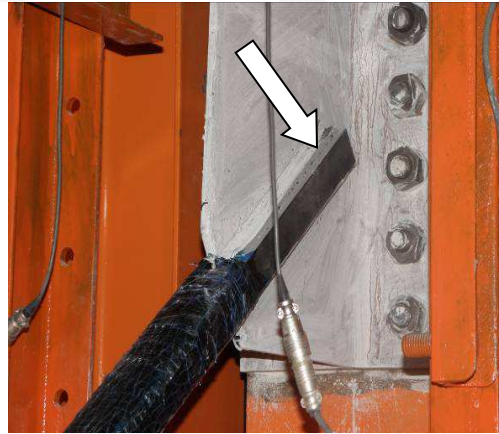
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.86 : TB-12 numunesinin $3\delta_y$ (10.95mm) ve $4\delta_y$ (14.60mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-3\delta_y$ (-10.95mm)'de genel burkulma.

(b) $+3\delta_y$ (+10.95mm)'de üst uç doğu yüzündeki CFRP plakanın aderansını kaybetmesi. (c) $-4\delta_y$ (-14.60mm)'de genel burkulma. (d) $-4\delta_y$ (-14.60mm)'de alt uç doğu yüzündeki CFRP plakanın aderansını kaybetmesi. (e) $-4\delta_y$ (-14.60mm)'de alt uç batı yüzündeki CFRP plakanın aderansını kaybetmesi (f) $-4\delta_y$ (-14.60mm)'de üst uç batı yüzündeki CFRP plakanın aderansını kaybetmesi.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

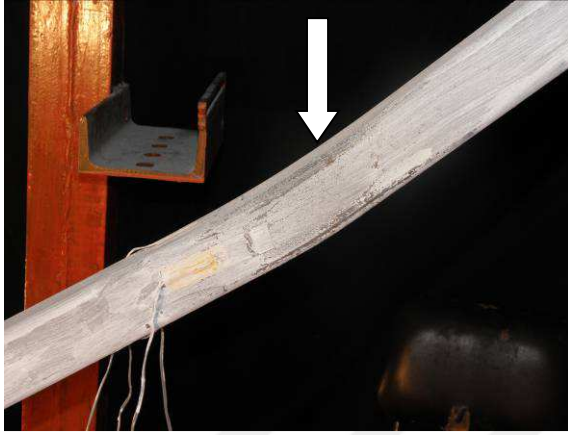
Şekil 4.87 : TB-12 numunesinin $5\delta_y$ (18.25mm) ve $6\delta_y$ (21.90mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $+5\delta_y$ (+18.25mm)'de davranış. (b) $-5\delta_y$ (-18.25mm)'de genel burkulma. (c) $-5\delta_y$ (-18.25mm)'de orta bölgenin batı yüzünde boya dökülmesi. (d) $-6\delta_y$ (-21.90mm)'de genel burkulma. (e) $-6\delta_y$ (-21.90mm)'de alt uç güçlendirmesinin durumu. (f) $-6\delta_y$ (-21.90mm)'de üst uç güçlendirmesinin durumu.



(a)



(b)



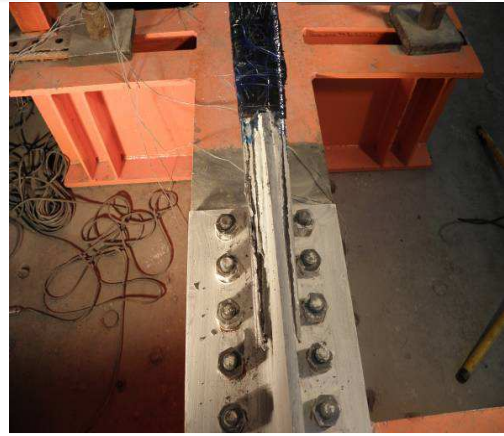
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.88 : TB-12 numunesinin $7\delta_y$ (25.55mm), $8\delta_y$ (29.20mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı ve kopma sonrası görünüşleri: (a) $-7\delta_y$ (-25.55mm)'de genel burkulma. (b) $-7\delta_y$ (-25.55mm)'de üst uç güçlendirmesinin durumu. (c) $-7\delta_y$ (-25.55mm)'de orta bölgedeki düzlem içi düşey hareket. (d) $-8\delta_y$ (-29.20mm)'de genel burkulma. (e) Kopma sonrası genel görünüş. (f) Kopma sonrası alt uç birleşimive güçlendirmesinin durumu.

4.4.12 TB13 numunesi (Kutu 70x70x3 – Yalın Numune)

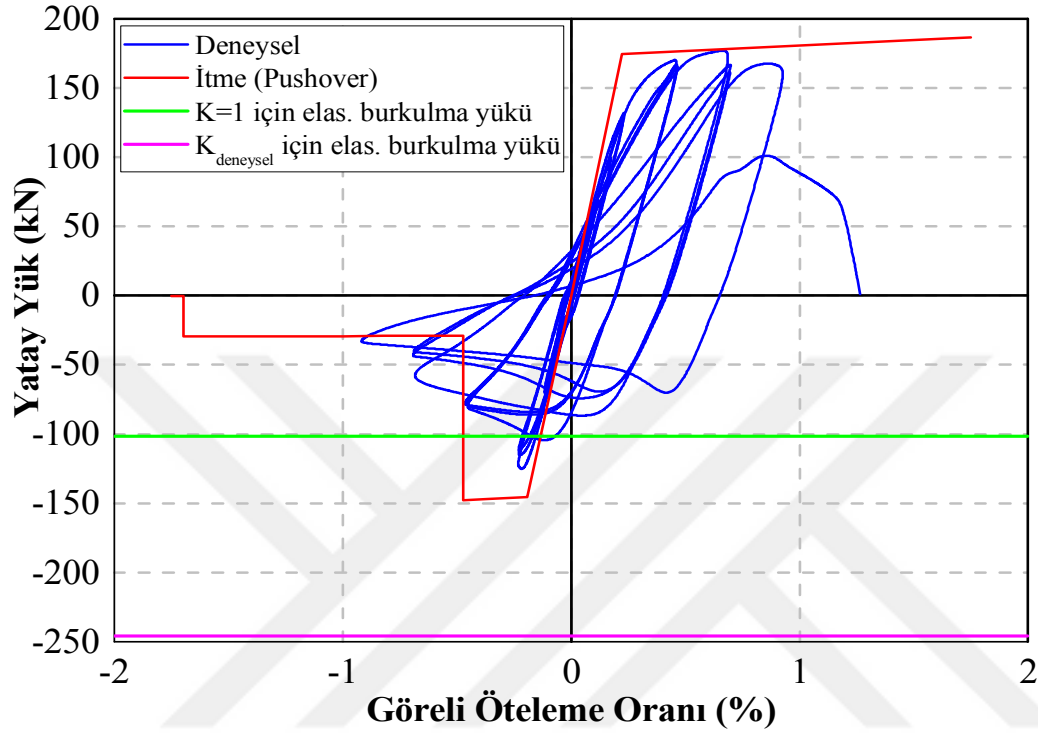
Kutu 70x70x3 en kesit özelliklerinde ve temiz $L=2667\text{mm}$ uzunluğundaki TB-13 numunesi, önce güney yönünde çekme, sonra kuzey yönünde basınç uygulanarak deneye başlanmıştır. Deneysel olarak elde edilen yatay yük-görelî ötelenme oranı histeretik eğrisi ve itme analizinden elde edilen eğri Şekil 4.89’da, yükleme protokolü Şekil 4.90’da gösterilmiştir. Numunenin deney öncesi görünüşleri Şekil 4.93-a, b, c ve d’de görülmektedir.

TB-13 numunesi itme analizinden tahmin edilen akma yerdeğiştirmesinin $1/3$ ’ündeki ($\pm 1.67\text{mm}$, %0.06 görelî öteleme oranı) ilk üç çevriminde ve sonraki aynı akma yerdeğiştirmesinin $2/3$ ’ündeki ($\pm 3.34\text{mm}$, %0.12 görelî öteleme oranı) üç çevrimde elastik olarak davranmıştır. Bu aşamada, numunede beyaz boya dökülmesi, zayıflatılmış kesitlerde ve birleşim elemanlarında sorun gözlenmemiştir.

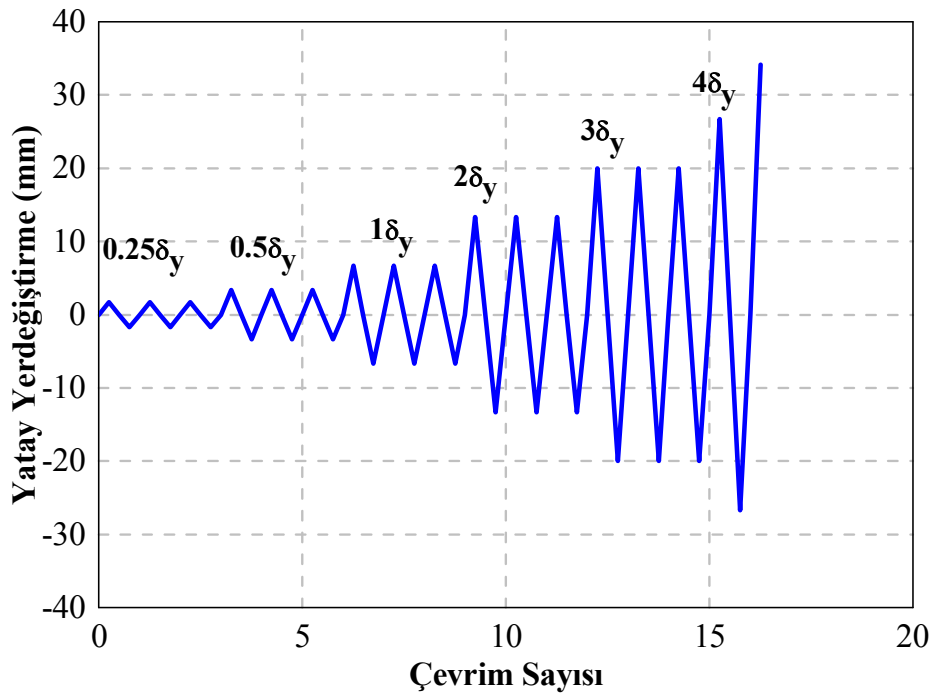
Kendi deney grubunun referans numunesi olan TB-13 için itme analiziyle tahmin edilen basınç akma yerdeğiştirmesi (δ_{yt}) -5.00mm (%0.17 görelî ötelenme oranı)’dır. İlk çekme etkisinde $+5.02\text{mm}$ yerdeğiştirme seviyesine kadar yükleme yapılmıştır. Bu seviyede şekildeğiştirmeler $+1000\mu\text{strain}$ civarında ölçülmüştür. İlk basınç çevriminde ise -5.00mm yerdeğiştirme seviyesinde numunede akma belirlenmemiştir. Bu seviyeden itibaren numuneye ilişkin yatay yük-yerdeğiştirme eğrisi izlenerek grafiğin yataylaştığı noktanın yakalanması için yük azar azar artırılarak uygulanmıştır. Böylece, doğrusal olmayan davranışın başladığı, genel burkulmanın oluştuğu, deneysel akma yerdeğiştirmesi (δ_{yd}) -6.67mm ($-1\delta_y$, %0.23 görelî öteleme oranı) olarak belirlenmiştir. Numunenin burkulma yükü ise -121.4kN ’dur. İkinci çevrimin çekme etkisinde numune üzerinde $+1400\sim+1500\mu\text{strain}$ civarında şekildeğiştirme değerleri ölçülmüştür. Numunenin $-1\delta_y$ ’deki burkulmuş durumu Şekil 4.93-e’de görülmektedir. Basınç etkisinde, numune doğruya doğru 31.5mm (%1.18L) düzlem dışı yerdeğiştirme yapmıştır. Son yükleme çevriminde de çekme etkisinde zayıflatılmış uç kesitlerinde ve basınç etkisinde orta bölgede herhangi bir sorun gözlenmemiştir.

Sonraki adım olan $\pm 2\delta_y$ ($\pm 13.34\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.47 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirmesi numuneye üç kez uygulanmıştır. İlk çevrimde çekme etkisinde şekildeğiştirmeler $+2600\sim+2700\mu\text{strain}$ civarında ölçülmüş olup numune çekmede de akmaya başlamıştır. Basınç etkisinde alt ve üst guseler doğruya doğru belirgin

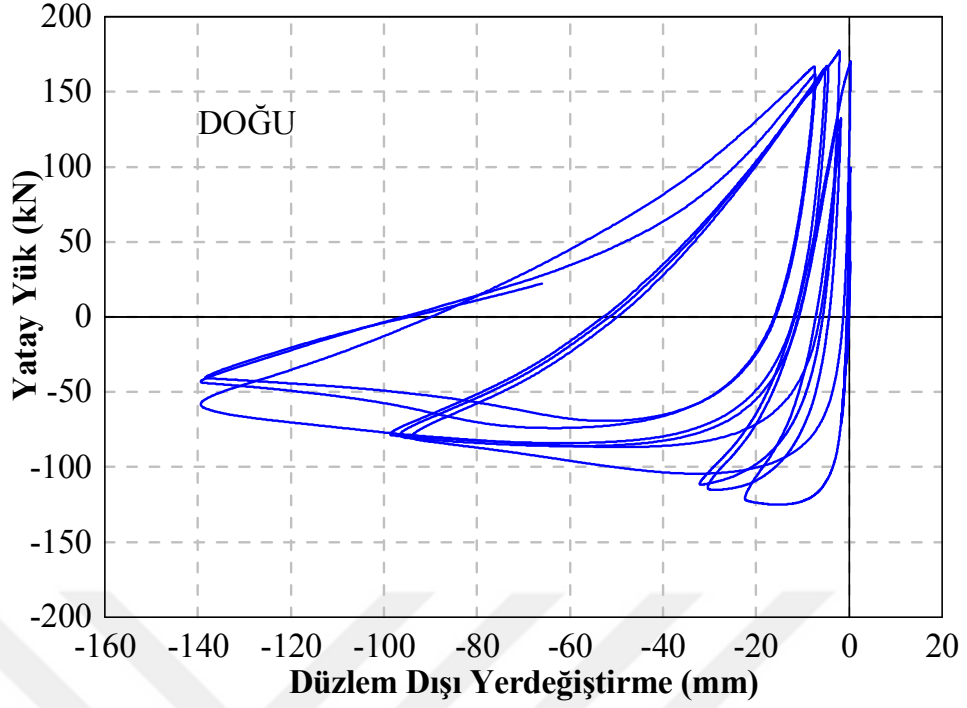
şekilde dönmüş olup orta bölgede -13000 μ strain civarında şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. İkinci ve üçüncü yükleme çevrimlerinin çekme ve basınç etkilerinde zayıflatılmış uç kesitlerde ve orta bölgede boya dökülmesi görülmemiştir. Son çevrim basınç etkisinde orta bölge batı yüzünde -14000 μ strain civarında



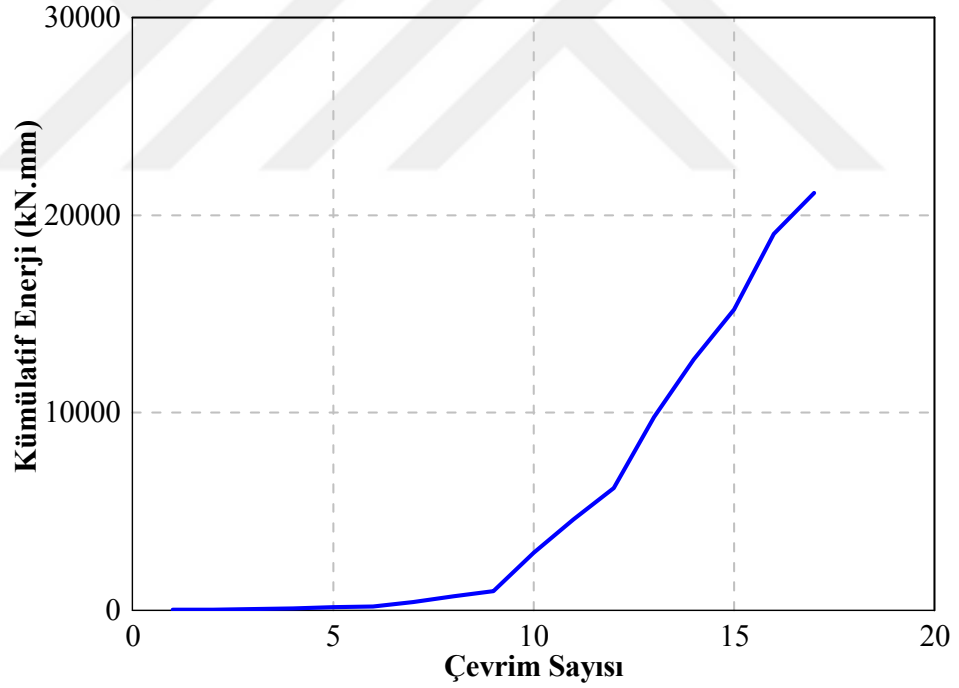
Şekil 4.89 : TB-13 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi ve itme eğrisi.



Şekil 4.90 : TB-13 numunesi yükleme protokolü.



Şekil 4.91 : TB-13 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil 4.92 : TB-13 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

şekildeğiştirmeler ölçülmüştür; bu miktarlardaki şekildeğiştirmeler tüm seriler içinde ilk kez bu numunede kaydedilmiş olup olası yerel burkulmanın habercisi olarak değerlendirilmiştir. Bu seviyede ölçülen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme 98.7mm (%3.7L)'dir. Bu yerdeğiştirme seviyesinde belirlenen en büyük çekme ve

basınç kuvvetleri sırasıyla +172.5kN ve -81kN'dur. $-2\delta_y$ seviyesindeki genel burkulma Şekil 4.93-f'de görülmektedir.

Yatay yerdeğiştirme miktarının artırılmasıyla uygulanan $\pm 3\delta_y$ (± 20.01 mm yerdeğiştirme, %0.7 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirmesi numuneye üç kez uygulanmış olup ilk çevrimin çekme etkisinde numune ortasında 2mm kalıcı düzlem dışı yerdeğiştirme ölçülmüştür. Basınç etkisinde, numunenin orta bölgesinde, batı yüzünde 17200 μ strain şekildeğiştirme ölçülmüş olup bu bölgede yerel burkulma başlangıcı gözlenmiştir. Şekil 4.94-a'da numunenin genel burkulması, Şekil 4.94-b'de ise yerel burkulma başlangıcı görülmektedir. Yerel burkulma bölgesinde beyaz boyada dökülmeler olmuştur. İkinci çevrimin basınç yüklemesinde yerel burkulma bölgesinde aşırı içe çökme ve dışarı şişmeyle birlikte belirginleşen yerel burkulma ve boya dökülmesi izlenmiştir. Üçüncü çevrimin çekme etkisinde yerel burkulma bölgesinde kesitin üst köşesinden başlayan yırtılma belirlenmiştir. Basınç etkisinde ise yırtılan bu bölge kapanarak aşırı yerel burkulma oluşmuştur. $-3\delta_y$ 'deki yerel burkulma Şekil 4.94-c, d, e, f ve Şekil 4.95-a'da görülmektedir. Bu yerdeğiştirme seviyesinde ölçülen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme 141.7mm (%5.3L) olup en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +178.4kN ve -58.6kN'dur. Bu adımdan sonra düzlem dışı yerdeğiştirme ölçer kapasitesine ulaşılacağından deneyden çıkartılmıştır. Numuneye ilişkin yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.91'de görülmektedir.

Numuneye uygulanan son yatay yerdeğiştirme adımı olan $\pm 4\delta_y$ (± 26.68 mm yerdeğiştirme, %0.93 görelî öteleme oranı) seviyesinde, ilk çevrimin çekme etkisinde pik yerdeğiştirme seviyesine kadar orta bölgedeki yırtık hızla artarak ilerlemiştir. Yırtığın ilerlemesi Şekil 4.95-b ve c'de verilmiştir. Basınç etkisinde ise numunedeki yırtık kapanarak numunede genel ve yerel burkulma oluşmuştur. Yerel burkulmanın şişme oluşan üst yüzünde yırtığın ilerlediği görülmüştür. Şekil 4.95-d, e ve f'de yırtıktaki kapanma, genel ve yerel burkulmalar verilmiştir. İkinci çevrimin çekme etkisinde orta bölgedeki yırtık kesitin büyük bir bölümüne ilerlemiş, ancak kopma meydana gelmeden hedef yerdeğiştirmeye ulaşılmıştır. Bu noktadan sonra basınç uygulanmayıp kesit kopana kadar çekmeye devam edilmiştir. Numunenin kopma öncesi durumu Şekil 4.96-a, b, c ve d'de görülmektedir. Kesit +34.1mm (%1.19 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde +65.2 kN çekme etkisinde ortadan kopmuş olup kopma sonrası durumu Şekil 4.96-e ve f'de görülmektedir.

Kopma alt bayrak levhasından numunenin ortasına doğru 1250mm ileride oluşmuş, zayıflatılmış uç kesitlerde, birleşim elemanları olan bulon ve kaynaklarda herhangi bir sorun görülmemiştir. Deney sonunda TB-13 numunesi kümülatif olarak 21141kNmm enerji tüketmiş olup yutulan kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi Şekil 4.92’da gösterilmiştir. EK L’de deney süresince numune üzerinden ölçülen şekildeğişimlere ilişkin verilerin histeretik eğrileri verilmiştir.

Yerel narinliği oldukça yüksek ($b/t=20.33$) TB-13 numunesi orta bölgede aşırı yerel burkulma oluşumundan sonra orta bölgeden kopmuştur. Ulaşın yerdeğiştirme süneklik seviyesi en çok 4 olan numunelerde aşırı yerel burkulma durumu numunenin erken kopmasına/göçmesine neden olmuştur.

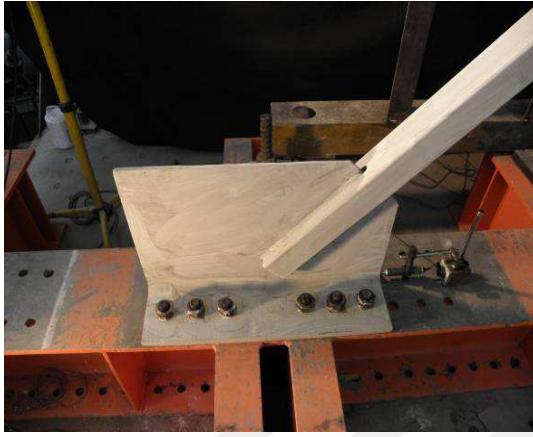




(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

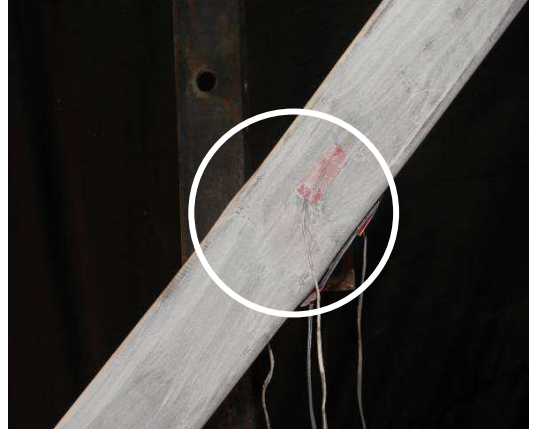


(f)

Şekil 4.93 : TB-13 numunesinin deney öncesi, $1\delta_y$ (6.67mm) ve $2\delta_y$ (13.34mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Düzlemdışı yerdeğiştirme ölçerin konumu. (c) Deney öncesi alt uç birleşim. (d) Deney öncesi üst uç birleşim. (e) $-1\delta_y$ (-6.67mm)'de burkulma. (f) $-2\delta_y$ (-13.34mm)'de burkulma.



(a)



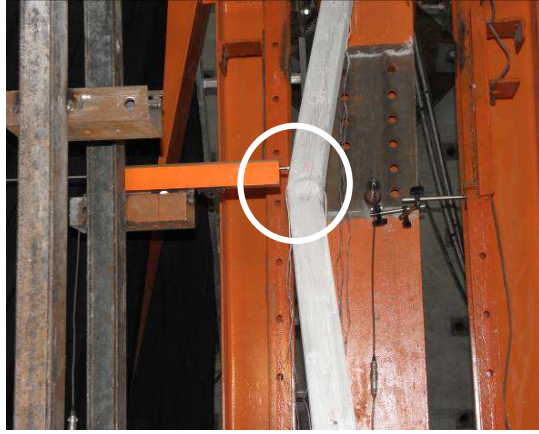
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.94 : TB-13 numunesinin $3\delta_y$ (20.01mm) yatay yerdeğiştirme seviyesinde davranışı: (a) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de genel burkulma. (b) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de yerel burkulma. (c) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de batı yüzünde içeri çökme. (d) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de yerel burkulmanın üstten görünüşü. (e) Yerel burkulma sonucu numunede oluşan dirsek. (f) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de yerel burkulma bölgesinin alttan görünüşü.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.95 : TB-13 numunesinin $3\delta_y$ (20.01mm) ve $4\delta_y$ (26.68mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-3\delta_y$ (-20.01mm) son yükleme çevrimi basınç etkisinde aşırı yerel burkulma oluşması. (b,c) $+4\delta_y$ (+26.68mm)'de yerel burkulma bölgesinde köşelerde yırtığın ilerlemesi (d) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de genel burkulma (e) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de yerel burkulmanın doğudan görünüşü. (f) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de yerel burkulmanın batıdan görünüşü.



(a)



(b)



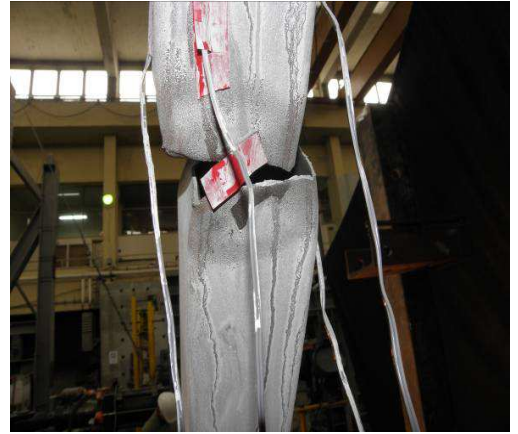
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.96 : TB-13 numunesi kopma öncesi ve sonrası görünüşleri: (a,b) $+4\delta_y$ ($+26.68\text{mm}$)’de son yükleme çevriminde çekme pikine giderken yırtığın ilerlemesi. (c,d) Kopma öncesi yırtığın aşırı duruma gelmesi. (e,f) Kopma sonrası görünüşler.

4.4.13 TB-14 numunesi (Kutu 70x70x3 + Uçlar: CFRP plaka ve kumaş + Orta:%17L CFRP sargı)

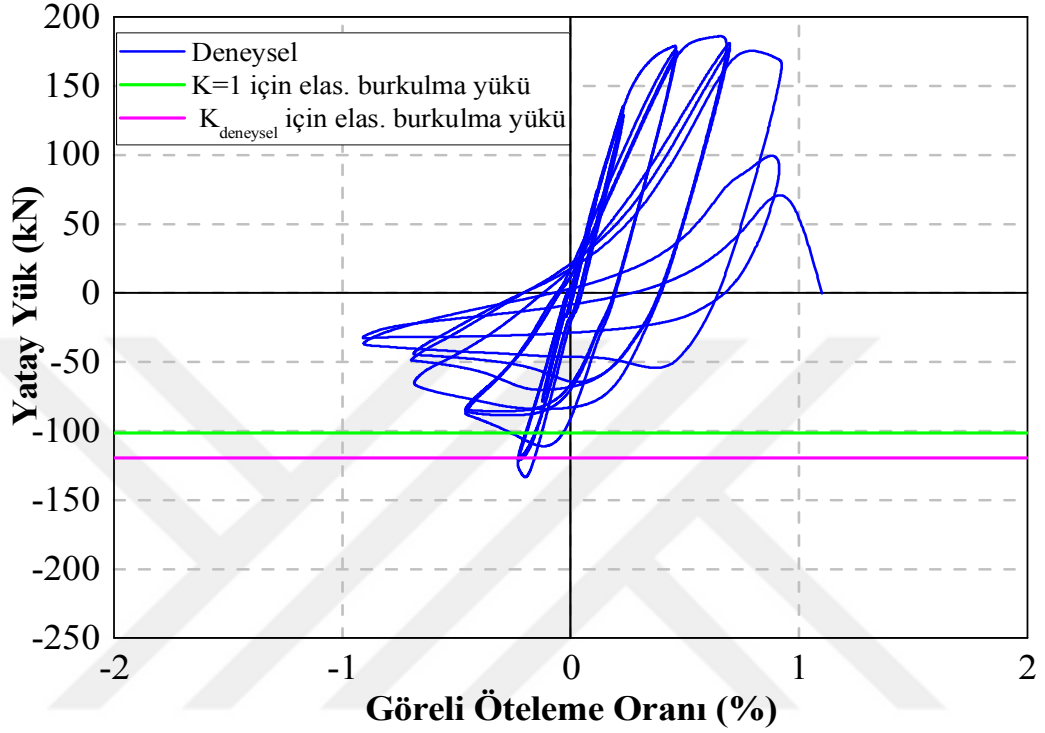
Kesit boyutları 70mm, 70mm, et kalınlığı 3mm, uzunluğu L=2667mm olan ve deney grubunun ikinci numunesi olan TB-14, TB-13 numunesiyle aynı yükleme protokolüyle denenmiştir. Deneysel olarak elde edilen yatay yük-yatay yerdeğıştirme eğrisi Şekil 4.97’de, uygulanan yükleme protokolü Şekil 4.98’de verilmiştir. Numunenin deney öncesi görünüşleri Şekil 4.101-a, b, c ve d’de görölmektedir.

Numunenin elastik olarak davrandığı $\pm 0.25\delta_y$ (± 1.67 mm, %0.06 görelî öteleme oranı) ve $\pm 0.50\delta_y$ (± 3.34 mm, %0.12 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğıştirme seviyelerinde beklendiğı üzere numunede ve birleşimlerde herhangi bir sorun gözlenmemiştir. Bu aşamada ölçülen çekme ve basınç kuvvetlerinin birbirine çok yakın olduğu görölmüştür.

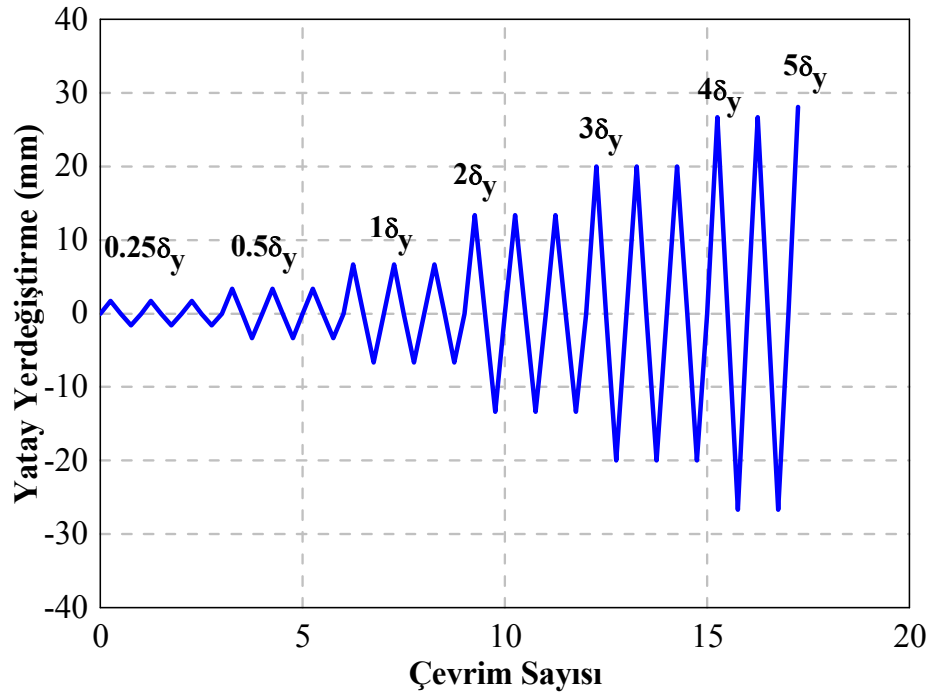
Numunenin akma yatay yerdeğıştirmesi, $\pm 1\delta_y$ (± 6.67 mm, %0.23 görelî öteleme oranı), seviyesinde ilk yükleme çevriminin çekme etkisinde CFRP’lerden ilk sesler duyulmuş olmasına karşın bu elemanlarda aderans kaybı gözlenmemiştir. Basınç etkisinde ise, -135.2kN yatay yük etkisinde numune burkulmuş ve yük aniden 130.7kN’a düşmüştür. Numunenin $-1\delta_y$ ’deki burkulması Şekil 4.101-e’de görölmektedir. İkinci ve üçüncü yükleme çevrimlerinde CFRP güçlendirmelerin katkısıyla, ölçülen çekme kuvvetlerinde artış, buna karşın basınç kuvvetinde düşüş kaydedilmiştir. Bu yerdeğıştirme seviyesinde ölçülen maksimum çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +136.7kN ve -123.3kN’dur. Numunenin burkulması sonrasında ölçülen en büyük düzlem dışı yerdeğıştirme ise 34.3mm (%1.29L)’dir.

$\pm 2\delta_y$ (± 13.34 mm yerdeğıştirme, %0.47 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğıştirme seviyesinde ilk çevrim sırasında çekme etkisinde CFRP’lerden sesler duyulmuştur. Numune üzerinde altta +4300~+4400 μ strain, ortada +2800 μ strain ve üstte +3500~+4000 μ strain civarında şekildeğıştirmeler ölçölmüştür. Basınç etkisinde, guselerde belirgin şekilde batıya doğru dönmeler görölmüştür. Orta bölgede numunenin batı yüzünde -2600 μ strain, doğu yüzünde ise -7200 μ strain şekildeğıştirmeler ölçölmüş böylece kullanılan CFRP kumaşların orta bölgede şekildeğıştirme artış hızını önemli ölçüde azalttığı görölmüştür. İkinci çevrimde, çekme etkisinde, CFRP plakalar üzerinde alt uç batı yüzünde +2300 μ strain, doğu yüzünde +1300 μ strain, üst uç batı yüzünde +1900 μ strain, doğu yüzünde

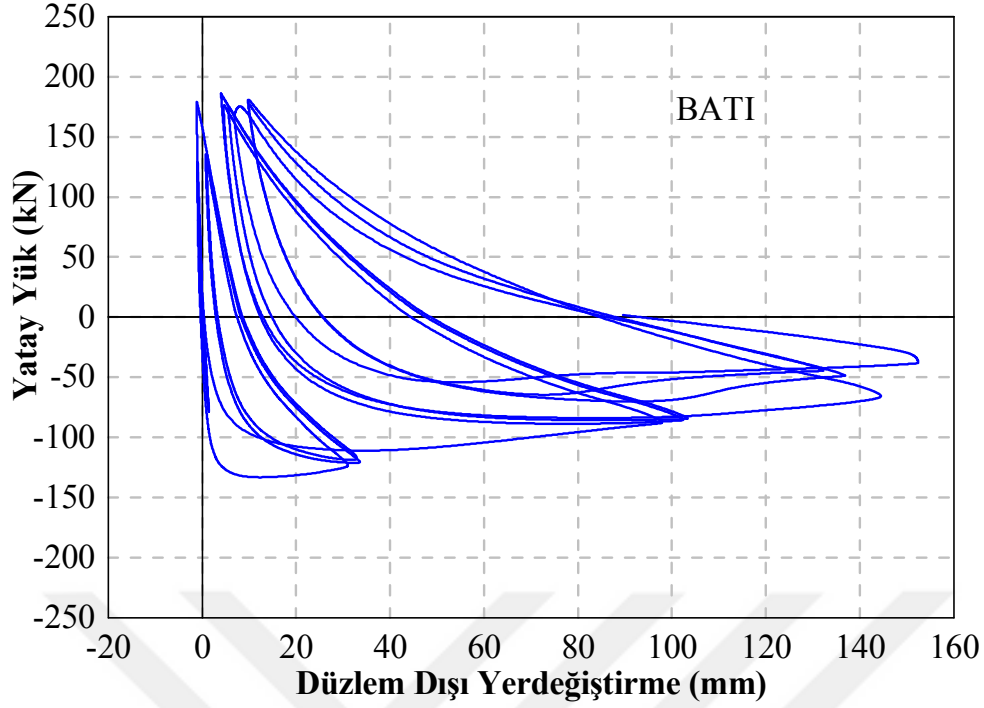
+1500 μ strain civarında şekildeğiştirmeler ölçölmüştür. Üçöncü çevrimde numunede ve CFRP’lerde sorun gözlenmemiştir. Bu seviyede ölçölen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme 104mm (%3.90L), en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +179.8kN ve -87.7kN’dur. -2 δ_y ’deki burkulma şekil 4.101-f’de görölmektedir.



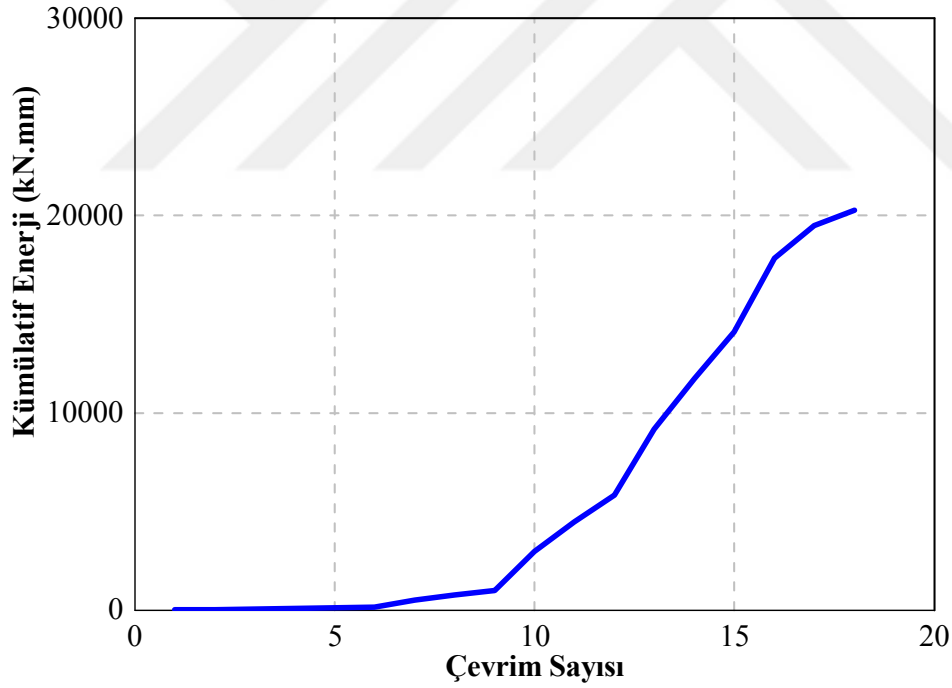
şekil 4.97 : TB-14 numunesi yatay yüğü-görelö öteleme oranı histeretik eğrisi.



şekil 4.98 : TB-14 numunesi yükleme protokolü.



Şekil 4.99 : TB-14 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil 4.100 : TB-14 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

Sonraki adım olan $\pm 3\delta_y$ (± 20.01 mm yerdeğiştirme, %0.7 göreceli öteleme oranı) yatay yerdeğiştirmesi numuneye üç kez uygulanmış olup ilk çevrim çekme etkisinde CFRP'lerden artan sesler duyulmuştur. CFRP plakalardan, alt uç batı yüzde +2600 μ strain, doğu yüzde +1300 μ strain, üst uç batı yüzde +2100 μ strain, doğu yüzde +1600 μ strain civarında şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. Basınç etkisinde ise orta

bölgedeki CFRP güçlendirmeden sesler duyulmuş olup CFRP'nin üst ucunun bitiminde yerel burkulma başlangıcı belirlenmiştir. Buna ek olarak, alt bayrak levhasında $-1800\mu\text{strain}$, üst bayrak levhasında $-5900\mu\text{strain}$ şekildeğiştirme ölçülmüş, bu ölçüm üst bayrak levhasının daha fazla döndüğünü göstermiştir. İkinci çevrimde çekme etkisinde sorun görülmemiş olmasına karşın basınç etkisinde yerel burkulma aşırı düzeyde artmıştır. Yerel burkulma oluşuktan sonra kuvvette belirgin azalma tespit edilmiş olup hedef yerdeğiştirme seviyesine giderken -11.26mm 'de ve -56.8kN 'dan itibaren kuvvette azalma görülmüştür. Üçüncü yükleme çevriminde çekme etkisinde zayıflatılmış kesitlerde sorun görülmemiştir. Bu yerdeğiştirme seviyesindeki en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla $+187\text{kN}$ ve -65.5kN olup ölçülen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme 137mm ($\%5.14L$) değerine ulaşmıştır. Numunenin $\pm 3\delta_y$ 'deki davranışı Şekil 4.102'de görülmektedir.

Yatay yerdeğiştirme miktarının artırılmasıyla uygulanan $\pm 4\delta_y$ ($\pm 26.68\text{mm}$ yerdeğiştirme, $\%0.93$ görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinin çekme etkisinde pik yerdeğiştirmeye giderken yerel burkulma bölgesinde $+173\text{kN}$ seviyesinde yırtılma başlamış, bunun sonucu kuvvette azalma belirlenmiştir. Basınç etkisinde yırtık kapanarak genel burkulma oluşmuş ve en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme 152mm ($\%5.70L$) olarak ölçülmüştür. Numunenin $\pm 4\delta_y$ 'deki davranışı Şekil 4.103'de görülmektedir. İkinci yükleme çevrimi sırasında ve çekme etkisinde yırtık hızlı bir şekilde artmıştır. Bu adımdan sonra düzlem dışı yerdeğiştirme ölçer kapasitesine ulaşılacağından deneyden çıkartılmıştır. Bu ana kadar elde edilen yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.99'da görülmektedir.

$\pm 5\delta_y$ ($\pm 33.35\text{mm}$ yerdeğiştirme, $\%1.17$ görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirmesi seviyesinde ilk çekme etkisinde hedef yerdeğiştirme seviyesine ulaşmadan, yırtık aşırı şekilde artmış ve numune $+28.1\text{mm}$ yatay yerdeğiştirme seviyesinde ve $+70\text{kN}$ etkisinde, orta bölge CFRP güçlendirmesinin üst bölümden yüksek sesle kopmuştur. Orta CFRP güçlendirmesinde görünür yırtılma, liflerin ayrılması ya da kopması izlenmemiştir. Kopma sonrası numune Şekil 4.104'de görülmektedir.

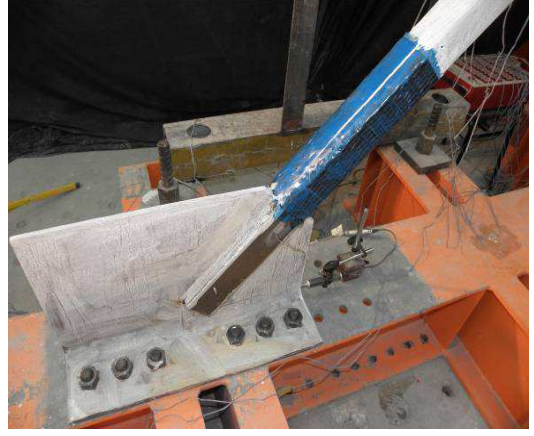
Kopma alt bayrak levhasından numunenin ortasına doğru, 1620mm uzaklıkta oluşmuş olup zayıflatılmış uç kesitler ile birleşim elemanları olan bulon ve kaynaklarda herhangi bir sorun izlenmemiştir. Deney sonunda TB-14 numunesi kümülatif olarak 20278kNmm enerji yutmuş olup yutulan kümülatif enerji-çevrim

sayısı eğrisi Şekil 4.100'de gösterilmiştir. TB-14'de ortada sınırlı bir bölgede kullanılan CFRP sargı bu bölgedeki şekildeğiştirmeleri etkin bir biçimde sınırladığından yerel burkulma sargı altında olmamış, buna karşın sargı dışına çıkarak hemen sargı bitiminde meydana gelmiştir. Çapraz sonraki adımlarda yerel burkulma olan noktada kopmuştur. Bu durum, CFRP sargı uzunluğunun yetersiz kaldığını, buna karşılık inelastik şekildeğiştirmelerin çubuk üzerine daha uygun yayıldığını göstermektedir. Yine de b/t oranının çok büyük olması nedeniyle çaprazda yerel burkulma oluşumunun geciktirilmesine karşın, engellenememiştir.





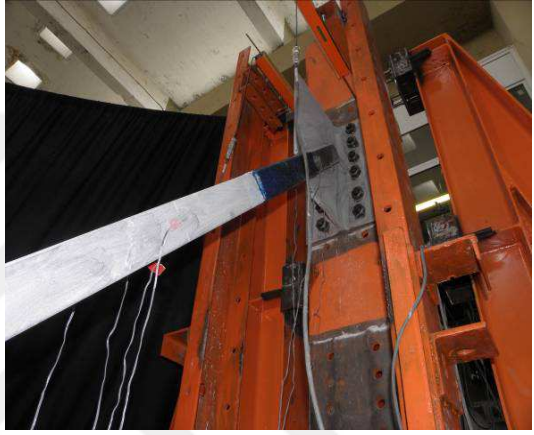
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

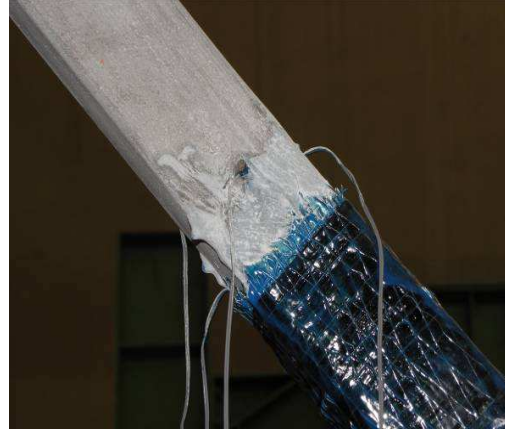


(f)

Şekil 4.101 : TB-14 numunesi deney öncesi, $1\delta_y$ (6.67mm) ve $2\delta_y$ (13.34mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşimi. (c) Deney öncesi orta bölge güçlendirmesi. (d) Deney öncesi üst uç birleşimi. (e) $-1\delta_y$ (-6.67mm)'de burkulma. (f) $-2\delta_y$ (-13.34mm)'de burkulma.



(a)



(b)



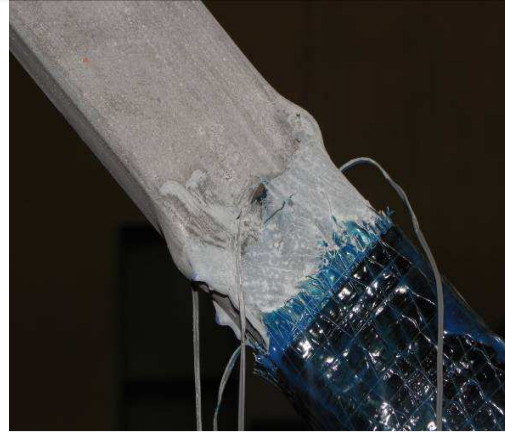
(c)



(d)



(e)



(f)

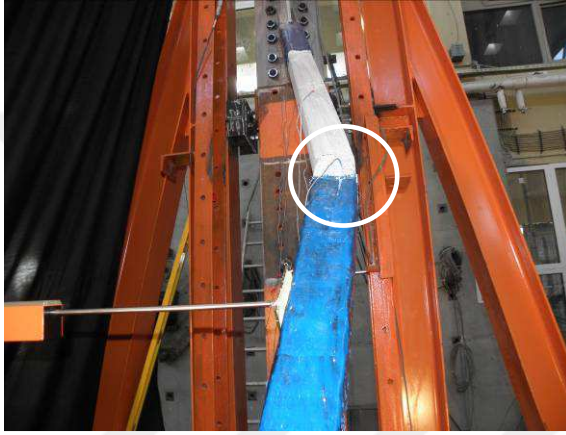
Şekil 4.102 : TB-14 numunesinin $3\delta_y$ (20.01mm) yatay yerdeğiştirme seviyesindeki davranışı: (a) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de burkulma. (b) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de yerel burkulma başlangıcı. (c) $+3\delta_y$ (+20.01mm)'de ikinci yükleme çevriminde çekme etkisinde davranış. (d) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de ikinci çevrimde basınç etkisinde dirsek oluşumu. (e) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de yerel burkulma oluşan bölge. (f) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de yerel burkulma bölgesinin yakından görünüşü.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.103 : TB-14 numunesinin $4\delta_y$ (26.68mm) yatay yerdeğiştirme seviyesindeki davranışı: (a) $+4\delta_y$ (+26.68mm)'de yerel burkulma bölgesinde köşelerde yırtık başlangıcı. (b) $+4\delta_y$ (+26.68mm)'de yerel burkulma bölgesinde köşelerde yırtığın ilerlemesi. (c) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de yerel burkulma. (d) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de genel burkulma. (e) $+4\delta_y$ (+26.68mm)'de ikinci çevrimde yırtığın ilerlemesi. (f) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de ikinci çevrimde yerel burkulma oluşması.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.104 : TB-14 numunesi kopma sonrası görünüşleri: (a,b,c,d) Kopan bölge görünüşleri. (e) Kopma sonrası alt uç birleşimi. (f) Kopma sonrası üst uç birleşimi.

4.4.14 TB-15 numunesi (Kutu 70x70x3+Uçlar: CFRP plaka ve kumaş + Orta:%33L CFRP sargı)

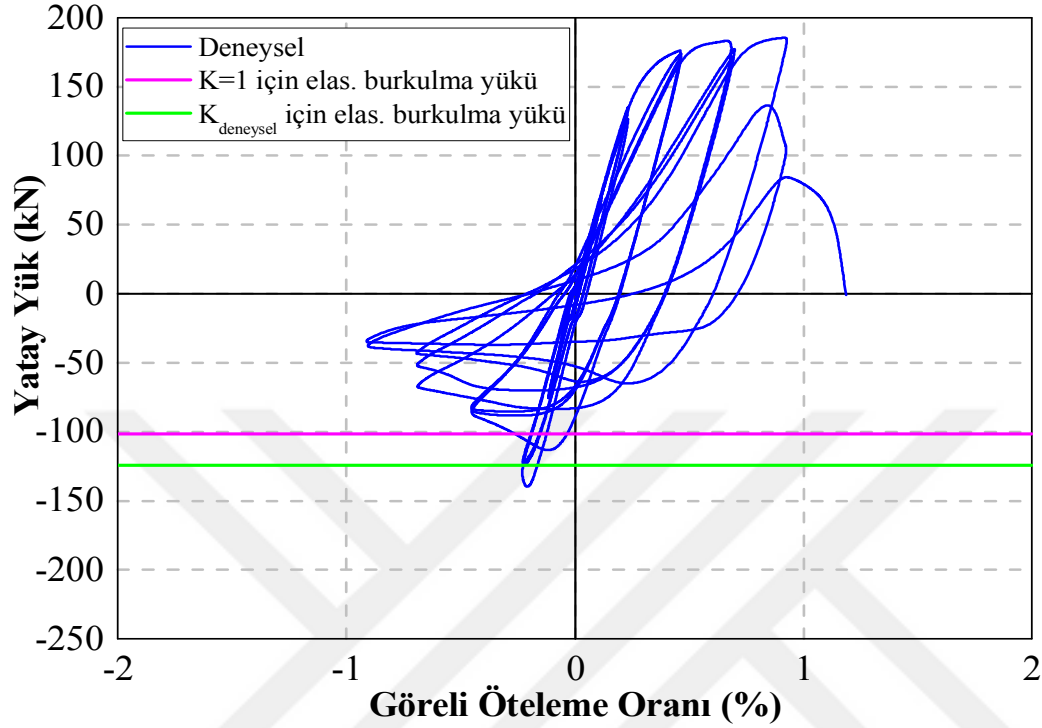
Kutu 70x70x3 enkesit ölçülerinde ve L=2667mm uzunluğundaki TB-15 numunesi de, karşılaştırma yapabilmek için, TB-13 ve TB-14 numunesiyle aynı yükleme protokolüyle denenmiştir. Dolayısıyla, bu numune ile grubundaki diğer numunelerin görelî histeretik enerji yutma kapasiteleri karşılaştırılacaktır. Deneysel olarak elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.105’de, yükleme protokolü ise Şekil 4.106’de gösterilmiştir. Numunenin deney öncesi görünüşleri Şekil 4.109-a, b, c ve d’de görölmektedir.

Elastik bölgede TB-15 numunesine, ilk olarak $\pm 0.25\delta_y$ (± 1.67 mm, %0.06 görelî öteleme oranı) daha sonra $\pm 0.50\delta_y$ (± 3.34 mm, %0.12 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirmeleri sırasıyla üçer çevrim olarak uygulanmıştır. İkinci elastik yerdeğiştirme seviyesinde, basınç etkisinde doğu yönünde 0.20mm (%0.007L) düzlem dışı yatay yerdeğiştirme ölçölmüştür. Numunenin elastik davrandığı yerdeğiştirme seviyelerinde, uçtaki zayıflatılmış kesit etrafında ve orta bölgedeki CFRP elemanlarla, birleşim elemanları olan kaynak ve bulonlarda beklendiğı üzere herhangi bir sorun gözlenmemiştir.

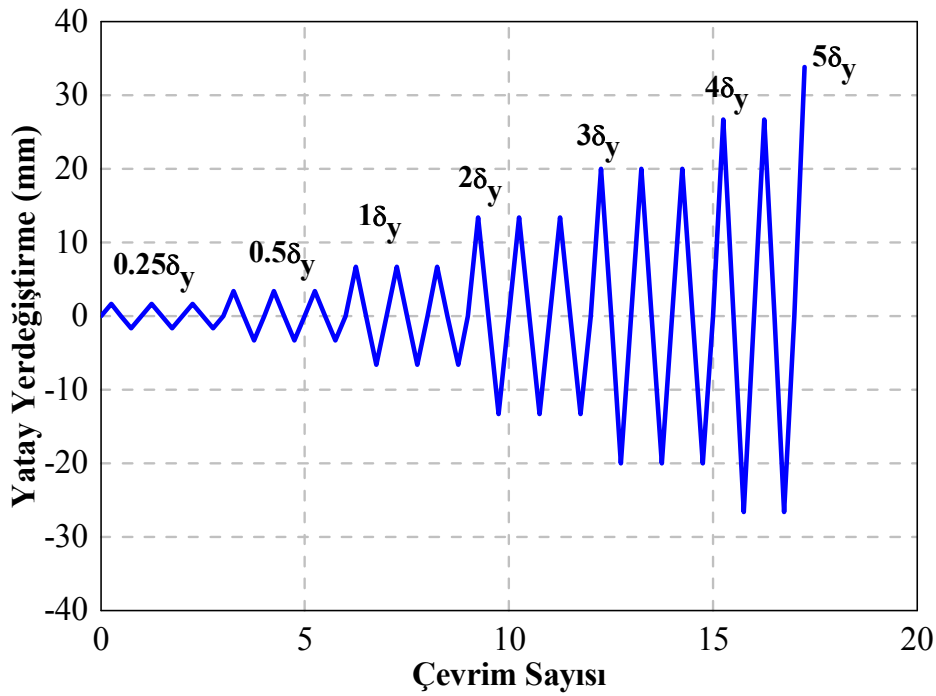
± 6.67 mm ($\pm 1\delta_y$, %0.23 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme adımının ilk çevriminde çekme etkisinde TB-15 numunesi üzerinde çekmede +127.1kN yatay kuvvet ve ortalama +1400~+1500 μ strain şekildeğiştirme ölçölmüştür. Basınç etkisinde numunenin burkulma yükü -141kN olarak belirlenmiş olup numunenin burkulmuş durumu Şekil 4.109-e’de görölmektedir. Beklendiğı gibi, burkulmadan sonra yükte bir düşme gözlenmiştir. Bu seviyede numunede 27mm (%1.01L) düzlem dışı yerdeğiştirme ölçölmüştür. İkinci çevrimde çekme kuvveti CFRP elemanların katkısıyla artarak +135.4kN’a (%6.5 oranında artış) ulaşmış şekildeğiştirmeler yine +1500 μ strain civarında kalmıştır. CFRP güçlendirme elemanları uygulanan son yükleme çevriminde yükü arttırmamasına karşın, yükün aynı seviyede kalmasını sağlamıştır. Bu yerdeğiştirme adımında basınç etkisinde ölçölen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme miktarı 32.6mm (%1.22L)’dir.

Yerdeğiştirme miktarının arttırılmasıyla $\pm 2\delta_y$ (13.34mm, %0.46 görelî öteleme oranı) seviyesine ulaşılmıştır. Çekme ve basınç etkilerinde CFRP elemanlardan sesler duyulmuştur. Şekil 4.109-f’de numunenin ilerleyen burkulmuş durumu görölmektedir. Basınç etkisinde alt ve üst bayrak levhaları belirgin şekilde doğuya

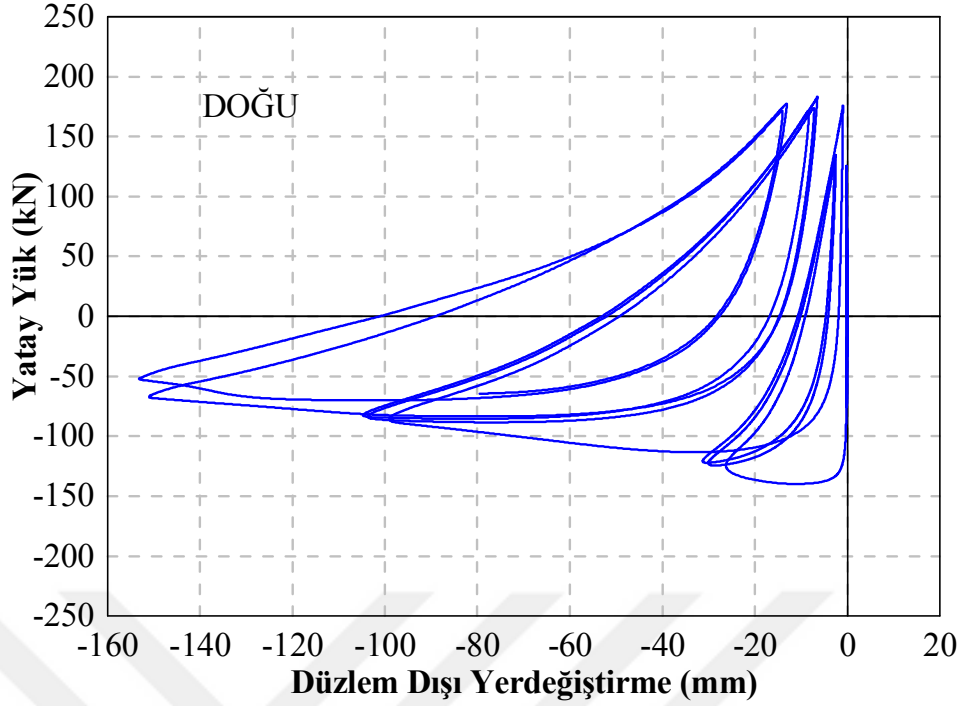
dönmüş olup bu durum Şekil 4.110-a'da görülmektedir. Çekme etkisinde numunede 7mm (%0.26L) kalıcı düzlem dışı yerdeğiştirme belirlenmiş olup bu yerdeğiştirme adımıyla ölçülen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme 106mm (%3.97L)'dir.



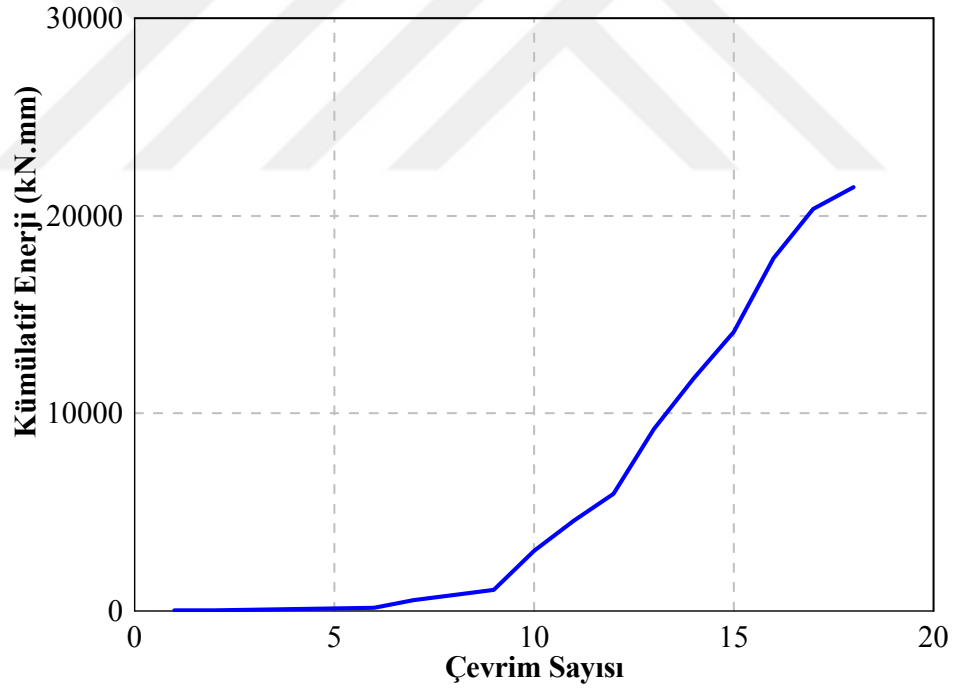
Şekil 4.105 : TB-15 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi.



Şekil 4.106 : TB-15 numunesi yükleme protokolü.



Şekil 4.107 : TB-15 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil 4.108 : TB-15 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

$\pm 3\delta_y$ (20.01mm, %0.70 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde Şekil 4.110-b'de de görülen ilk çekme adımında orta CFRP sağısından sesler duyulmuştur. Numune üzerindeki alt bölgedeki şekildeğiştirmeler +7800 μ strain, orta bölgedeki şekildeğiştirmeler +4500 μ strain, üst bölgedekiler ise +7000 μ strain civarındadır. Özellikle orta bölgede CFRP altındaki şekildeğiştirmeler diğer bölgedekilerin

yaklaşık yarısı mertebesinde. İlk basınç adımında orta bölgede herhangi bir sorun gözlenmemiş olup bu durum Şekil 4.110-c'de görülmektedir. İkinci basınç çevriminde pik yerdeğiştirme seviyesine giderken Şekil 4.110-d'de görüldüğü gibi orta bölgede yerel burkulma oluşmaya başlamıştır. Bununla birlikte orta bölgedeki CFRP sargıda içeri çökme ve numunenin üst ve alt bölümlerinde dışa doğru şişme gözlenmiştir. Numunedeki şişme etkisinden dolayı CFRP'yi yapıştırmada kullanılan epoksi rengi değişerek beyazlaşmaya başlamış ve bu bölgede yırtılma başlangıcı belirlenmiştir. Bu seviyede 153mm (%5.74L) düzlem dışı yerdeğiştirme ölçülmüş olup numuneye ilişkin yatay yük düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.107'de verilmiştir. Ayrıca üçüncü yükleme çevriminde, çekme etkisinde orta bölgede CFRP'sinde enine doğrultuda Şekil 4.110-e'de görülen yırtıklar ilerlemiştir. Aynı yükleme çevriminde, basınç etkisinde yerel burkulma bölgesinde oluşan gamze iyice belirginleşmiş ve Şekil 4.110-f'de görüldüğü gibi genel burkulma sırasında dirsek oluşumu gözlenmiştir. Bu sırada CFRP'lerden sesler duyulmuştur.

Sonraki yerdeğiştirme adımı olan $\pm 4\delta_y$ (26.68mm, %0.92 görelî öteleme oranı) seviyesinde ilk yükleme çevriminde çekme etkisinde orta bölgedeki CFRP'lerden gelen seslerde artış olmuştur. Basınç etkisinde, Şekil 4.111-a ve b'de görülen yerel burkulma bölgesinde oluşan şişkinliğin üst bölümünde çapraz ekseni doğrultusunda Şekil 4.111-c'de görüldüğü gibi CFRP'de yırtık oluşmuş olup bu bölgede CFRP'lerde enine ayrılmalar belirlenmiştir. İkinci yükleme çevriminde, çekme etkisinde orta bölgedeki CFRP sargının yırtılmasıyla birlikte çelik numunede de yırtılma başlangıcı gözlenmiş olup bu durum Şekil 4.111-d'de verilmiştir. Basınç etkisinde numunenin genel burkulmasının (Şekil 4.111-e) yanında orta bölgede aşırı yerel burkulma oluşması sonucunda CFRP sargı yırtılmıştır (Şekil 4.111-f).

Numune $+5\delta_y$ (33.35 mm, %1.15 görelî öteleme oranı) seviyesinde, Şekil 4.112-a'da görüldüğü gibi ilk çekme pikine giderken kopmuştur. Kopma sonrası numunenin durumu Şekil 4.112-b, c, d, e ve f'de görülmektedir. Kopma anındaki yerdeğiştirme +33.87mm olup kopma yükü +44.9kN olarak tespit edilmiştir. Deney sonunda TB-15 numunesi kümülatif olarak 21442kNmm enerji yutmuş olup ve yutulan kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi Şekil 4.108'de gösterilmiştir.



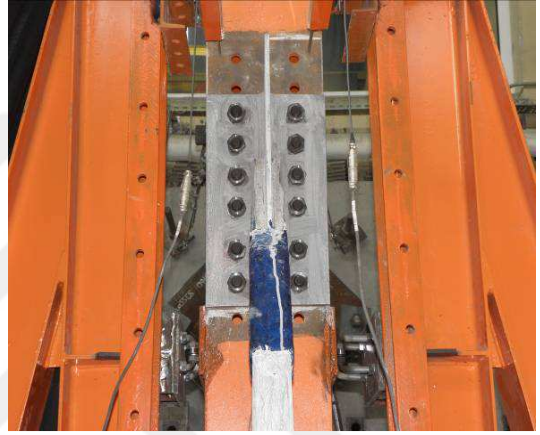
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.109 : TB-15 numunesinin deney öncesi durumu, $1\delta_y$ (6.67mm) ve $2\delta_y$ (13.34mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşimi. (c) Deney öncesi orta bölge güçlendirmesi. (d) Deney öncesi üst uç birleşimi. (e) $-1\delta_y$ (-6.67mm)'de burkulma. (f) $-2\delta_y$ (-13.34mm)'de burkulma.



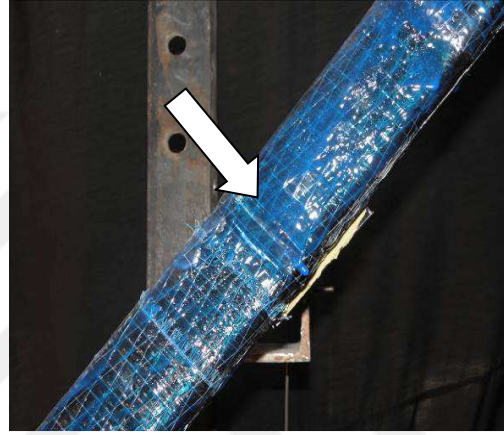
(a)



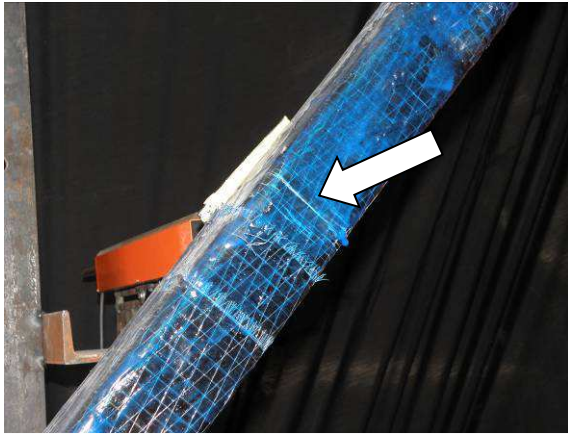
(b)



(c)



(d)

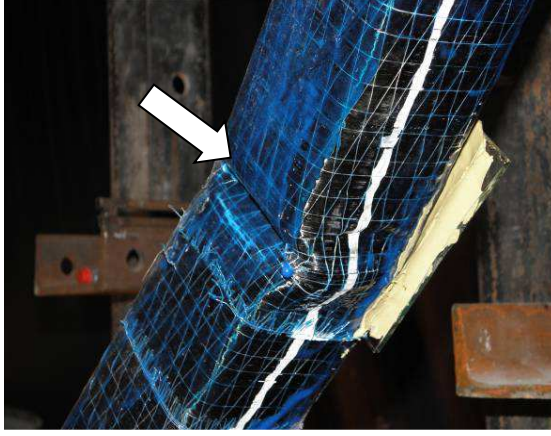


(e)

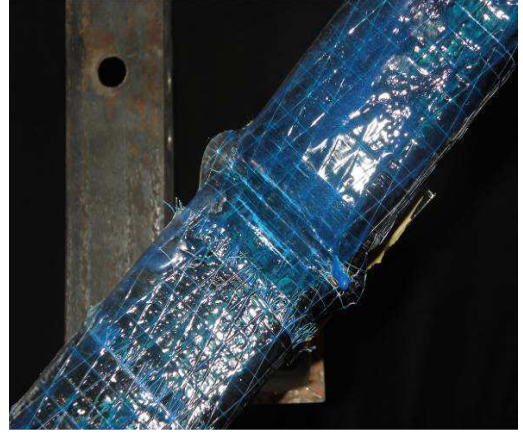


(f)

Şekil 4.110 : TB-15 numunesinin $2\delta_y$ (13.34mm) ve $3\delta_y$ (20.01mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-2\delta_y$ (-13.34mm)'de alt gusede dönme. (b) $+3\delta_y$ (+20.01mm)'de görünüş. (c) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de ilk çevrimde burkulma. (d) $-3\delta_y$ (20.01mm)'de ikinci çevrimde yerel burkulma başlangıcı. (e) $+3\delta_y$ (+20.01mm)'de orta bölgede CFRP'de enine yırtılma. (f) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de üçüncü çevrimde yerel burkulmanın belirginleşmesi ve dirsek oluşumu.



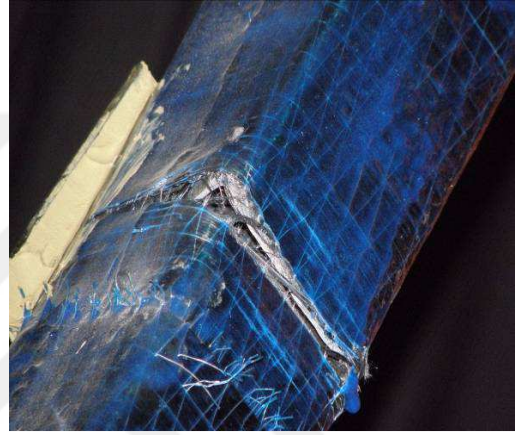
(a)



(b)



(c)



(d)

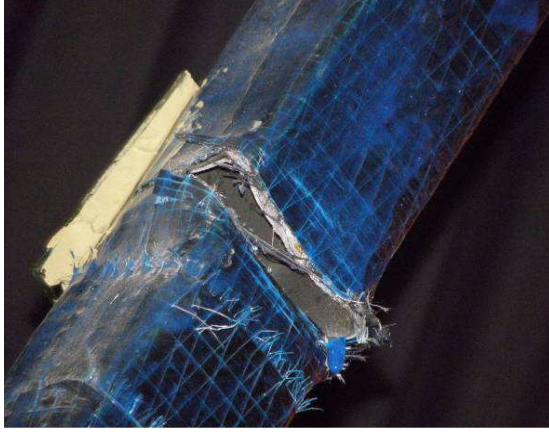


(e)



(f)

Şekil 4.111 : TB-15 numunesinin $4\delta_y$ (26.68mm) yatay yerdeğiştirme seviyesinde davranışı: (a) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de yerel burkulma bölgesinde aşırı içe çökme. (b) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de yerel burkulma bölgesinde yukarı ve aşağı doğru şişme. (c) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de yerel burkulma bölgesinde üst ve alt yüzlerde CFRP'de yırtılma. (d) $+4\delta_y$ (+26.68mm)'de ikinci çevrimde numunenin yırtılmaya başlaması. (e) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de ikinci çevrimde burkulma. (f) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de ikinci çevrimde yerel burkulma bölgesi alt yüzde CFRP'nin yırtılması.



(a)



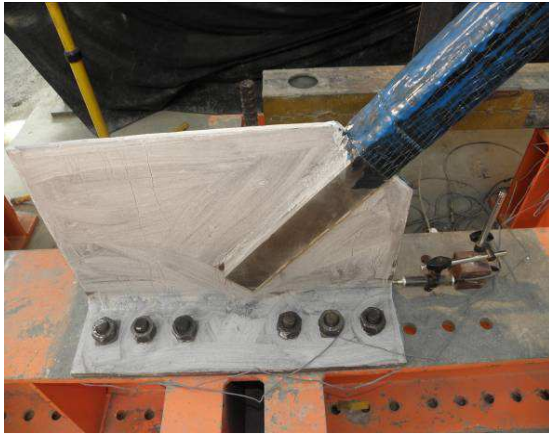
(b)



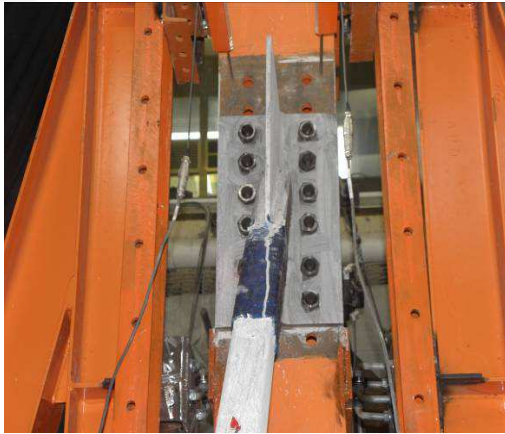
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.112 : TB-15 numunesinin $+5\delta_y$ (+33.35mm) yatay yerdeğiştirme seviyesine giderken davranışı ve kopma sonrası görünümleri: (a) $+5\delta_y$ (+33.35mm) pikine giderken yırtığın ilerlemesi. (b,c,d) Kopan bölge görünümleri. (e) Kopma sonrası alt uç birleşimi. (f) Kopma sonrası üst uç birleşimi.

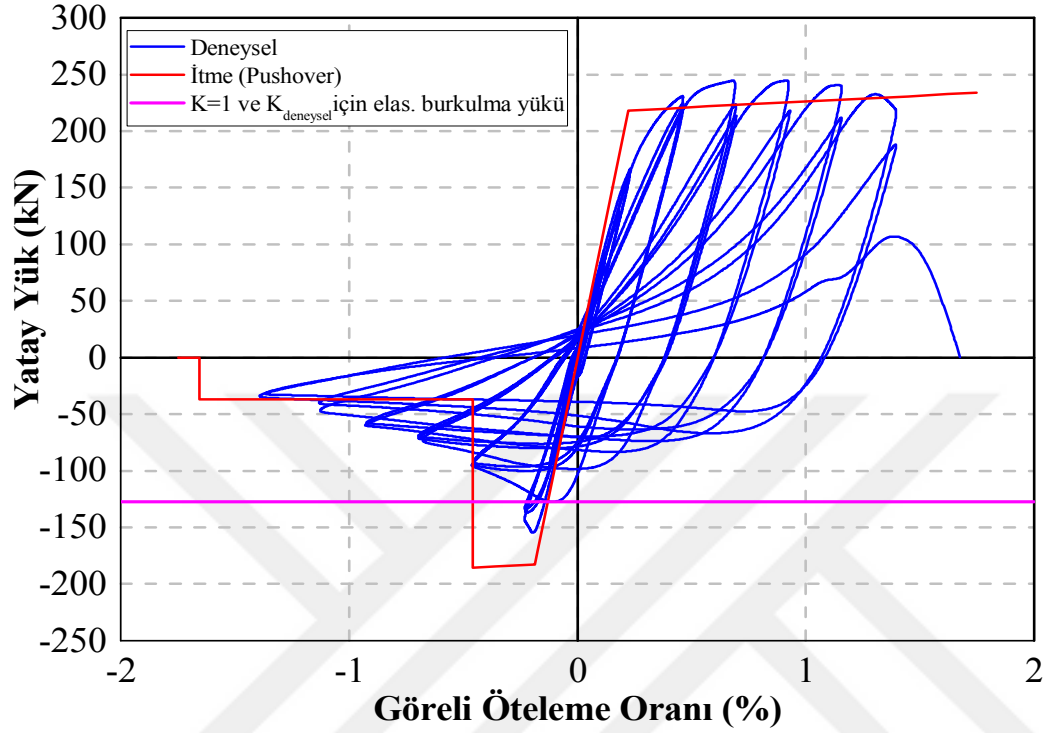
4.4.15 TB-16 numunesi (Kutu 70x70x4 - Yalın)

Kutu 70x70x4 kesitli, $L=2667\text{mm}$ uzunluğundaki TB-16 numunesine ilk olarak çekme etkisiyle deneye başlanmıştır. Deneysel olarak elde edilen yatay yük-görelî ötelenme oranı histeretik ve itme analizi eğrileri Şekil 4.113'de, yükleme protokolü Şekil 4.114'de gösterilmiştir. Numunenin deney öncesi genel görünüşleri Şekil 4.117-a ve b'de verilmiştir.

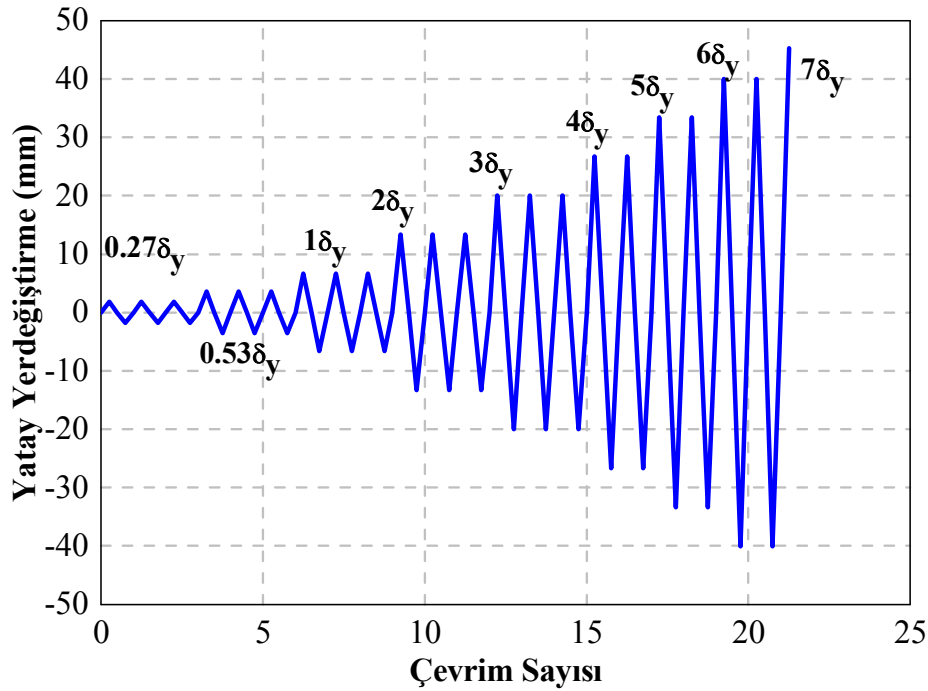
TB-16 numunesi, tahmin edilen akma yerdeğiştirmesinin $1/3$ 'ündeki ($\pm 1.78\text{mm}$, $\%0.062$ görelî öteleme oranı) etkisindeki ilk üç çevrimde ve sonraki adım olan tahmin edilen akma yerdeğiştirmesinin $2/3$ 'ündeki ($\pm 3.56\text{mm}$, $\%0.125$ görelî öteleme oranı) üç çevrimde doğrusal elastik davranmıştır. $-2/3\delta_{yt}$ seviyesinde batıya doğru 0.8mm ($\%0.03L$) düzlem dışı bir hareket belirlenmiş olup bu yükleme seviyesi sonunda hidrolik vereni reaksiyon duvarına bağlayan ankrajlar kontrol edilmiştir. Numunenin elastik çevrimlerdeki durumu Şekil 4.117-c'de görülmektedir. Deney öncesi yapılan itme analiziyle tahmin edilen akma yerdeğiştirmesine ulaşıldığında deney sırasında sürekli olarak izlenen yatay yük-yerdeğiştirme eğrisinde yataylaşma olmadığı görülmüştür. Bundan sonra yatay yerdeğiştirme miktarı deney kontrol odasında eğri incelenerek arttırılmış ve yatay yük-yerdeğiştirme eğrisinin yataylaştığı deneysel akma yerdeğiştirmesi $\pm 6.67\text{mm}$ ($\pm 1\delta_y$, $\%0.233$ görelî öteleme oranı) olarak belirlenmiş ve bu seviyedeki burkulma Şekil 4.117-d'de verilmiştir. Bu yerdeğiştirme seviyesinde, çekme etkisinde zayıflatılmış uç kesitlerde sorun gözlenmemiştir. Çekme etkisinde numune üzerinde $+1200\sim 1300\mu\text{strain}$ civarında şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. Basınç etkisinde ise numune batıya doğru burkulmuş olup alt ve üst bayrak levhalarında da batıya doğru eğilme başlangıcı görülmüştür. Orta bölgede en fazla 40mm ($\%1.5L$) düzlem dışı yerdeğiştirme ölçülmüştür. Bu yerdeğiştirme seviyesinde elde edilen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla $+167.3\text{kN}$ ve -142.5kN 'dur.

$\pm 13.34\text{mm}$ ($\pm 2\delta_y$, $\%0.47$ görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde çekme etkisinde numune üzerinde $+2200\mu\text{strain}$ 'in üzerinde şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. Çekme etkisi altında numune orta bölgesinde kalıcı düzlem dışı yerdeğiştirme belirlenmiş olup bu seviyedeki en büyük değeri 7.6mm ($\%0.29L$)'dir. Şekil 4.117-e'de numunenin çekme etkisindeki durumu görülmektedir. Zayıflatılmış uç kesitlerde, kaynak ve bulonlarda herhangi bir sorun görülmemiştir. Basınç

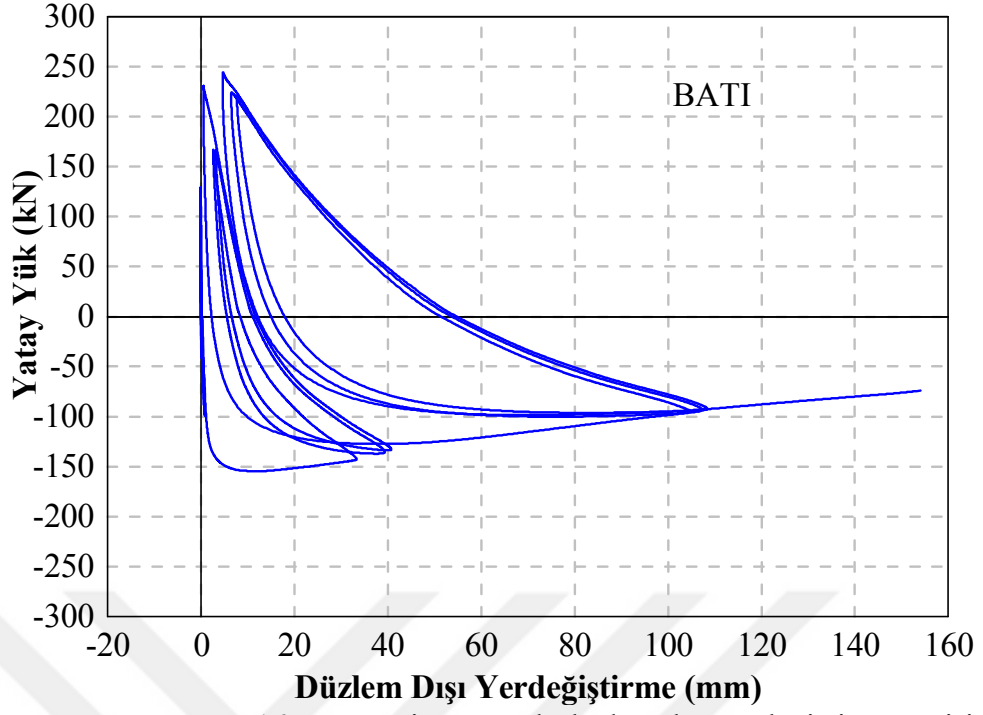
etkisinde ise bayrak levhalarında belirgin şekilde dönme gözlenmiş ve numunedeki burkulma artmıştır (Şekil 4.117-f). Bu seviyede en fazla 110mm (%4.12L) düzlem dışı yerdeğiştirme ve numunenin orta bölgesinde $-12300\mu\text{strain}$ civarında



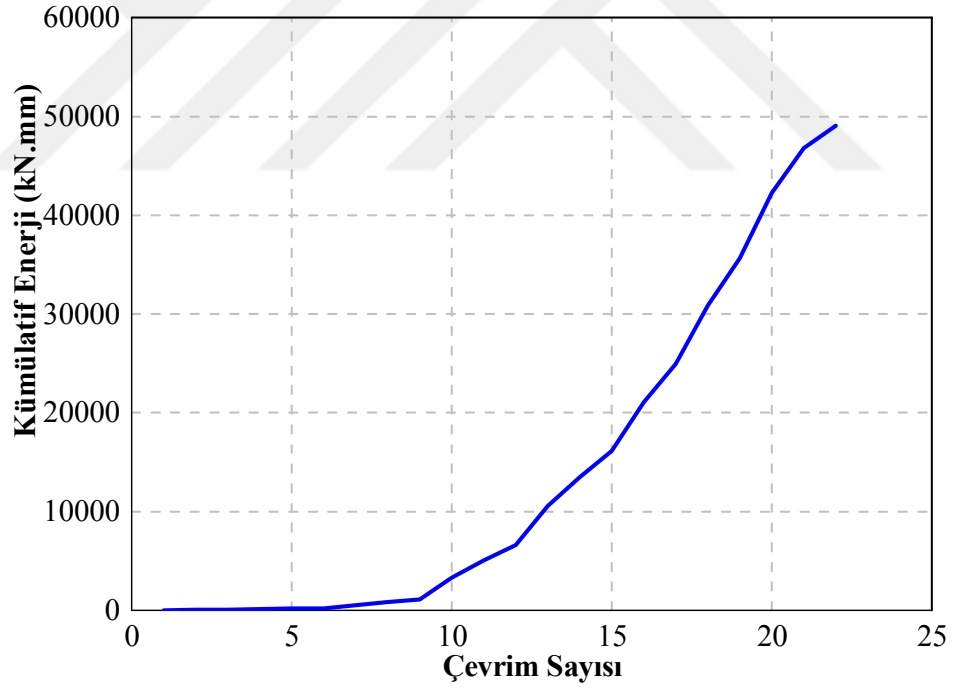
Şekil 4.113 : TB-16 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi ve itme eğrisi.



Şekil 4.114 : TB-16 numunesi yükleme protokolü.



şekil 4.115 : TB-16 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.



şekil 4.116 : TB-16 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

şekildeğiştirmeler lçlmştr. Bu seviyede lçlen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +231kN ve -94.8kN'dur.

Üç çevrim olarak uygulanan ve son yerdeğiştirme adımı olan $\pm 3\delta_y$ ($\pm 20.01\text{mm}$, %0.75 görelı öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde, çekme etkisinde numuneye ilişkin yatay yük-yerdeğiştirme eğrisi yataylaşmış olup numune çekme

etkisinde akmış ve numune üzerindeki şekildeğiştirmeler $+3600\mu\text{strain}$ değerine ulaşmıştır (Şekil 4.118-a). Numunenin zayıflatılmış kesitlerinde ve birleşim bölgelerinde herhangi bir sorun görölmemiştir. Basınç etkisinde numunedeki burkulma aşırı artmış olup Şekil 4.118-b ve c'de numunenin durumu görölmektedir. Deney süresince ölçölen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme Şekil 4.115'de göröldüğü gibi 153mm (%5.74L)'dir. Bayrak levhalarındaki dönme aşırı değerlere varmıştır. Orta bölgede $-24000\mu\text{strain}$ civarında şekildeğiştirmeler elde edilmiştir. Bu yerdeğiştirme seviyesinde en fazla $+245.1\text{kN}$ çekme, -74kN basınç kuvveti ölçölmüştür.

$\pm 4\delta_y$ ($\pm 26.68\text{mm}$, %1 görelı öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesi iki çevrim olarak numuneye uygulanmıştır. Bu seviyede numuneye etkiyen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla $+244.5\text{kN}$ ve -59.2kN 'dur. Çekme etkisinde sıfır noktasından geçilmesine karşın bayrak levhalı birleşimlerde aşırı deformasyon gözlenmiştir. Bunun yanında alt uç zayıflatılmış kesit bölgesinin üst kısmında hafif boya kabarması belirlenmiş olup numunenin genel durumu Şekil 4.118-d'de görölmektedir. Basınç etkisinde numunede hem düzlem içi hem de düzlem dışı birleşik bir burkulma modu izlenmiştir (Şekil 4.118-e ve f).

Sonraki $\pm 5\delta_y$ ($\pm 33.35\text{mm}$, %1.25 görelı öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme adımında çekme etkisinde guselerdeki kalıcı yerdeğiştirmeler aşırı şekilde belirgin duruma gelmiştir. Alt zayıflatılmış kesit üst kısmında hafif boya kabarması devam etmiştir. Üst zayıflatılmış kesit etrafında ise Şekil 4.119-a'da göröldüğü gibi boğum oluşmuştur. Çekme etkisinde ulaşılan en büyük kuvvet $+239.8\text{kN}$ 'dur. Basınç etkisinde genel burkulma ve orta bölgedeki ilerleyen yerel burkulma sırasıyla Şekil 4.119-b ve c'de görölmektedir. Boya dökölmesi belirgin şekilde devam etmiştir. Ulaşılan en büyük basınç kuvveti ise -47.8kN 'dur.

$\pm 40.02\text{mm}$ ($\pm 6\delta_y$, %1.50 görelı öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesine ulaşıldığında, ilk çevrim basınç etkisinde yerel burkulma Şekil 4.119-d'de göröldüğü gibi aşırı duruma gelmiştir. İkinci çevrimde, Şekil 4.119-e'de gösterildiği gibi,

çekme etkisinde orta bölgede numunenin doğu yüzünde köşelerden başlayan yırtıklar gözlenmiş olmasına karşın hedef yerdeğiştirmeye ulaşılmıştır. Basınç etkisinde orta bölgede aşırı yerel burkulma ve boya dökülmesi devam etmiş olup orta bölgedeki yırtık kapanarak numune burkulmuştur (Şekil 4.119-f).

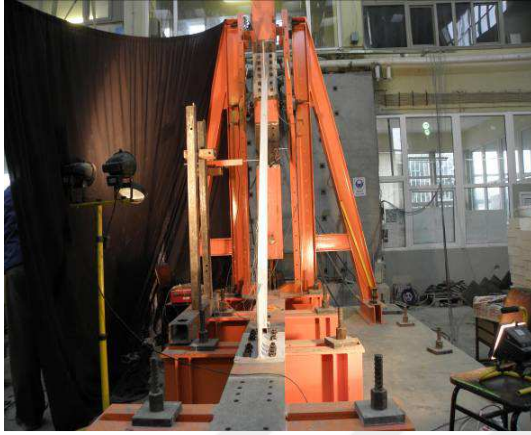
Son yerdeğiştirme seviyesi olan $\pm 46.69\text{mm}$ ($\pm 7\delta_y$, %1.75 görelî öteleme oranı)'nin ilk çekme adımında üst kesitte yırtılma ilerlemiştir. Bunun yanında üst zayıflatılmış kesitte boğum artmıştır. Çekme etkisinde orta bölgedeki yırtığın ilerlemesi Şekil 4.120-a'da görölmektedir. Orta bölgedeki yırtık (Şekil 4.120-b) uç bölgelerdekilere göre daha hızlı ilerlediğinden pik yerdeğiştirme seviyesine ulaşılardan, +45.2mm (%1.58 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde +62kN çekme kuvveti etkisinde numune ortadan kopmuştur. Kopma sonrasında numunenin durumu Şekil 4.120-c,d,e ve f'de görölmekte olup deney süresince numune, Şekil 4.116'da görölebileceğı gibi, toplam 49089kNmm enerji tüketmiştir.



(a)



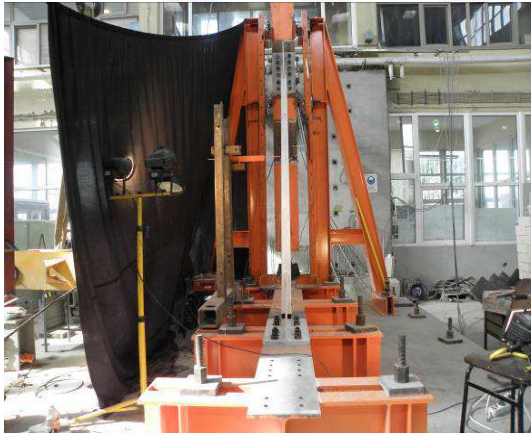
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.117 : TB-16 numunesinin deney öncesi görünüşleri, elastik çevrimlerdeki, $1\delta_y$ (6.67mm) ve $2\delta_y$ (13.34mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerindeki davranışı:

- (a) Deney öncesi genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşimi görünüşü.
(c) Elastik yükleme çevrimlerinde numunenin durumu. (d) $-1\delta_y$ (-6.67mm)'de genel burkulma. (e) $+2\delta_y$ (+13.34mm)'de numunenin davranışı. (f) $-2\delta_y$ (-13.34mm)'de genel burkulma.



(a)



(b)



(c)



(d)

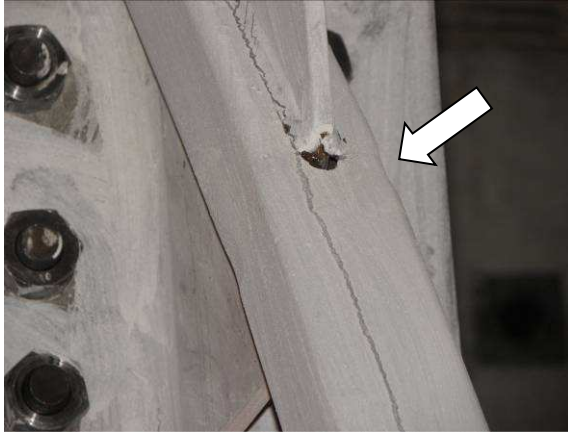


(e)



(f)

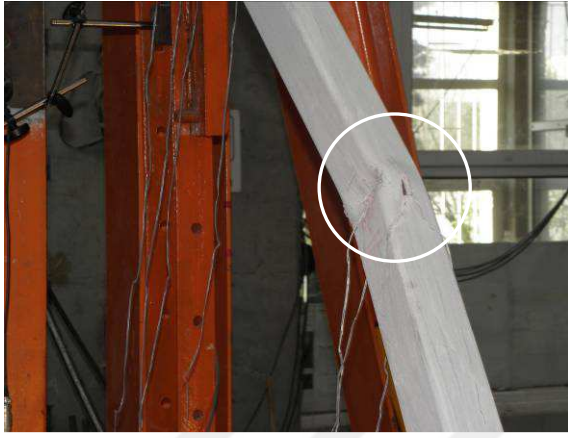
Şekil 4.118 : TB-16 numunesinin $3\delta_y$ (20.01mm) ve $4\delta_y$ (26.68mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerindeki davranışı: (a) $+3\delta_y$ (+20.01mm)'de numunenin davranışı. (b) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de genel burkulma. (c) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de ilk çevrim basınç etkisinde orta bölge. (d) $+4\delta_y$ (+26.68mm)'de numunenin davranışı. (e) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de genel burkulma. (f) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de alt uç bayrak levhası dönmesi.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.119 : TB-16 numunesinin $5\delta_y$ (33.35mm) ve $6\delta_y$ (40.02mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerindeki davranışı: (a) $+5\delta_y$ (+33.35mm)'de üst uç zayıflatılmış kesit etrafında boğum oluşması. (b) $-5\delta_y$ (-33.35mm)'de genel burkulma. (c) $-5\delta_y$ (-33.35mm)'de yerel burkulma (d) $-6\delta_y$ (-40.02mm)'de yerel burkulma. (e) $+6\delta_y$ (+40.02mm)'de ikinci çevrim etkisinde orta bölgedeki yırtılma başlangıcı. (f) $-6\delta_y$ (-40.02mm)'de ikinci çevrim etkisinde basınç etkisinde yırtığın kapanarak yerel burkulma oluşması.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.120 : TB-16 numunesinin $7\delta_y$ (46.69mm) seviyesine giderken davranışı ve kopma sonrası görüşler: (a) $+7\delta_y$ (+46.69mm) çekme pikine giderken orta bölgedeki yırtığın durumu. (b) $7\delta_y$ (+46.69mm) çekme pikine giderken kopma öncesi orta bölge. (c) Kopma sonrası orta bölge. (d) Kopma sonrasında alt utaki gusedeki kalıcı şekildegıştirme. (e) Alt uç zayıflatılmış kesitin kopma sonrası görüşü. (f) Kopma sonrası üst uç zayıflatılmış kesit bölgesindeki boğum oluşumu ve yırtığın durumu.

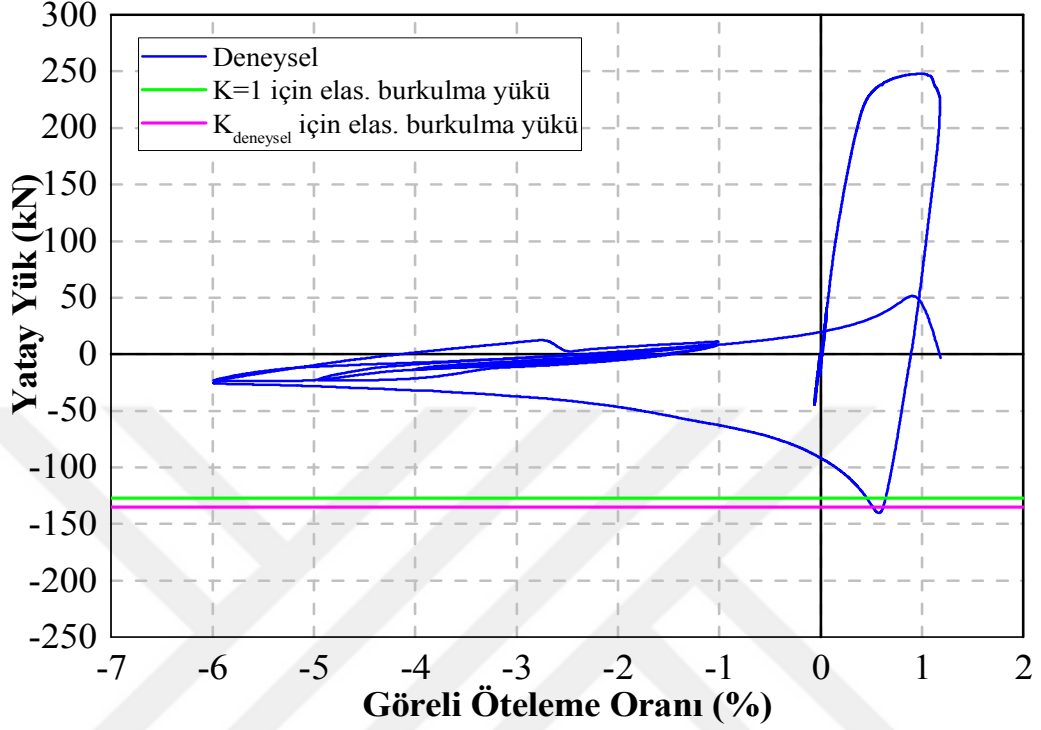
4.4.16 TB-17 numunesi (Kutu 70x70x4 - Yalın)

Yükleme geçmişinin etkinliğini görmek amacıyla yakın fay etkisi yükleme protokolüyle denenen Kutu 70x70x4 kesitli ve $L=2667\text{mm}$ uzunluğundaki TB-17 numunesine büyük yerdeğiştirmeler uygulanmıştır. Bu yerdeğiştirmelerin ölçülebilmesi için tepe ölçüm noktasında toplamda 300mm ($\pm 150\text{mm}$) yerdeğiştirme kapasiteli iki adet SDP-300 yerdeğiştirme ölçer kullanılmıştır; düzlem dışı için ise toplam 200mm ($\pm 100\text{mm}$) yerdeğiştirme kapasiteli SDP-200 yerdeğiştirme ölçer kullanılmış ve numunenin deney öncesi durumu Şekil 4.125-a, b ve c’de verilmiştir.

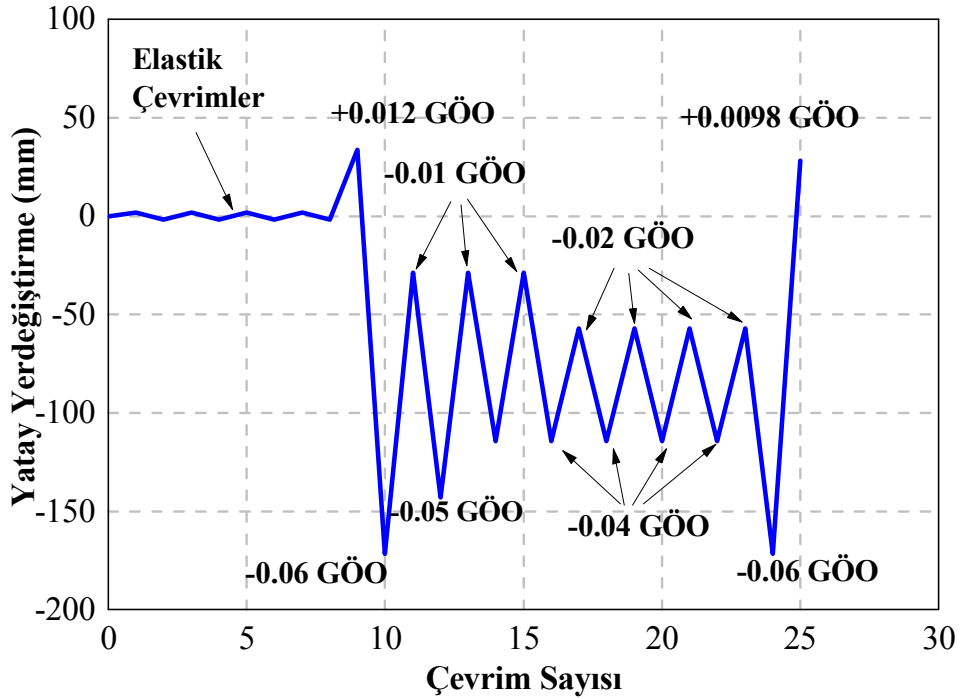
İlk üç çevrimde tahmin edilen akma yerdeğiştirmesinin $1/3$ ’ü kadar $\pm 1.77\text{mm}$ ($\pm \delta_{yt}/3$, %0.06 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme uygulanarak elastik rijitlik belirlenmiştir. Bu elastik yerdeğiştirme bölgesinde numunede ve birleşimlerde sorun gözlenmemiştir.

Yakın fay yüklemesi, üç çevrim olarak yüklenen elastik yüklemeler sonrasında başlatılmıştır. Numuneye ilişkin yatay yük-görelî öteleme histeretik eğrisi ve yükleme protokolü sırasıyla Şekil 4.121 ve Şekil 4.122’de görülmektedir. İlk olarak çekme ile başlanılmış olup hedef görelî ötelenme oranı %2 ($+57.16\text{mm}$)’dir. Bu hedef yerdeğiştirmeye ulaşmak için yaklaşık 2-3mm’lik artışlarla hidrolik verenle yatay yerdeğiştirme uygulanmıştır. $+8\text{mm}$ (%0.28 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde $+145\text{kN}$ çekme kuvvetine ulaşılmış olup yerdeğiştirme arttırılmaya devam edilmiştir. $+210\text{kN}$ çekme kuvvetine ulaşıldığında yaklaşık $+12\text{mm}$ (%0.42 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesine ulaşılmış olup numune üzerinde $+2200\mu\text{strain}$ civarında şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. Yerdeğiştirme seviyesi $+15\text{mm}$ (%0.52 görelî öteleme oranı)’ye ulaşıldığında şekildeğiştirmeler $+2700\mu\text{strain}$ civarına yükselmiş, bu seviyede yatay kuvvet $+230\text{kN}$ ölçülmüştür. Numunenin $+25\text{mm}$ (%0.87 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesindeki durumu Şekil 4.125-d’de görülmektedir. Yerdeğiştirme $+32\text{mm}$ (%1.12 görelî öteleme oranı) ulaştığında kuvvet $+245\text{kN}$ ’a ulaşmıştır. Bu seviyede üst ve alt zayıflatılmış kesitlerde belirgin boğumlar oluşmuştur (Şekil 4.125-e). Hidrolik verenin yük kapasitesi $\pm 250\text{kN}$ olduğundan bu değere ulaşıldığında sistem kendini otomatik olarak kapatmaktadır. Bu yüzden yerdeğiştirme miktarı daha fazla arttırılmayıp, hedeflenen yerdeğiştirme değerine ulaşmadan bu seviyeden geriye dönmek zorunda kalınmıştır. Geriye dönüş sırasında, çekme etkisinde numunenin boyunun aşırı uzamasından dolayı, $+15.1\text{mm}$

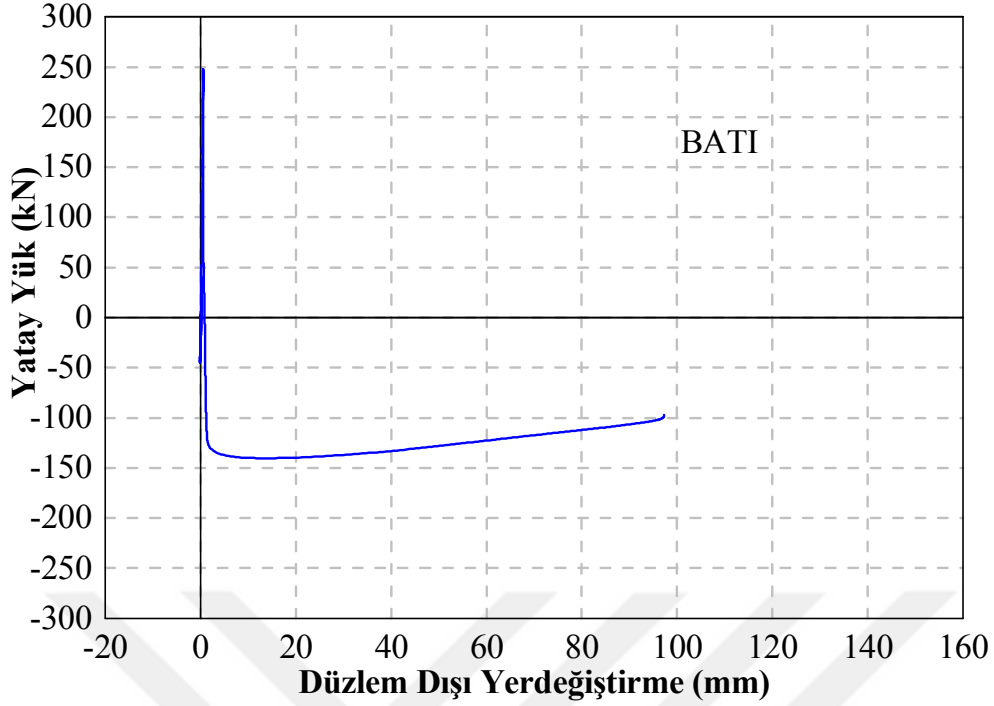
(%0.53 görel öteleme oranı)'de ve +140 kN çekme etkisinde numune burkulmuştur (Şekil 4.125-f). Bu seviyede düzlem dışı yerdeğiştirme 30mm (%1.12L) olarak ölçülmüş olup numuneden sesler gelmiştir.



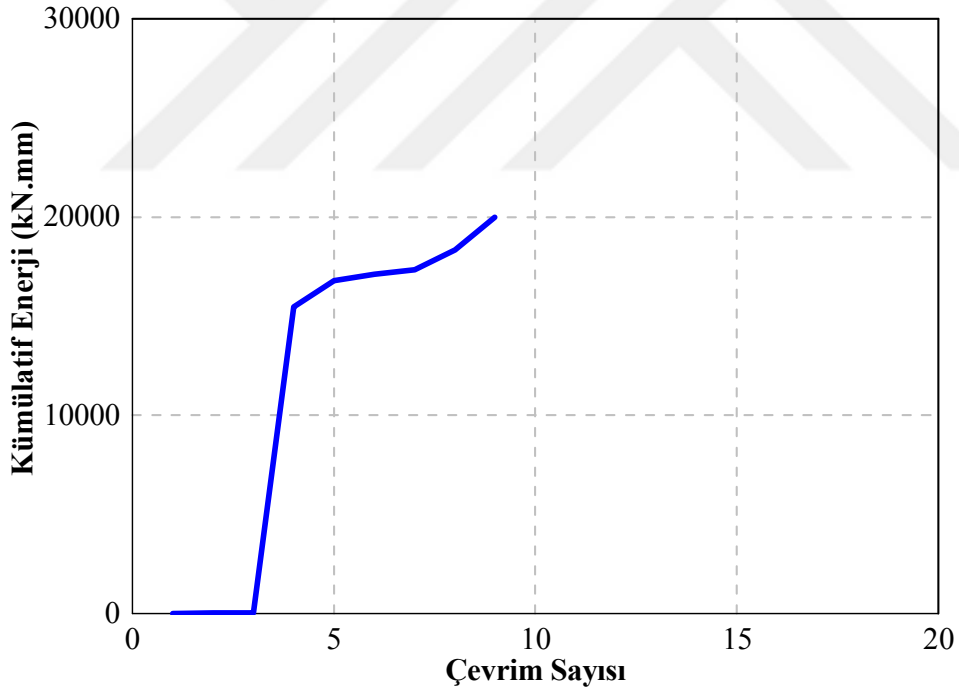
Şekil 4.121 : TB-17 numunesi yatay yük-görel öteleme oranı histeretik eğrisi.



Şekil 4.122 : TB-17 numunesi yükleme protokolü.



Şekil 4.123 : TB-17 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil 4.124 : TB-17 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

İkinci hedef görelî öteleme oranı basınçta %6 (-171.48mm)'dır. Hedef yerdeğiştirmeye giderken hızlı artan yerdeğiştirme sonucunda Şekil 4.126-a'da görüldüğü gibi düzlem dışı yerdeğiştirme ölçer devre dışı kalmıştır. Şekil 4.123'de yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi görülmektedir. Artan yerdeğiştirme etkisinde -23mm (%0.80 görelî öteleme oranı)'de numunenin durumu Şekil 4.126-

b’de görülmektedir -28.5mm (%1 görelî öteleme oranı)’de -62.2kN yüke ulaşılmıştır. Bu seviyede bayrak levhaları Şekil 4.126-c’de görüldüğü gibi aşırı şekilde batıya dönmüştür. Alt bayrak levhasından ölçülen şekildeğıştirme -1800µstrain, üst bayrak levhasından ölçülen şekildeğıştirmeler -2600µstrain civarında olup orta bölgede, numunenin doğu yüzünde yerel burkulma başlangıcı belirlenmiştir. Yerdeğıştirme seviyesinin -57.5mm (%2.01 görelî öteleme oranı)’ye ulaşmasıyla -46.4kN yük etkisinde yerel burkulma aşırı şekilde belirginleşmiştir (Şekil 4.126-d). -82.3mm (%2.88 görelî öteleme oranı)’de -37.8kN yük etkisinde numuneden yüksek sesler duyulmuş ve -101mm (%3.5 görelî öteleme oranı) seviyesine ulaşıldığında Şekil 4.126-e’de görüldüğü gibi yerel burkulma aşırı şekilde artmış olup Şekil 4.126-f’de bu seviyedeki genel burkulma görülmektedir. Artan yerdeğıştirmeyle ulaşılan -125mm (%4.38 görelî öteleme oranı)’deki genel burkulma Şekil 4.127-a’da görülmektedir. Deney sırasında hedef yerdeğıştirme biraz aşıp -177.5mm (%6.2 görelî öteleme oranı)’den geriye dönmüş olup bu seviyedeki yerel burkulma Şekil 4.127-b’de, üst uç birleşim bölgesi Şekil 4.127-c’de görülmektedir.

-28.58mm (%1 görelî öteleme oranı) üçüncü hedef yerdeğıştirmeye giderken -76.45mm (%2.67 görelî öteleme oranı) seviyesinde orta yerel burkulma bölgesinde yüksek sesle yırtık oluşmuştur (Şekil 4.127-d). Hedef yerdeğıştirmeye ulaşıldığında orta bölgedeki yırtılma aşırı ilerlemiş olup alt ve üst bayrak levhalarında aşırı miktarda kalıcı şekildeğıştirmeler görülmüştür. Üst zayıflatılmış kesit bölgesinde oluşan boğum etrafından boya dökülmeleri gözlenmiştir.

Sonraki basınç etkisindeki hedef öteleme oranı %5 (-142.9mm) olup yırtılan bölge kapanarak Şekil 4.127-e’de görüldüğü gibi numune genel burkulmuştur.

Hedef yerdeğıştirmesi, basınç etkisinde -28.58mm (%1 görelî öteleme oranı)’ye ulaşıldığında orta bölgedeki yırtık ilerlemiş ve Şekil 4.127-f’de görüldüğü gibi kesitin yaklaşık 2/3’lük kısmının yırtıldığı görülmüştür.

Basınç etkisinde %4 görelî öteleme oranı (-114.32mm)’ndaki hedef yerdeğıştirme seviyesine ulaşıldığında yırtık tekrar kapanıp numune burkulmuş ve numune üzerinde aşırı miktarda kalıcı şekildeğıştirmeler oluşmuştur.

Tekrar basınç etkisinde -28.58mm (%1 görelî öteleme oranı) hedef yerdeğıştirmesine ulaşıldığında deney düzeneğinde veri alınmasını ve kaydedilmesini sağlayan Visual Log programında sorun oluşmuş ve sistem kapatılıp tekrar açılmıştır. Böylece ikinci

bir veri dosyası daha oluşmuştur. Her iki dosya kullanılarak veri grafikleri hazırlanmıştır.

Sekizinci yerdeğiştirme görelî öteleme adımı olan basınç etkisindeki %4 görelî ötelenme oranı (-114.32mm)'nda numunedeki yırtık kapanarak tekrar burkulma oluşmuş ve burkulma yükü -13.7kN olarak ölçülmüştür.

Hedef görelî ötelenme oranı basınçta %2 (-57.16mm)'ye ulaşıldığında ölçülen basınç kuvveti -2.8kN olup bu seviyeden sonra yük daha da azalmaktadır. Yerel burkulma bölgesindeki yırtıkta oluşan açılma Şekil 4.128-a'da görülmektedir. Bu seviyeden sonra basınç etkisinde %4 (-114.32mm) ve %2 (-57.16mm) görelî öteleme oranları ardışık olarak üç kez uygulanmıştır. Bu yüklemeler esnasında yırtık sürekli olarak açılıp kapanarak numune inelastik olarak burkulmuştur.

Basınç etkisindeki sonraki hedef görelî öteleme oranı %6 (-171.48mm)'ya ulaşıldığında ölçülen kuvvet -23.2kN'dur. Bu yerdeğiştirme seviyesinde yerel burkulma bölgesindeki yırtığın kapanarak yerel burkulmuş durumu Şekil 4.128-b'de görülmektedir. Sonraki hedef görelî öteleme oranı çekmede %2 (+57.16mm) olup bu hedefe giderken +28mm (%0.98 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde +60kN çekme etkisinde numune ortadan kopmuştur. Kopma sonrası numunenin durumu Şekil 4.128-c, d,e ve f'de verilmiştir.

Deney sonrasında üst zayıflatılmış uç birleşimi incelendiğinde bu bölgede de yırtılma başlangıcı olduğu tespit edilmiştir. Yakın fay etkisi yükleme protokolüyle denenen numune deney süresince toplam 19993kNmm enerji tüketerek kopmuş olup numuneye ait kümülatif tüketilen enerji-çevrim sayısı eğrisi Şekil 4.124'de görülmektedir.



(a)



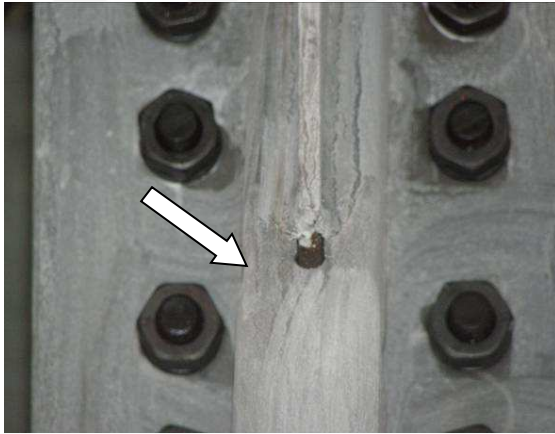
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.125 : TB-17 numunesi deney öncesi, +25mm, +32mm ve +15mm yerdeğiştirme seviyelerinde numunenin görünüşleri; (a) Deney öncesi genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşimi. (c) Deney öncesi üst uç birleşimi. (d) +25mm (%0.088 görelî ötelenme oranı)’de numunenin durumu. (e) +32mm (%1.12 görelî ötelenme oranı)’de üst zayıflatılmış kesitinde boğum oluşması. (f) +15.1mm (%0.53 görelî ötelenme oranı)’de çekme etkisinde burkulma.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.126 : TB-17 numunesinin artan basınç yerdeğiştirmesi etkisindeki davranışı: (a) Basınç etkisinde burkulmanın artması ve yerdeğiştirme ölçerin devre dışı kalması. (b) -23mm (%0.080 görelî ötelenme oranı)'de numunenin durumu. (c) -28.5mm (%1 görelî ötelenme oranı)'de alt gusedeki aşırı dönme. (d) -57.5mm (%2.01 görelî ötelenme oranı)'de yerel burkulma başlangıcı. (e) -101mm (%3.5 görelî ötelenme oranı)'de yerel burkulma bölgesi. (f) -101mm (%3.5 görelî ötelenme oranı)'de genel burkulma.



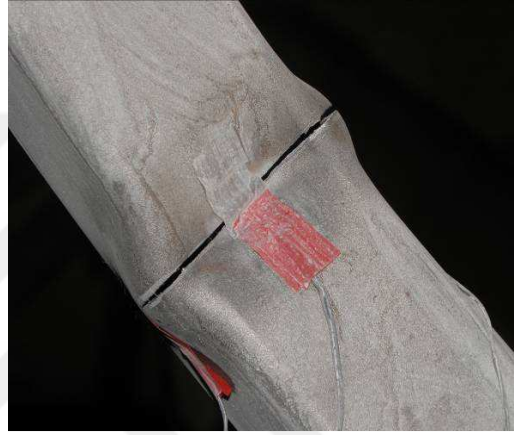
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.127 : TB-17 numunesinin artan ve azalan basınç yerdeğiştirmelerindeki durumu: (a) -125mm (%4.38 görelî ötelenme oranı)'de genel burkulma.

(b) -177.5mm (%6.21 görelî ötelenme oranı)'de yerel burkulma. (c) -177.5mm (%6.21 görelî ötelenme oranı)'de üst uç birleşim bölgesinin durumu. (d) -76.45mm (%2.67 görelî ötelenme oranı)'de orta bölgede yırtık oluşması. (e) -142.9mm (%5 görelî ötelenme oranı)'de yırtığın kapanıp genel burkulma oluşması. (f) -28.58mm (%1 görelî ötelenme oranı)'de yırtığın artması.



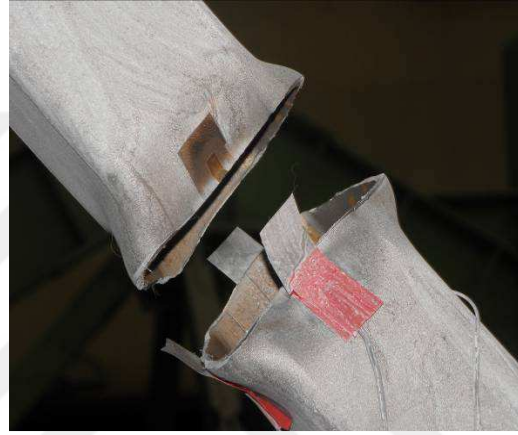
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.128 : TB-17 numunesinin değişen basınç yerdeğiştirmelerindeki ve kopma sonrası görünümleri: (a) -57.16mm (%2 görelî ötelenme oranı)'de yerel burkulma bölgesinde yırtıktaki açılma. (b) -171.48mm (%6 görelî ötelenme oranı)'de yırtığın kapanması. (c, d, e, f) Kopma sonrası görünümler.

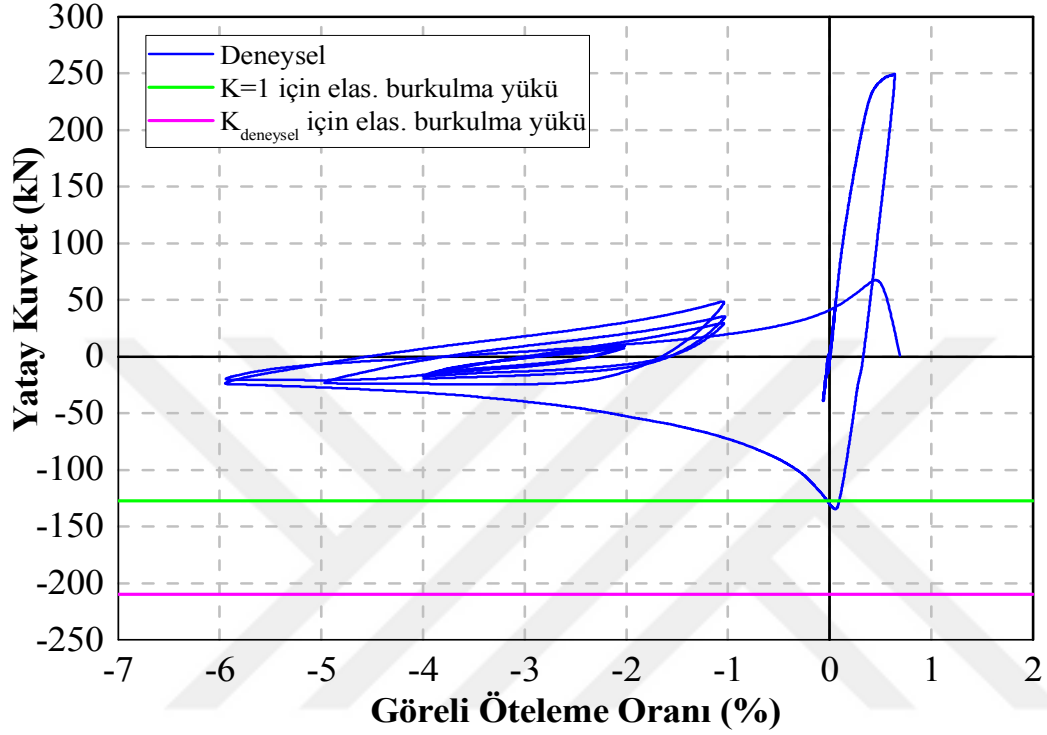
4.4.17 TB-18 numunesi (Kutu 70x70x4 + Uçlar: CFRP plaka ve kumaş + Orta:%22L CFRP sargı)

Kutu 70x70x4 kesitli ve L=2667mm uzunluğundaki TB-18 numunesi de TB-17 numunesi gibi yakın fay etkisi yükleme protokolüyle denenmiş olup ölçüm düzeneği TB-17 numunesiyle aynıdır. Numuneye tahmin edilen akma yerdeğiştirmesinin 1/3'ü kadar $\pm 1.77\text{mm}$ ($\pm \delta_{yt}/3$, %0.06 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme üç elastik çevrim olarak uygulanmıştır. Bu yerdeğiştirme seviyesinde numunede ve birleşim elemanlarında herhangi bir sorun görülmemiştir. Numuneye ilişkin, yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi Şekil 4.129'te, yükleme protokolü Şekil 4.130'de, deney öncesi görünüşler ise Şekil 4.133-a, b ve c'de gösterilmiştir.

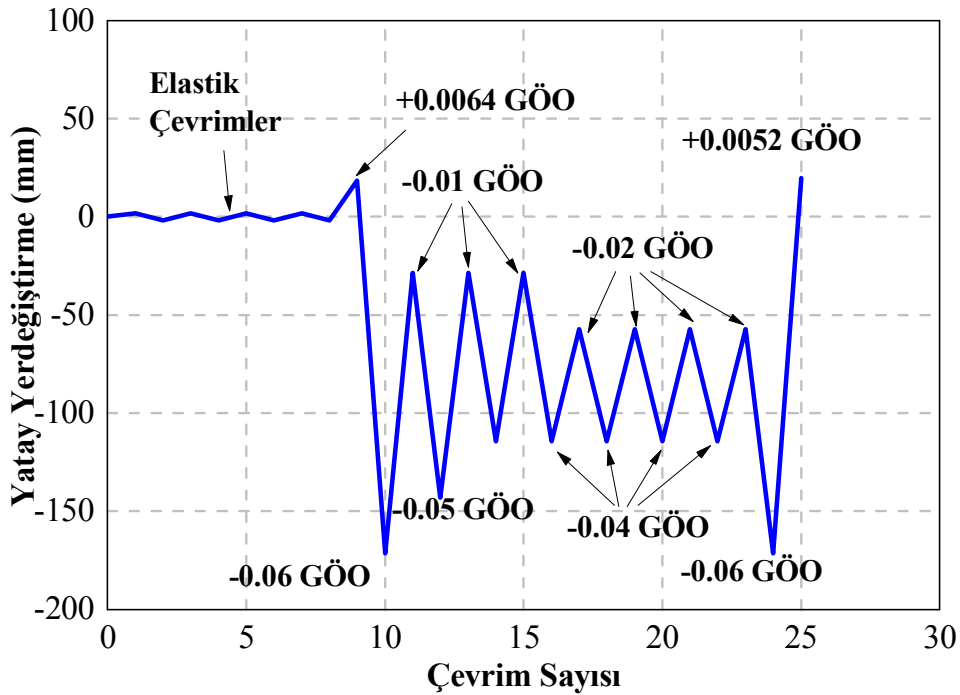
Numuneye ilk olarak çekme uygulanmış olup hedef görelî ötelenme oranı %2 (+57.16mm)'dir. Numuneye etkitilen yerdeğiştirme miktarı her adımda arttırılarak yakın fay etkisi yükleme protokolü uygulanmıştır. +11mm (%0.38 görelî öteleme oranı) ve +13.5mm (%0.47 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde CFRP elemanlardan sesler gelmiş olup ulaşılan kuvvetler sırasıyla +200kN ve +240kN'dur. Numune üzerinde +4000~5000 μ strain civarında şekildeğiştirmeler +17.5mm (%0.61 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde ölçülmüştür. Sonraki +18.38mm (%0.64 görelî öteleme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde +249.9kN kuvvet ölçülmüş olup davranış Şekil 4.133-d'de verilmiştir. 250kN kapasiteye sahip olan hidrolik verenin kapasitesine ulaşp sistemin kapanmaması için ilk çekme adımı burada bitirilip yükleme geri döndürölmüştür. Şekil 4.133-e'de göröldüğü gibi +1.5mm (%0.052 görelî öteleme oranı) seviyesinden geçerken, çekme yerdeğiştirmesinde numune burkulmuştur. Bu seviyede düzlem dışı yerdeğiştirme 30mm olarak (%1.12L) civarında ölçölmüştür.

Hedef görelî öteleme oranı basınçta %6 (-171.48mm) olan ikinci yerdeğiştirme seviyesine giderken -36mm (%1.26 görelî öteleme oranı)'de -70 kN yatay yük etkisinde CFRP elemanlardan çok yüksek sesler gelmiştir. Bunun yanında alt ve üst bayrak levhaları dönmeye başlamıştır. -78.3mm (%2.73 görelî öteleme oranı)'de orta bölgede -69000 μ strain, üst bayrak levhasında -15280 μ strain ve üst uç zayıflatılmış kesitinin doğu yüzüne yapıştırılmış olan CFRP plaka üzerinde -1600 μ strain civarlarında şekildeğiştirmeler ölçölmüş olup kuvvet -42.2kN olarak tespit edilmiştir. Bu seviyede numunedeki burkulma Şekil 4.133-f'de görölmektedir. -132mm (%4.62

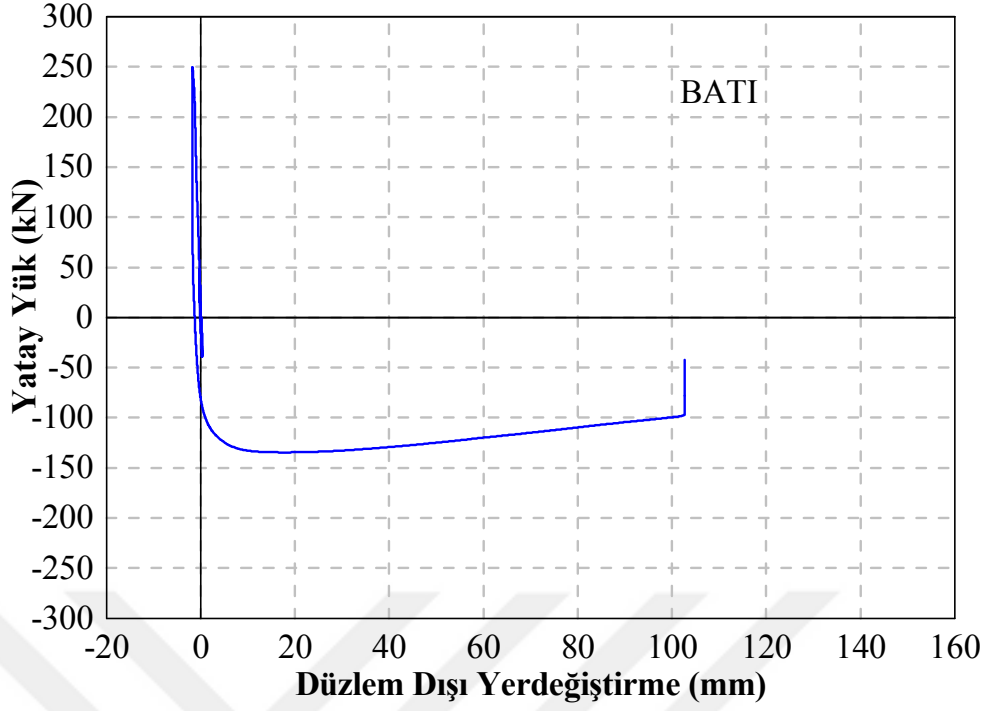
görelî ötelenme oranı)'ye ulaşıldığında ölçülen kuvvet -27.5kN olup bu seviyedeki davranış Şekil 4.134-a'da, orta bölgede üst yüzde oluşan epoksi çatlağı Şekil 4.134-b'de görülmektedir. Orta bölgede belirgin yerel burkulmayla birlikte dirsek oluşmuştur. Numunede düzlem içi ve dışı yerdeğıştirmeler görülmüştür. Hedef görelî



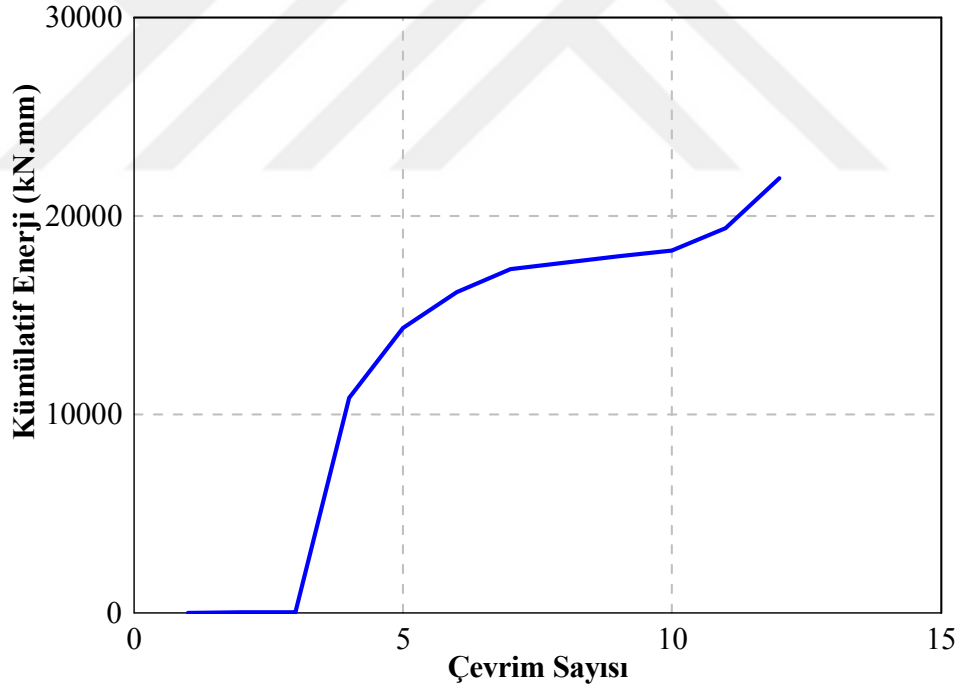
Şekil 4.129 : TB-18 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi.



Şekil 4.130 : TB-18 numunesi yükleme protokolü.



Şekil 4.131 : TB-18 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil 4.132 : TB-18 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

öteleme oranı olan -%6 (-171.48mm yerdeğiştirme)'ya ulaşıldığında numuneki genel burkulma Şekil 4.134-c'de verilmiş olup orta bölgesinde -87000 μ strain, üst bayrak levhasında -26000 μ strain, zayıflatılmış uç kesitlere yapıştırılan CFRP plakalarda -1000~2000 μ strain civarlarında şekildeğiştirmeler ölçülmüş ve Şekil 4.134-d'de görüldüğü gibi orta bölgede aşırı gamze oluşmuştur. Basınç etkisinde oluşan aşırı

gamze etkisiyle Şekil 4.134-e’de görüldüğü gibi orta bölgenin alt yüzünde CFRP sargının köşe bölgesinde yırtılma belirlenmiştir. Orta bölgenin batı yüzünde lif doğrultusunda CFRP sargıda ayrılmalar belirlenmesine karşın uç bölgelerdeki CFRP plakalarda sorun görülmemiştir.

Üçüncü hedef yerdeğiştirme seviyesi basınç etkisindeki -28.58mm (%1 görelî öteleme oranı)’ye ulaşıldığında numune üzerinde +50.3kN çekme kuvveti oluşmuş ve davranış Şekil 4.134-f’de görülmektedir.

Sonraki basınç etkisindeki hedef öteleme oranı %5 (-142.9mm) olup bayrak levhaları aşırı miktarda şekilde batıya dönmüştür. Yerdeğiştirme geriye döndüğünde -120mm (%4.20 görelî ötelenme oranı) seviyesinde -6.7kN yük etkisinde orta bölgedeki CFRP’den sesler duyulmuştur.

-28.58mm (%1 görelî öteleme oranı)’de hedef yerdeğiştirme giderken orta bölgede CFRP sargıda yırtılmalar oluşmuştur.

Basınç etkisinde %4 görelî öteleme oranı (-114.32mm)’ndaki hedef yerdeğiştirme oranına ulaşıldığında orta bölgenin doğu yüzündeki içeri doğru gamze çok ilerlemiştir. Bunun yanında yine orta bölgenin üst yüzünde epoksîde oluşan çatlak Şekil 4.135-a’da görüldüğü gibi artmış ve batı yüzünde Şekil 4.135-b’de görüldüğü gibi CFRP liflerinde ayrılma görülmüştür.

Sonraki iki hedef yerdeğiştirme olan -28.58mm (%1 görelî öteleme oranı) ve -114.32mm (%4 görelî öteleme oranı) seviyelerinde sırasıyla +31kN ve -17.8kN yükler ölçülmüştür.

Ardışık olarak tekrarlı uygulanan hedef yerdeğiştirmelerden -57.16mm (%2 görelî öteleme oranı)’de numunenin durumu ve yerel burkulma bölgesi Şekil 4.135-c ve e’de görülmektedir. -114.32mm (%4 görelî öteleme oranı)’de ki burkulma Şekil 4.135-d’de verilmiş olup son üç yükleme çevrimde alt ve üst zayıflatılmış kesit etrafındaki CFRP plakalarda ve sargıda sorun gözlenmemiştir. Orta bölgedeki CFRP sargının ikinci katında sesle alt katmandan ayrılma ve kalkma gözlenmiş olmasına karşın alt katman çelik yüzeye yapışık olup bir sorun görülmemiştir.

Basınç etkisindeki sonraki hedef görelî öteleme oranı %6 (-171.48mm)’ya ulaşıldığında bayrak levhaları aşırı şekilde dönmüş olup bu yüzden uçlardaki CFRP

plakalar daha az zorlanmıştır. Bu seviyede orta bölgede oluşan yerel burkulma Şekil 4.135-f’de görülmekte olup ölçülen basınç kuvveti -20.4kN’dur. Basınç etkisinde Şekil 4.136-a’da orta bölgede üst kısımda CFRP sargı üzerindeki epokside ilerleyen çatlak görülmektedir. Çekme etkisindeki sonraki hedef görelî öteleme oranı +%2 (+57.16mm)’ye giderken yerdeğiştirmenin sıfır olduğu noktadan geçerken numune üzerindeki kalıcı şekildeğiştirmeler Şekil 4.136-b’de verilmiş olup numune hedef yerdeğiştirme seviyesine ulaşmadan +14.9mm (%0.52 görelî öteleme oranı) seviyesinde +74.3 kN kuvvet etkisinde çok şiddetli sesle orta bölgeden kopmuştur. Numunenin kopma sonrası görünüşleri Şekil 4.136-c,d,e ve f’de görülmektedir.

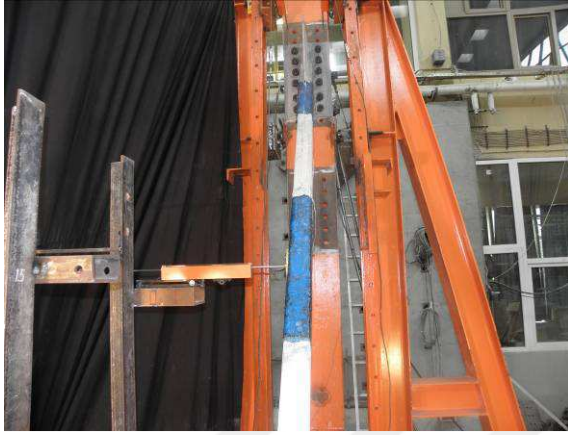
Yakın fay etkisi yükleme protokolüyle denenen numune deney süresince toplam 21919kNmm enerji tüketerek kopmuş olup kümülatif tüketilen enerji-çevrim sayısı eğrisi Şekil 4.132’de, düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.131’de ve şekildeğiştirme eğrileri EK R’de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



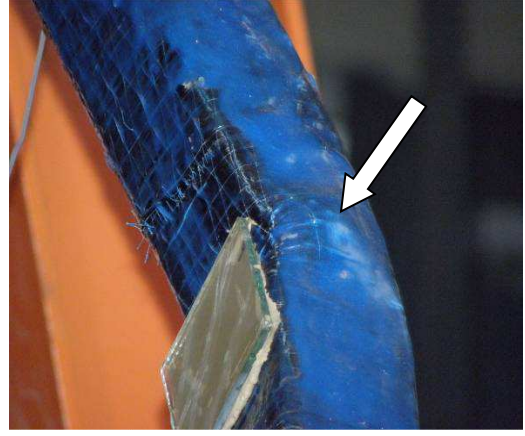
(f)

Şekil 4.133 : TB-18 numunesinin deney öncesi görünüşleri, +18.38mm, -1.5mm ve -78.3mm yerdeğiştirme seviyelerinde davranış: (a) Deney öncesi genel görünüş.

(b) Deney öncesi alt uç birleşim bölgesi. (c) Deney öncesi orta ve üst birleşim bölgeleri. (d) +18.38mm (+%0.64 görelî ötelenme oranı)'de davranış. (e) -1.5mm (-%0.052 görelî ötelenme oranı)'de burkulma. (f) -78.3mm (-%2.74 görelî ötelenme oranı)'de burkulma.



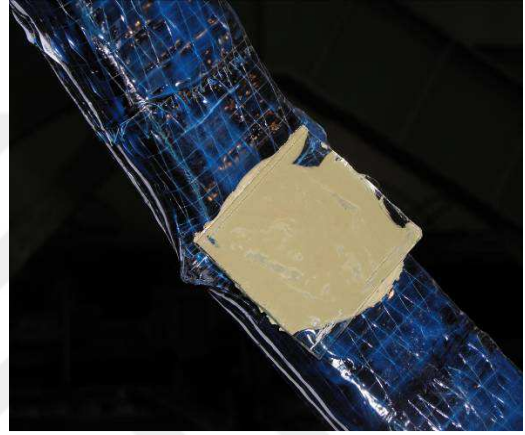
(a)



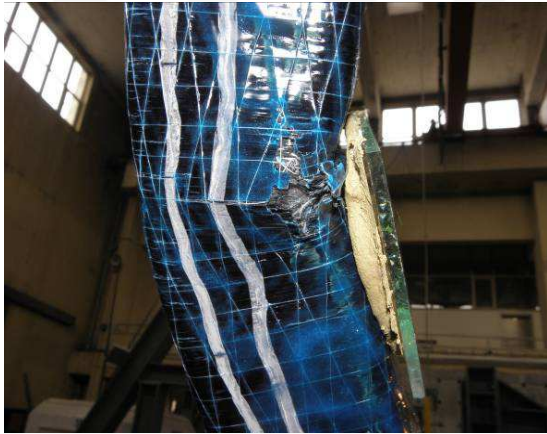
(b)



(c)



(d)



(e)

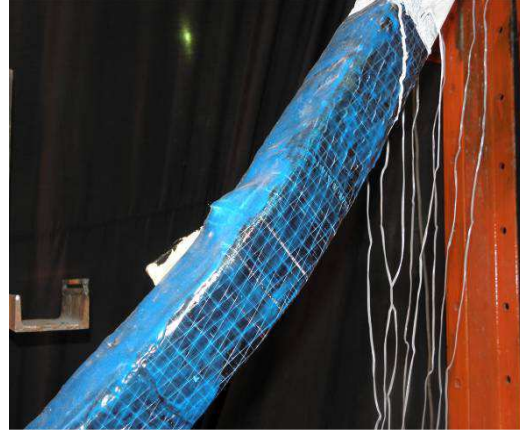


(f)

Şekil 4.134 : TB-18 numunesinin basınç yerdeğiştirmeleri etkisindeki durumu:
 (a) -132mm (%4.62 görelî ötelenme oranı)'de düzlem dışı hareket. (b) -132mm (%4.62 görelî ötelenme oranı)'de orta bölgede üst kısımda CFRP epoksisinde çatlak oluşumu. (c) -171.47mm (%6 görelî ötelenme oranı)'de genel burkulma. (d) -171.47mm (%6 görelî ötelenme oranı)'de yerel burkulma. (e) -171.47mm (%6 görelî ötelenme oranı)'de orta bölge alt köşe noktasında CFRP'deki yırtılma. (f) -28.56 (%1 görelî ötelenme oranı)'de numunenin durumu.



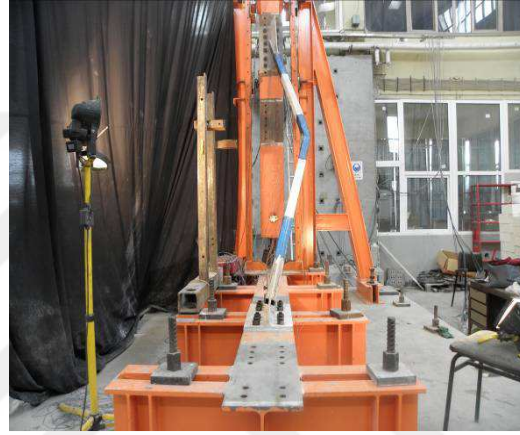
(a)



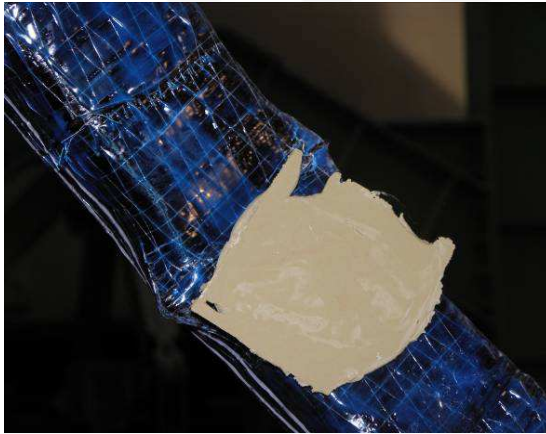
(b)



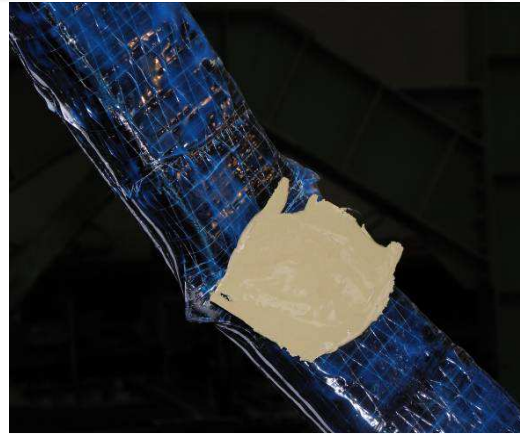
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.135 : TB-18 numunesinin değişen basınç yerdeğiştirmeleri etkisindeki durumu: (a) -114.32mm (%4 görelî ötelenme oranı)'de orta bölgede CFRP üst kısmında artan yırtık. (b) -114.32mm (%4 görelî ötelenme oranı)'de orta bölge batı yüzünde CFRP'de liflerin ayrılması. (c) -57.4mm (%2 görelî ötelenme oranı)'de davranış. (d) -114.32mm (%4 görelî ötelenme oranı)'de burkulma. (e) -57.4mm (%2 görelî ötelenme oranı)'de yerel burkulma bölgesi. (f) -171.50mm (%6 görelî ötelenme oranı)'de yerel burkulma bölgesi.



(a)



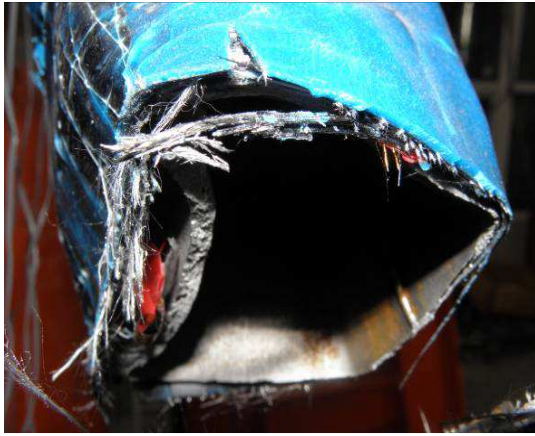
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.136 : TB-18 numunesinin değişen basınç yerdeğiştirmeleri etkisindeki durumu ve kopma sonrası görünüşleri: (a) -171.50mm (%6 görelî ötelenme oranı)'de orta bölgede CFRP üst kısmında artan yırtık. (b) Yerdeğiştirmenin sıfır olduğu noktadaki kalıcı deplasman. (c, d, e) Kopma sonrası orta bölge. (f) Kopma sonrası alt uç birleşimi.

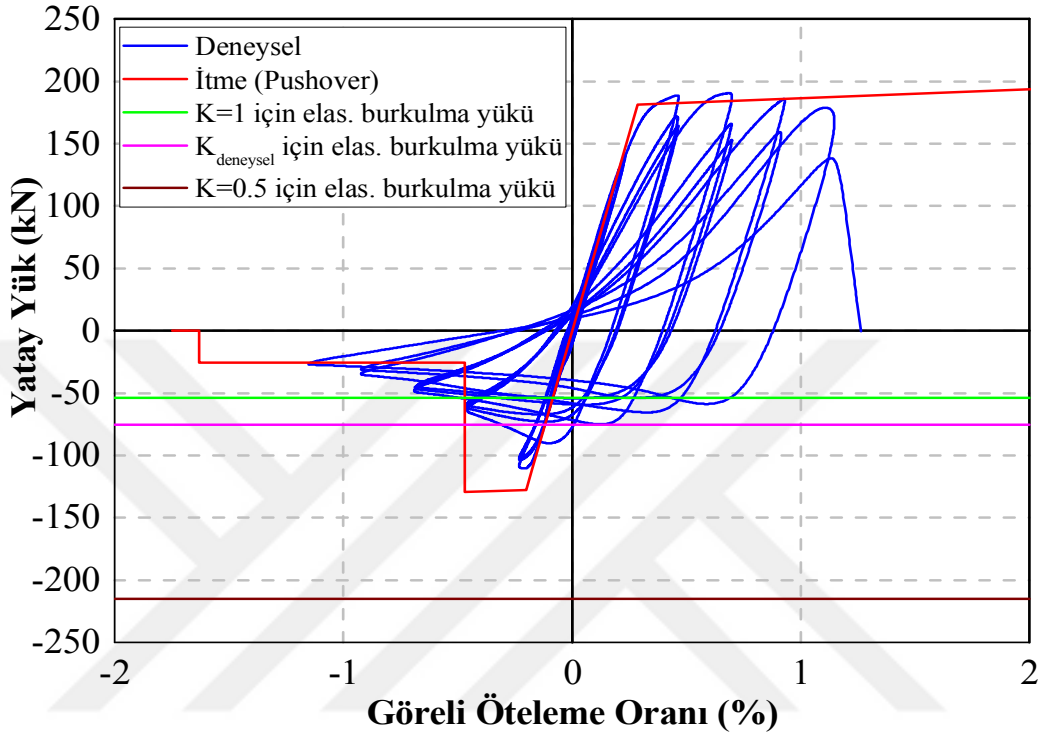
4.4.18 TB-19 numunesi (Boru 76.1x3 – Yalın numune)

Boru 76.1x3 en kesit ölçülerinde ve $L=3558\text{mm}$ uzunluğundaki ve güney yönünde yüklenerek ilk olarak çekme etkisinde bırakılan TB-19 numunesinin deney sonucunda elde edilen yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi ve analiz sonucunda elde edilen itme eğrisi Şekil 4.137’de, yükleme protokolü Şekil 4.138’de gösterilmiştir. Numunenin deney öncesi görünüşleri ise Şekil 4.141-a, b ve c’de görülmektedir. Bu numune çalışma kapsamında denenen üç adet boru enkesitli numunelerden ilki olup yalın (güçlendirilmemiş) koşullarda incelenmiştir. Böylece kesit şekillerinin (kutu ya da boru) histeretik davranışa olan etkisinin de belirlenmesi bir diğer parametre olarak ele alınmış olacaktır.

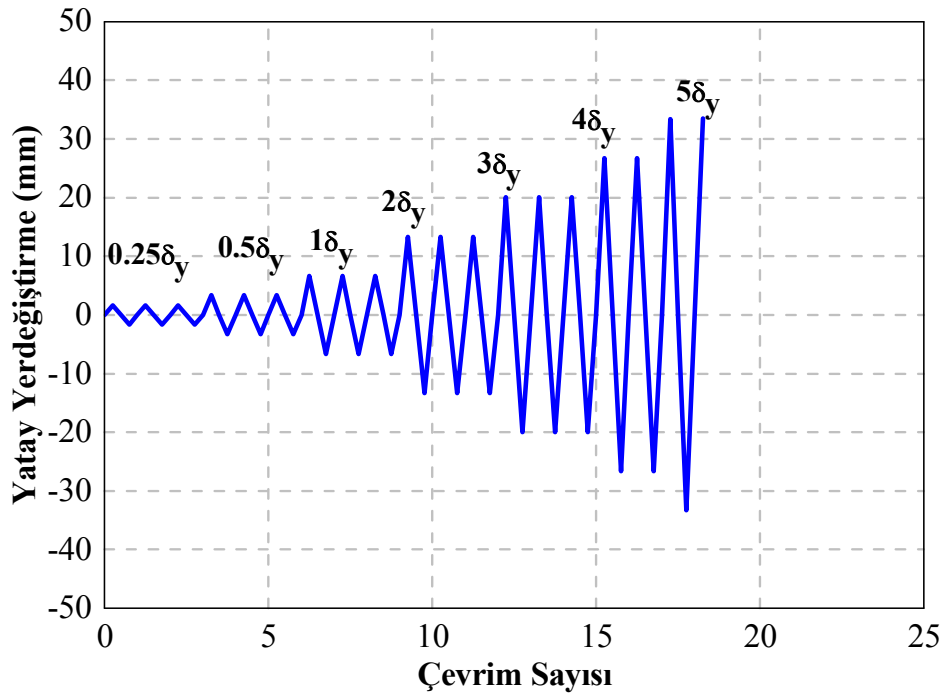
TB-19 numunesi, $\pm 1.67\text{mm}$ yatay yerdeğiştirme ($\%0.058$ görelî öteleme oranı) etkisindeki ilk üç çevrimde ve gerçek malzeme değerlerinin kullanıldığı itme analizi sonunda tahmin edilen akma yerdeğiştirmesinin $2/3$ ’ündeki ($\pm 3.34\text{mm}$, $\%0.116$ görelî öteleme oranı) üç çevrimde doğrusal elastik davranmıştır. Bu yerdeğiştirme seviyesinde batıya doğru 1.47mm ($\%0.041L$) düzlem dışı yerdeğiştirme ölçülmüş olup zayıflatılmış uç birleşimlerinde ve birleşim elemanları olan kaynak ve bulonlarda herhangi bir sorun izlenmemiştir.

TB-19 numunesi için yapılan itme analiziyle tahmin edilen basınç akma yerdeğiştirmesi -5mm ($\%0.17$ görelî öteleme oranı)’dır. İlk çekme etkisinde $+5.01\text{mm}$ yerdeğiştirmeye kadar yükleme yapılmıştır. Bu seviyede numune üzerinde $+950\sim +1000\mu\text{strain}$ mertebesinde şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. Numunenin bu seviyedeki çekme etkisindeki davranışı Şekil 4.141-d’de görülmektedir. İlk basınç yüklemesinde ise -5mm yerdeğiştirme seviyesinde numunede akma görülmemiştir. Bu seviyeden itibaren yerdeğiştirme miktarı azar azar arttırılarak yatay yük-yatay yerdeğiştirme grafiğinin yataylaştığı ve doğrusal olmayan davranışın başladığı nokta deney sırasında belirlenmiştir; bu numunede deneysel akma yerdeğiştirmesi (δ_{yd}) -6.67mm ($-\delta_y$, $\%0.23$ görelî öteleme oranı) olarak kabul edilmiş Şekil 4.141-e’de bu seviyede burkulma davranışı görülmektedir. Numunede bu seviyede batıya doğru 40.1mm ($\%1.13L$) düzlem dışı yerdeğiştirme ölçülmüştür. İkinci ve üçüncü yükleme çevrimlerinde numunede boya dökülmesi ve birleşim bölgelerinde göçme gözlenmemiştir. Bu aşamada ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla, $+141.7\text{kN}$ ve -108.2kN ’dur.

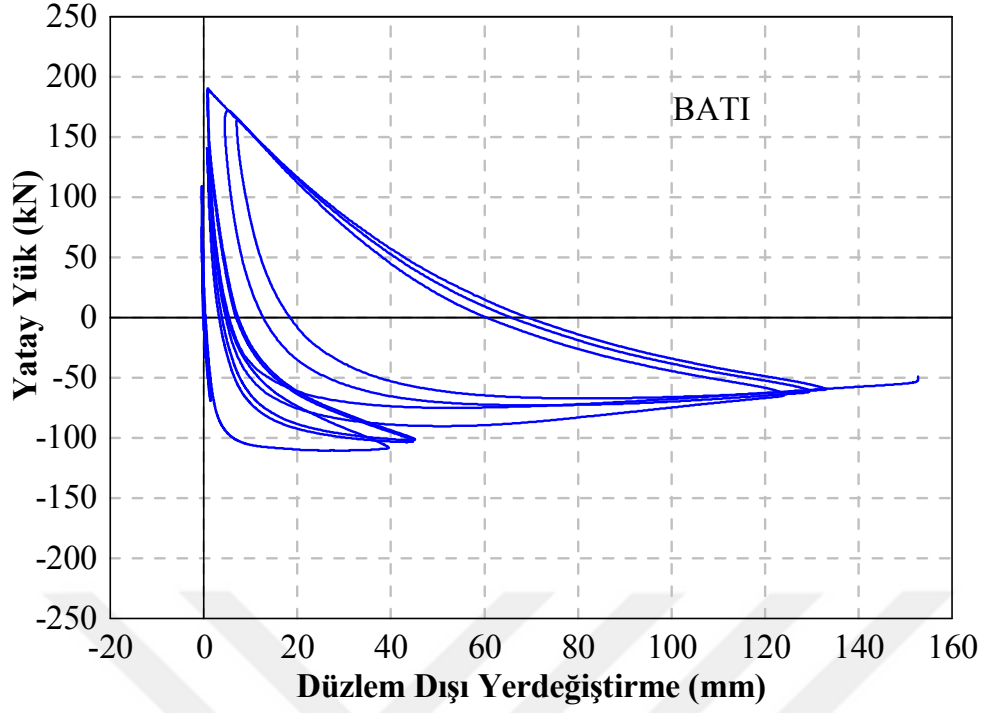
Sonraki adım olan $\pm 2\delta_y$ ($\pm 13.34\text{mm}$, %0.47 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde ilk çevrimde çekme etkisinde numune üzerinde +2000 μstrain civarında şekildeğiştirme ölçölmüştür. Basınç etkisinde numunenin batıya doğru belirgin şekilde düzlem dışı hareket ettiği gözlenmiştir (şekil 4.141-f).



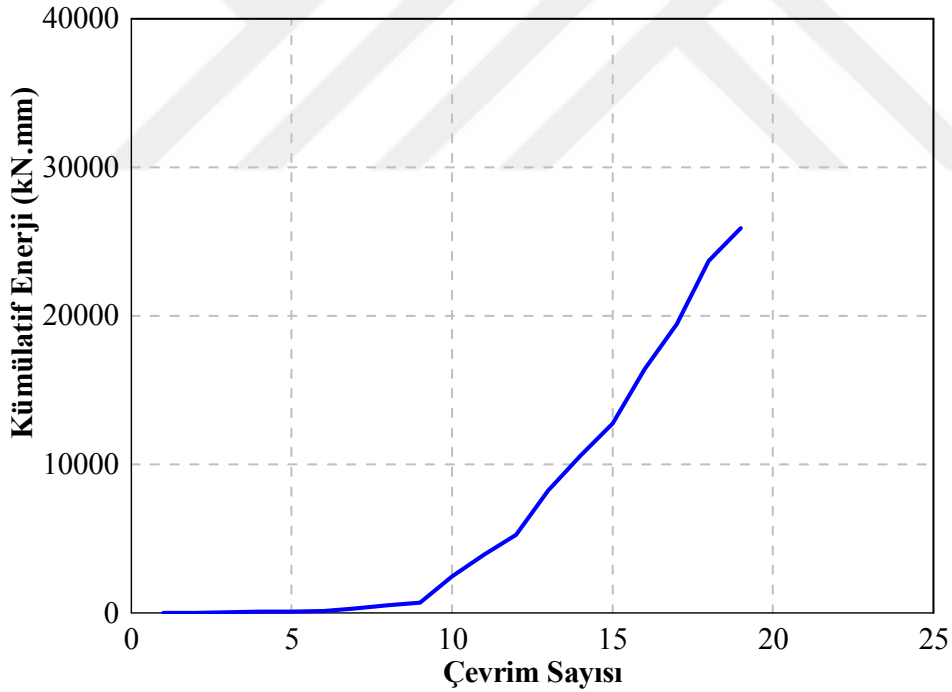
şekil 4.137 : TB-19 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi ve itme eğrisi.



şekil 4.138 : TB-19 numunesi yükleme protokolü.



Şekil 4.139 : TB-19 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil 4.140 : TB-19 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

İkinci ve üçüncü çevrimlerin çekme etkilerinde zayıflatılmış kesitte boya dökülmesi gözlenmemiştir. Bu çevrimler sırasında basınç etkisinde ise düzlem dışı davranış gittikçe artmış ve en fazla 134mm (%3.77L) düzlem dışı yerdeğiştirme ölçülmüştür. $\pm 2\delta_y$ yatay yerdeğiştirme seviyesinde ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +186kN ve -64.8kN'dur.

Üç çevrim olarak uygulanan son yerdeğiştirme seviyesinde, $\pm 3\delta_y$ ($\pm 20.01\text{mm}$, %0.70 görelı öteleme oranı), ilk çekme etkisinde numunenin alt ve üst bölgelerinde $+2500\mu\text{strain}$ civarında, orta bölgede $+2000\mu\text{strain}$ civarında şekildeğiştirmeler ölçölmüştür. Basınç etkisinde düzlem dışı yerdeğiştirme aşırı miktarda artmış ve 150mm 'lik yerdeğiştirme ölçer kapasitesini aşmıştır. Bu adımdan itibaren düzlem dışı yerdeğiştirme ölçer deneyden çıkartılmıştır. Numuneye ilişkin yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi şekil 4.139'da görölmektedir. İkinci yükleme çevriminin ilk çekme etkisinde numunenin alt ve orta bölgelerinde $+2000\mu\text{strain}$ civarında, üst bölgesinde ise $+4000\mu\text{strain}$ civarında şekildeğiştirmeler ölçölmüş olup deney boyunca kaydedilen şekildeğiştirme ölçer verileri EK S'de verilmiştir. Alt uç zayıflatılmış kesitin alt ve üst bölgelerinde boya dökölmesi gözlenmiş olup alt zayıflatılmış kesitin üst ve alt kısımlarında yırtılma başlangıcı belirlenmiştir. Basınç etkisinde ise orta bölgede boya dökölmesi gözlenmemiştir. Üçüncü ve son yükleme çevriminde çekme etkisinde numunenin alt uç zayıflatılmış kesitinde aşırı boya dökölmesi, bu bölgede üstteki yırtıkta ise ilerleme gözlenmiştir. Buna karşın, üst uç zayıflatılmış kesitte boya dökölmesi ve yırtılma gözlenmemiştir; basınç etkisinde ise orta bölgede yine boya dökölmesi gözlenmemiştir. Bu yerdeğiştirme seviyesinde ölçölen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla $+190\text{kN}$ ve -49kN 'dur. Numunenin $3\delta_y$ yerdeğiştirme seviyesindeki davranışı şekil 4.142'de verilmiştir.

$\pm 4\delta_y$ ($\pm 26.68\text{mm}$, %0.93 görelı öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesi ilk çekme etkisinde yırtık alt zayıflatılmış kesitin batı yüzüne ilerlemiş olup şekil 4.143-a'da görölmektedir; bu bölgede boya dökölmesi artarak devam etmiştir. Üst uç zayıflatılmış kesit alt yüzünde boya dökölmesi gözlenmiştir. Basınç etkisinde ise numunenin doğu yüzünde ani boya dökölmesini izleyen yerel burkulma gözlenmiş olup bu seviyedeki numune davranışı şekil 4.143-b, c ve d'de görölmektedir. İkinci çevrimde çekmeye giderken yerdeğiştirmenin sıfır olduğu noktadan geçildiğinde ortadaki yerel burkulma bölgesinde kalıcı şekildeğiştirme olduğu belirlenmiştir. Alt uç zayıflatılmış kesitin altında ve üstünde yırtık ilerlemeye devam etmiştir. Bu yerdeğiştirme seviyesinde ölçölen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla $+185.2\text{kN}$ ve -35.3kN 'dur.

Yatay yerdeğiştirme seviyesi arttırılarak $\pm 5\delta_y$ ($\pm 33.35\text{mm}$ yerdeğiştirme, %1.17 görelı öteleme oranı) uygulanmaya başlanmıştır. İlk çevrim çekme etkisinde, alt uç zayıflatılmış kesitin altında ve üstünde yırtığın hızla ilerlediği gözlenmiş olup bu

durum Şekil 4.143-e’de görülmektedir. Üst uç zayıflatılmış kesitte yırtılma gerçekleşmemiştir. Basınç etkisinde orta bölgede yerel burkulma ve boya dökülmesi aşırı miktarda artmıştır. Numunenin bu seviyedeki davranışı Şekil 4.143-f’de verilmiştir. İkinci çevrim çekme etkisinde, pik yerdeğiştirme geçildikten sonra, +33.53mm yerdeğiştirme seviyesinde ölçülen +143kN’luk yükte ani düşüşle +132kN’a ulaşılmış ve numune alt zayıflatılmış kesitten yüksek sesle kopmuştur.

Kopma sonrasında numunenin orta bölgesinde 39mm (%1.1L) düzlem dışı kalıcı yerdeğiştirme olduğu görülmüştür. Numunenin kopma öncesi ve sonrası durumu Şekil 4.144’de görülmektedir. Uç birleşimlerindeki kaynak ve bulonlarda hasar belirlenmemiştir. Deney sonunda TB-19 numunesi kümülatif olarak 25886kNmm enerji yutmuştur; yutulan kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi Şekil 4.140’da gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

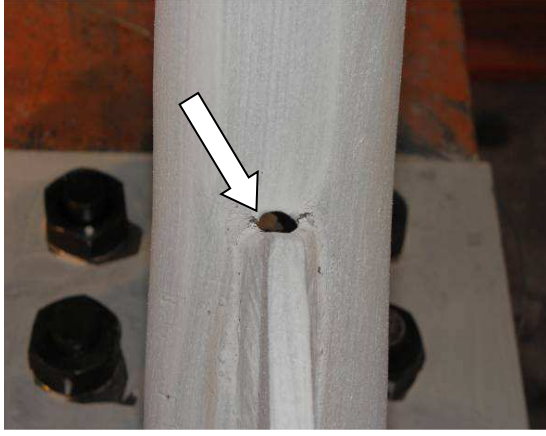


(e)

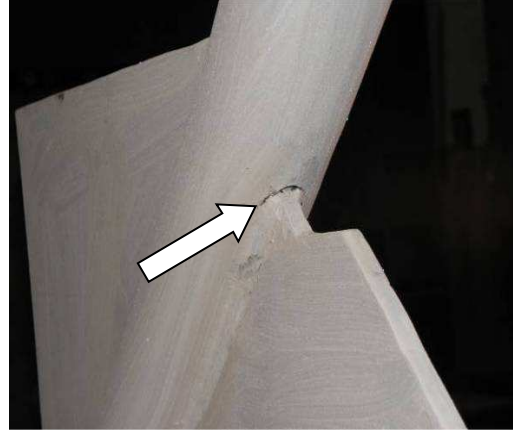


(f)

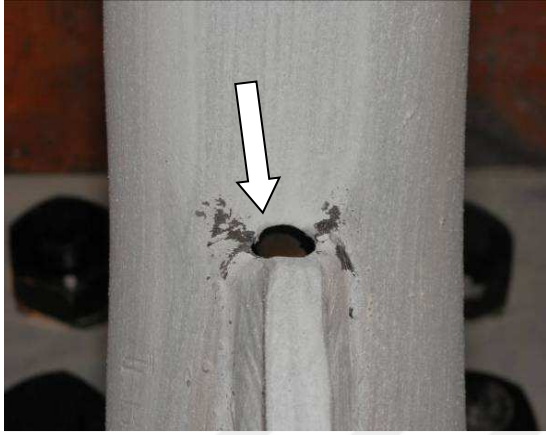
Şekil 4.141 : TB-19 numunesi deney öncesi, $1\delta_y$ (6.67mm) ve $2\delta_y$ (13.34mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşimi. (c) Deney öncesi üst uç birleşimi. (d) $+1\delta_y$ (+6.67mm)'de çekme etkisi. (e) $-1\delta_y$ (-6.67mm)'de burkulma. (f) $-2\delta_y$ (-13.34mm)'de burkulma.



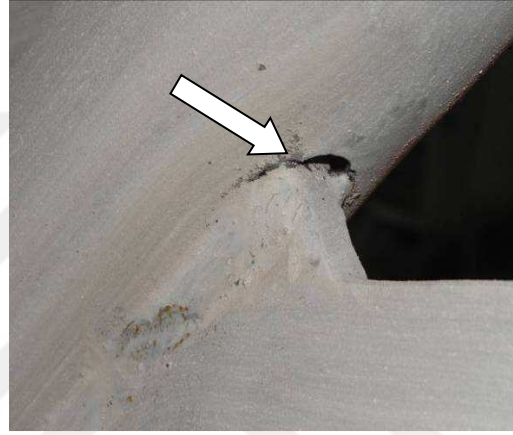
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.142 : TB-19 numunesinin $3\delta_y$ (20.01mm) yatay yerdeğiştirme seviyesinde davranışı: (a) $+3\delta_y$ (+20.01mm)'de alt uç birleşimi üst bölümünde boya dökülmesi ve yırtılma başlangıcı. (b) $+3\delta_y$ (+20.01mm)'de alt uç birleşimi alt bölümünde boya dökülmesi. (c) $+3\delta_y$ (+20.01mm) ikinci yükleme çevriminde alt uç birleşimi üst bölümünde yırtığın ilerlemesi. (d) $+3\delta_y$ (+20.01mm) ikinci yükleme çevriminde alt uç birleşimi alt bölümünde yırtık başlangıcı. (e) $+3\delta_y$ (+20.01mm)'de üst uç birleşiminin durumu. (f) $-3\delta_y$ (-20.01mm) ikinci yükleme çevriminde burkulma.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.143 : TB-19 numunesinin $4\delta_y$ (26.68mm) ve $5\delta_y$ (33.35mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $+4\delta_y$ (+26.68mm)'de alt uç birleşimi üst kısmında yırtığın ilerlemesi. (b) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de burkulma. (c) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de yerel burkulma. (d) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de son yükleme çevriminde yerel burkulmanın aşırı duruma gelmesi. (e) $+5\delta_y$ (+33.35mm)'de yırtığın ilerlemesi. (f) $-5\delta_y$ (-33.35mm)'de yerel burkulmanın aşırı duruma gelmesi.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.144 : TB-19 numunesi kopma öncesi ve sonrası görünümleri: (a) Kopma öncesi alt uç birleşimi. (b) Kopma sonrası genel görünüş. (c, d) Kopan bölge görünümleri. (e) Yerel burkulma bölgesinde oluşan kılcal yırtıklar. (f) Kopma sonrası üst uç birleşimi.

4.4.19 TB-20 numunesi (Boru 76.1x3 + Uçta:CFRP plaka ve kumaş + Orta:%14L CFRP sargı)

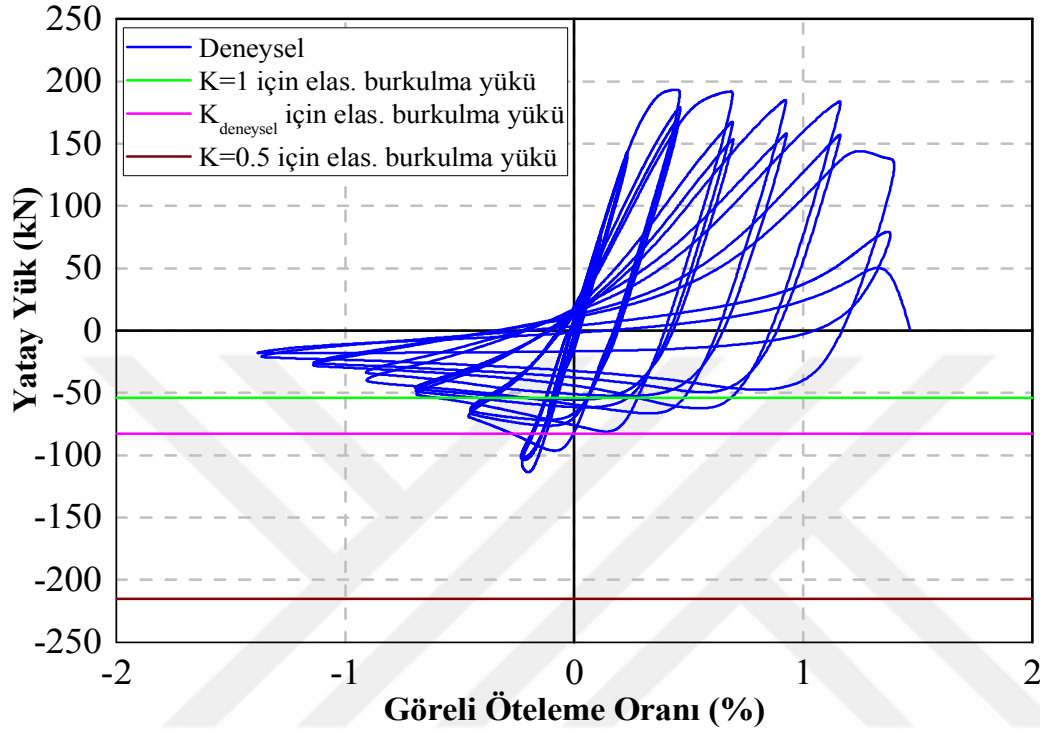
Boru 76.1x3 kesit özelliklerinde ve L=3558mm uzunluğunda CFRP elemanlarla uçta ve orta bölgede güçlendirilmiş olan TB-20 numunesi, TB-19 numunesiyle aynı yükleme protokolüyle denenmiş iki numunenin histeretik enerji yutma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Deneysel olarak elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.145’de, uygulanan yükleme protokolü Şekil 4.146’da görülmekte olup numunenin deneyden önceki görünüşleri Şekil 4.149-a, b, c ve d’de verilmiştir.

TB-20 numunesi $\pm 0.25\delta_y$ yatay yerdeğiştirme ($\pm 1.67\text{mm}$, %0.058 görelî öteleme oranı) etkisinde ilk üç çevrimde ve sonraki $\pm 0.50\delta_y$ ($\pm 3.34\text{mm}$, %0.12 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesindeki üç yükleme çevrimi etkisinde elastik davranmıştır. $\pm 0.50\delta_y$ yatay yerdeğiştirme seviyesinde en fazla 0.4mm (%0.011L) düzlem dışı yerdeğiştirme ölçülmüştür. Bu aşamalarda, zayıflatılmış uç kesitleri güçlendirmek üzere yapıştırılan CFRP kumaş şerit-sargılarda, orta bölgedeki CFRP kumaş sargılarda ve birleşim elemanlarında herhangi bir sorun görülmemiştir.

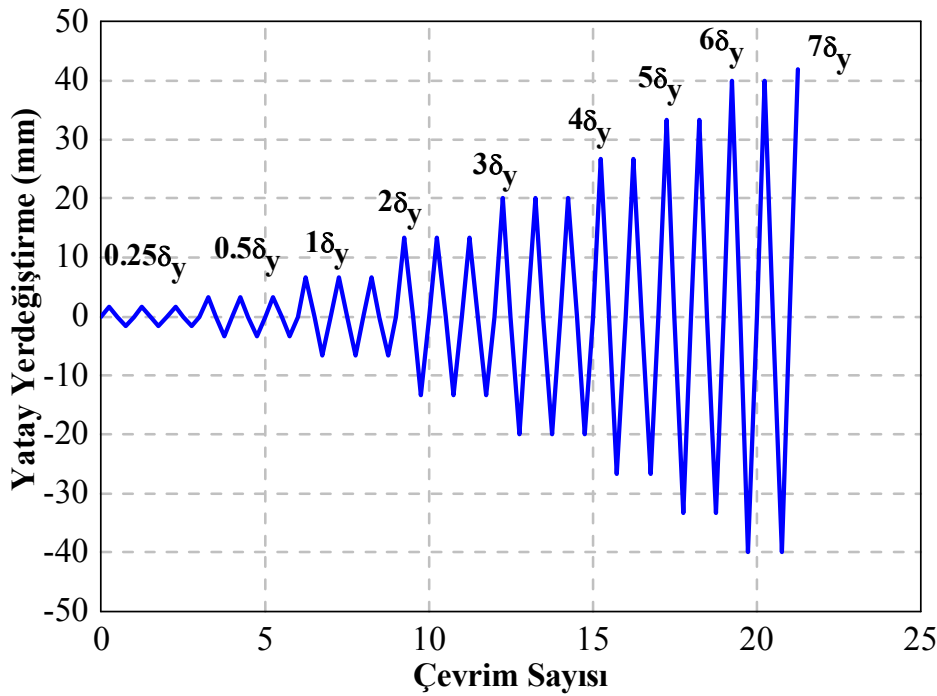
TB-20 numunesi $\pm 1\delta_y$ ($\pm 6.67\text{mm}$, %0.23 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme adımının ilk çevriminde, çekme etkisinde beklendiği üzere elastik davranmış olup numune üzerinde +1200~+1350 μstrain civarında şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. Basınç etkisinde ise, TB-19 numunesine benzer olarak, yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisinde doğrusal olmayan davranışın başladığı ve numunenin basınç etkisinde aktığı gözlenmiştir; burkulma başlangıcı Şekil 4.149-e’de görülmektedir. Burkulma -5.6mm yatay yerdeğiştirme seviyesinde, -115kN yatay yük etkisinde oluşmuştur. İkinci çevrimde çekme etkisinde yükte artış olduğu belirlenmiştir. Bu beklendiği üzere CFRP elemanların yük aldığı bir göstergesidir. Basınç etkisinde alt ve üst guse levhalarının belirgin şekilde doğruya döndüğü gözlenmiştir. Üçüncü ve son yükleme çevriminde çekme etkisinde zayıflatılmış uç kesitlerde boya dökülmesi olmuş, basınç etkisinde ise numunenin orta bölgesinde batı yüzünde -2000 μstrain , doğu yüzünde -800 μstrain şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. Ölçülen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme 49.5mm (%1.39L)’dir. Bu yerdeğiştirme adımıyla ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +143.8kN ve -106.8kN’dur.

Sonraki $\pm 2\delta_y$ ($\pm 13.34\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.47 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme adımının ilk yükleme çevriminde, çoğunluğu alt uçtakiler olmak üzere alt ve üst uç zayıflatılmış kesitlerin güçlendirilmesinde kullanılan CFRP kumaş

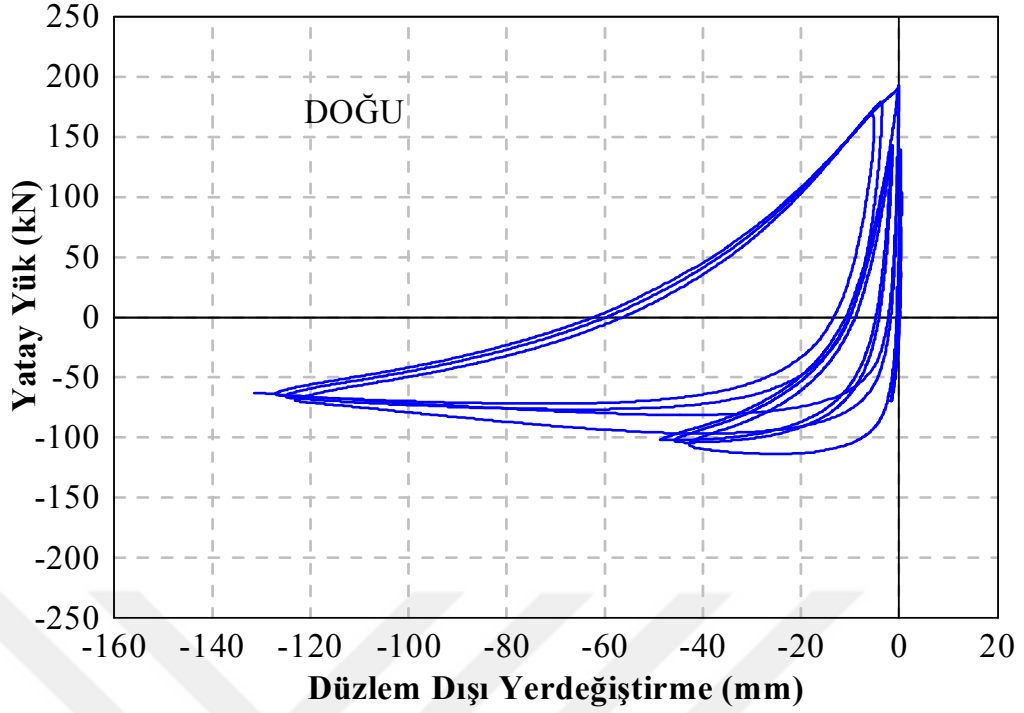
şeritlerden şiddetli sesler duyulmuştur. Numunenin alt tarafında +2400 μ strain, üst tarafında +3400 μ strain şekildeğiştirmeler ölçülmüş olup şekildeğiştirme ölçerlerden elde edilen verilerin eğrileri EK T’de verilmiştir. Şekil 4.149-f’de görüldüğü gibi alt uç zayıflatılmış kesitin batı yüzündeki CFRP şeritte yırtık oluşmuştur.



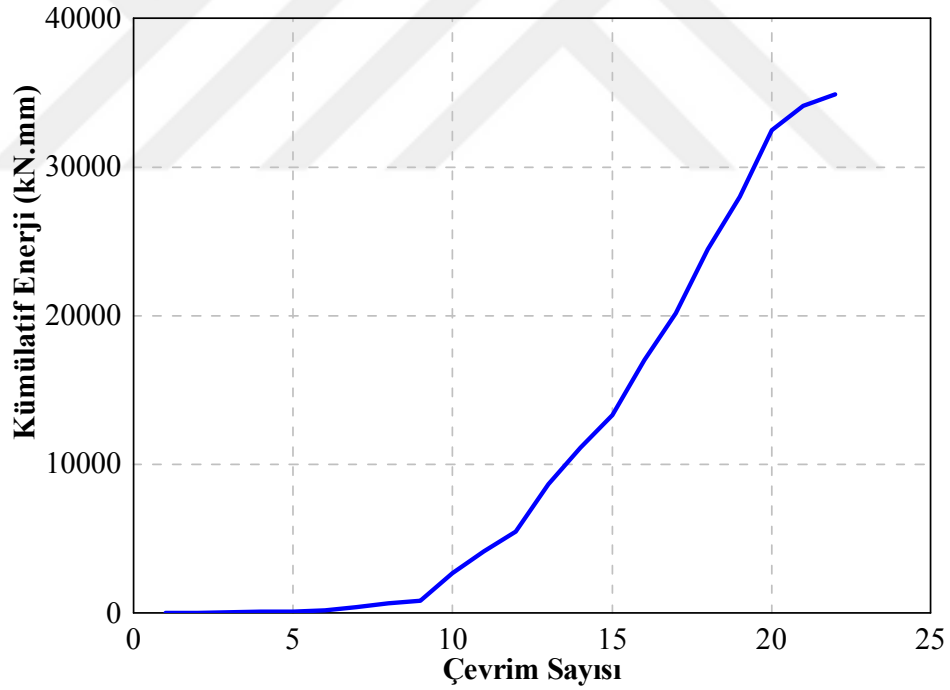
Şekil 4.145 : TB-20 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi.



Şekil 4.146 : TB-20 numunesi yükleme protokolü.



Şekil 4.147 : TB-20 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil 4.148 : TB-20 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

Basınç etkisinde alt uç CFRP elemanlarından sesler duyulmuş olup numunenin burkulmuş durumu Şekil 4.150-a'da görülmektedir. İkinci çevrim çekme ve basınç etkilerinde CFRP'lerden gelen sesler artmıştır. Son yükleme çevrimi çekme etkisinde alt uç zayıflatılmış kesit batı yüzünde çelik yüzey görünecek şekilde CFRP'de yırtık genişlemiştir. Basınç etkisinde ise bu adımdaki en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme

129mm (%3.63L) olarak ölçülmüştür. $\pm 2\delta y$ yerdeğiştirme adımımda elde edilen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +192.5kN ve -68.8kN'dur.

Numuneye üç yükleme çevrimi olarak uygulanan son yerdeğiştirme seviyesi $\pm 3\delta y$ 'nin (± 16.89 mm yerdeğiştirme, %0.59 görelı öteleme oranı) ilk çevriminde, çekme etkisinde +187kN yük ve +16.5mm yerdeğiştirme değerlerinde alt uç zayıflatılmış kesitin güçlendirme bölgesinden yüksek sesler duyulmuş ve küçük bir CFRP parçası koparak yerinden fırlamıştır. Basınç etkisinde de CFRP'lerden sesler duyulmaya devam edilmiştir. Numunenin basınç etkisindeki burkulmuş durumu Şekil 4.150-b'de görölmektedir. Numunenin basınç etkisinde düzlem dışı hareket etmesinden dolayı, alt uç birleşimde plastik mafsallın oluştuğı bölgede çekme tarafından kalan batı yüzdeki yırtığın ilerlemesi Şekil 4.150-c'de görölmektedir. Alt uç birleşiminde basınç tarafında kalan doğu yüzün durumu ise Şekil 4.150-d'de verilmiştir. Düzlem dışı yerdeğiştirmenin 138mm (%3.88L)'ye ulaşmasından sonra, yerdeğiştirme ölçerin sonraki yerdeğiştirme seviyesinde kapasitesine ulaşacağı öngörölüp, deneyden çıkartılmıştır. Numuneye ilişkin yatay yük düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.147'de görölmektedir. İkinci çevrimde çekme etkisinde CFRP'lerden sesler gelmeye devam etmiş, alt uç doğu yüzünde CFRP'deki yırtık ilerlemiştir (Şekil 4.150-e). Basınç etkisinde de -49.1kN seviyesinde CFRP'lerden sesle duyulmuş, alt uç zayıflatılmış kesitteki CFRP'de yırtığın büyüdüğü gözlenmiştir. Üçüncü çevrimde çekme etkisinde CFRP'lerden sesler artmış alt uç zayıflatılmış kesit batı yüzündeki CFRP'de ayrılma devam etmiş ve çelik yüzey görünmüştür. Basınçta ise orta bölgedeki CFRP sargının üst bölümünde numunede hafif boya dökölmesi gözlenmiştir. Bu aşamada ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +192kN ve -51.4kN'dur.

Numuneye iki kez uygulanan $\pm 4\delta y$ (± 26.68 mm yerdeğiştirme, %0.93 görelı öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde ilk çevrim çekme etkisinde alt uç zayıflatılmış kesit batı yüzündeki yırtık aşağı doğru ilerlemeye başlamış olup bu durum Şekil 4.150-f'de görölmektedir. Alt uç birleşimi doğu yüzündeki CFRP'de de yırtık ilerlemiş olup Şekil 4.151-a'da verilmiştir. Buna karşın, sorunsuz üst uç birleşiminin durumu Şekil 4.151-b'de görölmektedir. Basınç etkisinde numunenin genel burkulmuş durumu Şekil 4.151-c'de görölmekte olup Şekil 4.151-d'de verildiğı şekliyle orta bölgede CFRP sargının bittiğı yerin hemen üstünde yerel burkulma başlamıştır. İkinci çevrim çekme etkisinde orta bölgedeki kalıcı yerdeğiştirme aşırı

belirginleşmiş, alt uç batı yüzdeki CFRP'deki yırtık ilerlemiştir. Basınçta, orta bölgede aşırı yerel burkulma oluşumu sonucu içeri çöken bölge genişlemiştir. Bu aşamada ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +186.6kN ve -40.4kN'dur.

$\pm 5\delta y$ ($\pm 33.35\text{mm}$ yerdeğiştirme, %1.17 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme adımının ilk yükleme çevriminin çekme etkisinde üst uç zayıflatılmış kesit doğu yüzündeki CFRP şeritte, Şekil 4.151-e'de görüldüğü gibi, yırtık oluşmuş ancak batı yüzündeki CFRP şeritlerde sorun gözlenmemiştir. Orta bölgedeki CFRP sargı üst tarafa yakın bölgede enine doğrultuda yırtılmış olup Şekil 4.151-f'de görülmektedir. Basınç etkisinde, yerel burkulma Şekil 4.152-a'da görüldüğü gibi aşırı miktarda artmıştır. İkinci çevrim çekme etkisinde orta yerel burkulma bölgesinde, burkulma bölgenin köşelerinde kılcal yırtıklar belirlenmiştir. Alt uç zayıflatılmış kesitin batı ve doğu yüzlerindeki yırtıklardan çelik yüzey görülmüştür. Yüksek sesle üst uç zayıflatılmış kesit doğu yüzündeki CFRP şeritte de yırtık oluşmuştur. Basınç etkisinde orta bölgedeki yerel burkulma bölgesinde kesit aşırı şekilde plastikleşmiştir. Bu adımda ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +183.2kN ve -28.3kN'dur.

Yatay yerdeğiştirme miktarının artırılmasıyla ulaşılan $\pm 6\delta y$ ($\pm 40.02\text{mm}$ yerdeğiştirme, %1.40 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinin ilk çevriminde çekme etkisinde pik yerdeğiştirmeye giderken numunede orta bölgenin üstündeki yerel burkulma bölgesinin batı yüzünde yırtılma başlamıştır (Şekil 4.152-b). Basınçta ise yırtık kapanarak yerel burkulma bölgesinde aşırı içe çökme devam etmiştir. İkinci çevrimde çekme etkisinde orta bölgedeki yırtık aşırı artmıştır. Basınçta ise aynı bölgede aşırı içe çökme gözlenmiştir. Bu adımda ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +136kN ve -21.2kN'dur.

$\pm 7\delta y$ ($\pm 46.69\text{mm}$ yerdeğiştirme, %1.63 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme adımının ilk çekme etkisinde numunedeki yırtık ilerlemesi Şekil 4.152-c'de verilmiştir. Numune pik yerdeğiştirmeye giderken +41.95mm seviyesinde, 59.7kN yatay kuvvet etkisinde orta bölge CFRP sargısının üstündeki yerel burkulma bölgesinden yüksek sesle kopmuştur. Şekil 4.152-d ve e'de kopma sonrası orta bölge görülmektedir.

Kopma, alt bayrak levhası birleşiminden itibaren numune ortasına doğru 2111mm ileride meydana gelmiştir. Kopma sonrasında, alt uç zayıflatılmış kesitin alt ve üst

yüzlerinde yırtık başlangıcı olduğu belirlenmiş olup bu durum Şekil 4.152-f’de görülmektedir. Uç birleşimlerdeki kaynak ve bulonlarda sorun gözlenmemiştir. Deney sonunda TB-20 numunesi kümülatif olarak 34863kNmm enerji yutmuştur ve yutulan kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi Şekil 4.148’de gösterilmiştir

.

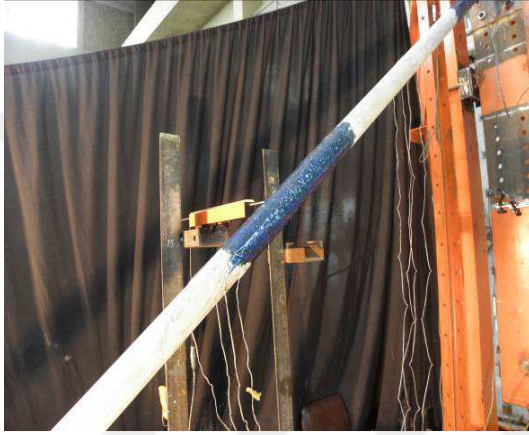




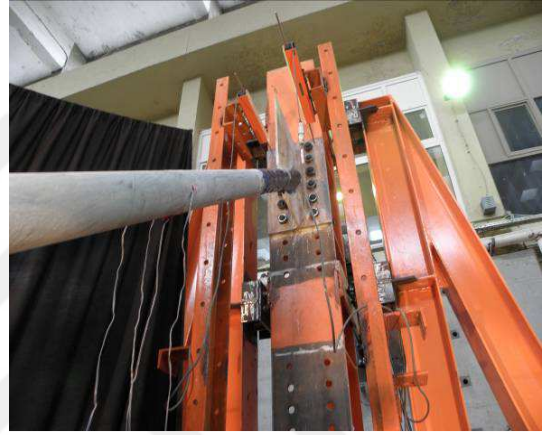
(a)



(b)



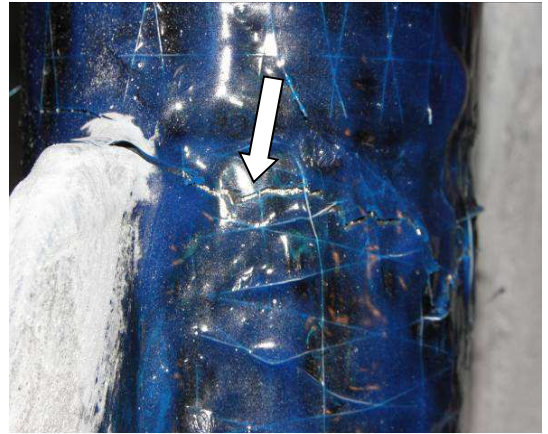
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.149 : TB-20 numunesi deney öncesi, $1\delta_y$ (6.67mm) ve $2\delta_y$ (13.34mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşimi. (c) CFRP ile orta bölge güçlendirmesi. (d) Deney öncesi üst uç birleşimi. (e) $-1\delta_y$ (-6.67mm)'de burkulma başlangıcı. (f) $+2\delta_y$ (+13.34mm)'de alt uç batı yüzünde CFRP'de yırtılma başlangıcı.



(a)



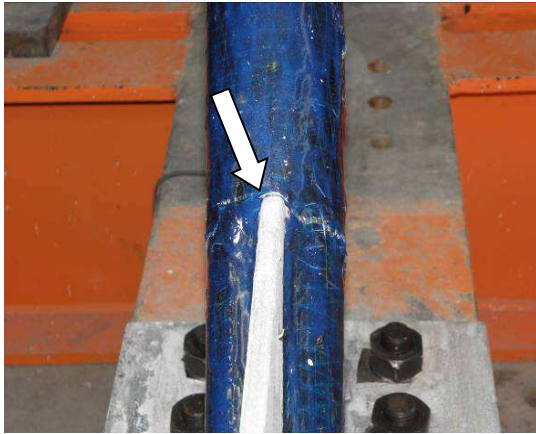
(b)



(c)



(d)

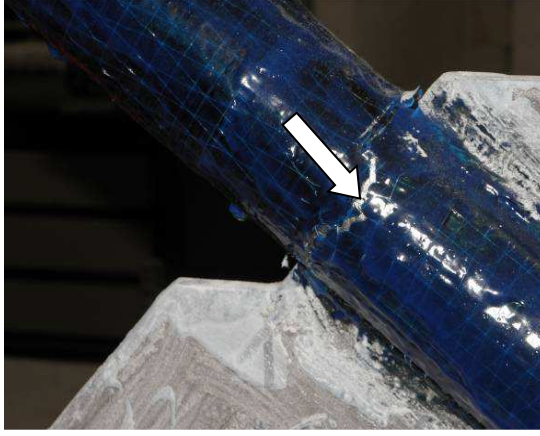


(e)



(f)

Şekil 4.150 : TB-20 numunesinin $2\delta_y$ (13.34mm), $3\delta_y$ (20.01mm) ve $4\delta_y$ (26.68mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-2\delta_y$ (-13.34mm)'de burkulma. (b) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de burkulma. (c) $+3\delta_y$ (+20.01mm)'de alt uç batı yüzünde CFRP'de yırtığın ilerlemesi. (d) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de basınç etkisindeki alt uç doğu yüzündeki CFRP'nin durumu. (e) $+3\delta_y$ (+20.01mm)'de alt uç doğu yüzünde CFRP'de yırtığın ilerlemesi. (f) $+4\delta_y$ (+26.68mm)'de alt uç batı yüzünde CFRP'de yırtığın ilerlemesi.



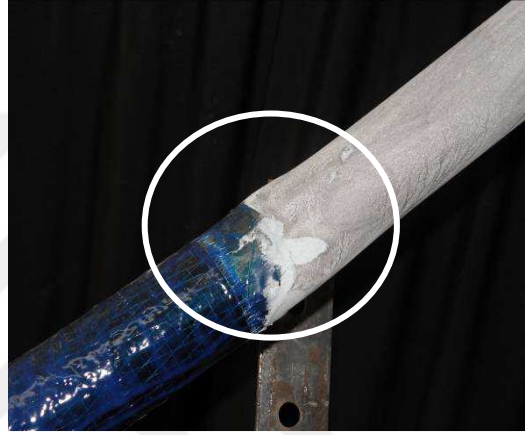
(a)



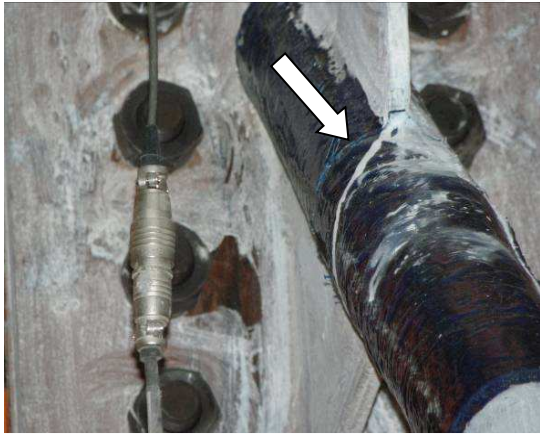
(b)



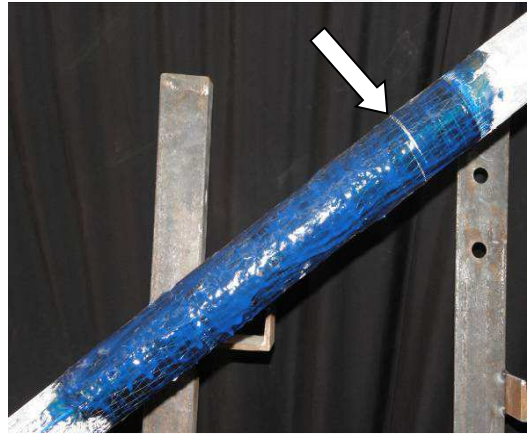
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.151 : TB-20 numunesinin $4\delta_y$ (26.68mm) ve $5\delta_y$ (33.35mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $+4\delta_y$ (+26.68mm)'de alt uç birleşimi doğru yüzünde CFRP'de yırtığın ilerlemesi. (b) $+4\delta_y$ (+26.68mm)'de üst uç birleşiminin durumu. (c) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de genel burkulma. (d) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de yerel burkulmanın belirginleşmesi. (e) $+5\delta_y$ (+33.35mm)'de üst uç birleşiminde CFRP'de yırtılma. (f) $+5\delta_y$ (+33.35mm)'de orta bölgede CFRP'de enine yırtılma.



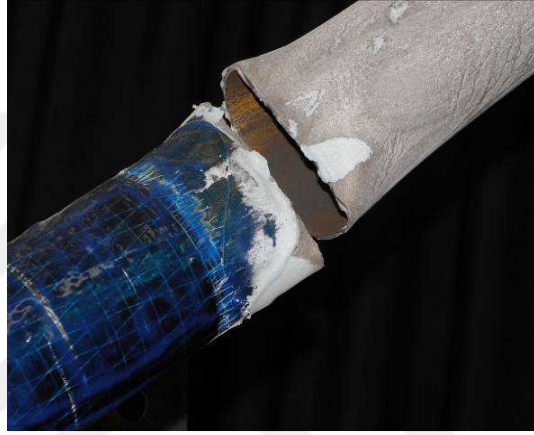
(a)



(b)



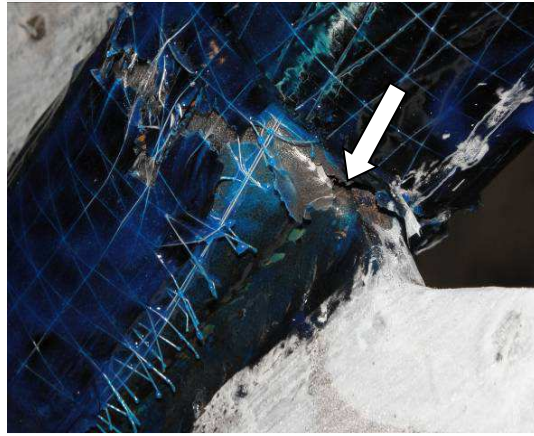
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.152 : TB-20 numunesinin $5\delta_y$ (33.35mm), $6\delta_y$ (40.02mm) ve $7\delta_y$ (46.69mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı ve kopma sonrası görünüşleri: (a) $-5\delta_y$ (-33.35mm)'de yerel burkulma. (b) $+6\delta_y$ (+40.02mm)'de orta bölgede yırtılma başlangıcı. (c) $+7\delta_y$ (+46.69mm)'de orta bölgede yırtığın ilerlemesi. (d,e) Kopma sonrası görünüşler. (f) Kopmadan sonra belirlenen alt uç zayıflatılmış kesitteki yırtılma başlangıcı.

4.4.20 TB-21 numunesi (Boru 76.1x3 + Uçta:CFRP plaka ve kumaş + Orta:%28L CFRP sargı)

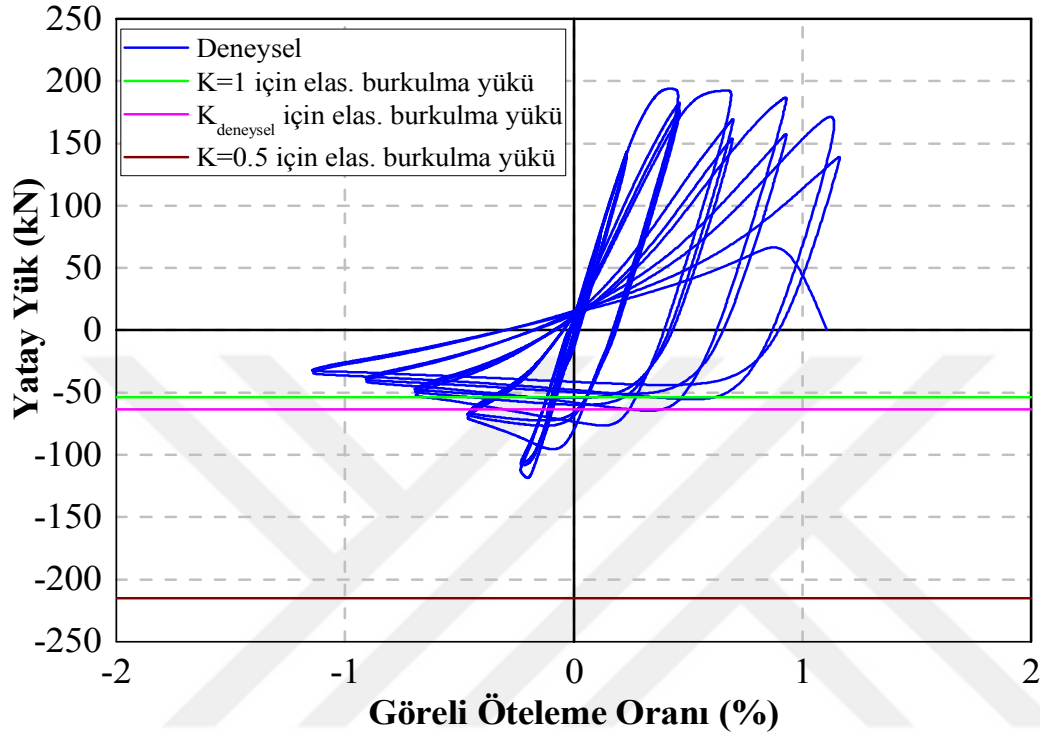
Boru 76.1x3 kesit özelliklerinde ve L=3558mm uzunluğunda CFRP elemanlarla uçta ve orta bölgede güçlendirilmiş olan TB-21 numunesi, TB-19 ve TB-20 numuneleriyle aynı yükleme protokolüyle denenmiş ve TB-19 ile TB-20 numunelerinin histeretik enerji yutma kapasiteleri ile karşılaştırılmıştır. Deneysel olarak elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.153'de, uygulanan yükleme protokolü Şekil 4.154'de görülmekte olup numunenin deneyden önceki görünüşleri Şekil 4.157-a, b, c ve d'de verilmiştir.

TB-21 numunesi $\pm 0.25\delta_y$ yatay yerdeğiştirme ($\pm 1.67\text{mm}$, %0.058 görelî ötelenme oranı) etkisinde ilk üç çevrimde ve sonraki $\pm 0.50\delta_y$ ($\pm 3.34\text{mm}$, %0.12 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesindeki üç yükleme çevrimi etkisinde elastik davranmıştır. $\pm 0.50\delta_y$ yatay yerdeğiştirme seviyesinde en fazla 0.18mm (%0.0051L) düzlem dışı yerdeğiştirme ölçülmüştür. Bu aşamalarda, zayıflatılmış uç kesitleri güçlendirmek üzere yapıştırılan CFRP kumaş ve şerit sargılar ile birleşim elemanlarında herhangi bir göçme görülmemiştir.

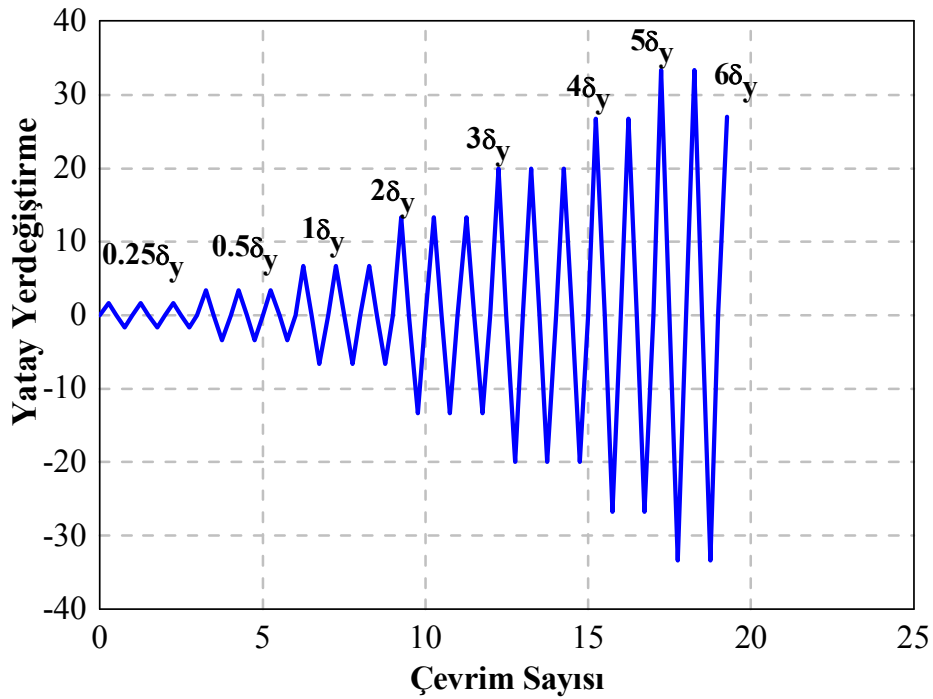
$\pm 1\delta_y$ ($\pm 6.67\text{mm}$, %0.23 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme adımının ilk çevriminde çekme etkisinde TB-21 numunesi üzerinde +1200~+1300 μstrain civarında şekildeğiştirmeler ölçülmüştür. Basınç etkisinde yatay yük -120.5kN seviyesine ulaştığında numune aniden burkularak batıya doğru düzlem dışı hareket etmiş olup burkulma anı Şekil 4.157-e'de görülmektedir. Bu noktada yükte ani düşüş gözlenerek, yük -116kN seviyesine inmiştir. Ani burkulma anında 30mm (%0.84L) düzlem dışı yerdeğiştirme ölçülmüştür. İkinci ve üçüncü yükleme çevrimlerinde çekme kuvvetinin arttığı belirlendiğinden bu durum CFRP elemanların yük aldığı şeklinde yorumlanmıştır. Basınç etkisinde en fazla 44.5mm (%1.25L) düzlemdışı yerdeğiştirme ölçülmüştür. Bu adımda ölçülen en büyük çekme ve basınç yükleri sırasıyla +144kN ve -111kN'dur.

TB-21 numunesinde $\pm 2\delta_y$ ($\pm 13.34\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.47 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme adımı ilk yükleme çevriminde çekme etkisinde, +200kN yük seviyesinde CFRP elemanlardan sesler duyulmuş ve yük +193kN'a düşmüştür. Numune orta bölgesinde 1.4mm (%0.039L)'lik kalıcı düzlemdışı yerdeğiştirme ölçülmüş olup numune üzerinde alt bölgede +7000 μstrain , orta bölgede +2200~+2500 μstrain ve üst bölgede +5000 μstrain civarında şekildeğiştirmeler

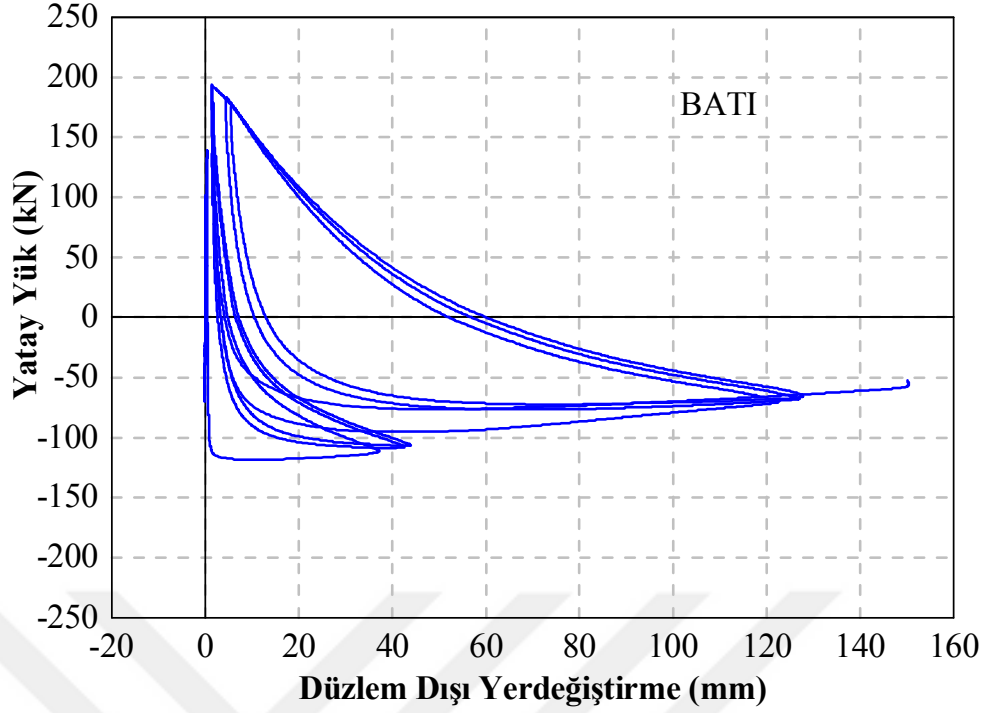
ölçülmüştür. Basınç etkisinde ise alt uç zayıflatılmış kesit güçlendirmesinin basınç etkisindeki batı tarafından sesler duyulmuş ve CFRP şeritte çelik yüzeyden ayrılma izlenmiştir. İkinci çevrimde çekme etkisinde özellikle alt uçtaki CFRP'lerden sesler gelmiştir. Basınç etkisinde numune yalnızca genel olarak burkulmuş, yerel burkulma



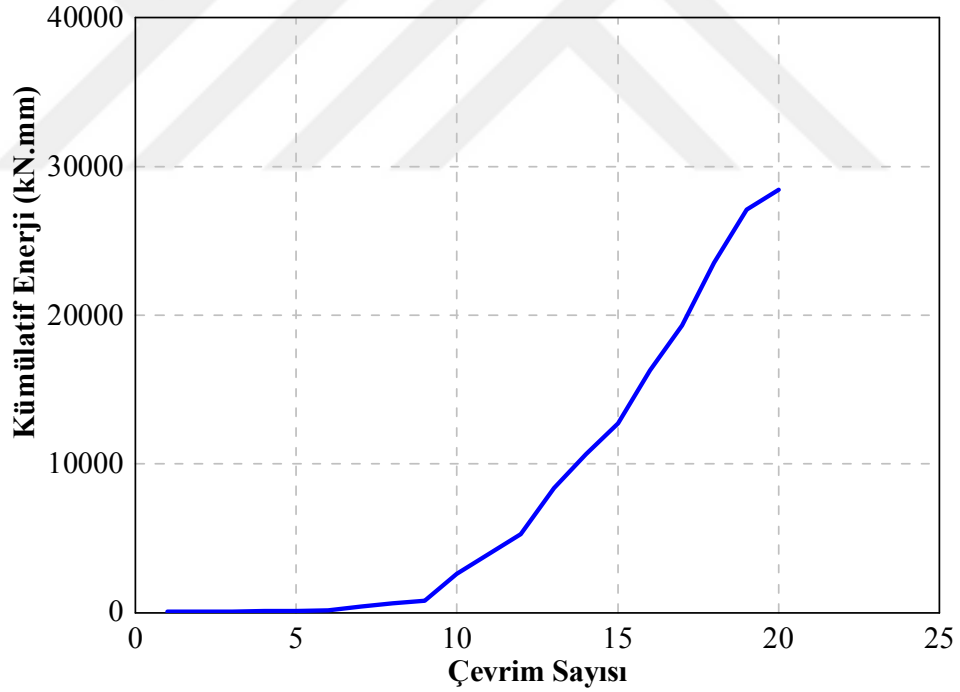
Şekil 4.153 : TB-21 numunesi yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrisi.



Şekil 4.154 : TB-21 numunesi yükleme protokolü.



Şekil 4.155 : TB-21 numunesi yatay yük-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrisi.



Şekil 4.156 : TB-21 numunesi kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi.

ve boya dökülmesi belirlenmemiştir. Numunenin genel burkulmuş durumu Şekil 4.157-f'de görülmektedir. Üçüncü ve son çevrimde çekme etkisinde CFRP elemanlardan sesler duyulmaya devam edilmiş, alt uç batı yüzü güçlendirmesinde CFRP şeritte ince kılcal bir yırtık belirlenmiştir (Şekil 4.158-a). Basınç etkisinde numune $2\delta_y$ yerdeğiştirme seviyesindeki en büyük düzlem dışı yerdeğiştirme miktarı

olan 130mm (%3.65L)'ye ulaşmıştır. Bu adımda ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +193kN ve -70.1kN'dur.

Sonraki $\pm 3\delta_y$ (± 16.89 mm yerdeğiştirme, %0.59 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme adımının ilk çevriminde çekme etkisinde CFRP'lerden sesler duyulmuştur. Pik yerdeğiştirmeye giderken +187kN seviyesinde yatay yük-yerdeğiştirme grafiğı yataylaşmıştır. Buna ek olarak, alt uçta zayıflatılmış kesitin doğu ve batı yüzlerindeki CFRP şeritlerde zayıflatılmış kesit hizasında, Şekil 4.158-b'de görüldüğü gibi, yırtıklar oluşmuştur. Basınç etkisinde numune 150mm (%4.22L)'den fazla düzlem dışı yerdeğiştirme yapmış olup yerdeğiştirme ölçerin kapasitesine ulaşılmış olduğundan deneyden çıkartılmıştır. Şekil 4.158-c'de numunenin burkulmuş durumu verilmiştir. İkinci çevrim çekme etkisinde alt uç zayıflatılmış kesit CFRP şeritlerindeki yırtıklarda büyüme gözlenmiş ve yırtık doğu yüzde ilerlemiştir; CFRP'lerden sesler gelmeye devam etmiştir. Alt uç doğu yüzde ilerleyen yırtık Şekil 4.158-d'de görülmektedir. Orta bölgedeki 1200mm uzunluğundaki CFRP sargıda herhangi bir sorun belirlenmemiştir. Basınç etkisinde, yerel burkulma belirtisi ve boya dökülmesi gözlenmemiştir. Üçüncü çevrimde çekme etkisinde ortadaki CFRP sargılardan sesler duyulmuştur. Numune üzerinde ölçülen en yüksek şekildeğiştirmeler alt bölgede +14000 μ strain, orta bölgede +12000 μ strain ve üst bölgede +13000 μ strain civarında olup deney boyunca kaydedilen verilere ilişkin şekildeğiştirme histeresisleri EK U'da gösterilmiştir. Basınç etkisinde ise alt uç güçlendirmesi batı tarafında aderans kaybı olan bölgedeki CFRP liflerinde kabartıyla birlikte burkulma sonrasında kırılma gözlenmiştir (Şekil 4.158-e). Bu adımda ölçülen en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +192.8kN ve -52.5kN'dur.

Numuneye iki kez uygulanan $\pm 4\delta_y$ (± 26.68 mm yerdeğiştirme, %0.93 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde ilk çevrim çekme etkisinde alt uçtaki lifleri burkulan bölgedeki CFRP üzerinde oluşan yırtık aşağıya doğru ilerlemiştir. Bunun yanında, orta bölgedeki CFRP sargılardan sesler duyulmuştur. Basınç etkisinde Şekil 4.158-f'de görüldüğü gibi burkulan numunenin, alt uç zayıflatılmış kesitte doğu yüzde çekmeye maruz kalan CFRP şeritte aderans ayrılması görülmüş (Şekil 4.159-a), CFRP lif yüksek sesle kopup dışarı fırlamıştır (Şekil 4.159-b). Orta bölgeden de sesler gelmeye devam etmiştir. İkinci yükleme çevrimi çekme etkisinde, üst uç birleşiminde, Şekil 4.159-c'de görüldüğü gibi, herhangi bir sorun izlenmemiştir. Alt

uç CFRP şeritte yırtık özellikle doğu yüzde ilerlemiş ve orta bölgeden sesler duyulmuştur. Basınç etkisinde, orta bölgede CFRP sargıda sorun gözlenmemiş olup alt uç birleşimi batı yüzünde basınç etkisinde kalan CFRP liflerinde burkulma gözlenmiştir. Bu durum Şekil 4.159-d’de verilmiştir.

Yerdeğiştirme miktarının arttırılmasıyla ulaşılan $\pm 5\delta_y$ ($\pm 33.35\text{mm}$ yerdeğiştirme, %1.17 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme adımının ilk yükleme çevriminin çekme etkisinde, orta bölgede CFRP sargı üzerinde yüksek ses sonrasında yırtık oluşmuştur. Bunun yanında, alt uç zayıflatılmış kesit CFRP güçlendirmesinde, Şekil 4.159-e’de görüldüğü gibi yırtık büyümeye devam etmiştir. Şekil 4.159-f’de görüldüğü gibi, çekme etkisinde orta bölgede enine yırtılma tespit edilmiştir. Basınç etkisindeki burkulmuş durumu Şekil 4.160-a’da verilen numune, orta bölgede genel burkulma yönünde çekmeye çalışan bölgede CFRP sargıda enine doğrultuda liflerde ayrılma (Şekil 4.160-b) izlenmiş, alt uç zayıflatılmış kesitin çekme etkisinde kalan doğu yüzünde oval uç detay civarında yüksek sesle yırtık oluşmuştur. İkinci yükleme çevrimi çekme etkisinde orta bölgede CFRP sargı üzerinde, Şekil 4.160-c’de görüldüğü gibi, ikinci enine doğrultuda yırtık oluşmuş olup alt uç CFRP güçlendirmesindeki yırtıklar artmıştır. Basınç etkisinde ise orta bölgede burkulmanın çekme oluşturduğu batı yüzünde CFRP sargıda enine lif doğrultusundaki yırtıklar ilerlemiştir.

$\pm 6\delta_y$ ($\pm 40.02\text{mm}$ yerdeğiştirme, %1.40 görelî öteleme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde ilk çekme pikine giderken $+26.87\text{mm}$ yerdeğiştirme seviyesinde, $+73.8\text{kN}$ yük etkisinde numune alt uç zayıflatılmış kesitten aniden yüksek sesle kopmuştur.

Kopma sonrasında numune üzerinde yapılan gözlemler sonucunda numunenin Şekil 4.160-d’de görüldüğü gibi alt uç zayıflatılmış kesitinde çekme etkisinde önemli miktarda uzama olduğu ve basınç etkisinde ise bu bölgede yerel burkulma olduğu kopma bölgesinin incelenmesiyle tespit edilmiştir. Üst uç zayıflatılmış kesit CFRP güçlendirmeleri incelendiğinde, batı yüzde CFRP üzerinde yırtık olduğu (Şekil 4.160-e) ve doğu yüzde ise CFRP sargının başladığı noktada CFRP şeritte bir bölgede aderans kaybı olduğu (Şekil 4.160-f) tespit edilmiştir. Deney sonunda TB-21 numunesi kümülatif olarak 28435kNmm enerji yutmuş olup yutulan kümülatif enerji-çevrim sayısı eğrisi Şekil 4.156’da gösterilmiştir.



(a)



(b)



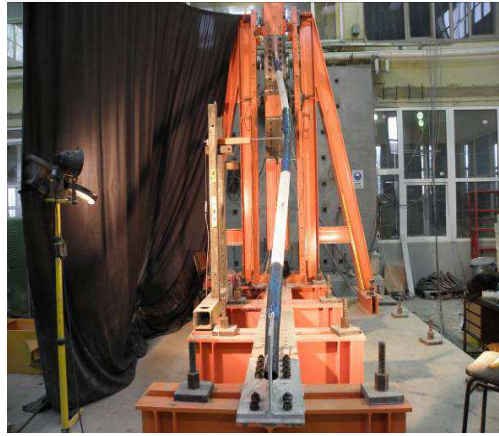
(c)



(d)

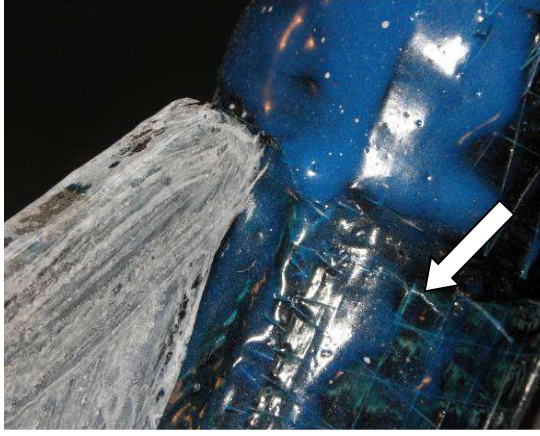


(e)



(f)

Şekil 4.157 : TB-21 numunesi deney öncesi, $1\delta_y$ (6.67mm) ve $2\delta_y$ (13.34mm) yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) Genel görünüş. (b) Deney öncesi alt uç birleşimi. (c) Deney öncesi üst uç birleşimi. (d) Orta bölge güçlendirmesi. (e) $-1\delta_y$ (-6.67mm)'de burkulma başlangıcı. (f) $-2\delta_y$ (-13.34mm)'de burkulma.



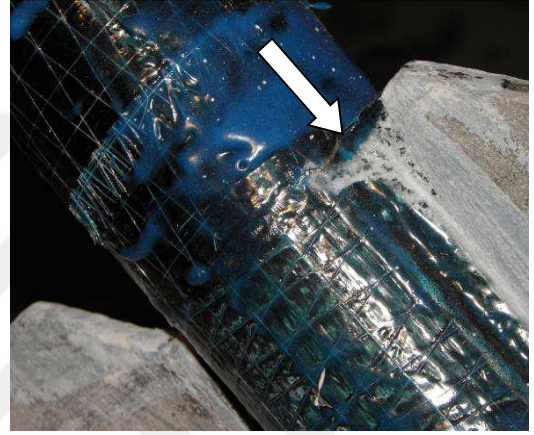
(a)



(b)



(c)



(d)

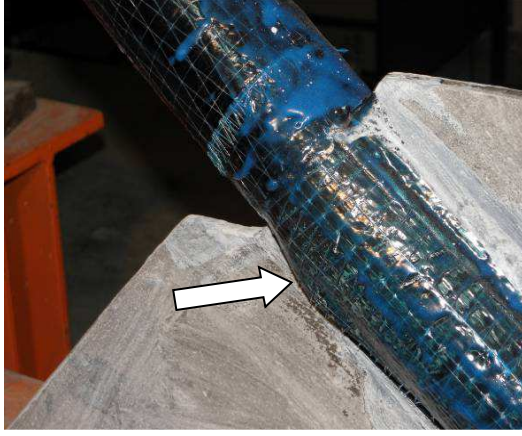


(e)



(f)

Şekil 4.158 : TB-21 numunesinin $2\delta_y$ (13.34mm), $3\delta_y$ (20.01mm) ve $4\delta_y$ (26.68mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $+2\delta_y$ (+13.34mm)'de alt uç batı yüzünde CFRP'de oluşan yırtık. (b) $+3\delta_y$ (+20.01mm)'de alt uç batı yüzünde CFRP'nin yırtılması. (c) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de burkulma. (d) $+3\delta_y$ (+20.01mm)'de ikinci çekme etkisinde alt uçtaki CFRP'de doğu yüzünde yırtık. (e) $-3\delta_y$ (-20.01mm)'de alt uç batı yüzünde yırtık bölgesinde aderansını kaybeden CFRP liflerinin burkulması. (f) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de burkulma.



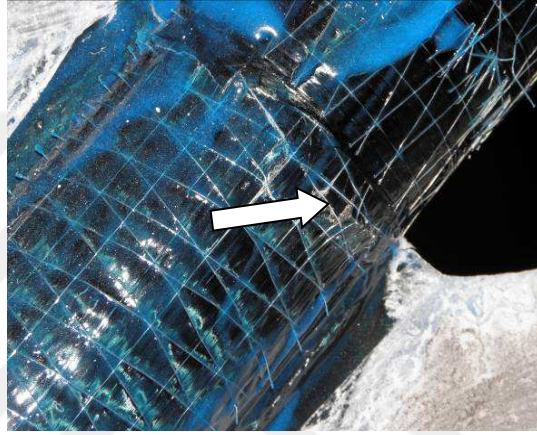
(a)



(b)



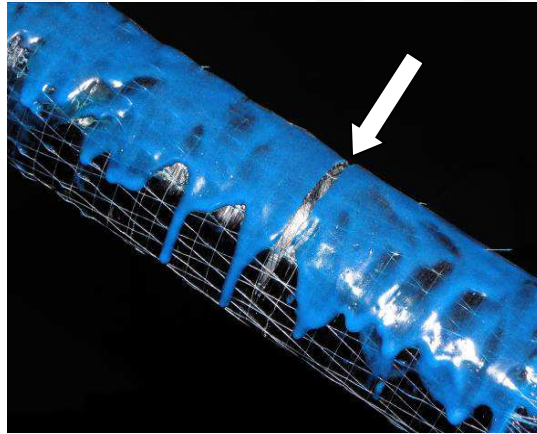
(a)



(b)



(a)



(b)

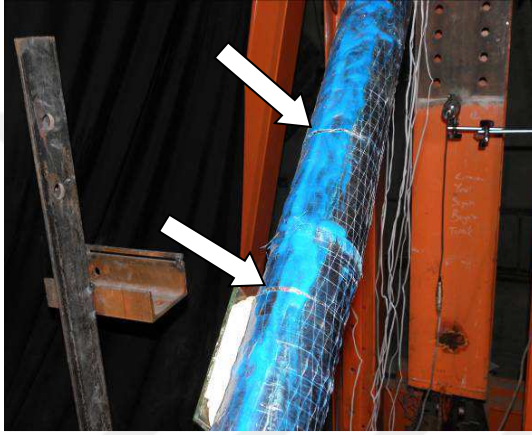
Şekil 4.159 : TB-21 numunesinin $4\delta_y$ (26.68mm) ve $5\delta_y$ (33.35mm) yatay yerdeğiştirme seviyelerinde davranışı: (a) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de alt uç doğu yüzünde CFRP'de aderans kaybı. (b) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de alt uç doğu yüzündeki CFRP lifinin koparak dışarı fırlaması. (c) $+4\delta_y$ (+26.68mm)'de ikinci çevrimde üst uç birleşiminin durumu. (d) $-4\delta_y$ (-26.68mm)'de batı yüzde burkulan CFRP lifleri. (e) $+5\delta_y$ (+33.35mm)'de alt uç zayıflatılmış kesit hizasında CFRP'nin ayrılması. (f) $+5\delta_y$ (+33.35mm)'de orta bölgede CFRP'de enine yırtılma.



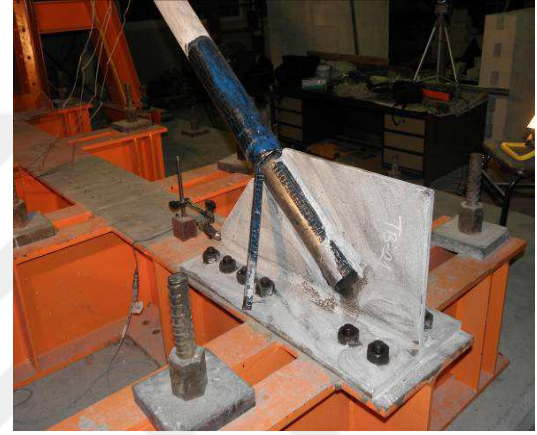
(a)



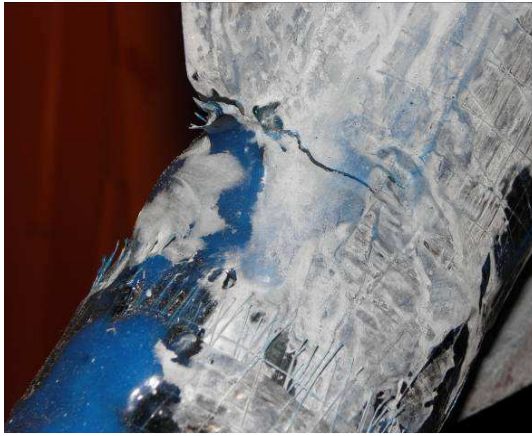
(b)



(c)



(d)



(e)

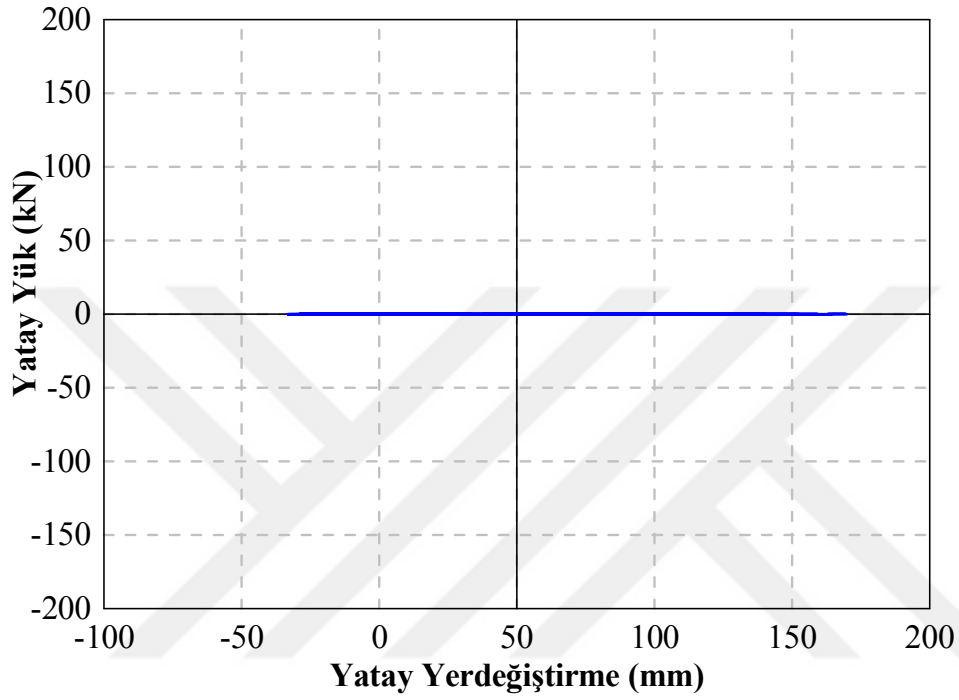


(f)

Şekil 4.160 : TB-21 numunesinin $5\delta_y$ (33.35mm) yatay yerdeğiştirme seviyesinde davranışı ve kopma sonrası görünüşleri: (a) $-5\delta_y$ (-33.35mm)'de burkulma. (b) $-5\delta_y$ (-33.35mm)'de orta bölgede oluşan dirseğin çekme tarafında yırtılma başlangıcı. (c) $+5\delta_y$ (+33.35mm)'de ikinci çevrim etkisinde orta bölgede oluşan enine yırtık. (d) Kopma sonrası alt uç birleşimi. (e,f) Kopmadan sonra tespit edilen üst uç zayıflatılmış kesitteki CFRP'nin hasar durumu.

4.4.21 Boş deney düzeneğinin denenmesi

Deney düzeneğinin numunelere olan etkisinin anlaşılabilmesi için numune yerleştirilmemiş olan deney düzeneği TB-14 numunesinin yükleme protokolüyle denenmiş olup elde edilen yatay yük-yatay yerdeğiştirme histeretik eğrisi Şekil 4.161’de görülmektedir.



Şekil 4.161: Deney düzeneğinin yatay yük-yatay yerdeğiştirme histeretik eğrisi.

Elde edilen verilere göre deney düzeneğindeki mafsallın tasarlandığı şekliyle görevini yerine getirdiği ve düzeneğin numuneye herhangi bir dayanım ve rijitlik katkısının olmadığı görülmüştür.

5. DENEY SONUÇLARININ GRUP HALİNDE KARŞILAŞTIRILMASI

5.1 Giriş

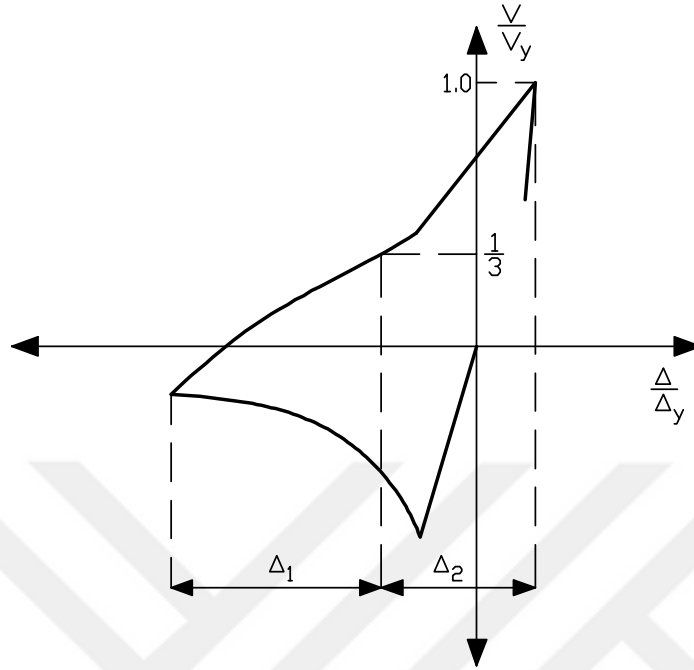
Bu bölümde numunelerin, önceki bölümde de detaylı olarak aktarılmış olan, deneysel histeretik davranışları karşılaştırılacaktır. Karşılaştırmalar özellikle aynı deney grubu içerisinde yer alan numuneler arasında yapılacaktır. Numunelerin genel davranışları elde edilmiş olan yatay yük-görelî öteleme oranı histeretik eğrileriyle değerlendirilecektir. Numunelerin enerji tüketimleri, çevrim sayısı-kümülatif tüketilen enerji eğrileriyle karşılaştırılmıştır. Özellikle başlangıç rijitlikleri zarf eğrileri değerlendirilerek rijitlik-çevrim sayısı eğrileri hazırlanmıştır. Tüp çapraz numunelerin deneysel TTY'leri Lee ve Goel (1987)'den uyarlanan esaslara göre hesaplanmıştır. Bunlara ek olarak, başlangıç rijitliği, tüp çaprazın ilk akma veya burkulma anındaki dayanımı, toplam tüketilen enerji miktarları ve etkili burkulma boyu gibi numunelerin davranışlarını yakından temsil eden parametreler tablolar halinde verilmiştir.

5.2 Tüp çaprazların deneysel tanımlanmış toplam yatay yerdeğiştirmeleri

Numunelerin deneysel TTY'leri (Δ_f) Lee ve Goel (1987)'den uyarlanan yöntemle göre deneysel histeretik eğrilerinden elde edilmiştir. Bu yöntemin adımlar aşağıda özetlenmiştir:

- Deneysel histeretik eğri, akma dayanımı ve akma yerdeğiştirmesiyle normalize edilir (V/V_y ve Δ/Δ_y).
- Histeretik eğrinin çekme bölgesi Δ_1 ve Δ_2 olmak üzere iki bölgeye ayrılmıştır. Δ_1 yükün basınçtan çekmeye döndüğü noktadan akma dayanımının 1/3'ü noktasına kadar olan eksenel uzamadır. Δ_2 ise akma dayanımının 1/3'ü olan noktadan yükün boşaltma noktasına kadar olan uzama miktarıdır. Δ_1 ve Δ_2 tanımları Şekil 5.1'de verilmiştir.
- Deneysel TTY aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanır:

$$\Delta_{f,deneyse} = \sum (0.1\Delta_1 + \Delta_2) \quad (5.1)$$



Şekil 5.1 : Δ_1 ve Δ_2 tanımları (Lee ve Goel (1987)'den uyarlanmıştır) (Çelik ve diğ., 2004)

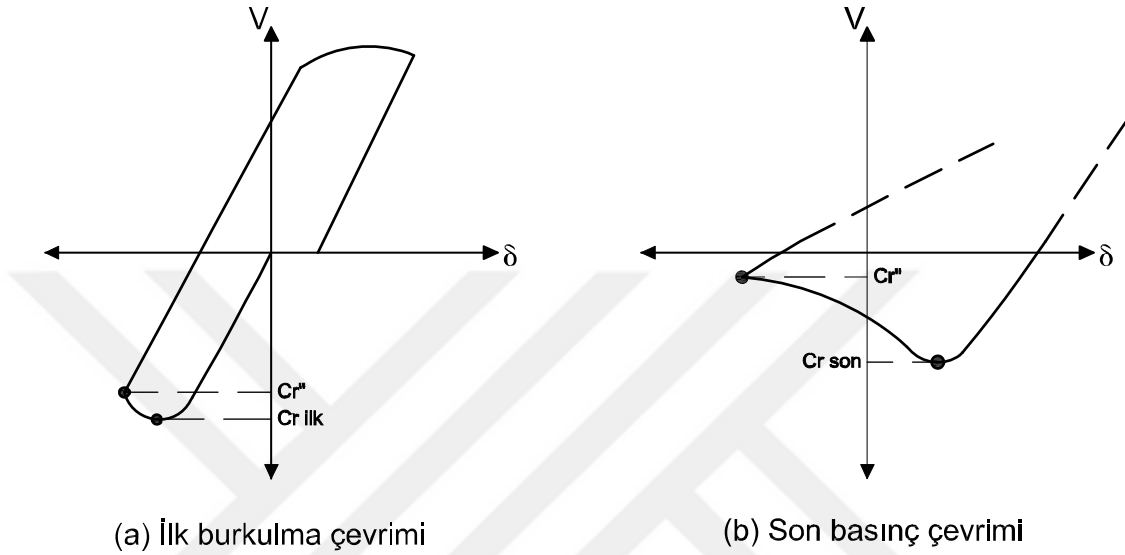
5.3 Tüp çaprazların deneysel burkulma boyu katsayıları

Tüp çaprazların deneysel burkulma boylarının hesabında numuneler üzerindeki şekildeğiştirmelerden yararlanılmıştır. İlk olarak numunelerin tamamı başlangıçta düzlem dışı burkulduğundan numunenin doğu ve batı yüzlerindeki ve tam burkulma anındaki şekildeğiştirmeler Hooke kanunu dikkate alınarak gerilmeye dönüştürülmüştür. Bu gerilmelerden yararlanılarak numunenin $\frac{1}{4}$ noktalarındaki eğilme momentleri hesaplanmış ve eğilme momenti diyagramları elde edilmiştir. Elde edilen diyagramlarda momentin sıfırdan geçtiği noktalar arası uzunluğun numune boyuna oranı deneysel burkulma boyları olarak belirlenmiştir.

5.4 Tüp çaprazların normalize edilmiş burkulma kapasiteleri

Tüp numunelerde ilk burkulmanın olduğu çevrimde ulaşılan en büyük basınç kuvveti (burkulma yükü) $C_{r \text{ ilk}}$, numunenin göçmeden önceki son basınç çevriminde ulaşılan en büyük basınç kuvveti $C_{r \text{ son}}$, akmadan sonraki her yerdeğiştirme seviyesinin ilk çevrimindeki hedef yerdeğiştirmede ulaşılan basınç yükü ise C_r''

olarak isimlendirilmiş, bu değerler Şekil 5.2’de detaylı olarak gösterilmiştir. Normalize edilmiş basınç kapasiteleri aynı şekilde her C_r'' 'ye karşılık gelen yerdeğiştirmeler (δ_r) ilk burkulma (akma) yerdeğiştirmesine bölünerek (δ_r/δ_y) normalize edilmiştir. Normalize edilmiş basınç kapasiteleri olan $C_r''/C_{r\text{ ilk}}$ ve $C_r''/C_{r\text{ son}}$ 'un normalize edilmiş yerdeğiştirmelere (δ_r/δ_y) göre ayrı ayrı değişim eğrileri hazırlanmıştır.



Şekil 5.2 : $C_{r\text{ ilk}}$, $C_{r\text{ son}}$ ve C_r'' 'nün tanımları.

5.5 Basınç ve çekme etkisinde ayrı ayrı tüketilen enerji oranları

Çapraz numunelerin basınç ve çekme bölgelerinde tükettikleri enerjilerin karşılaştırılması amacıyla numunelerin akmadan itibaren her bir yerdeğiştirme adımıdaki tüm çevrimlerde tüketilen toplam basınç ve toplam çekme enerjilerinin oranı (E_c/E_t) ve normalize edilmiş yerdeğiştirmelerin (δ_r/δ_y) eğrileri çizilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Numenin göçtüğü çekme çevriminin, basınç çevrimi karşılığı olmadığı için bu adımdaki çekme enerjisi hesaplara ve karşılaştırmalara dahil edilmemiştir. E_c/E_t oranı özellikle burkulan çaprazın basınç etkisinde de ne kadar etkin olduğunun belirlenmesi bakımından önemlidir. Genel kaygı olarak basınçta çok verimsiz görünen bu tür çaprazların basınçta da görece verimliliklerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

5.6 Etkin rijitlik değişimi

Çaprazlı çelik çerçevelerde büyük yerdeğiştirmeler altında rijitlikteki değişim çerçevenin davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada, elastik ötesi adımlarda her bir çevrimde ulaşılan maksimum çekme ve maksimum basınç dayanımları arasındaki eğim esas alınarak hesaplanan etkin (efektif) rijitlik değerlerinin çevrim sayısına göre değişimi belirlenmiş olup güçlendirilmiş numunelerin rijitliklerindeki değişimler yalın numuneler ile karşılaştırılmıştır.

5.7 Histeretik sönüm oranları

Numunelerin yön değiştiren tekrarlı yükler altında sönümledikleri enerji miktarını ifade etmenin bir diğer yolu da etkili/histeretik sönüm oranının hesaplanmasıdır. Viskoz sönüm gerçek fiziksel bir özellik olmayıp daha çok matematiksel bir yaklaşım yapmak için kullanılmaktadır. Gerçekte yapılarda sönümleyici elemanlar yoksa yapının sönümünü modellemek için viskoz sönüm yaklaşımı kullanılmaktadır. Rayleigh sönümü olarak da bilinen, kütle ve rijitlik orantılı sönüm bir diğer modeldir. Sözü edilen her iki sönüm modeli de yapının gerçek fiziksel özelliklerine dayalı olarak üretilen ve analitik olarak gereksinim duyulan özellikleri içermektedir.

Chopra (2001) etkili sönüm oranı için (5.2) genel bağıntısını önermektedir;

$$\xi_{eff} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_{D,\Delta_i}}{E_{S,\Delta_i}} \quad (5.2)$$

Burada, ξ_{eff} etkili (eşdeğer) sönüm oranı, E_{D,Δ_i} numune tarafından i sayılı çevrimde sönümlenen enerjidir. E_{S,Δ_i} i sayılı çevrimde depolanan elastik şekildeğiştirme enerjisi

$$E_{S,\Delta_i} = \frac{V_{\Delta_i} \Delta_i}{2} \quad (5.3)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. V_{Δ_i} i sayılı çevrimde elde edilen maksimum çekme/basınç kuvveti, Δ_i i sayılı çevrimde elde edilen maksimum yerdeğiştirmedir. Çaprazlarda depolanan elastik şekildeğiştirme enerjisi çekme ve basınç yüklemeleri için ayrı ayrı bulunan depolanan elastik şekildeğiştirme enerjisinin ortalamasıdır.

(5.3) bağıntısı (5.2)'de yerine konursa bağıntı aynı zamanda EN 15129 3.1.10'da (2010, Bölüm 3, p.6) lineer olmayan sönümleyicilerin (Non Linear Device-NLD) etkili sönüm oranı (effective damping ratio) için verilen (5.4) bağıntısına dönüşür.

$$\xi_{eff} = \frac{E_{D,\Delta_i}}{2\pi V_{\Delta_i} \Delta_i} \quad (5.4)$$

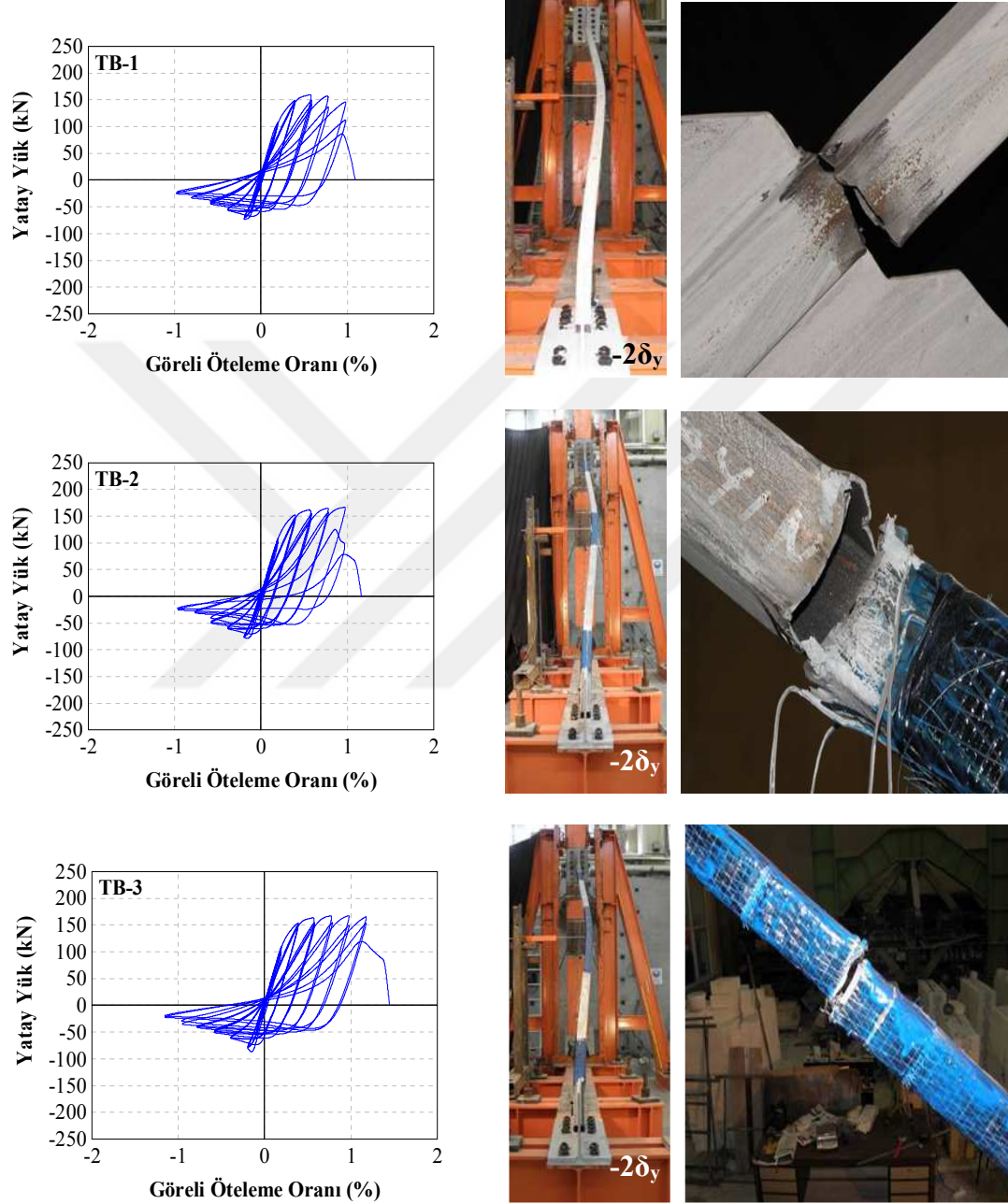
Çaprazların çekme ve basınç piklerindeki farklılık bağıntıya yerleştirilirse

$$\xi_{eff} = \frac{E_{D,\Delta_i}}{\pi(T_{\Delta_i} + P_{\Delta_i})\Delta_i} \quad (5.5)$$

(5.5) elde edilir. Burada T_{Δ_i} ve P_{Δ_i} sırasıyla i sayılı çevrimde çaprazların deneysel çekme ve basınç piklerinde ulaşılan ortalama kuvvetler, ξ_{eff} deprem sönümleyicilerinin karakteristik davranış özelliğini tanımlayan bir parametredir. Bu parametrenin yapı sisteminin dinamik kuramsal davranışının modellenmesinde kullanılmaması gerektiği, buna karşın verilen doğrultuda aynı sönüm ve rijitliğe sahip sönümleyicilerin lineer analiz problemlerinde kullanılabileceği önerilmektedir. Ayrıca numunelerin metal sönümleyiciler (Energy Dissipating Devices- EDD) sınıfında değerlendirilebilmesi için etkili (eşdeğer) viskoz sönüm oranı $\xi_{eff} > \%15$ koşulunu sağlamalıdır (EN 15129, 2010, Bölüm 3, p.7). Malzemenin yön değiştiren tekrarlı yükler altında stabil ve kararlı davranışı sağlayacak özellikte olması ayrı bir sınırlayıcı koşuldur (Bölüm 6, p.23).

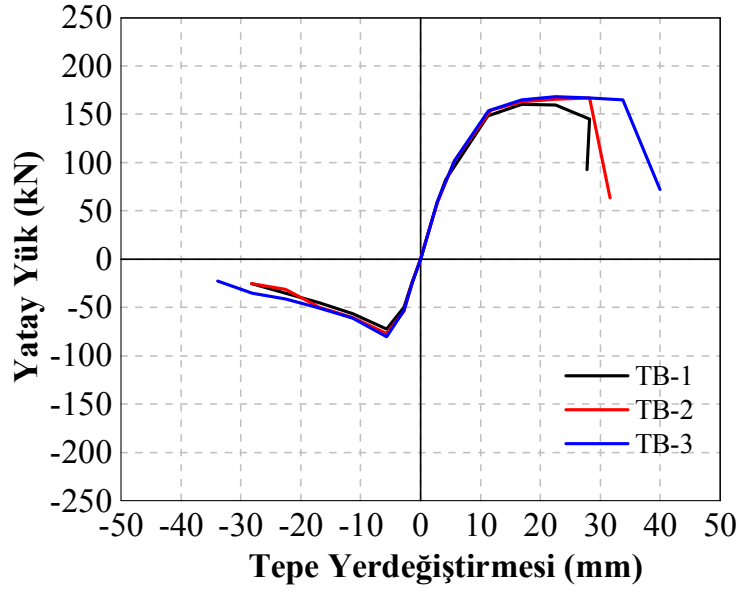
5.8 Deney sonuçlarının karşılaştırılması

5.8.1 TB-1, TB-2 ve TB-3 (Kutu 60x60x3) numunelerinin sonuçlarının karşılaştırılması

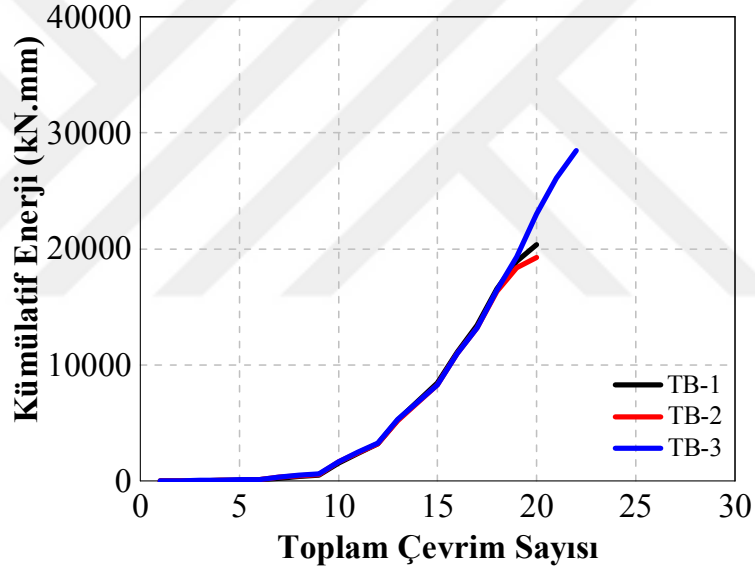


Şekil 5.3 : TB-1, TB-2, TB-3 numuneleri (Kutu 60x60x3) yatay yük - görelî öteleme oranı eğrileri, burkulma modları ve kopma sonrası hasar seviyeleri.

Numunelerin yatay yük-görelî öteleme histeretik eğrileri, burkulma modları ve kopma ötesi görünüşleri Şekil 5.3'de görülmektedir. Histeretik eğriler karşılaştırıldığında TB-3 numunesinin, beklendiği ve tasarlandığı üzere, TB-1 ve TB-2 numunelerine göre daha uygun bir davranış sergilediği görülmektedir.



Şekil 5.4 : TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerine ilişkin zarf eğrileri.



Şekil 5.5 : TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerinin tükettikleri enerji miktarları.

Çizelge 5.1 : TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerinin deneysel burkulma boyu katsayıları ve deneysel TTY'leri.

Numuneler	Deney.Burkulma Boy Katsayısı (K_e)	Normalleştirilmiş K_e	Deneysel TTY Δ_f (mm)	Normalleştirilmiş Δ_f
TB-1	0.831	0.995	15.548	1.000
TB-2	0.835	1.000	14.237	0.916
TB-3	0.814	0.975	20.475	1.317

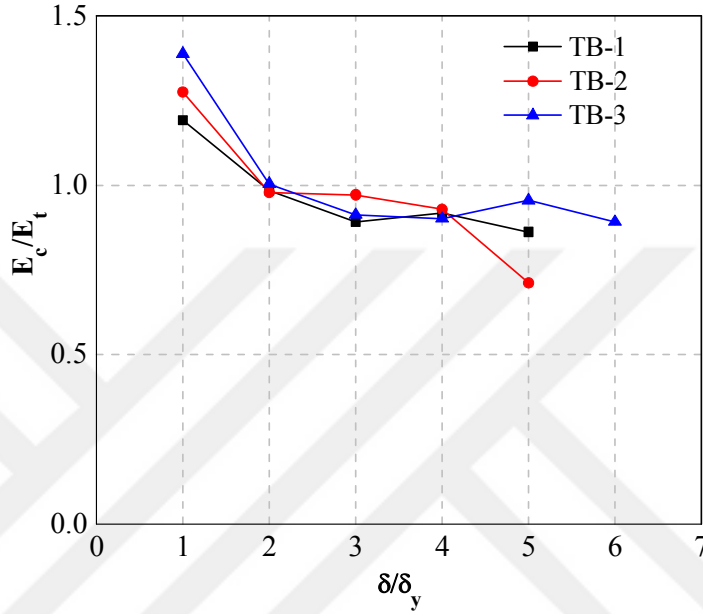
Numunelerin zarf eğrileri ve kümülatif enerji tüketme kapasiteleri sırasıyla Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de görülmektedir. Her iki numune grubunun zarf eğrilerinden görüldüğü gibi dayanım ve rijitlikte belirgin artışlar olmadığı anlaşılmaktadır.

Buna karşın, orta bölgesinde 1200mm CFRP kumaş sargıyla ve zayıflatılmış uç kesitleri CFRP plaka ve kumaş sargıyla güçlendirilmiş TB-3 numunesi %40 daha fazla enerji tüketmiş ve sünekliği oldukça artmıştır; gerçekte, bu çalışmada hedeflenen de sünekliğin artırılması olduğundan bu hedefe ulaşılmıştır. $6\delta_y$ süneklik seviyesinde, 600mm’lik CFRP sargının yerel burkulma oluşumunu engelleyememesinden dolayı TB-1 ve TB-2 numuneleri yaklaşık olarak aynı miktarda enerji tüketmişlerdir.

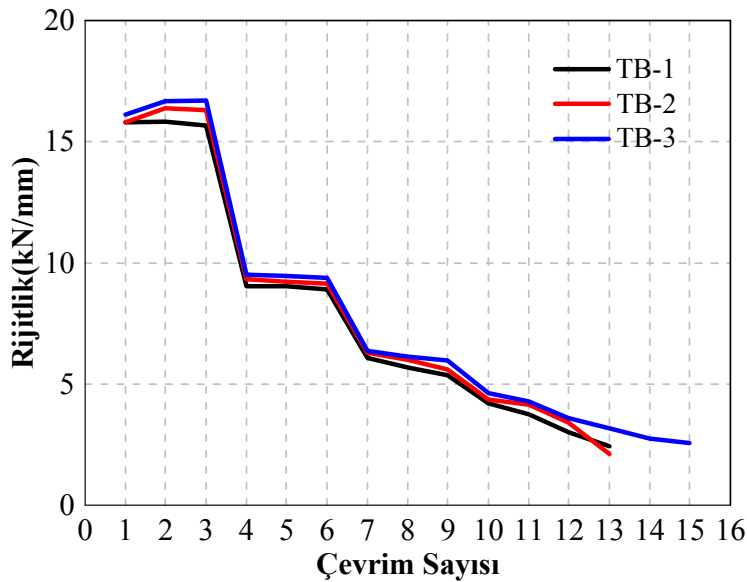
TB-3 numunesi bu grubun kontrol numunesi TB-1’e göre orta bölgedeki CFRP kumaş sargı etkisiyle yerel burkulma oluşumunun geciktirilmesinden dolayı %32 daha uzun bir TTY’ye sahiptir. TB-2 numunesi CFRP sargıdan dolayı orta bölgede oluşan plastik mafsallık sargının bitim noktasında oluşmuş, eksenel şekildeğiştirmelerin artış hızı geciktirilememiştir. Bundan dolayı kesit orta bölgeden yaklaşık referans numunesiyle aynı zamanda kopmuştur. TB-2 numunesinin akma taban kesme kuvveti ve akma yerdeğiştirmesi referans numunesinden daha fazla olduğundan, bu kuvvetlere karşı gelen şekildeğiştirmeler daha fazla olup TTY %8 oranında daha kısa olarak hesaplanmıştır. TB-2 ve TB-3 numuneleri orta bölgelerinde lifleri tek doğrultulu CFRP kumaş ile enine doğrultuda sarıldığından etkili burkulma boyu katsayıları hemen hemen aynıdır. Çizelge 5.1’de görüldüğü gibi TB-1 ve TB-2’in etkili burkulma boyları arasındaki fark ihmal edilebilecek büyüklükte olup TB-3’de etkili burkulma boyunda az miktarda (%2.5 oranında) kısalma olmuştur.

Çaprazın çekme ve basınç bölgelerindeki görelî performansları bakımından önemli olduğu düşünüldüğünden, numunelerin akmadan itibaren her yerdeğiştirme seviyesinde basınç ve çekme bölgelerinde tükettikleri enerji miktarları oranları (E_c/E_t) – normalleştirilmiş yerdeğiştirme eğrileri’de verilmiştir. Bu eğriler karşılaştırıldığında, $1\delta_y$ yerdeğiştirme seviyesinde basınçta tüketilen enerji miktarları sırasıyla TB-3 ve TB-2 numunelerinde TB-1 referans numunesine göre %17 ve %7 oranlarında daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. $2\delta_y$ yerdeğiştirme seviyesinde her üç numunede de basınç ve çekme bölgelerinde tüketilen enerji miktarları eşit olup bu süneklik seviyesinden sonra çekme bölgesinde numuneler daha fazla enerji

tüketmiştir. $5\delta_y$ yerdeğiştirme seviyesine ulaşılan kadar numunelerin E_c/E_t oranları arasında küçük farklar olsa da eşit mertebelerde seyretmektedir. $5\delta_y$ süneklik seviyesinde ise güçlendirilmiş TB-3 ve TB-2 numuneleri TB-1 ile karşılaştırıldığında sırasıyla %12 daha fazla ve %17 daha az orana sahiptir. Bu eğrilerden basınç bölgesinde de önemli miktara varan enerjinin tüketildiği, CFRP ile güçlendirmenin buna yardım ettiği görülmektedir.



Şekil 5.6 : TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerine ilişkin E_c/E_t – normleştirilmiş yerdeğiştirme eğrileri.

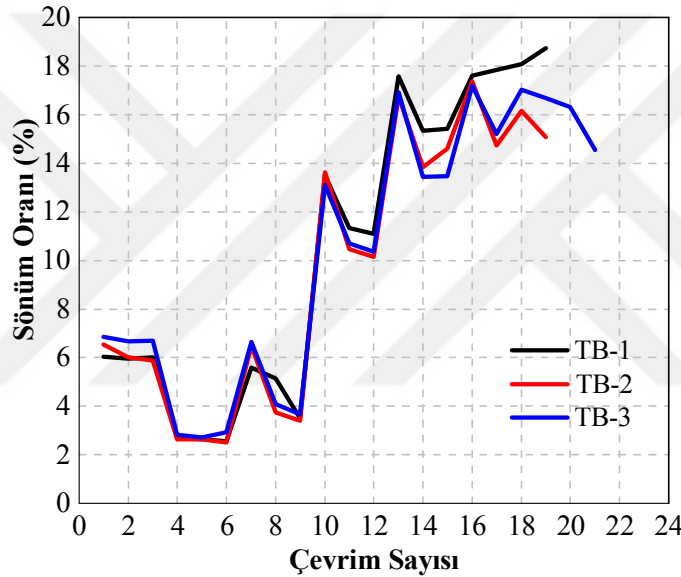


Şekil 5.7 : TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerinin rijitlik değişim eğrileri.

Çevrim sayısına bağlı olarak numunelere ilişkin rijitlik değişimi Şekil 5.7'de görülmektedir. Başlangıçtan kopmaya kadar olan süreçte numunelerin birbirlerine

göre rijitliklerinde belirgin bir fark görülmeyip, rijitlikleri oldukça birbirlerine yakındır. Böylece sünekliği arttırmak amacıyla CFRP ile yapılan iyileştirmenin rijitliği etkilemediği sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu, çaprazlı çerçevelerin güçlendirilmesinde deprem yüklerinin artmaması bakımından tercih edilen bir durumdur.

Numunelerin her yükleme çevrimindeki sönüm oranlarındaki değişim Şekil 5.8’de verilmiştir. Numuneler genel olarak her çevrimde yaklaşık olarak benzer sönüm oranına sahip olup %2.60 ile %18.80 arasında değişmektedir. Çaprazların TTY’lerinin uzun olması durumunda sönüm oranlarındaki artış dikkati çekmektedir.



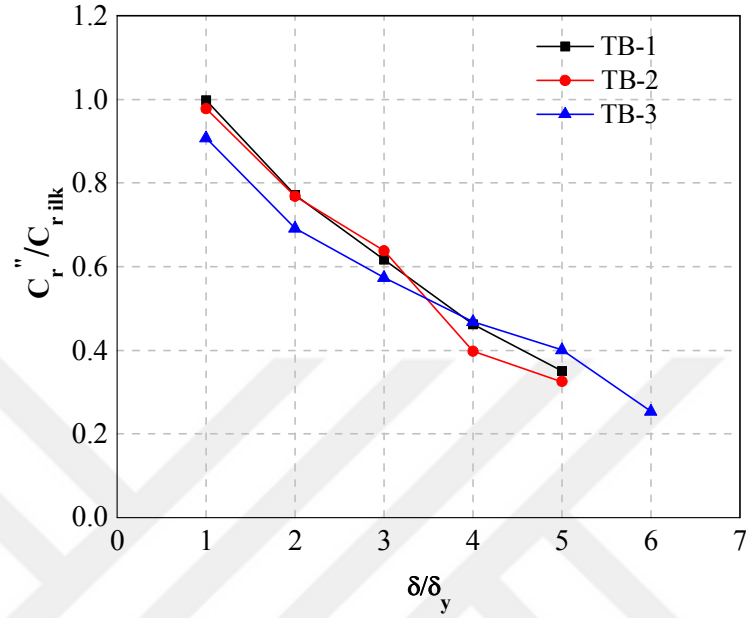
Şekil 5.8 : TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerine ilişkin sönüm oranı eğrileri.

Numunelerin normalleştirilmiş burkulma dayanımlarındaki değişim sırasıyla Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’daki $C_r''/C_{r\text{ ilk}}$ ve $C_r''/C_{r\text{ son}}$ eğrilerinde verilmiştir.

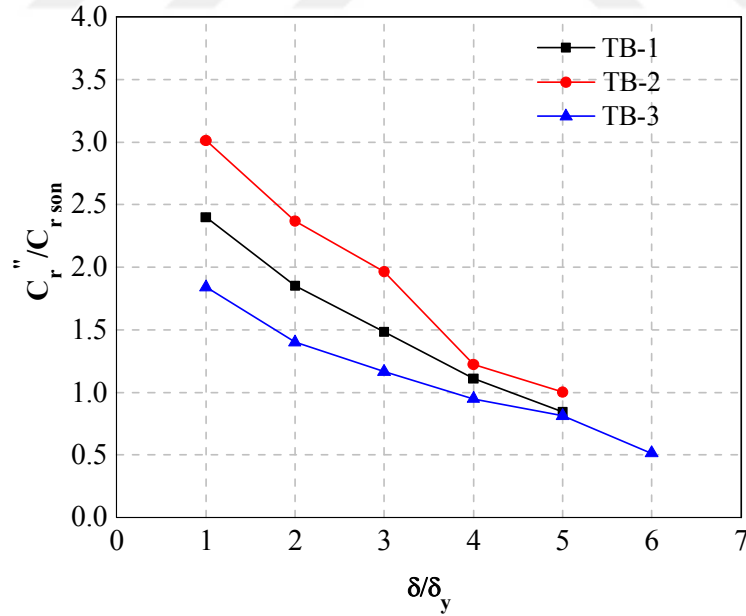
Numunelere ilişkin $C_r''/C_{r\text{ ilk}}$ oranlarındaki değişim birbirlerine oldukça yakın olup doğrusala yakın bir azalma ilişkisi vardır. Azalma hızı tüm numuneler için yaklaşık olarak aynıdır. $5\delta_y$ yerdeğiştirme seviyesinde bu oranın TB-1’de en çok 0.35, TB-2’de en çok 0.30 ve TB-3’de en çok 0.40 olduğu görülmüştür. Burada TB-1 ve TB-3 arasındaki fark güçlendirmenin etkisini göstermektedir. $6\delta_y$ seviyesinde ise TB-3’de en çok 0.2 elde edilmiştir.

$C_r''/C_{r\text{ son}}$ ’da ise numuneler arasında daha belirgin farklar olduğu görülmektedir. Her durumda TB-1 ve TB-2 TB-3’e göre daha yüksek oranlara sahiptir. TB-3

numunesinin kopma öncesindeki basınç dayanımının ($C_{r \text{ son}}$) TB-1 ve TB-2'ye göre daha yüksek olması nedeniyle $C_r''/C_{r \text{ son}}$ oranının hesabında daha düşük değerlerin elde edilmesi olağandır. Aradaki fark δ/δ_y arttıkça azalmakta, $\delta/\delta_y=5$ 'de TB-1, TB-2 ve TB-3 için sırasıyla 0.84, 1.0, 0.81 oranları elde edilmektedir.

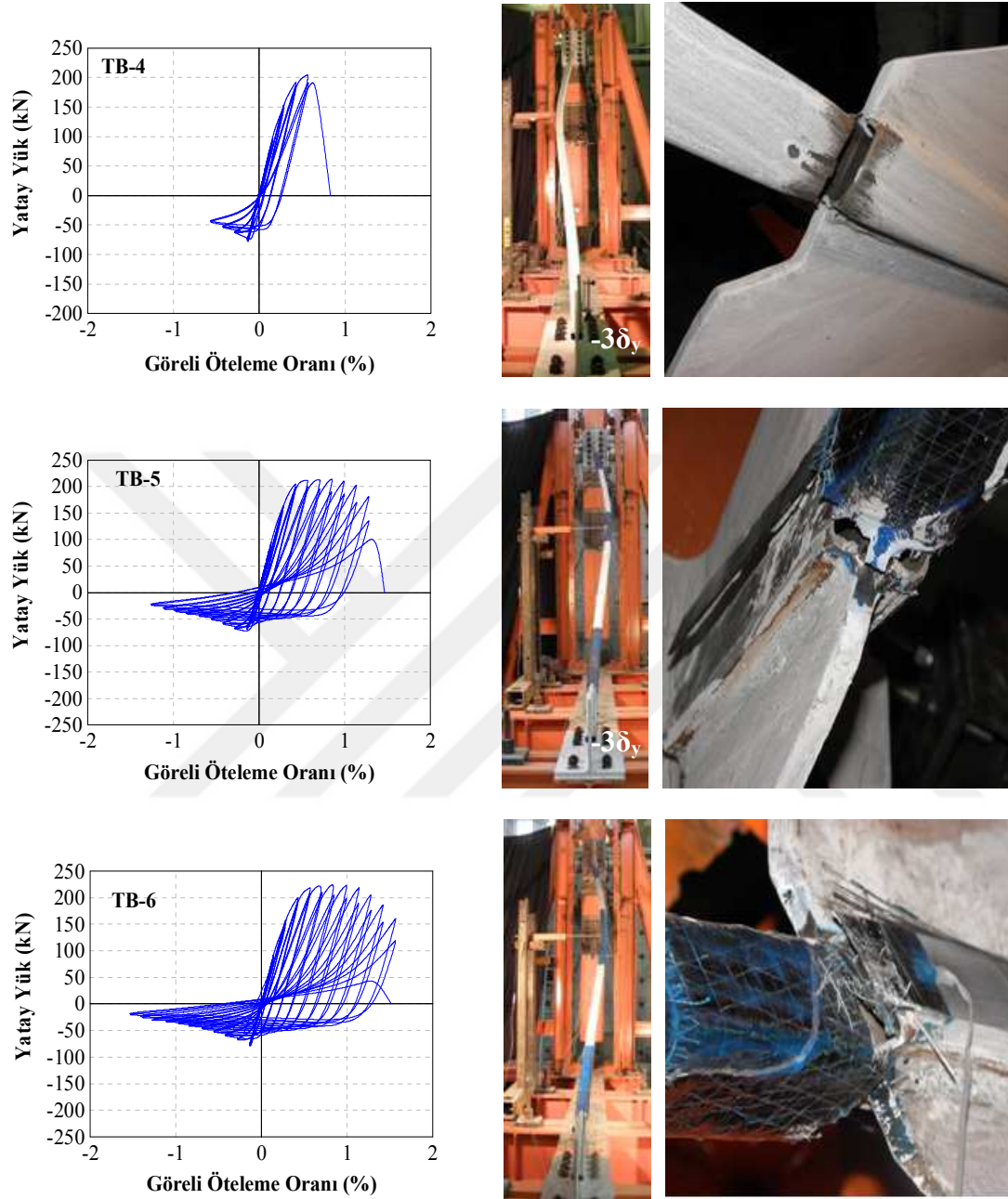


Şekil 5.9 : TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerinin $C_r''/C_{r \text{ ilk}}$ eğrileri.



Şekil 5.10 : TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerinin $C_r''/C_{r \text{ son}}$ eğrileri.

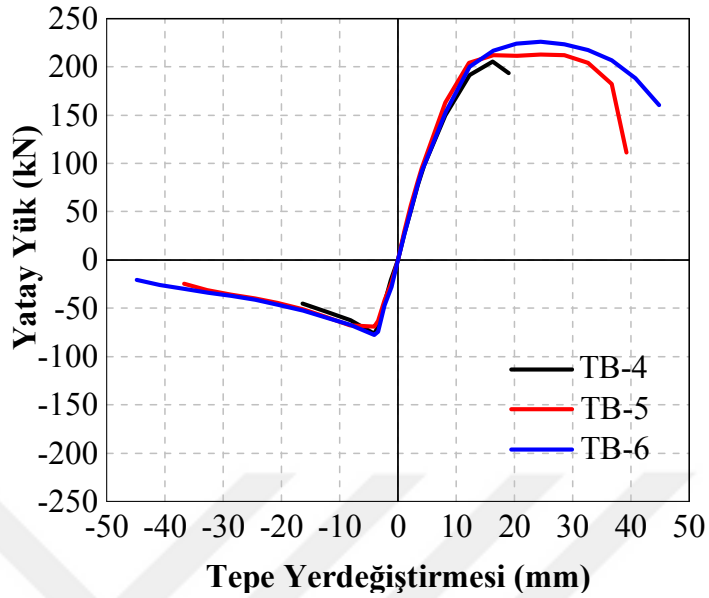
5.8.2 TB-4, TB-5 ve TB-6 (Kutu 50x50x4) numunelerinin sonuçlarının karşılaştırılması



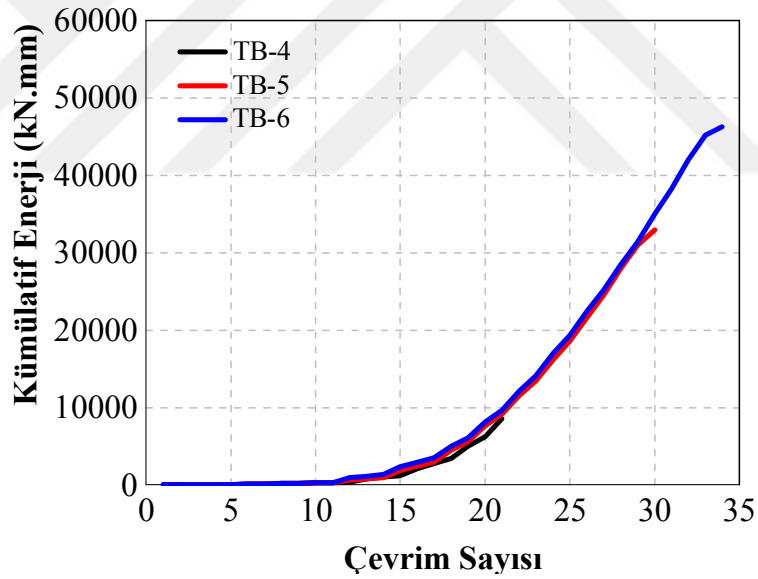
Şekil 5.11 : TB-4, TB-5, TB-6 numuneleri (Kutu 50x50x4) yatay yük - görelî öteleme oranı eğrileri, burkulma modları ve kopma sonrası hasar seviyeleri.

İkinci grup deney numuneleri olan TB-4, TB-5 ve TB-6'nın histeretik eğrileri, örnek burkulma modları ve kopma sonrası durumları Şekil 5.11'de verilmiştir. Genel narinlikleri oldukça yüksek olan numunelerden TB-6 numunesi en dolu histeretik eğriye sahip olup TB-5 numunesi buna oldukça yakındır. TB-5 ve TB-6 numunelerinin denenmesi sırasında deney sistemi istem dışı kapandığından TB-6

numunesinde kısa süreli veri kaybı yaşanmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda aksi belirtilmedikçe deneyden elde edilen veriler esas alınmıştır.



Şekil 5.12 : TB-4, TB-5 ve TB-6 numunelerine ilişkin zarf eğrileri.



Şekil 5.13 : TB-4, TB-5 ve TB-6 numunelerinin tükettikleri enerji miktarları.

Çizelge 5.2 : TB-4, TB-5 ve TB-6 numunelerinin deneysel burkulma boyu katsayıları ve deneysel TTY'leri.

Numuneler	Deney.Burkulma Boy Katsayısı (K_e)	Normalleştirilmiş K_e	DeneySEL TTY Δ_f (mm)	Normalleştirilmiş Δ_f
TB-4	0.652	0.779	0.797	1.000
TB-5	0.831	0.992	21.347	26.784
TB-6	0.837	1.000	26.932	33.792

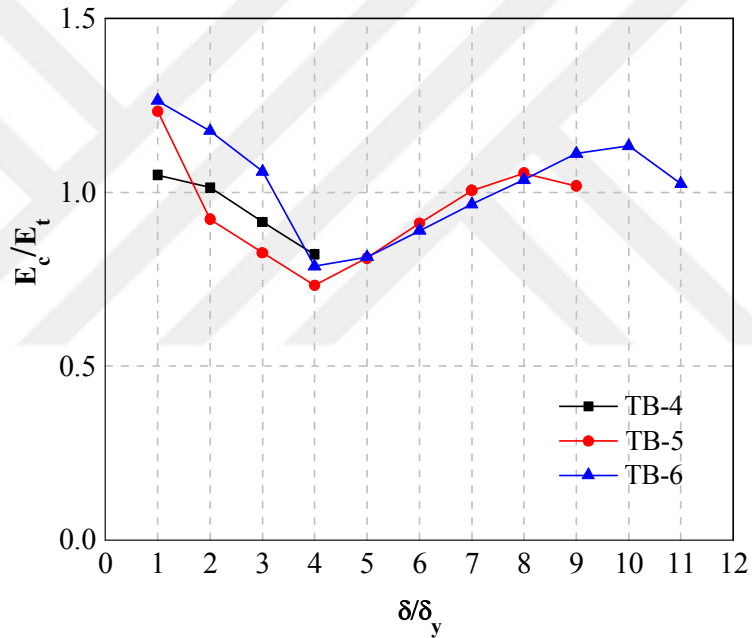
Numunelerin Şekil 5.12’de verilen zarf eğrileri karşılaştırıldığında, basınç bölgesinde tüm numunelerin yaklaşık aynı yörüngeyi takip ettiği ve numunenin sünekliğine bağlı olarak farklı dayanım ve yerdeğiştirmelere ulaşıldığı görülmektedir. Çekme bölgesinde doğrusallığın bittiği akma noktasına kadar numuneler benzer davranış göstermiş, doğrusal olmayan bölgedeki en büyük dayanımları karşılaştırıldığında TB-5 ve TB-6 numuneleri grubun referans numunesi olan TB-4’ten sırasıyla %3.5 ve %10 oranlarında daha fazla dayanımlara ulaşmıştır; beklendiği üzere dayanımlardaki artış belirgin bir seviyede değildir.

Zayıflatılmış uç bölgelerinde CFRP plaka ve kumaş sargıyla güçlendirilen numunelerden, orta bölgesi 900mm (%25L) ve 450mm (%13L) kumaş sargıyla güçlendirilmiş olan TB-6 ve TB-5 numuneleri referans numunesine (TB-4) göre sırasıyla %441 ve %285 oranlarında daha fazla toplam enerji tüketmiştir. Numunelerin herbir çevrime karşı gelen kümülatif enerji tüketme kapasitesi eğrileri Şekil 5.13’de görülmektedir.

İkinci grup deney numunelerine ilişkin TTY’ler ve deneysel burkulma boyları Çizelge 5.2’de detaylı olarak verilmiştir. TB-4 numunesi çekmede akmaya ulaştıktan hemen sonra alt bağlantı noktasında zayıflatılmış kesitten koptuğu için TTY’si oldukça düşüktür. TB-5 ve TB-6 numuneleri orta ve zayıflatılmış kesit bölgelerinde CFRP elemanlarla yapılan güçlendirmelerin etkisiyle kontrol numunesinden sırasıyla 27 kat ve 33 kat daha uzun TTY’ye sahiptir. Bu numune grubunda zayıflatılmış uç kesitler ve orta bölgede yapılan yerel güçlendirmelerin numunelerin burkulma boyunu değiştirmedeği görülmüş, burkulma boyu en kısa olan numunenin kontrol numunesi (TB-4) olduğu tespit edilmiştir.

Akma noktasından itibaren numunelerin her yerdeğiştirme seviyesinde basınç ve çekme bölgelerinde tükettikleri enerji miktarları oranları (E_c/E_t) - normalleştirilmiş yerdeğiştirme eğrileri Şekil 5.14’te verilmiştir. TB-6 numunesinin denemesi sırasında sistemin kendiliğinden kapanıp deneyin tekrar başlatılması TB-6 numunesi için veri kaybına neden olduğundan deney sonuçlarına göre E_c/E_t eğrisi çizildiğinde $2\delta_y$ yerdeğiştirme seviyesinde eğride ani ve belirgin bir düşüş görülmektedir. TB-4 ve TB-5 numunelerinin $2\delta_y$ seviyesinden $3\delta_y$ ’ye geçişindeki E_c/E_t oranı farkı esas alınarak TB-6 numunesinin E_c/E_t değeri $2\delta_y$ seviyesinde düzeltilmiş ve değerlendirmeler eğrinin bu düzeltilmiş durumuna göre yapılmıştır. Akmanın başladığı $1\delta_y$ seviyesinde TB-5 ve TB-6 numunelerine ait E_c/E_t değerleri TB-4’e göre

sırasıyla %17 ve %20 oranlarında daha fazladır. E_c/E_t oranları başlangıçtan itibaren yavaş yavaş azalıp $4\delta_y$ 'de aynı en düşük seviyeye ulaşmıştır. Bu seviyede TB-4 numunesi göçmüş olup numunelerin hepsinin basınç ve çekme bölgelerinde tüketilen enerjilerinin oranları oldukça birbirine yakındır. Bu yerdeğiştirme seviyesinden sonra TB-5 ve TB-6 numunelerine ilişkin E_c/E_t oranları her yerdeğiştirme seviyesinde yaklaşık eşit olacak şekilde numunelerin kopmasına kadar devam etmiştir. Özellikle yüksek inelastik çevrimlerde basınçta da en az çekmedeki kadar ya da üzerinde ($E_c/E_t > 1.00$) enerji tükettiği, diğer bir deyişle sünek davranışın basınçta da devam ettiği görülmektedir. Bu davranış biçimi TTY'Y'nin arttırılması koşuluyla çaprazların basınç etkisi altında sünek davranmadığı görüşünün uygun olmadığı anlamına gelmektedir.

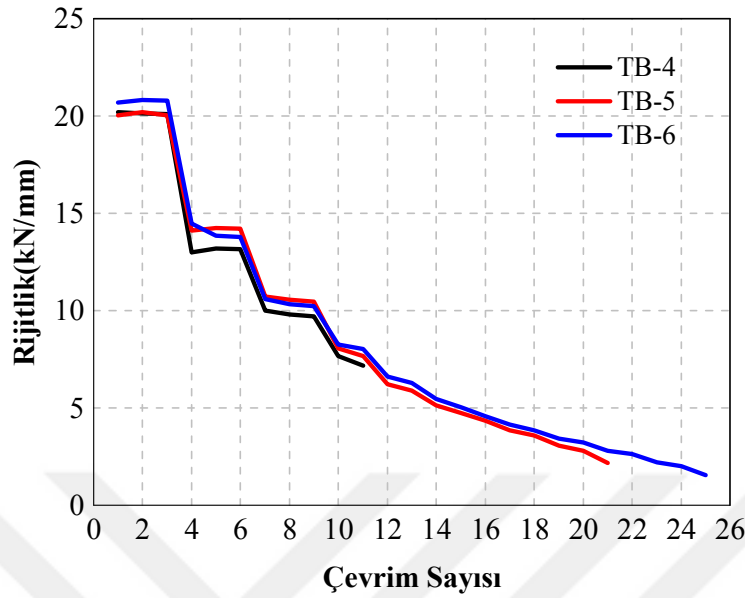


Şekil 5.14 : TB-4, TB-5 ve TB-6 numunelerine ilişkin E_c/E_t – normalize edilmiş yerdeğiştirme eğrileri.

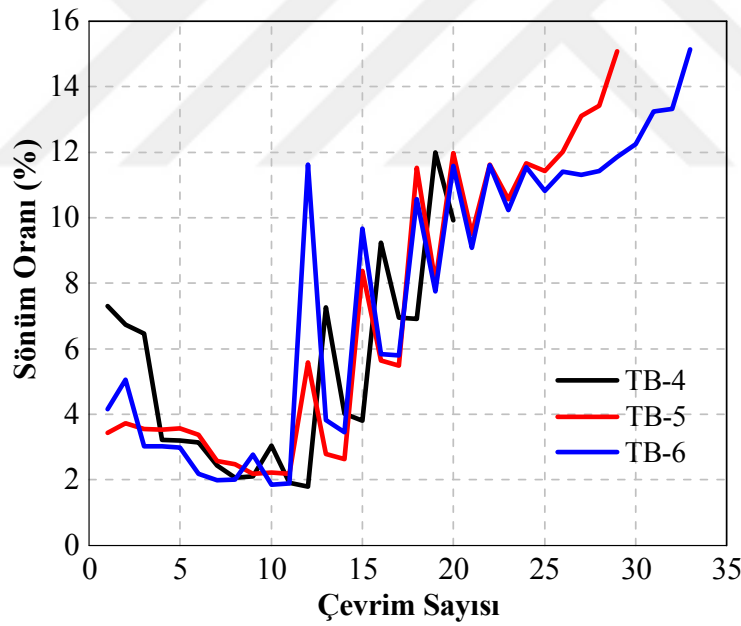
Numunelere ilişkin çevrim sayısına göre rijitlik değişimi eğrileri Şekil 5.15'de görülmektedir; rijitliklerde önemli sayılması gereken bir değişim bulunmamaktadır; bu beklenen bir durumdur.

Numunelerin her yükleme çevrimindeki sönüm oranlarındaki değişim Şekil 5.16'da verilmiştir. Sönüm oranlarındaki değişimin yaklaşık olarak aynı olmasına karşın TB-6 numunesinde ani bir artış görülmekte olup bunun deneydeki kısa süreli data kaybından ileri geldiği düşünülmektedir. Önceki numune grubunda izlendiği gibi

burada da özellikle yüksek inelastik yerdeşistirmelerde bu tür sistemler için yüksek denilecek histeretik sönüm oranlarına ulaşılabilmektedir.

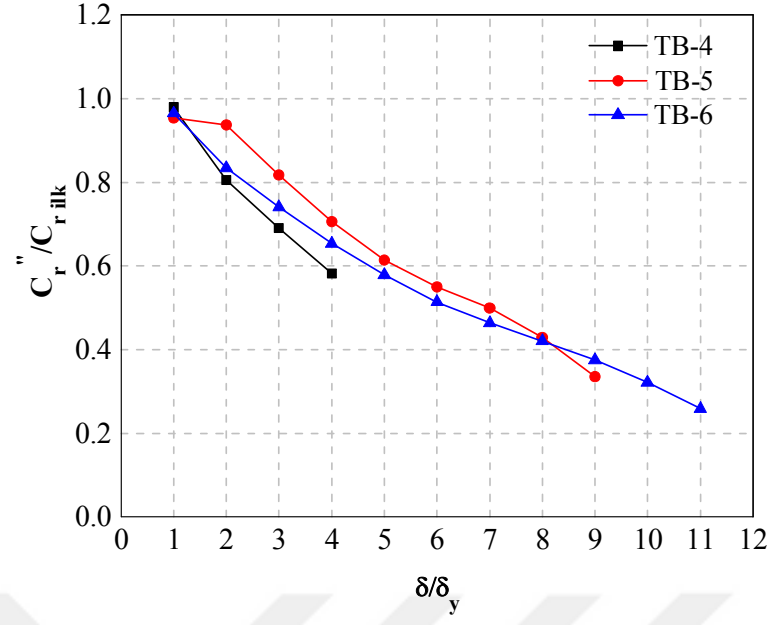


Şekil 5.15 : TB-4, TB-5 ve TB-6 numunelerinin rijitlik değişim eğrileri.

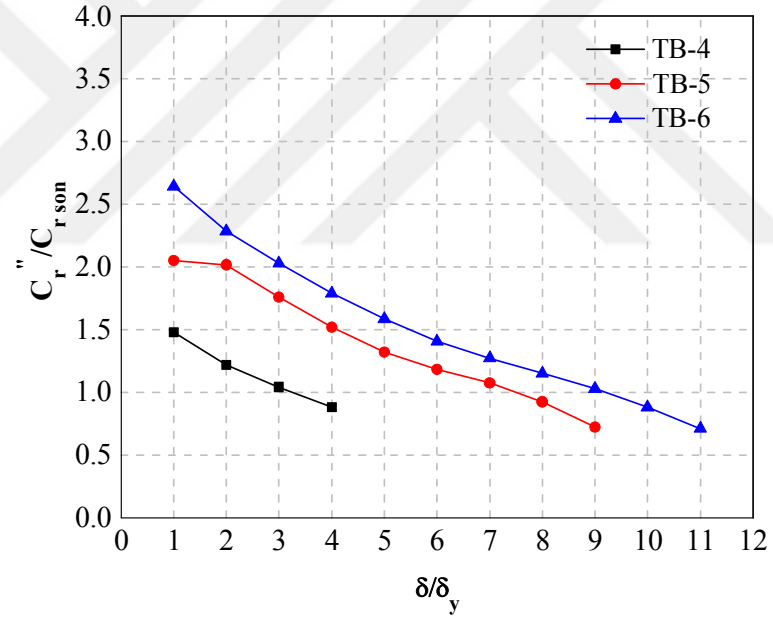


Şekil 5.16 : TB-4, TB-5 ve TB-6 numunelerine ilişkin sönüm oranı eğrileri.

Numunelerin normalleştirilmiş burkulma dayanımlarındaki değişim sırasıyla Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'deki C_r''/C_r ilk ve C_r''/C_r son eğrilerinde verilmiştir. C_r''/C_r ilk'de numunelerin basınç dayanımlarındaki azalmanın doğrusala yakın olduğu görölmektedir. C_r''/C_r son'da da C_r''/C_r ilk'e benzer olarak doğrusal bir azalma görölmektedir.

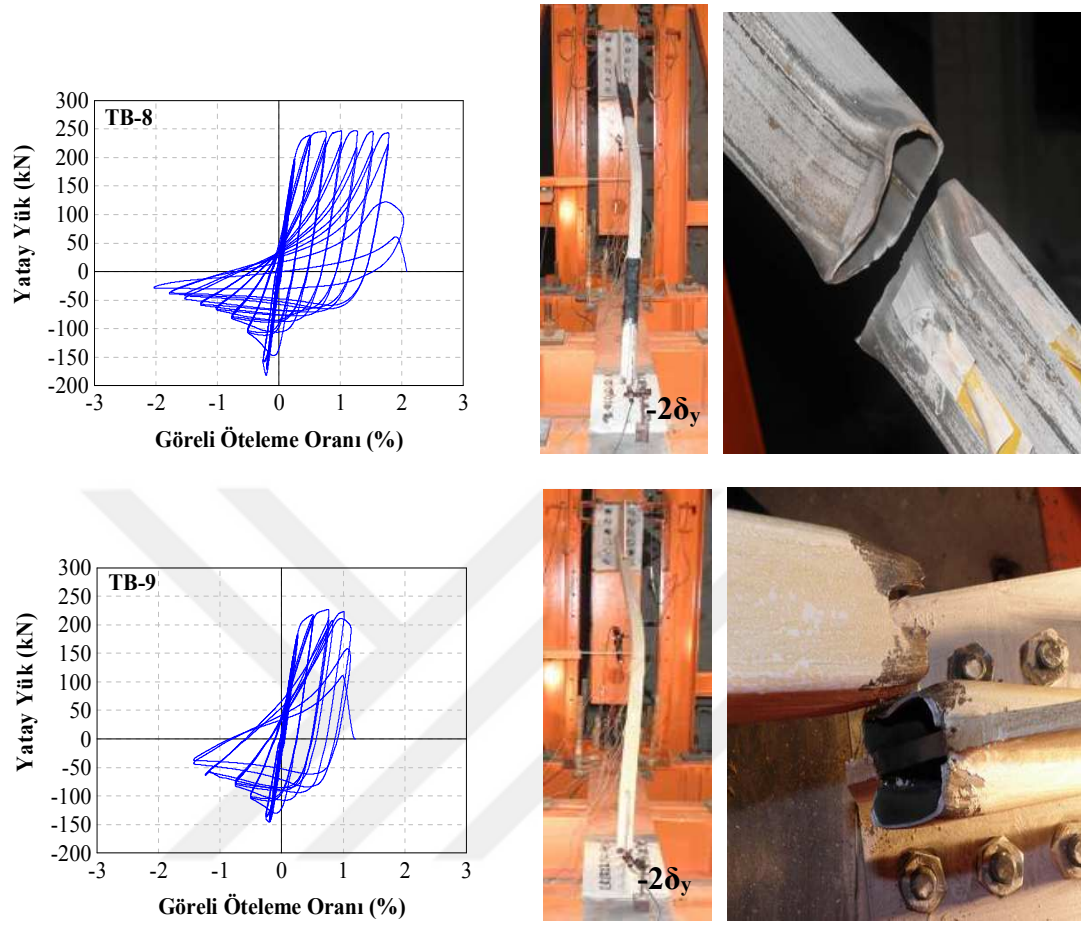


Şekil 5.17 : TB-4, TB-5 ve TB-6 numunelerinin $C_r''/C_{r ilk}$ eğrileri.



Şekil 5.18 : TB-4, TB-5 ve TB-6 numunelerinin $C_r''/C_{r son}$ eğrileri.

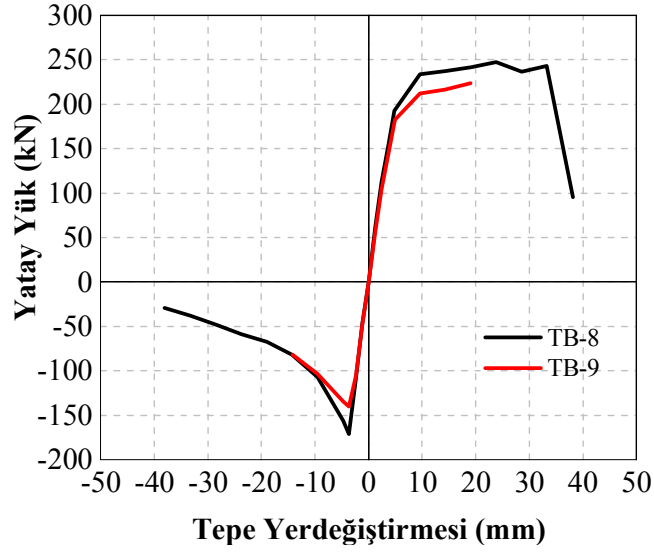
5.8.3 TB-8 ve TB-9 (Kutu 60x60x4) numunelerinin sonuçlarının karşılaştırılması



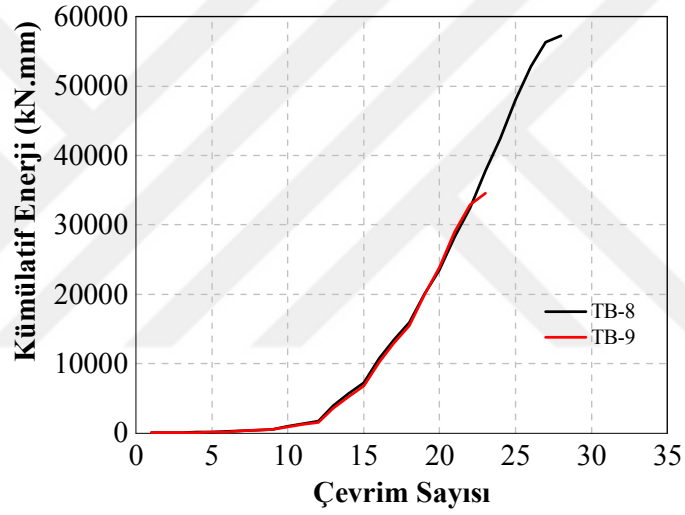
Şekil 5.19 : TB-8 ve TB-9 numuneleri (Kutu 60x60x4) yatay yük - görelî öteleme oranı eğrileri, burkulma modları ve kopma sonrası hasar seviyeleri.

Kutu 60x60x4 kesitine sahip TB-8 ve TB-9 numunelerine ilişkin yatay kuvvet- görelî öteleme oranı histeretik eğrileri, burkulma modları ve kopma sonrası görünüşleri Şekil 5.19’da verilmiştir. Güçlendirilmiş TB-8 numunesinin %2 görelî öteleme oranına ulaştığı ve daha dolu bir davranış sergilediği görülmektedir; buna karşılık, özellikle son çevrimlerde dayanımın aşırı düzeyde azaldığı gözönünde bulundurulmalıdır.

Şekil 5.20’de verilen numunelere ilişkin zarf eğrileri incelendiğinde, sadece zayıflatılmış uç kesitleri CFRP plaka ve kumaş sargıyla güçlendirilmiş TB-8 numunesinin yalın kontrol numunesine (TB-9) göre rijitliğinde belirgin bir değişme olmadığı, dayanımında ise çekme ve basınç bölgelerinde sırasıyla %11 ve %22 oranlarında artış olduğu görülmüştür. Numunelere ilişkin kümülatif enerji tüketme eğrileri Şekil 5.21’de verilmiş ve sünekliğin artmasından dolayı TB-8 numunesi %66 oranında daha fazla enerji tüketmiştir.



Şekil 5.20 : TB-8 ve TB-9 numunelerine ilişkin zarf eğrileri.

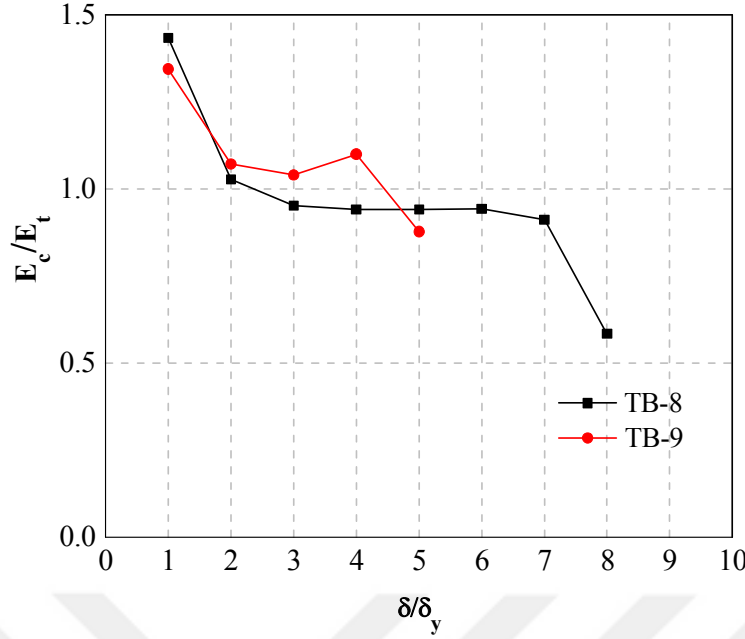


Şekil 5.21 : TB-8 ve TB-9 numunelerinin tükettikleri enerji miktarları.

Çizelge 5.3 : TB-8 ve TB-9 numunelerinin deneysel burkulma boyu katsayıları ve deneysel TTY'leri.

Numuneler	Deney.Burkulma Boy Katsayısı (K_e)	Normalleştirilmiş K_e	Deneysel TTY Δ_f (mm)	Normalleştirilmiş Δ_f
TB-8	0.959	1.000	26.826	1.510
TB-9	0.958	1.000	17.764	1.000

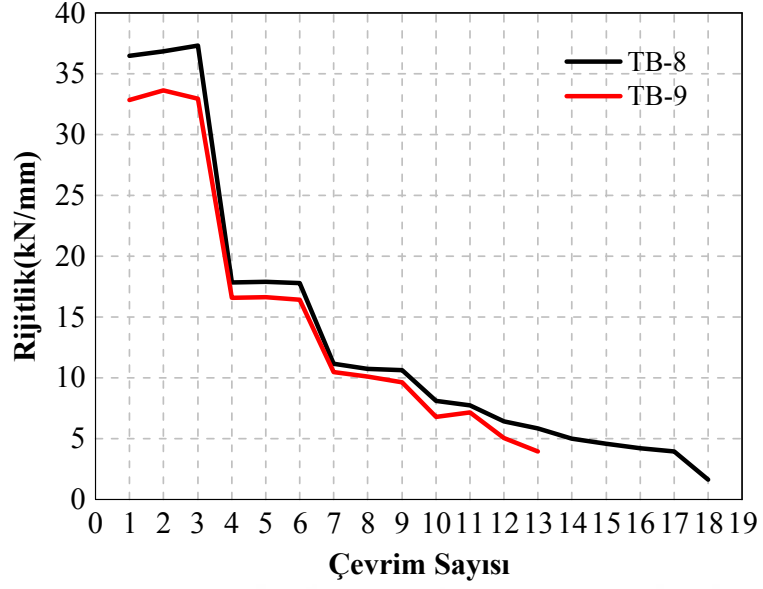
Yalın numune (TB-9) zayıflatılmış kesitinden koparken güçlendirilmiş TB-8 numunesinde hasar numunenin orta bölgesine kaymıştır. Bu, TB-8 numunesinin TTY'sini %51 oranında arttırmıştır. Çizelge 5.3'de numunelere ilişkin TTY'ler ve burkulma boyu katsayıları verilmiştir. Uç bölgelerin güçlendirilmesinin burkulma boyu üzerinde belirgin bir etkisi olmayıp burkulma boyu aynı kalmıştır.



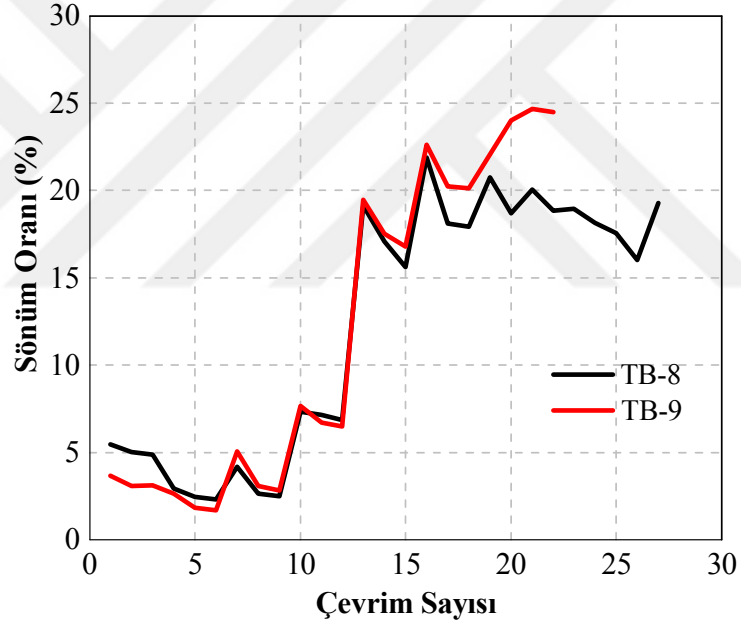
Şekil 5.22 : TB-8 ve TB-9 numunelerine ilişkin E_c/E_t – normalleştirilmiş yerdeğiştirme eğrileri.

Numunelerin akma sonrasındaki doğrusal olmayan davranışları süresince her bir yerdeğiştirme seviyesinde basınç ve çekme bölgelerinde tükettikleri enerji oranı (E_c/E_t) – normalleştirilmiş yerdeğiştirme eğrileri Şekil 5.22’de görülmektedir. $1\delta_y$ seviyesinde güçlendirilmiş numune basınç ve çekme bölgelerinde sırasıyla %17 ve %10 oranlarında daha fazla enerji tüketmiştir. Bu seviyedeki TB-8 numunesinin E_c/E_t oranı %7 oranında daha fazlayken $2\delta_y$, $3\delta_y$ ve $4\delta_y$ seviyelerinde TB-9 numunesinin altına düşmüş olup en fazla %15 oranında daha azdır. $5\delta_y$ süneklik seviyesinde bu oran referans numunesine (TB-9) göre %7 oranında daha fazladır. Her iki numune için de basınçta tüketilen enerji akma anında belirgin şekilde fazlayken sonraki adımlarda küçük farklar olsa da basınç ve çekme bölgelerinde tüketilen enerjiler birbirine yakındır (en büyük fark %10). $8\delta_y$ süneklik seviyesinde, kopma öncesinde, TB-8 numunesinin basınçta tükettiği enerji çekmede tükettiğinin yaklaşık yarısı mertebesine inmiştir.

Numunelerin rijitliklerinin çevrim sayısına bağlı değişimleri Şekil 5.23’te gösterilmiştir. Başlangıçta TB-8 numunesinin rijitliğinin TB-9 numunesine göre %10 oranında fazla olmasına karşın ilerleyen çevrimlerdeki rijitlikleri aralarındaki fark ihmal edilebilecek kadar birbirlerine yaklaşmıştır.

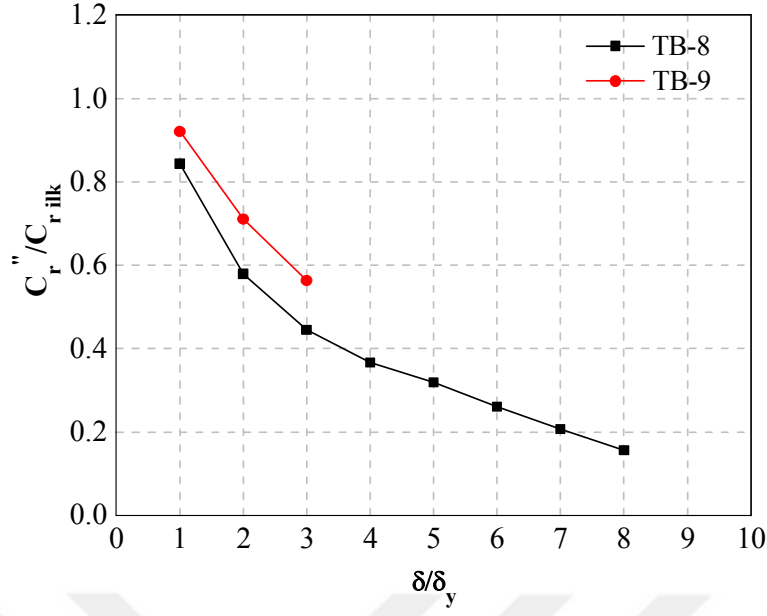


Şekil 5.23 : TB-8 ve TB-9 numunelerinin rijitlik değişim eğrileri.

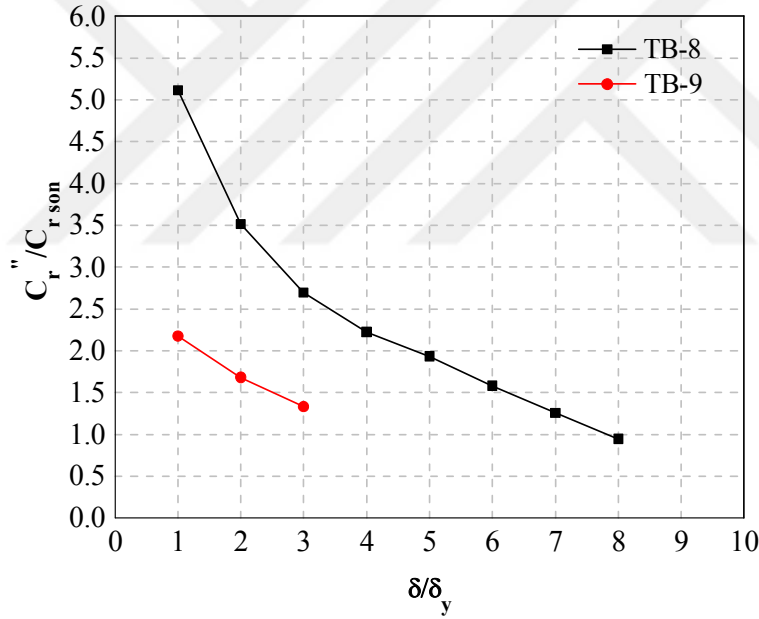


Şekil 5.24 : TB-8 ve TB-9 numunelerine ilişkin sönüm oranı eğrileri.

Numunelerin sönüm oranları başlangıçtan itibaren 16.çevrime kadar benzerlik göstermiş olmasına karşın TB-9 numunesi kopma anında TB-8 numunesine göre %30 oranında daha fazla sönüm oranına ulaşmıştır. Şekil 5.24'te numunelere ilişkin sönüm oranı eğrilerinde de görülebileceği gibi numunelerin sönüm oranları %2.44 ile %24.66 arasında değişmektedir. Sünekliğin artmasıyla sönüm oranı yaklaşık olarak 10 kat artmıştır.



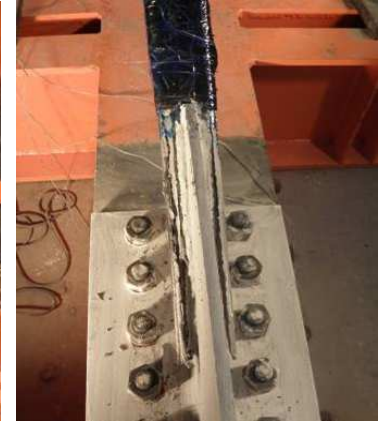
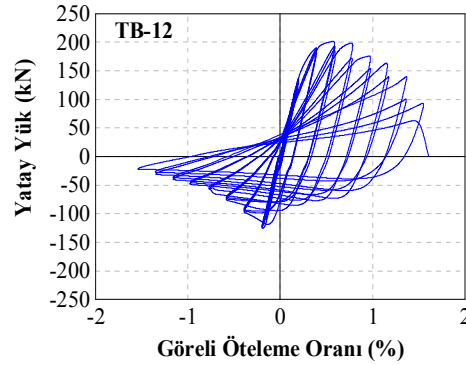
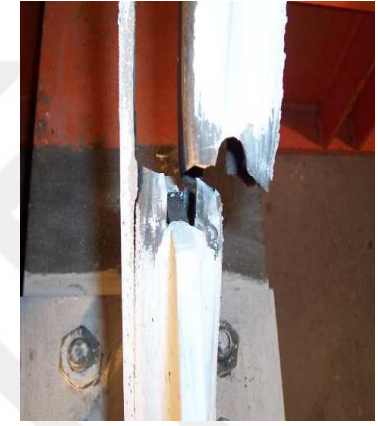
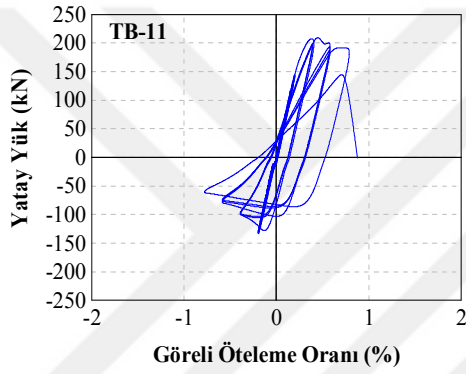
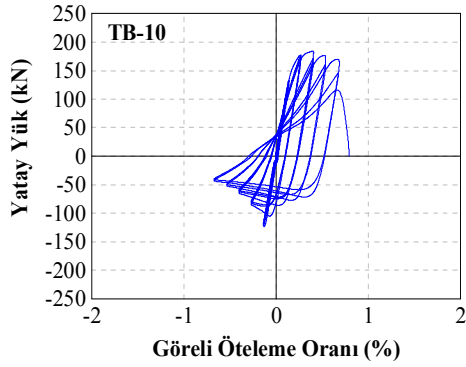
Şekil 5.25 : TB-8 ve TB-9 numunelerinin C_r''/C_{rilk} eğrileri.



Şekil 5.26 : TB-8 ve TB-9 numunelerinin C_r''/C_{rson} eğrileri.

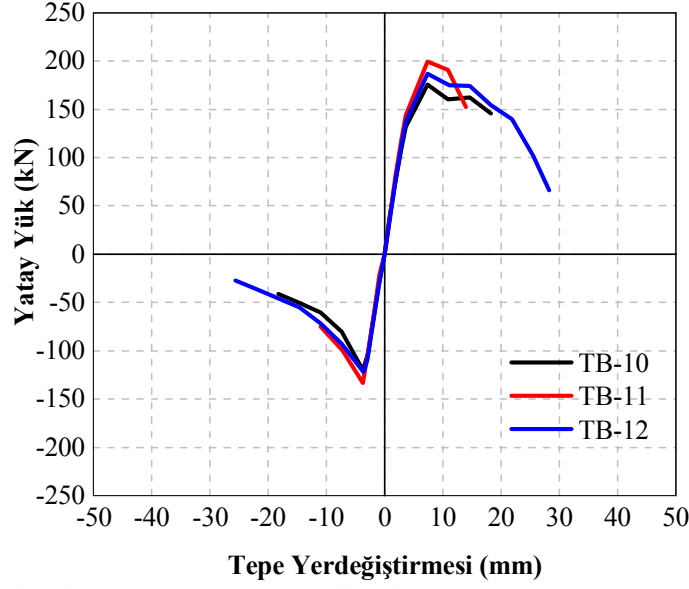
Numunelerin normalleştirilmiş burkulma dayanımlarındaki değişim sırasıyla Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'daki C_r''/C_{rilk} ve C_r''/C_{rson} eğrilerinde verilmiştir. $3\delta_y$ seviyesine kadar C_r''/C_{rilk} ve C_r''/C_{rson} eğrilerinde basınç dayanımında doğrusal olmayan daha hızlı bir azalma görülmüş ve bu seviyeden sonra azalma hızı azalarak doğrusala yakın bir durum almıştır.

5.8.4 TB-10, TB-11, TB-12 (Kutu 50x50x4) numunelerinin sonuçlarının karşılaştırılması

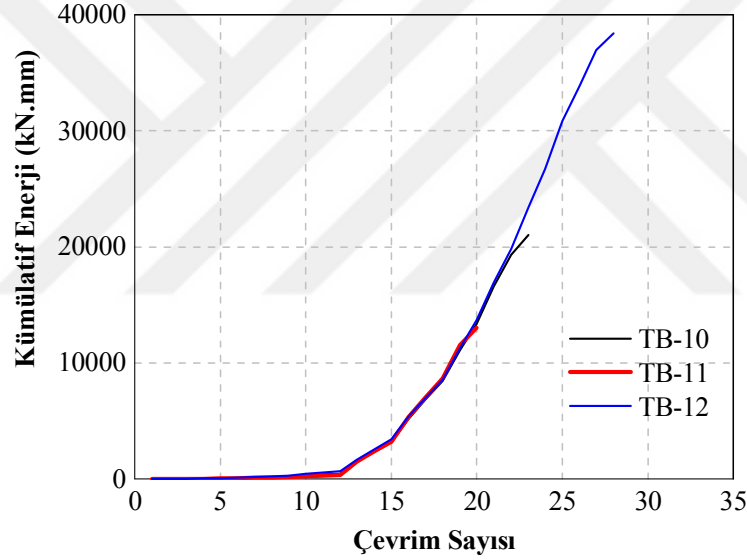


Şekil 5.27 : TB-10, TB-11, TB-12 numuneleri (Kutu 50x50x4) yatay yük - görelî öteleme oranı eğrileri, burkulma modları ve kopma sonrası hasar seviyeleri.

Zayıflatılmış enkesitleri bölgesinde 2 kat CFRP plaka ve 3 kat CFRP kumaş sargıyla güçlendirilmiş TB-12 numunesi en dolu histeretik eğriye sahip numune olup Şekil 5.27’de tüm numuneler ait histeretik eğriler, burkulma modları ve alt uç zayıflatılmış enkesit bölgesindeki hasar seviyeleri görülmektedir. Histeretik eğriler karşılaştırıldığında güçlendirmenin TB-12 numunesinde sünekliği amaçlandığı üzere belirgin şekilde arttırdığı görülmektedir. Numunelere ilişkin Şekil 5.28’de görülen



Şekil 5.28 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerine ait zarf eğrileri.



Şekil 5.29 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerinin tükettikleri enerji miktarları.

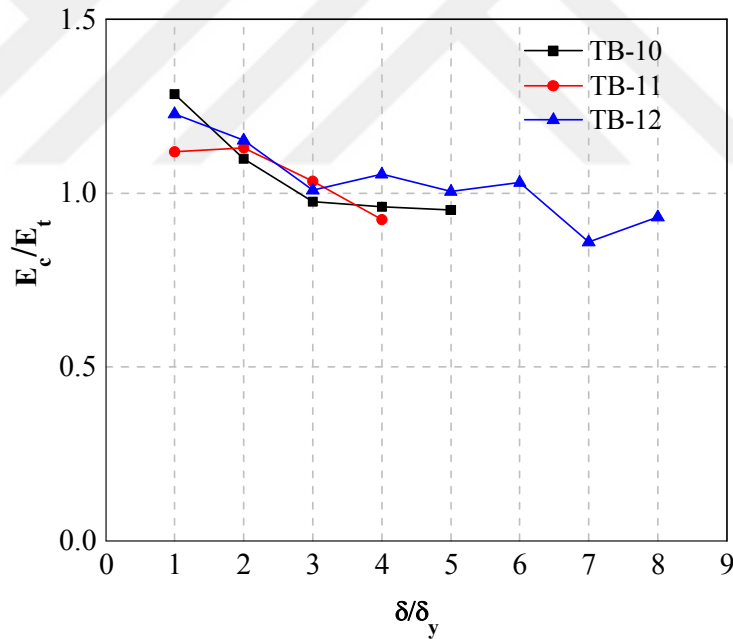
Çizelge 5.4 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerinin deneysel burkulma boyu katsayıları ve deneysel TTY'leri.

Numuneler	Deney.Burkulma Boy Katsayısı (K_e)	Normalleştirilmiş K_e	Deneysel TTY Δ_f (mm)	Normalleştirilmiş Δ_f
TB-10	0.860	1.000	18.758	1.000
TB-11	0.860	1.000	11.151	0.594
TB-12	0.692	0.805	27.738	1.479

zarf eğrilerine göre TB-11 (zayıflatılmış uç bölgeleri yalnızca 2 kat CFRP plaka ile güçlendirilmiş) ve TB-12 numunelerinin dayanımlarındaki artış sırasıyla %14 ve %7

oranlarındadır. Bu eğriler dayanım ve rijitlikte belirgin artışlar olmadığını gösterdiğinden önerilen yöntemin güçlendirme amaçları için uygun olduğu söylenebilir.

TB-12 numunesi sünekliğin artmasıyla en yüksek (%82.5 daha fazla) enerji tüketme kapasitesine sahiptir. Şekil 5.29’da numunelere ilişkin kümülatif tüketilen enerji eğrileri görülmektedir. $4\delta_y$ süneklik seviyesinde, beklenildiği gibi, TB-12 ve TB-11 aynı enerji yutma kapasitelerine sahiptirler. TB-10 numunesi kopmadan önce TB-11’ye göre daha yüksek süneklik seviyesine ulaşmasına karşın, bu süneklik seviyesinde TB-10 numunesi TB-12 ve TB-11 numunelerine göre sırasıyla %1.7 ve %4.3 oranlarında daha az enerji tüketmiştir. Bu durum CFRP, plakaların erken aderanslarını kaybetmelerine ve yüksek gerilme ve şekildeğiştirmelerin zayıflatılmış uç kesit çevresine yığılmasına bağlanabilir. Buna karşın, zayıflatılmış uç kesit çevresindeki CFRP sargının enerji tüketme kapasitesini belirgin oranda arttırdığı görülmektedir.



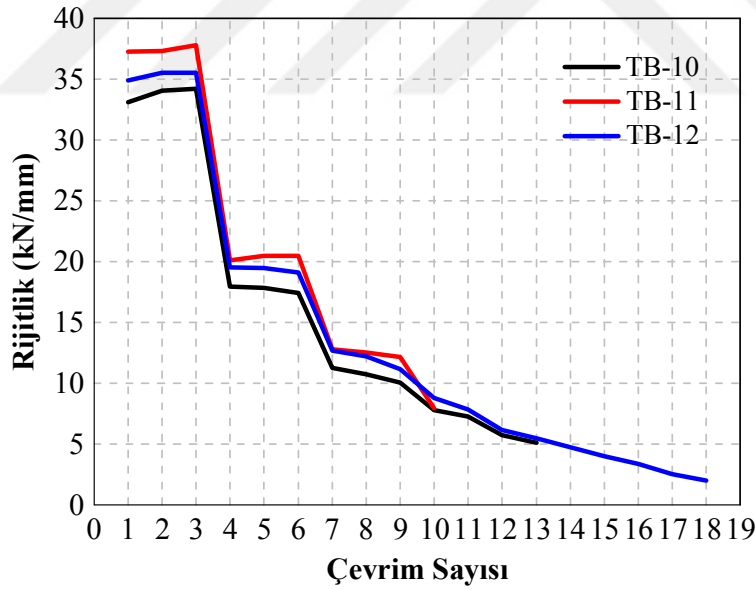
Şekil 5.30 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerine ilişkin E_c/E_t – normalleştirilmiş yerdeğiştirme eğrileri

Numunelerin uç birleşimleri ideal mafsal ile ankastre arasında davranış sergilediğinden deneysel burkulma boyu katsayılarının, beklendiği üzere, 0.5 ile 1.0 arasında olduğu görülmektedir. Çizelge 5.4’te görüldüğü üzere TB-10 ve TB-11 numuneleri aynı etkili burkulma boyuna sahiptir. Zayıflatılmış kesit bölgelerinde uygulanan yalnızca CFRP plaka güçlendirmesinin etkili burkulma boyu üzerinde

etkisi olmadığı görülmüştür. Buna karşın TB-12 numunesinde TB-11'den farklı olarak CFRP plakalar üzerine uygulanan CFRP sargının çapraz uç bölgelerini rijitleştirdiği ve etkili burkulma boyunu bu numunede %20 oranında azalttığı görülmüştür.

Hesaplanan deneysel TTY'leri Çizelge 5.4'te verilmiştir. TB-12 numunesi TB-10 (yalın) numunesine göre %48 daha uzun bir TTY'ye sahiptir. TB-11 numunesi CFRP plakaların erken aderanslarını kaybetmeleriyle gerilme ve şekildeğişikliklerin zayıflatılmış kesit bölgesinde yoğunlaşmasına yol açtığı kopma sonucunda TB-10 numunesinden %40 daha az TTY'ye sahiptir.

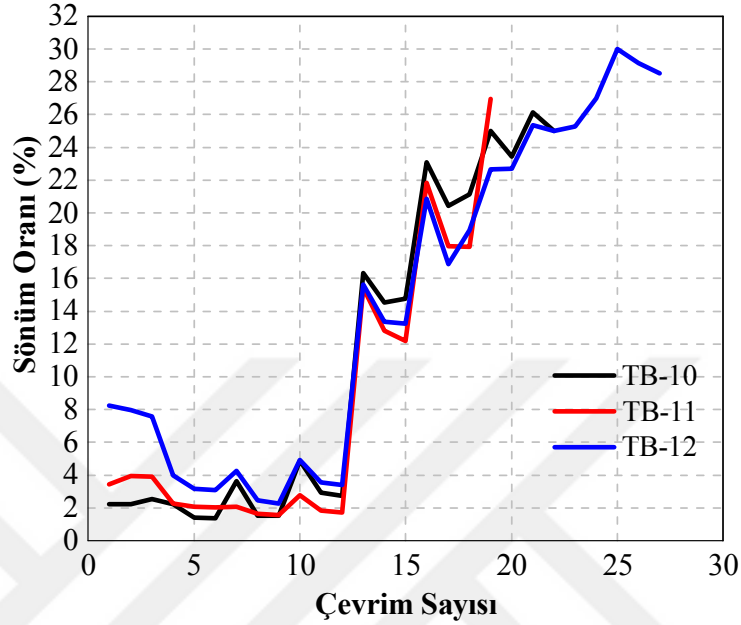
Çaprazın çekme ve basınç bölgelerindeki göreceli performansları bakımından önemli olduğu düşünüldüğünden, numunelerin akmadan itibaren her yerdeğiştirme seviyesinde basınç ve çekme bölgelerinde tükettikleri enerji miktarları oranları (E_c/E_t) – normalleştirilmiş yerdeğiştirme eğrileri Şekil 5.30'da verilmiştir. Genel olarak başlangıçtan itibaren $3\delta_y$ süneklik seviyesine kadar basınç etkisinde tüketilen enerjinin çekmeden daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 5.31 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerinin rijitlik değişim eğrileri.

Çevrim sayısına bağlı olarak numunelerin rijitliklerindeki değişim Şekil 5.31'de gösterilmiştir. Başlangıçta TB-11 ve TB-12 numunelerinin yalın TB-10 numunesine göre rijitliklerindeki fazlalıklar sırasıyla %12 ve %5 oranlarında olup çevrim sayısının artmasıyla rijitlikler arasındaki farkda artmış ve sırasıyla en fazla %20 ve %14 değerleri elde edilmiştir. TB-11'in kopmasından sonraki çevrimlerde TB-12 numunesinin yalın numuneye göre en fazla %7 oranında daha çok rijitliğe sahip

olduğu görülmüştür. Rijitliklerdeki değişimler genel olarak değerlendirildiğinde çevrimsel tekrarlı yükler etkisinde, güçlendirilen numunelerde en fazla %20 oranında artışa ulaşılmış olup bu değer güçlendirme projelerinde kabul edilebilecek limitler içerisinde kalmaktadır.

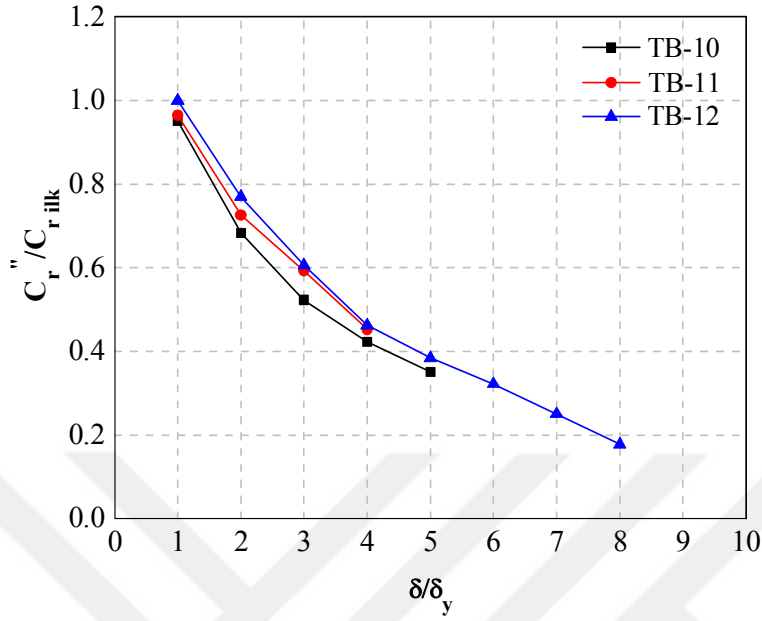


Şekil 5.32 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerine ilişkin sönüm oranı eğrileri.

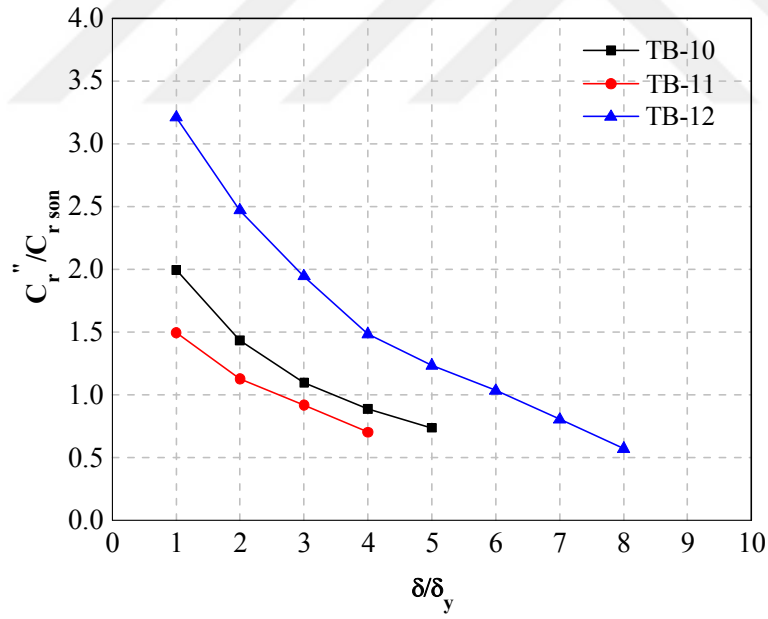
Numunelerin sönüm oranlarında başlangıçta, Şekil 5.32’de görülebileceği gibi, küçük farklar gözlenmiştir. TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerinin başlangıçtaki sönüm oranları sırasıyla %2.2, %3.5 ve %8.2 oranlarında olup beşinci çevrimden sonra sönüm oranları yakın değerler almaktadır. Buna karşın, kopma anında TB-11 ve TB-12 numuneleri yalın TB-10 numunesine göre sırasıyla %8 oranında daha fazla ve %10 oranında daha az sönüm oranına ulaşmıştır. Sünekliğin artmasıyla TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerinin kopma anlarında başlangıçtaki (elastik çevrimlerdeki) sönüm oranlarına göre sırasıyla 11kat, 8 kat ve 3.5 kat artış elde edilmiştir.

Numunelerin normalleştirilmiş burkulma dayanımlarındaki değişim sırasıyla Şekil 5.33 ve Şekil 5.34’deki C_r''/C_r ilk ve C_r''/C_r son eğrilerinde verilmiştir. C_r''/C_r ilk eğrisinde TB-11 numunesinde kopma seviyesi olan $4\delta_y$ ’ye kadar doğrusal bir azalma görülmüş, bu noktadan sonra azalma doğrusunun eğimi, başka bir deyişle azalmanın hızı azalmıştır. C_r''/C_r son eğrisinde de benzer bir durum söz konusu olup azalma hızı TB-10 numunesi için $3\delta_y$ seviyesinde, TB-12 numunesi için $4\delta_y$ seviyesinde

azalmıştır. TB-11 numunesi ise $4\delta_y$ seviyesindeki kopma anına kadar doğrusal azalan bir davranış göstermiştir.

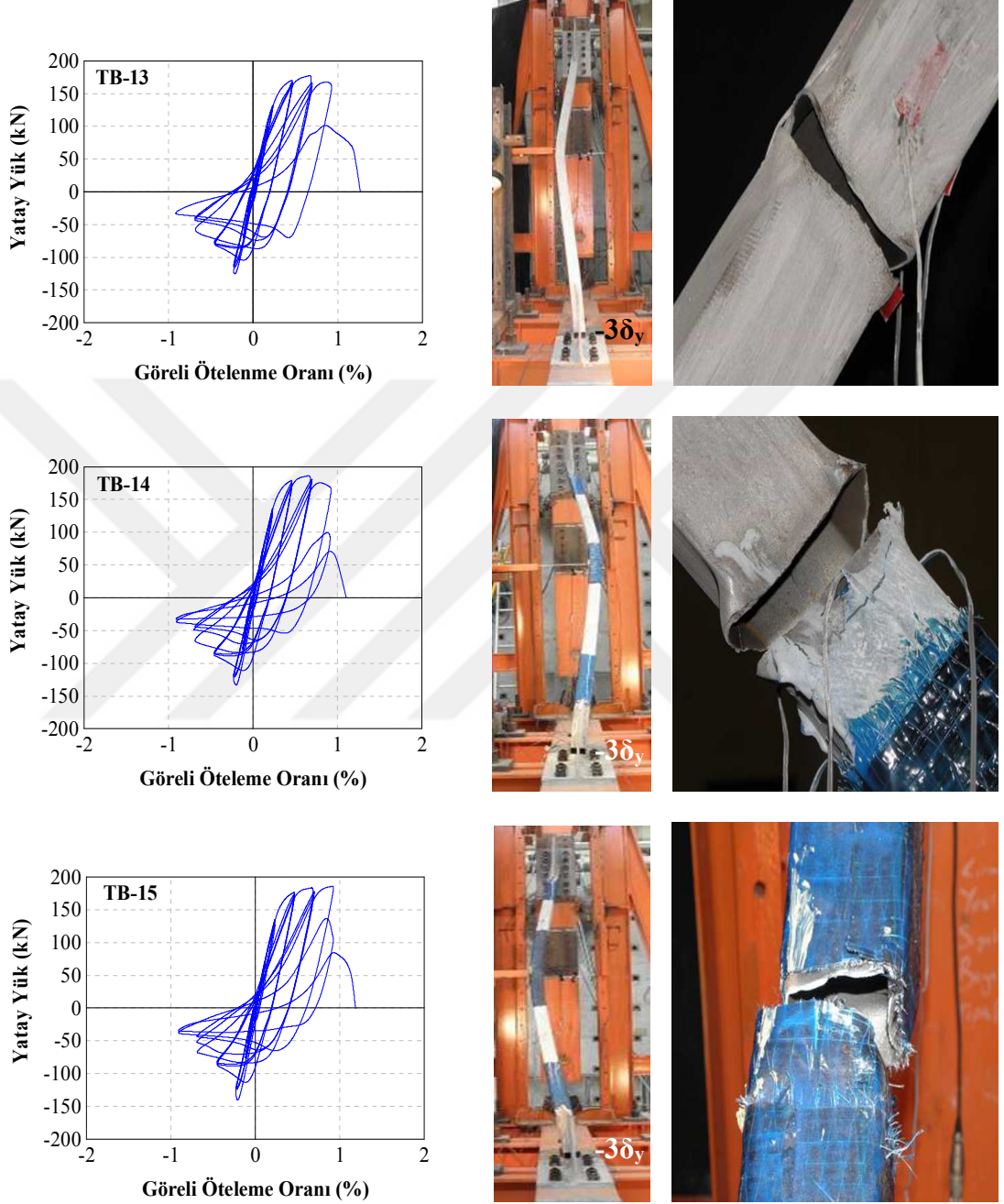


Şekil 5.33 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerinin $C_r''/C_{r ilk}$ eğrileri.



Şekil 5.34 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerinin $C_r''/C_{r son}$ eğrileri.

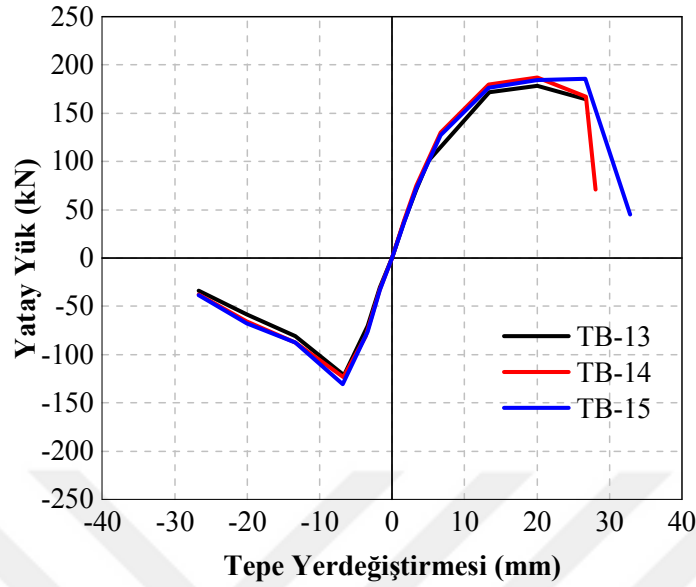
5.8.5 TB-13, TB-14, TB-15 (Kutu 70x70x3) numunelerinin sonuçlarının karşılaştırılması



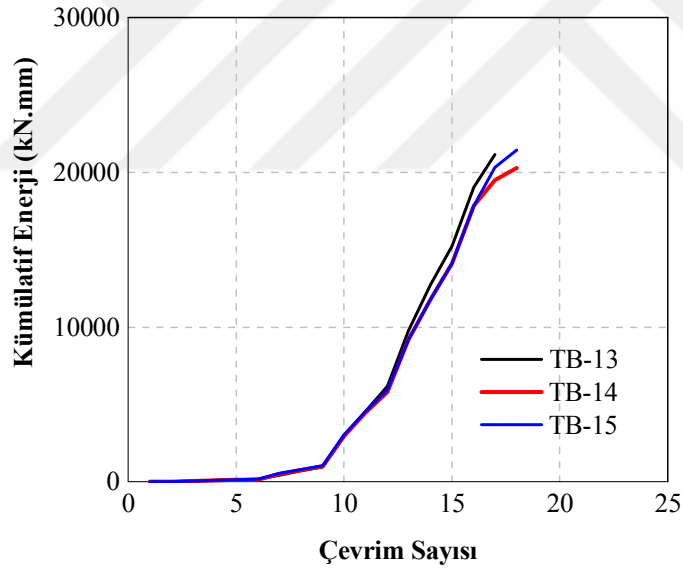
Şekil 5.35 : TB-13, TB-14, TB-15 numuneleri (Kutu 70x70x3) yatay yük - görelî öteleme oranı eğrileri, burkulma modları ve kopma sonrası hasar seviyeleri.

TB-13, TB-14 ve TB-15 numunelerinden oluşan beşinci numune grubuna ait histeretik eğriler, numunelerin burkulma modları ve kopma sonrasında orta bölgedeki hasar durumları Şekil 5.35’de görülmektedir. Yerel narınlığı ($b/t=20.33$)

en büyük olan kutu profillerden oluşan numune grubunda zayıflatılmış uç kesitleri CFRP plaka ve sargıyla, orta bölgeleri ise yalnızca sargıyla güçlendirilmiş olan



Şekil 5.36 : TB-13, TB-14 ve TB-15 numunelerine ait zarf eğrileri.



Şekil 5.37 : TB-13, TB-14 ve TB-15 numunelerinin tükettikleri enerji miktarları.

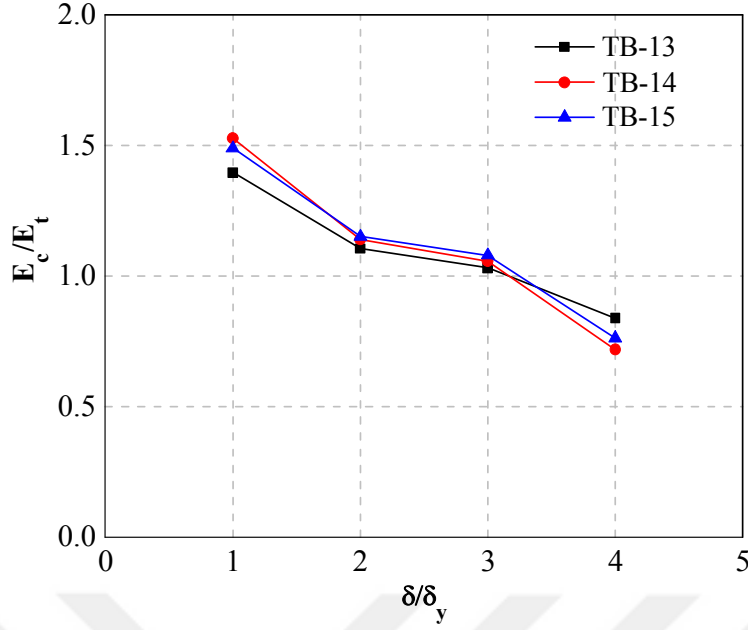
Çizelge 5.5 : TB-13, TB-14 ve TB-15 numunelerinin deneysel burkulma boyu katsayıları ve deneysel TTY'leri.

Numuneler	Deney.Burkulma Boyu Katsayısı (K_e)	Normalleştirilmiş K_e	DeneySEL TTY Δ_f (mm)	Normalleştirilmiş Δ_f
TB-13	0.642	0.696	11.320	1.000
TB-14	0.922	1.000	10.797	0.954
TB-15	0.904	0.980	11.480	1.014

TB-14 ve TB-15 numunelerine ait histeretik eğriler oldukça benzer olup doluluk oranı yalın TB-13 numunesine göre biraz daha fazladır. Yerel narinliğin davranışı oldukça etkilediği ve yüksek yerel narinliği olan bu numunelere uygulanan güçlendirmenin sünekliği yeterince arttırmadığı görülmüştür. Numunelere ilişkin Şekil 5.36'da görülen zarf eğrilerine göre TB-14 ve TB-15 numunelerinin basınçtaki dayanım artışları sırasıyla %2 ve %8 oranlarında, çekmedeki dayanım artışları ise sırasıyla %5 ve %4 oranlarındadır. Bu değerler ışında güçlendirmenin bu gruptaki numunelerin dayanımları üzerinde neredeyse etkisiz olduğu görülmektedir; başka bir deyişle, yerel narinliğin aşırı düzeylerde olması şekildeğiştirmelerin artış hızını engelleyememekte ve bu tür güçlendirmenin etkisini zayıflatmaktadır.

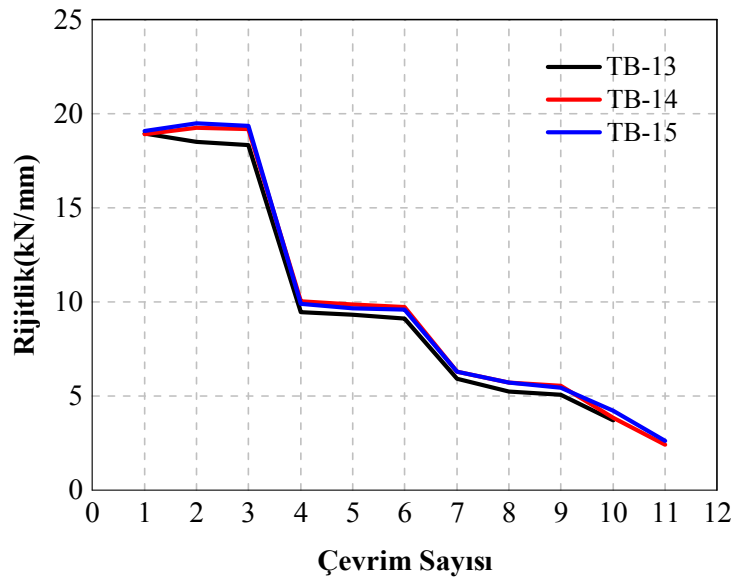
Numunelere ilişkin kümülatif tüketilen enerji eğrileri Şekil 5.37'de görülmekte olup numunelerin tükettikleri enerjiler yaklaşık olarak birbirlerine eşittir. Bu durum CFRP ile yapılan güçlendirmenin yüksek yerel narinliklerde etkili olmamasından kaynaklanmaktadır.

Numunelerin TTY'Y'leri ve deneysel burkulma boyları Çizelge 5.5'te verilmiştir. Bu numune grubunda zayıflatılmış uç kesitler ve orta bölgede yapılan yerel güçlendirmelerin numunelerin burkulma boyunu değiştirmedeği görülmüş, burkulma boyu en kısa olan numunenin kontrol numunesi (TB-13) olduğu tespit edilmiştir. TTY'Y'lerinin birbirlerine çok yakın olduğu, güçlendirmenin etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

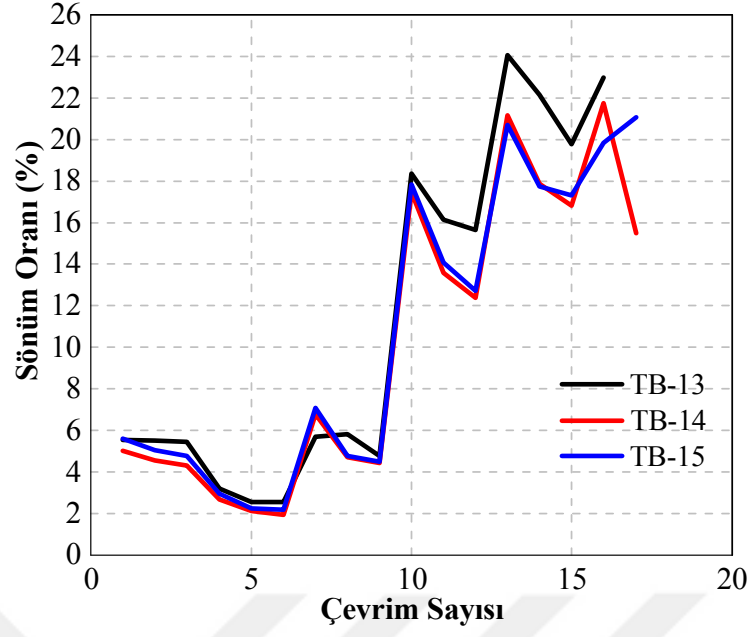


Şekil 5.38 : TB-13, TB-14 ve TB-15 numunelerine ilişkin E_c/E_t – normalize edilmiş yerdeğiştirme eğrileri.

Akmadan itibaren numunelerin her yerdeğiştirme seviyesinde basınç ve çekme bölgelerinde tükettikleri enerji miktarları oranları (E_c/E_t) – normalize edilmiş yerdeğiştirme eğrileri Şekil 5.38’de verilmiştir. Başlangıçtan itibaren $1\delta_y$ ve $2\delta_y$ süneklik seviyelerinde basınç etkisinde tüketilen enerjinin çekmeden daha fazla olduğu, $3\delta_y$ seviyesinde ise basınç ve çekmede tüketilen enerjilerin yaklaşık olarak eşitlendiği görülmüştür. Bu seviyeden sonra çekme etkisinde basınca göre daha fazla enerji tüketiliş E_c/E_t oranı birin altına inmiştir.

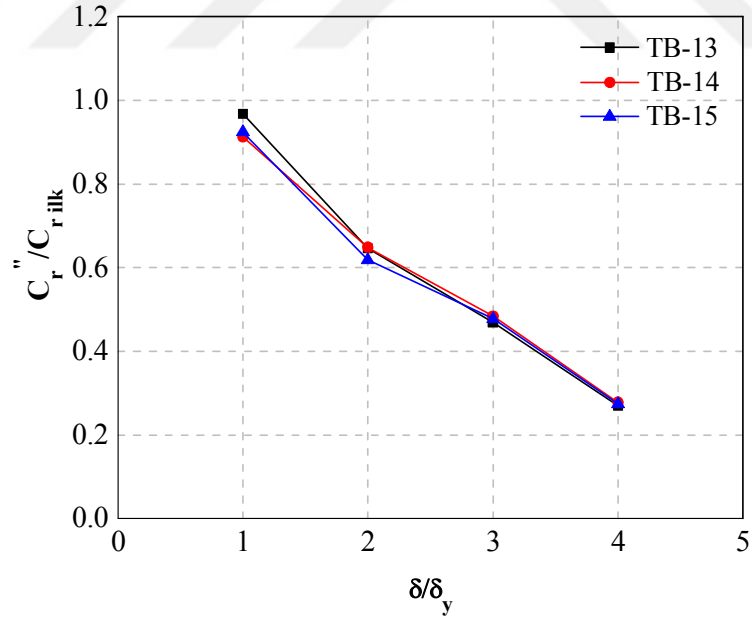


Şekil 5.39 : TB-13, TB-14 ve TB-15 numunelerinin rijitlik değişim eğrileri.

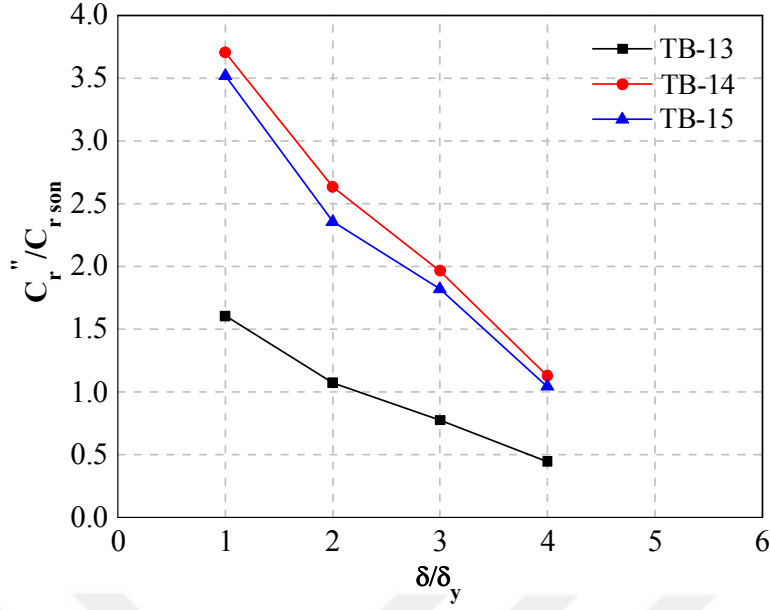


Şekil 5.40 : TB-13, TB-14 ve TB-15 numunelerine ilişkin sönüm oranı eğrileri.

Numunelere ilişkin çevrim sayısına göre rijitlik değişimi eğrileri Şekil 5.39'da görülmektedir; beklendiği gibi, rijitliklerde belirgin bir değişim yoktur.



Şekil 5.41 : TB-13, TB-14 ve TB-15 numunelerinin $C_r''/C_{r\text{ ilk}}$ eğrileri.

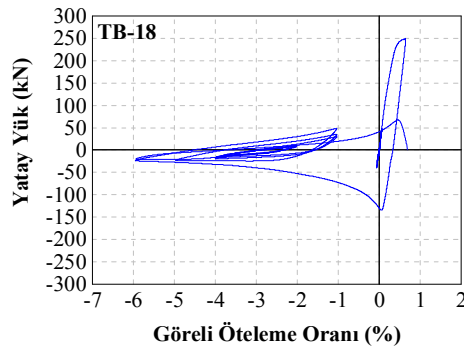
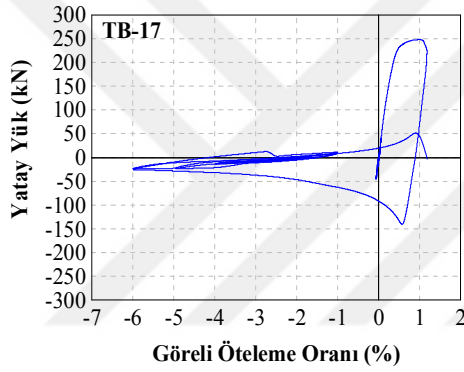
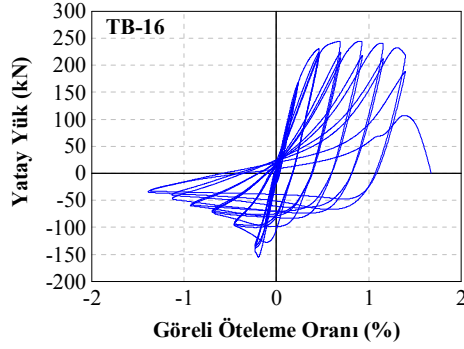


Şekil 5.42 : TB-13, TB-14 ve TB-15 numunelerinin $C_r''/C_{r son}$ eğrileri.

Numunelerin her yükleme çevrimindeki sönüm oranlarındaki değişim Şekil 5.40'da verilmiştir. Bu eğrilerden sönüm oranlarının çevrim sayısına bağlı olarak %5.5 ile %24 arasında değiştiği görülmektedir. Sönüm oranlarının değişimin onuncu çevrime dek yaklaşık olarak aynı olmasına karşın bundan sonra TB-13 numunesinin sönümünde artış görülmüş olup TB-14 ve TB-15 numunelerinden sırasıyla %14 ve %16 oranlarında daha fazla sönüme sahiptir.

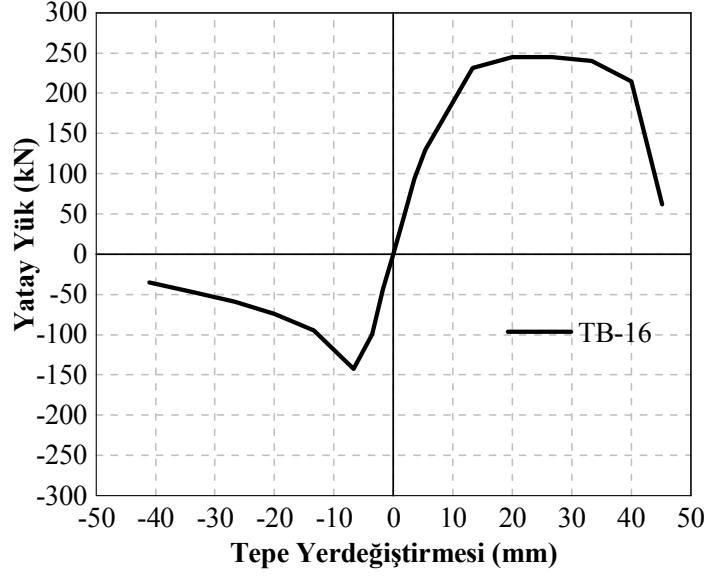
Numunelerin normalleştirilmiş burkulma dayanımlarındaki değişim sırasıyla Şekil 5.41 ve Şekil 5.42'deki $C_r''/C_{r ilk}$ ve $C_r''/C_{r son}$ eğrilerinde verilmiştir. $4\delta_y$ seviyesinde kopan üç numunenin $C_r''/C_{r ilk}$ eğrilerinde basınç dayanımlarındaki azalma hızları birbirlerine yakındır. $C_r''/C_{r son}$ eğrilerine göre güçlendirilmiş numunelerin basınç dayanımlarındaki değişim birbirine çok yakın olup referans numunesindeki değişim farklıdır.

5.8.6 TB-16, TB-17, TB-18 (Kutu 70x70x4) numunelerinin sonuçlarının karşılaştırılması

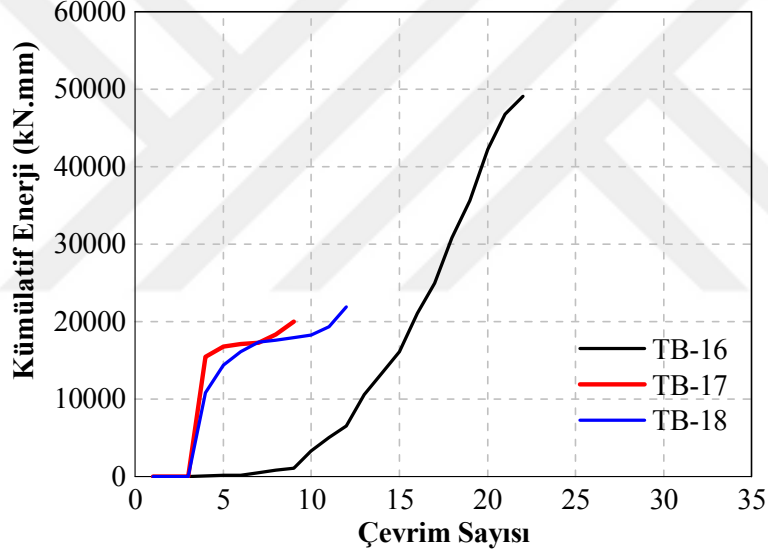


Şekil 5.43 : TB-16, TB-17, TB-18 numuneleri (Kutu 70x70x4) yatay yük - görelî öteleme oranı eğrileri, burkulma modları ve kopma sonrası hasar seviyeleri.

Altıncı numune grubunda yalnız TB-16 numunesi ATC-24, yalnız TB-17 ve yerel olarak CFRP ile güçlendirilmiş TB-18 numuneleri ise yakın fay etkisi yükleme protokollerine göre denenmiş olup elde edilen histeretik eğriler, burkulma modları ve kopma sonrası durumları Şekil 5.43'de görülmektedir. Yakın fay etkisi yükleme protokolünden elde edilen histeretik eğri çevrimsel yükleme protokolünden oldukça



Şekil 5.44 : TB-16 numunesine ait zarf eğrisi.



Şekil 5.45 : TB-16, TB-17 ve TB-18 numunelerinin tükettikleri enerji miktarları.

Çizelge 5.6 : TB-16, TB-17 ve TB-18 numunelerinin deneysel burkulma boyu katsayıları ve deneysel TTY'leri.

Numuneler	Deneysel Burkulma Boyu Katsayısı		Deneysel TTY
	(K _e)	Normalleştirilmiş K _e	Δ _f (mm)
TB-16 (ÇYE)	1.000	1.000	15.329
TB-17 (YFE)	0.970	0.970	2.420
TB-18 (YFE)	0.778	0.778	1.240

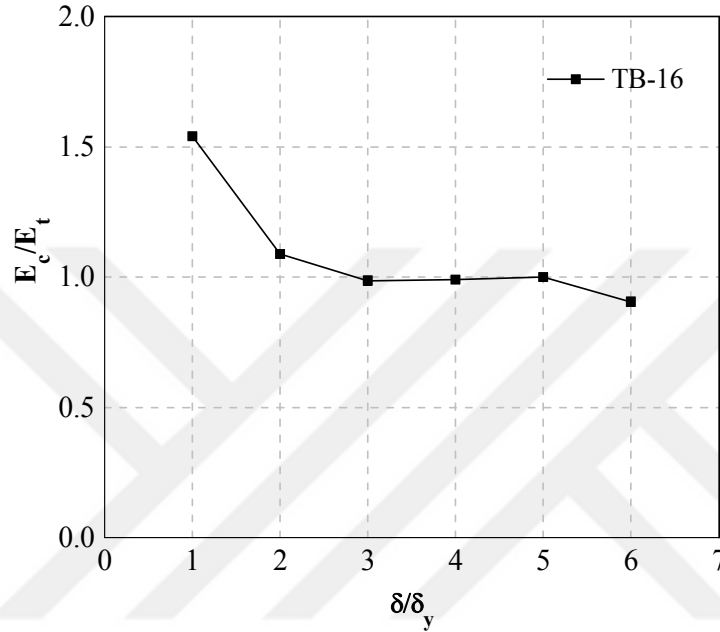
farklıdır. Davranıştaki en önemli farklardan biri yakın fay etkisinde numuneler (TB-17 ve TB-18) boşaltım çevrimi sırasında çekme yerdeğiştirmesinde burkulmuştur.

Bunun en önemli nedeni, protokolün ilk hedef çekme yerdeğiştirme değerinin çok yüksek olması ve bu ilk yerdeğiştirmede numune boyunun aşırı uzamasıdır. Boyu uzayan numunede çekme yerdeğiştirmesi azaldığında numune üzerinde basınç oluşmakta ve numune burkulmaktadır. Yakın fay etkisi histeretik eğrilerinde en dolu çevrim, protokolün ilk hedef çekme ötelenmesine giderken elde edilmiştir. Yakın fay etkisinde yalın TB-17 numunesinin TB-18 numunesine göre ilk çekme çevriminde daha dolu bir eğriye sahip olduğu gözlenmiştir. Bunun en önemli nedeni, güçlendirilmiş numunenin daha erken yüksek çekme yüküne maruz kalması ve yükün hidrolik veren kapasitesi olan 250kN'a yaklaşmasından dolayı protokolün daha erken geri döndürülmesidir. TB-16 numunesi çevrimsel yükleme etkisinde 245kN'a ulaşmışken, TB-17 ve TB-18 numuneleri yakın fay etkisinde yüklemenin geri çevrilmesinden önce sırasıyla 247kN ve 249.90kN'na ulaşılmıştır. Yakın fay etkisindeki numunelere ait zarf eğrileri kamaşık bir düzen içerdiğinden yalnızca TB-16 numunesine ait zarf eğrisi Şekil 5.44'te verilmiştir.

Numunelere uygulanan yükleme protokollerindeki farklılıklar numunelerin tükettikleri enerjilerde de görülmekte olup tüketilen enerjiler Şekil 5.45'de verilmiştir. Çevrimsel yükleme etkisindeki yalın TB-16 ve yakın fay etkisindeki yalın TB-17 numuneleri karşılaştırıldığında, TB-16 numunesi %146 oranında daha fazla enerji tüketmiştir. Yakın fay etkisinde güçlendirilmiş TB-18 numunesinin yine aynı etki altındaki TB-17 numunesine göre %10 oranında daha fazla enerji tüketmiş olduğu belirlendiğinden CFRP ile yapılan yerel güçlendirmenin yakın fay etkisinde de bir miktar etkili olduğu söylenebilir.

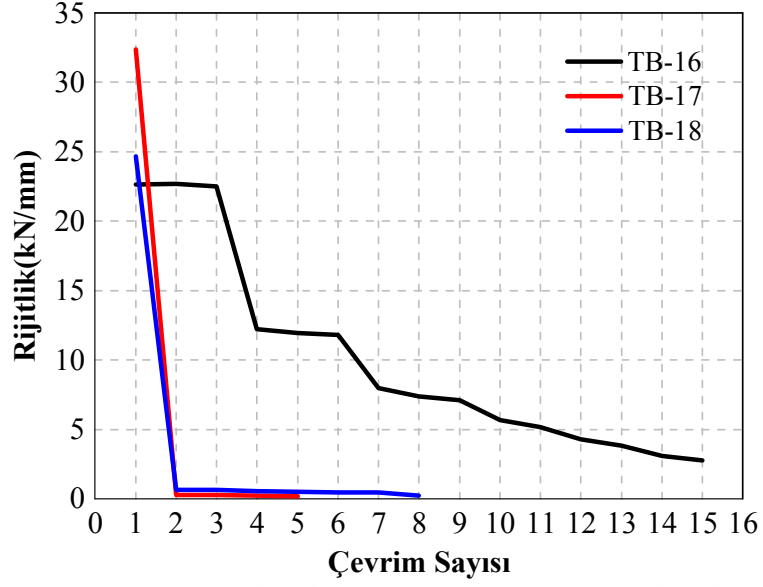
Farklı yükleme protokolleri etkisindeki numunelere ilişkin TTY'leri ve deneysel burkulma boyları Çizelge 5.6'da verilmiştir. Bu çizelgede, TB-16 numunesinin yanına çevrimsel yükleme etkisinde olduğunu belirtmek amacıyla ÇYE kısaltması TB-17 ve TB-18 numuneleriyanın yakın fay etkisinde olduklarını belirtmek amacıyla YFE kısaltması eklenmiştir. Yakın fay etkisinde TTY, etkinin en önemli adımı olan protokolün ilk çekme çevrimi tarafından belirlenmektedir. TB-16 numunesi TB-17 numunesinden 6.33 kat daha uzun TTY'ye sahiptir. Ayrıca yakın fay etkisindeki güçlendirilmiş TB-18 numunesi yalın TB-17 numunesinden %51 oranında daha kısa TTY'ye sahip olduğu görülmüştür; böylece yakın fay yüklemesinin ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmaktadır. Protokolün ilk çekme çevriminde TB-18 numunesinin hidrolik veren kapasitesine daha erken ulaşması sonucu erken geriye

dönüş yapıldığı unutulmamalıdır. Yalın TB-16 ve TB-17 numunelerinin deneysel burkulma boyları sırasıyla 1.00 ve 0.97 olarak hesaplanmıştır. TB-18 numunesinin burkulma boyu TB-16 ve TB-17 numunelerine göre sırasıyla %20 ve %23 oranlarında daha kısa olarak hesaplanmış olup CFRP güçlendirmenin çevrimsel yükleme ve yakın fay etkilerinde burkulma boyunu yaklaşık %20 oranı civarlarında kısalttığı söylenebilir.

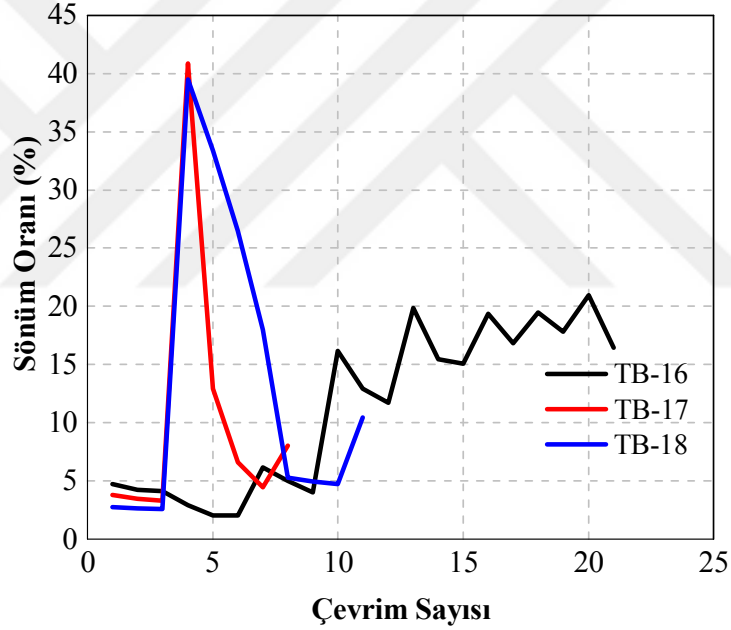


Şekil 5.46 : TB-16 numunesine ilişkin E_c/E_t – normalleştirilmiş yerdeğiştirme eğrisi.

Çevrimsel yükleme etkisindeki numunenin (TB-16) akmadan itibaren her yerdeğiştirme seviyesinde basınç ve çekme bölgelerinde tükettikleri enerji miktarları oranları (E_c/E_t) – normalleştirilmiş yerdeğiştirme eğrisi Şekil 5.46’da verilmiştir. $1\delta_y$ süneklik seviyesinde basınç etkisinde tüketilen enerji %50 oranı civarında daha fazlayken yerdeğiştirmelerin artmasıyla $3\delta_y$ seviyesinden $5\delta_y$ seviyesine kadar basınç ve çekme etkilerinde yaklaşık eşit miktarda enerji tüketildiği görülmektedir. $5\delta_y$ süneklik seviyesinden sonra çekme ve basınç yükleri arasındaki fark iyice arttığından çekme etkisinde daha fazla enerji tüketilmiştir. Yakın fay etkisindeki numunelerin yükleme adımları TB-16 numunesiyle aynı olmadığından dolayı bu numunelerin E_c/E_t oranları aynı grafik üzerinde gösterilememiştir. Bunu yerine, TB-17 ve TB-18 numunelerinin deney sonunda basınçta tüketilen toplam enerjinin çekmede tüketilen toplam enerjiye oranları hesaplanmış ve sırasıyla 1.74 ve 2.26 değerleri elde edilmiştir. Güçlendirilmiş numunenin basınçta çekmeye göre oldukça fazla enerji tükettiği görülmektedir.

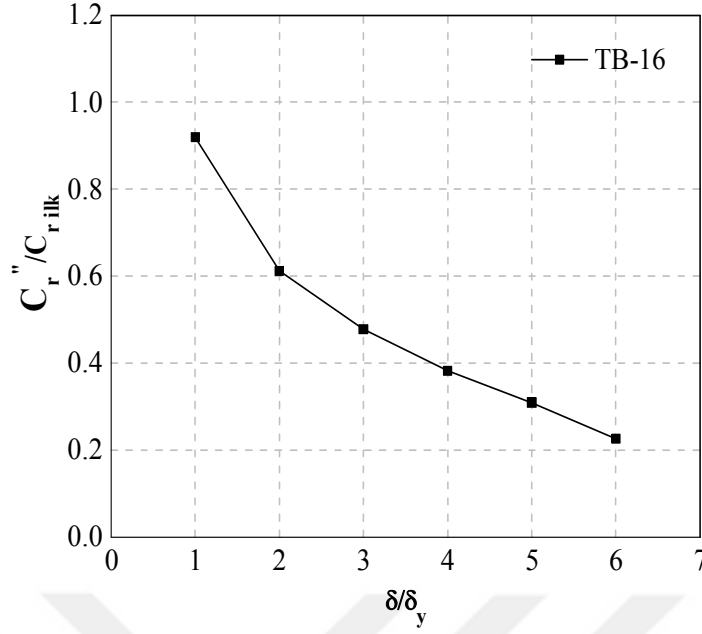


Şekil 5.47 : TB-16, TB-17 ve TB-18 numunelerinin rijitlik değişim eğrileri.

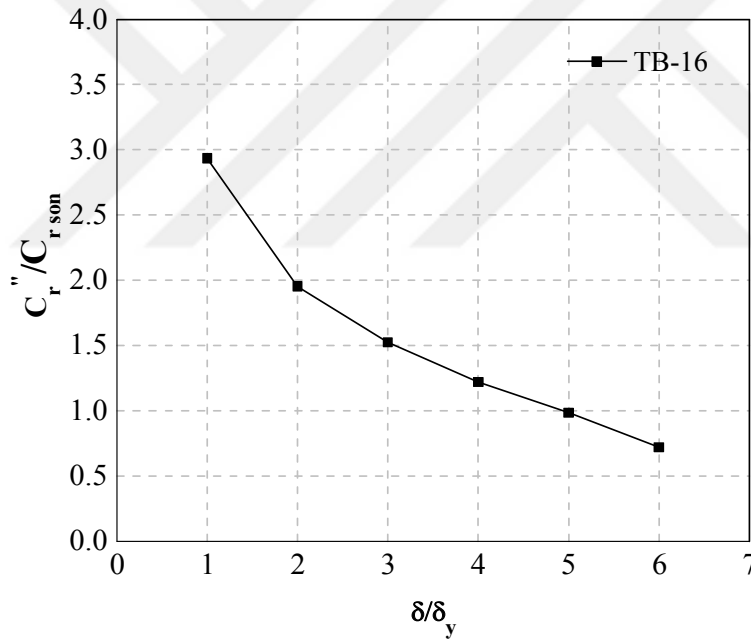


Şekil 5.48 : TB-16, TB-17 ve TB-18 numunelerine ilişkin sönüm oranı eğrileri.

Numunelere ilişkin çevrim sayısına göre rijitlik değişimi eğrileri Şekil 5.47’de görülmektedir. Yakın fay etkisindeki numuneler (TB-17 ve TB-18) beklendiği üzere protokolün ilk çekme çevriminde yüksek rijitliğe sahip olup sonraki çevrimlerde ani bir düşüşle hemen hemen sıfıra yakın bir rijitlik elde edilmiştir; Bu durum çaprazlı çelik çerçevelerin uygun tasarlanmaması durumunda özellikle yakın fay depremleri etkisinde davranışlarının ne kadar değişebileceğini göstermektedir. TB-17 numunesi TB-18 numunesine göre başlangıçta %31 oranında daha rijittir. TB-16’nın başlangıç rijitliği TB-18 numunesine oldukça yakındır.



Şekil 5.49 : TB-16 numunesinin $C_r''/C_{r ilk}$ eğrisi.



Şekil 5.50 : TB-16 numunesinin $C_r''/C_{r son}$ eğrisi.

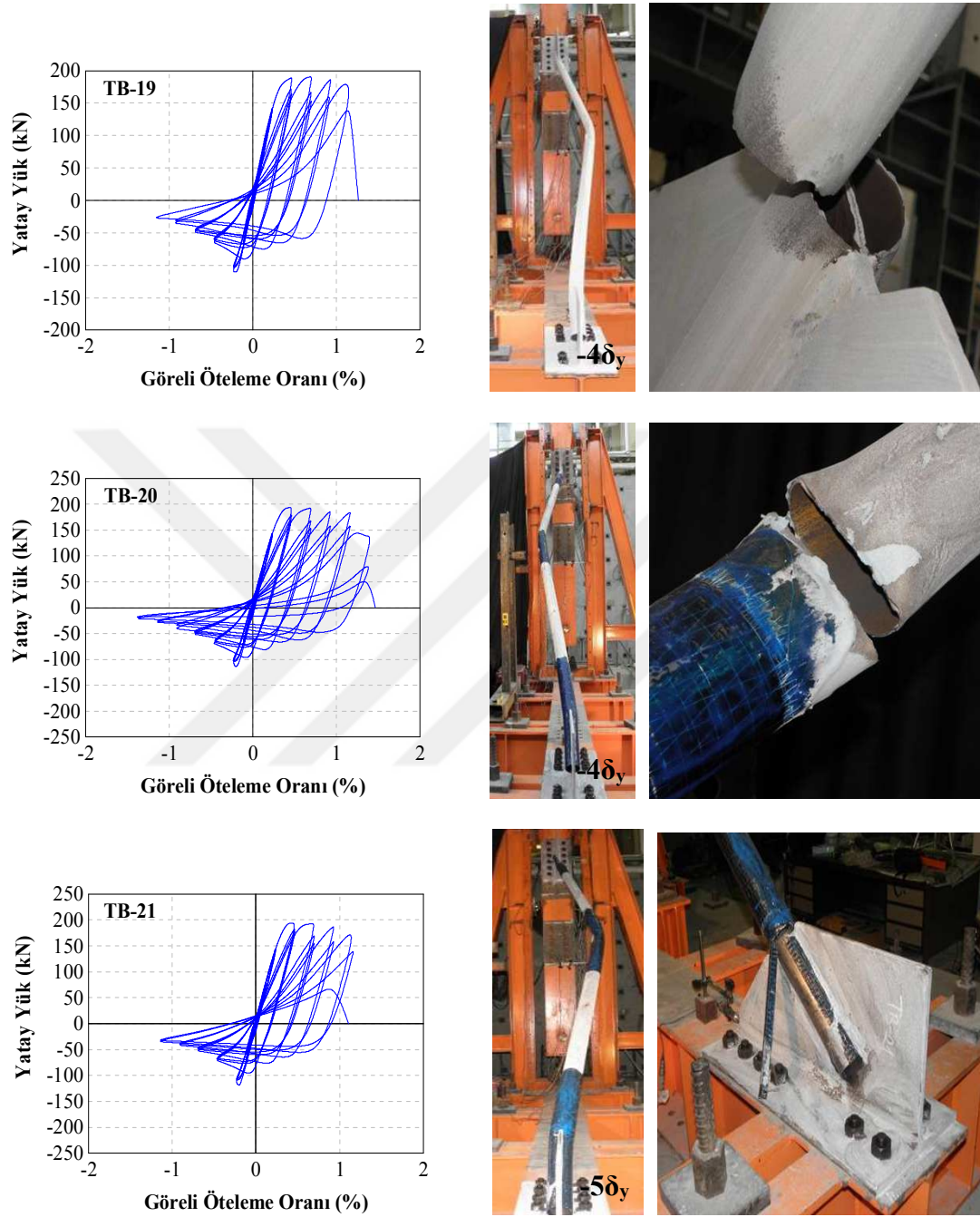
Çevrimsel ve yakın fay yükleme etkisindeki numunelerin her yükleme çevrimindeki sönüm oranlarındaki değişim Şekil 5.48’de verilmiştir. TB-16 numunesi %5 ile %21 oranları arasında değişen sönüm oranına sahip olup bu oran çevrim sayısı artışıyla yavaş yavaş artmaktadır. Yakın fay etkisindeki TB-17 ve TB-18 numunelerinde protokolün ilk çevriminde büyük şekildeğişimler olduğundan bu çevrimde sönümde ani artış görülmüştür. TB-17 ve TB-18 numunelerinin sönüm oranlarının başlangıç çevriminde sırasıyla %41 ve %39 oranlarında olup bu değerler

çevrimsel yükleme etkisindeki numunenin son çevrimindeki sönüm oranı yaklaşık 2 katıdır.

Çevrimsel yükleme etkisindeki TB-16 numunesinin burkulma dayanımlarındaki değişim sırasıyla Şekil 5.49 ve Şekil 5.50'deki C_r''/C_r ilk ve C_r''/C_r son eğrilerinde verilmiştir. Yakın fay etkisindeki numunelerin hedef yerdeğiştirme adımları farklı olduğundan burkulma dayanımı eğrileri çizilmemiştir. C_r''/C_r ilk ve C_r''/C_r son eğrilerinde TB-16 numunesinde $2\delta_y$ seviyesine kadar daha hızlı azalma tespit edilmiş, $2\delta_y$ 'den sonraki azalmalar ise daha yavaş olup hemen hemen doğrusaldır.

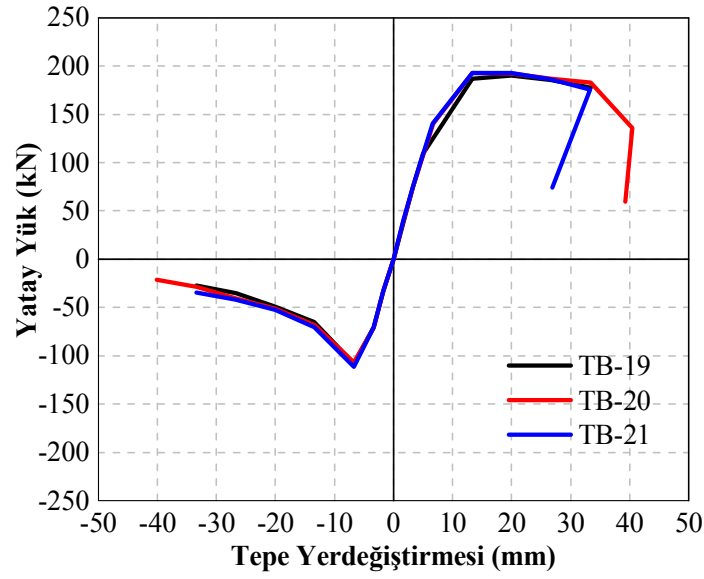


5.8.7 TB-19, TB-20, TB-21 (Boru 76.1x3) numunelerinin sonuçlarının karşılaştırılması

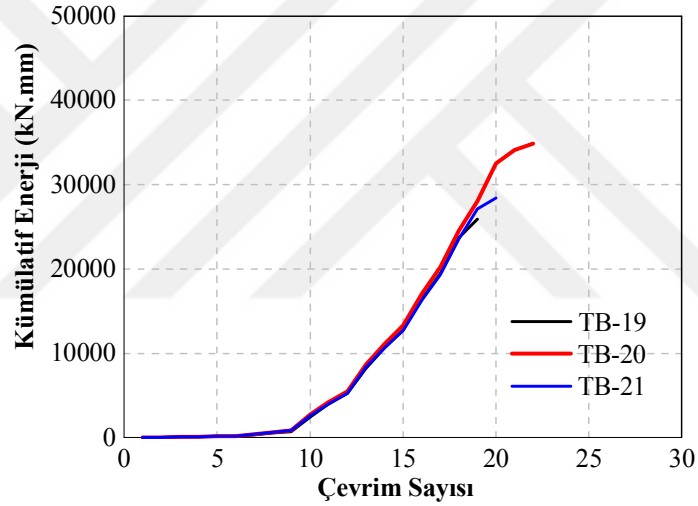


Şekil 5.51 : TB-19, TB-20, TB-21 numuneleri (Boru 76.1x3) yatay yük - görelî öteleme oranı eğrileri, burkulma modları ve kopma sonrası hasar seviyeleri.

Boru 76.1x3 profilleden oluşan son numune grubundaki TB-19, TB-20 ve TB-21 numunelerine ait histeretik eğriler, numunelerin burkulma modları ve kopma sonrasındaki hasar durumları Şekil 5.51’de görülmektedir. Güçlendirilmiş numunelerden TB-20 orta bölgeden, TB-21 ise alt uç zayıflatılmış kesit bölgesinden kopmuştur. Bunun en önemli nedeni TB-21 numunesinde alt uç güçlendirmesinde



Şekil 5.52 : TB-19, TB-20 ve TB-21 numunelerine ait zarf eğrileri.



Şekil 5.53 : TB-19, TB-20 ve TB-21 numunelerinin tükettikleri enerji miktarları.

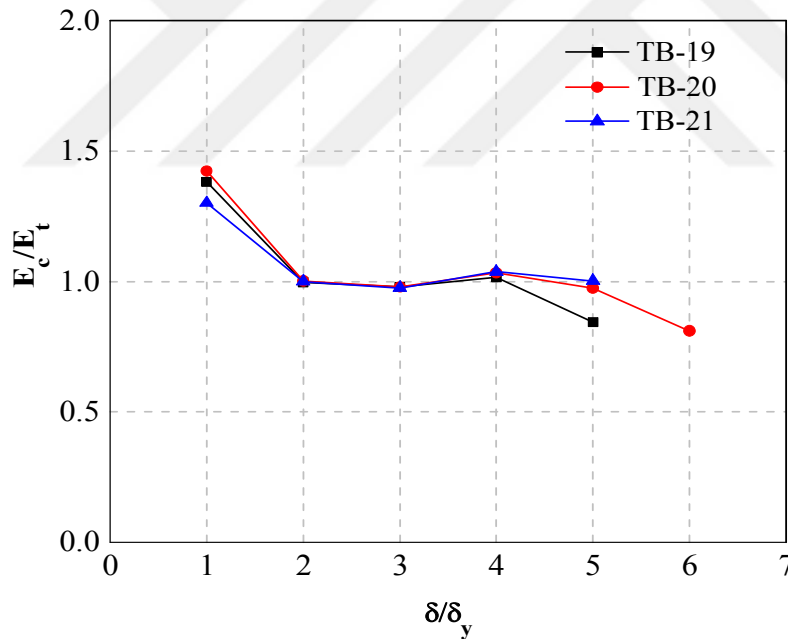
Çizelge 5.7 : TB-19, TB-20 ve TB-21 numunelerinin deneysel burkulma boyu katsayıları ve deneysel TTY'leri.

Numuneler	Deney.Burkulma		Deneysel	
	Boyut Katsayısı	Normalleştirilmiş	TTY	Normalleştirilmiş
	(K _e)	K _e	Δ _f (mm)	Δ _f
TB-19	0.846	0.919	13.201	1.000
TB-20	0.808	0.877	16.098	1.219
TB-21	0.921	1.000	13.845	1.049

kullanılan CFRP kumaşın erken aderansını kaybetmesi ve kopmanın bu bölgede beklenenden önce oluşmasıdır. TB-20 numunesi, yalnız TB-19 ve güçlendirilmiş TB-21 numunesinden daha dolu bir histeretik davranış göstermiştir.

Numunelerin zarf eğrileri ve kümülatif enerji tüketme kapasiteleri sırasıyla Şekil 5.52 ve Şekil 5.53'te görülmektedir. TB-21 numunesinin daha erken koptuğu zarf eğrilerinde açık bir şekilde görülmekte olup bu durum numunenin daha az enerji tüketmesine neden olmuştur. Orta bölgesinde 500mm uzunluğunda CFRP sargı bulunan TB-20 ve yine aynı bölgede 1000mm uzunluğunda CFRP sargı bulunan TB-21 numuneleri yalın numuneden sırasıyla %35 ve %10 oranlarında daha fazla enerji tüketmişlerdir. Zayıflatılmış enkesit bölgesinde oluşabilecek kopmaların geciktirilmesi ve özellikle engellenerek kopmanın çaprazın orta bölgesine kaydırılması enerji tüketiminin yanında çalışmada hedeflenen süneklik artışı da sağlamıştır.

Son numune grubunda zayıflatılmış uç kesitler ve orta bölgede yapılan yerel güçlendirmelerin numunelerin burkulma boyunu belirgin şekilde değiştirmedikleri görülmüştür. Burkulma boyu en kısa olan numunenin (TB-20) olduğu tespit edilmiştir. TB-20 numunesi %5 oranında daha kısa burkulma boyuna sahiptir.

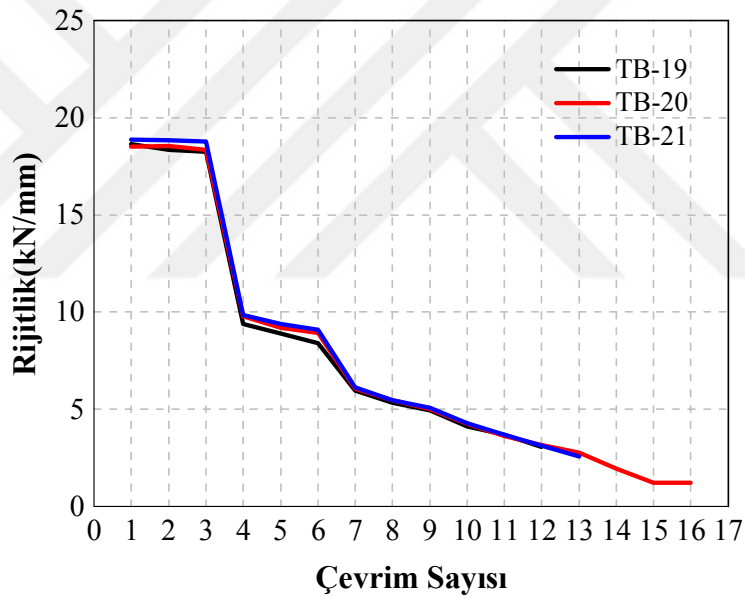


Şekil 5.54 : TB-19, TB-20 ve TB-21 numunelerine ilişkin E_c/E_t – normalize edilmiş yerdeğiştirme eğrileri.

TB-20 numunesi bu grubun kontrol numunesi TB-19'a göre kullanılan CFRP kumaş etkisiyle kopmanın zayıflatılmış uç kesitten orta bölgeye kaydırılmasından dolayı %22 daha uzun TTY'ye sahiptir. Güçlendirilmiş olmasına karşın beklenenden önce zayıflatılmış uç kesit bölgesinden kopan TB-21 numunesi kontrol numunesinden %5

oranında daha uzun TTY'ye sahiptir. Numunelerin deneysel burkulma boyları ve TTY'leri Çizelge 5.7'de listelenmiştir.

Çaprazın çekme ve basınç bölgelerindeki göreceli performanslarının belirlenmesinde önemli olan ve akmadan itibaren her yerdeğiştirme seviyesinde basınç ve çekme bölgelerinde tükettikleri enerji miktarları oranları (E_c/E_t) – normalize edilmiş yerdeğiştirme eğrileri Şekil 5.54'te verilmiştir. $1\delta_y$ yerdeğiştirme seviyesinde basınçta tüm numuneler daha fazla enerji tüketmiştir. Bu seviyede TB-20 numunesi kontrol numunesine göre daha büyük E_c/E_t oranına sahipken TB-21 numunesi grup içinde en düşük orana ulaşmıştır. İlerleyen yerdeğiştirme seviyelerinde $4\delta_y$ de dahil olmak üzere tüm numunelerde basınç ve çekme bölgelerinde tüketilen enerjiler yaklaşık olarak aynı olup $5\delta_y$ 'den itibaren önceki numunelerde olduğu gibi çekmede daha fazla enerji tüketildiği görülmektedir.

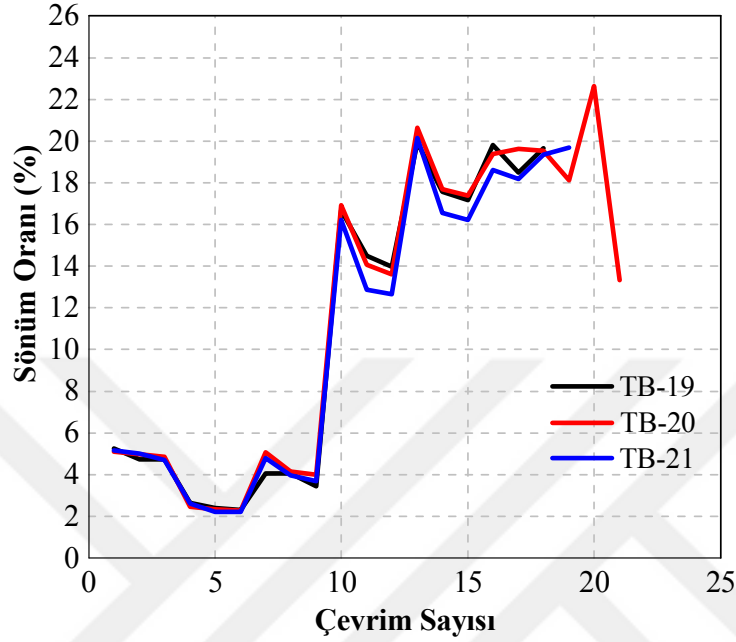


Şekil 5.55 : TB-19, TB-20 ve TB-21 numunelerinin rijitlik değişim eğrileri.

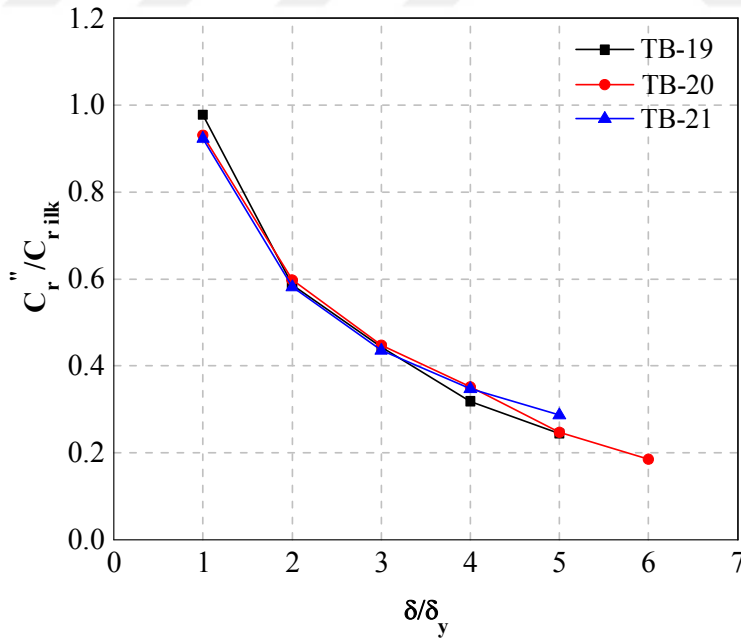
Numunelere ilişkin çevrim sayısına göre rijitlik değişimi eğrileri Şekil 5.55'de verilmiştir; beklendiği gibi rijitliklerde belirgin bir değişim yoktur. Rijitlik değişimi eğrisi genel olarak belirli yerdeğiştirme seviyeleri arasında ani değişim yaparak çevrim sayısı arttıkça hızla azalmaktadır. Buna karşın yedinci çevrim sayısından sonra rijitliklerdeki düşüş doğrusala yakındır.

Tüm numunelerin sönüm oranlarındaki değişim onuncu çevrime dek yaklaşık olarak aynı olup numunelere ilişkin sönüm oranı eğrileri Şekil 5.56'da verilmiştir. Bu noktadan sonra TB-21'nin sönüm oranında belirli çevrimlerde azalmalar görülmüştür; bu davranış biçimi deney sırasında CFRP elemanların etkisini yer yer

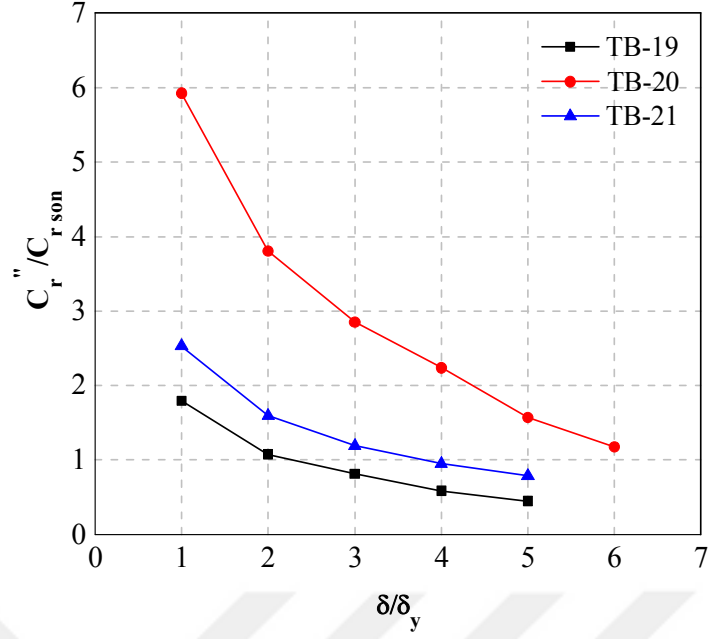
kaybetmesiyle açıklanabilir. TB-20 numunesi en fazla %23 civarında sönüme ulaşmış olup kontrol numunesinin sönüm oranından %14 daha fazladır. TB-21 ve TB-19 numunelerinin ulaştıkları en büyük sönüm oranları %20 civarında olup aralarındaki fark en fazla %1 oranındadır.



Şekil 5.56 : TB-19, TB-20 ve TB-21 numunelerine ilişkin sönüm oranı eğrileri.



Şekil 5.57 : TB-19, TB-20 ve TB-21 numunelerinin $C_r''/C_{r\text{ ilk}}$ eğrileri.



Şekil 5.58 : TB-19, TB-20 ve TB-21 numunelerinin $C_r''/C_{r\text{ son}}$ eğriler.

Numunelerin normalleştirilmiş burkulma dayanımlarındaki değişimler de sırasıyla Şekil 5.57 ve Şekil 5.58'deki $C_r''/C_{r\text{ ilk}}$ ve $C_r''/C_{r\text{ son}}$ eğrilerinde verilmiştir. Üç numunenin de $C_r''/C_{r\text{ ilk}}$ eğrilerinde basınç dayanımlarındaki azalma hızları birbirlerine oldukça yakın olup değişim $2\delta_y$ 'den sonra yaklaşık doğrusaldır. $C_r''/C_{r\text{ son}}$ değerlerindeki değişim TB-19 ve TB-21 için benzerdir. Etkinliği daha fazla olan TB-20'de bu oran diğer iki numuneye göre daha yüksek elde edilmiştir.



6. DENEY SONUÇLARININ TOPLUCA DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1 Giriş

Denenen yedi grup numunenin sonuçları kendi grupları içerisinde önceki bölümlerde kapsamlı olarak karşılaştırılmıştır. Bu bölümde ise yapılan deneylerden elde edilen ana sonuçlar topluca ve genel olarak değerlendirilmiştir.

6.2 Değerlendirme

Denenen toplam yirmi numuneden sekizi yalın numunedir. Bu numunelerden yalnızca biri boru profil olup kutu numunelerden birinde de yakın fay etkisi yükleme protokolü uygulanmıştır. Deneylerden elde edilen ve davranışı tanımlayan ana veriler Çizelge 6.1’de özetlenmiştir.

CFRP ile güçlendirilmemiş yalın numunelere ilişkin verilerin incelenmesiyle ulaşılan sonuçlar;

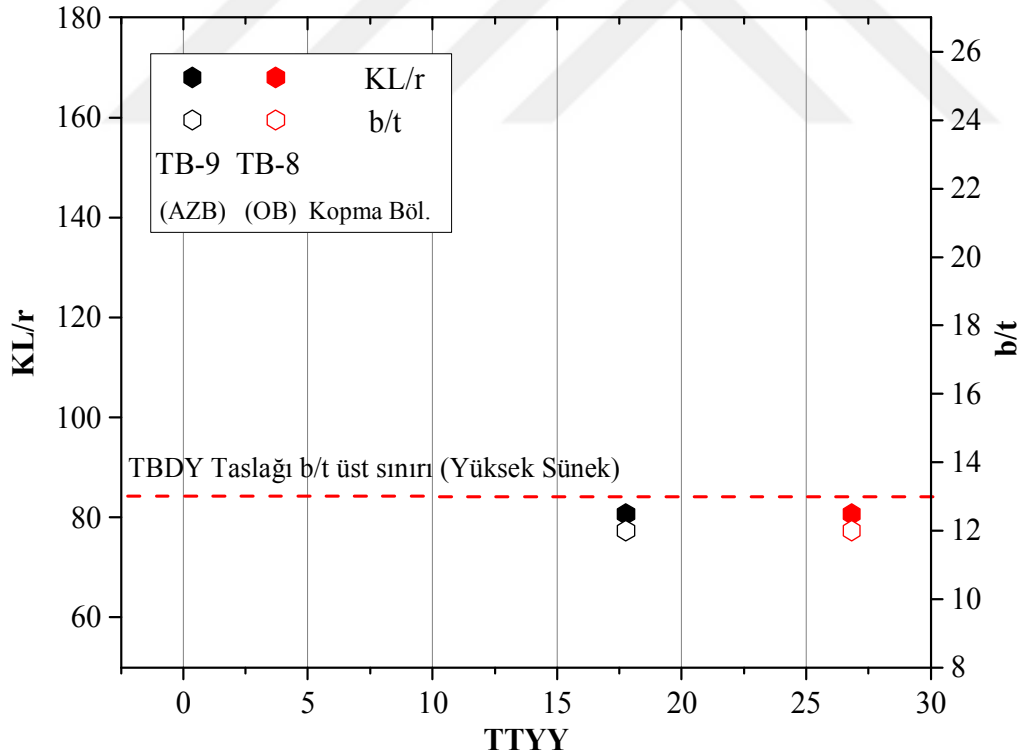
- Aynı profil enkesitine ve yerel narinliğe ($b/t=9.50$) sahip olmalarına karşın genel narinlikleri farklı olan TB-4 ve TB-10 numunelerinde, genel narinliğin artmasıyla TTY’de artış görülmüştür; bu, beklenen bir durumdur.
- Aynı yerel ve genel narinliğe sahip TB-16 ve TB-17 numuneleri yükleme protokolünün davranış üzerine olan etkisini görmek için sırasıyla ATC-24 ve yakın fay etkisi yerdeğiştirme protokollerine göre denenmiştir. Çevrimsel yerdeğiştirme protokolü olan ATC-24 etkisindeki numune yakın fay etkisindekine göre yaklaşık 7 kat daha uzun TTY’ye sahip olmuş olup 2.5 kat daha fazla enerji tüketmiştir. Numunelerin ulaştığı maksimum çekme kuvvetleri yaklaşık olarak aynı olmasına karşın çevrimsel protokol etkisindeki TB-16 numunesinin basınç kapasitesi %8 oranında daha fazladır.
- Yerel narinlikleri 14’ten büyük olan TB-1, TB-13, TB-16 ve TB-17 numunelerinden yalnızca TB-1 numunesi alt zayıflatılmış kesitten kopmuş, diğerleri orta bölgeden kopmuşlardır. TB-1’deki bu farklı davranışın

kaynaklama sırasında ısıdan etkilenen bölgeden (HAZ – Heat Affected Zone) kaynaklandığı düşünülmektedir.

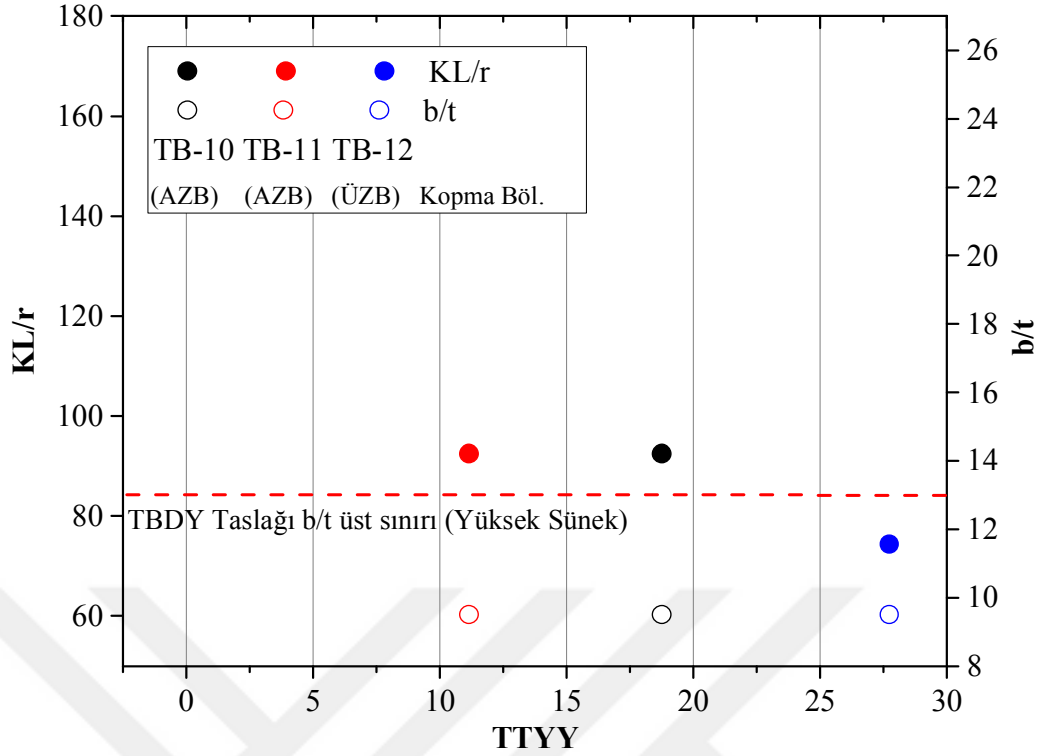
- Yalın kutu numuneler en fazla 7, en az 4 yerdeğiştirme sünekliği seviyesine ulaşmıştır. Denenen tek yalın boru çapraz numunesinin ulaştığı süneklik seviyesi ise 5'tir.

Yalnızca uç zayıflatılmış kesit bölgeleri CFRP elemanlarla güçlendirilmiş numunelere ilişkin verilerin incelenmesiyle ulaşılan sonuçlar:

- Aynı numune grubunda yer alan TB-11 (yalnızca CFRP plaka güçlendirmeli) ve TB-12 (CFRP plaka ve CFRP kumaş sargı güçlendirmeli) numunelerinin sonuçları incelendiğinde uç bölgede aderansın artırılması için CFRP plakalar üzerine uygulanan iki kat CFRP sargının, beklendiği üzere, oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. TB-12 numunesi TB-11'e göre yaklaşık 2.5 kat daha uzun TTY'ye, yaklaşık 3 kat daha fazla enerji tüketimine, 2 kat daha fazla yerdeğiştirme sünekliği seviyesine ulaşmıştır.



Şekil 6.1 : TB-8 ve TB-9 numunelerinin ilişkin KL/r-b/t-TTYY grafiği.

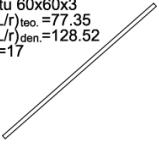
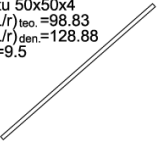


Şekil 6.2 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerinin KL/r-b/t-TTYY grafiği.

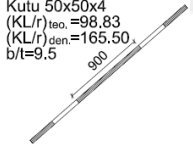
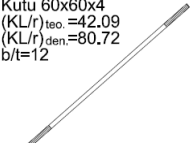
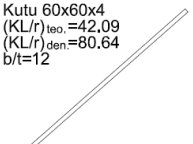
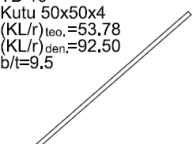
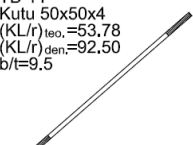
➤ Yerel narinliği (b/t) 9.50 olan TB-11 ve TB-12 numuneleri sırasıyla alt ve üst zayıflatılmış kesitlerden koparken yerel narinliği 12 olan TB-8 numunesi orta bölgeden kopmuştur. Yerel narinlik artışı sonucu göçme orta bölgeden koparak gerçekleşmiştir. Düşük yerel narinliklerde zayıflatılmış kesitler daha kritik olmaktadır. Sadece zayıflatılmış kesit bölgeleri güçlendirilen numune grupları için yerel ve genel narinliklerin değişimiyle TTYY'deki değişimi gösteren grafikler Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de verilmiştir. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Taslağı (2016)'da yerel narinlik için verilen üst sınırın altındaki kesitler zayıflatılmış kesitlerinden kopma eğilimindedir. Yerel narinliğin artarak verilen sınıra yaklaşması durumunda zayıflatılmış kesitlerde güçlendirme yapıldığında yüksek oranda orta bölgeden kopma gerçekleşmektedir.

➤ CFRP plaka ve CFRP kumaş sargı ile yapılan güçlendirmenin TTYY'yi yaklaşık 1.50 kat arttırdığı, enerji tüketimini ortalama 1.75 kat arttırdığı görülmektedir. Yapılan güçlendirme çapraz elemanın çekme kapasitesini yaklaşık %10 oranında arttırmıştır. Basınç kapasitesini ise TB-12 numunesinde hemen hemen hiç arttırmazken, TB-8 numunesinde %26 oranında arttırmıştır.

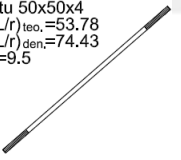
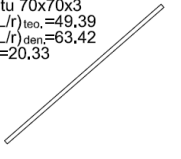
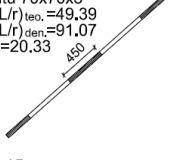
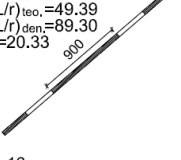
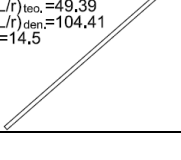
Çizelge 6.1 : Deney sonuçları özeti.

Numuneler	Yükleme Protokolü	Çekme Kapasitesi [kN]	Basınç Kapasitesi [kN]	Yerdeğiştirme Sünekliği	Tüketilen Enerji [kNmm]	TTY [mm]
TB-1 Kutu 60x60x3 $(KL/r)_{teo.} = 77.35$ $(KL/r)_{den.} = 128.52$ $b/t = 17$ 	ATC-24	160.31	72.84	6.00	20377.39	15.55
TB-2 Kutu 60x60x3 $(KL/r)_{teo.} = 77.35$ $(KL/r)_{den.} = 129.16$ $b/t = 17$ 	ATC-24	167.07	78.06	6.00	19288.7	14.24
TB-3 Kutu 60x60x3 $(KL/r)_{teo.} = 77.35$ $(KL/r)_{den.} = 125.92$ $b/t = 17$ 	ATC-24	168.20	88.28	7.00	28467.58	20.47
TB-4 Kutu 50x50x4 $(KL/r)_{teo.} = 98.83$ $(KL/r)_{den.} = 128.88$ $b/t = 9.5$ 	ATC-24	205.35	77.75	5.00	8549.43	0.80
TB-5 Kutu 50x50x4 $(KL/r)_{teo.} = 98.83$ $(KL/r)_{den.} = 164.20$ $b/t = 9.5$ 	ATC-24	214.50	72.44	10.00	32931.08	21.35

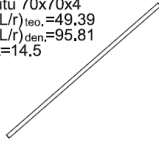
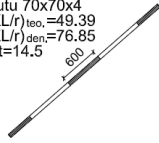
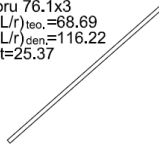
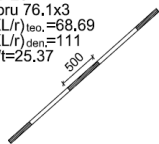
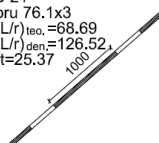
Çizelge 6.1 (devam) : Deney sonuçları özeti.

Numuneler	Yükleme Protokolü	Çekme Kapasitesi [kN]	Basınç Kapasitesi [kN]	Yerdeğiştirme Sünekliği	Tüketilen Enerji [kNmm]	TTY [mm]
TB-6 Kutu 50x50x4 $(KL/r)_{teo.}=98,83$ $(KL/r)_{den.}=165,50$ $b/t=9,5$ 	ATC-24	226.03	80.42	12.00	46251.85	26.93
TB-8 Kutu 60x60x4 $(KL/r)_{teo.}=42,09$ $(KL/r)_{den.}=80,72$ $b/t=12$ 	ATC-24	247.23	184.42	8.00	57210.68	26.83
TB-9 Kutu 60x60x4 $(KL/r)_{teo.}=42,09$ $(KL/r)_{den.}=80,64$ $b/t=12$ 	ATC-24	226.88	145.70	5.00	34530.31	17.76
TB-10 Kutu 50x50x4 $(KL/r)_{teo.}=53,78$ $(KL/r)_{den.}=92,50$ $b/t=9,5$ 	ATC-24	183.93	124.07	6.00	21042.98	18.76
TB-11 Kutu 50x50x4 $(KL/r)_{teo.}=53,78$ $(KL/r)_{den.}=92,50$ $b/t=9,5$ 	ATC-24	211.10	133.98	4.00	13033.2	11.15

Çizelge 6.1 (devam) : Deney sonuçları özeti.

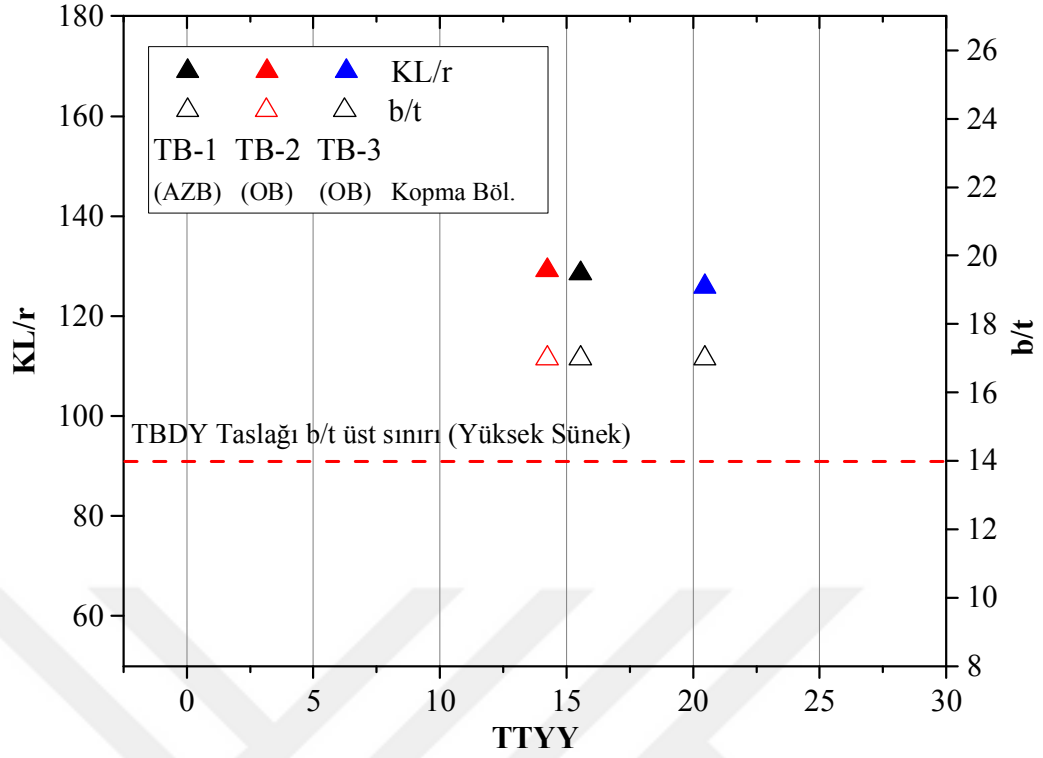
Numuneler	Yükleme Protokolü	Çekme Kapasitesi [kN]	Basınç Kapasitesi [kN]	Yerdeğiştirme Sünekliği	Tüketilen Enerji [kNmm]	TTY [mm]
TB-12 Kutu 50x50x4 $(KL/r)_{teo}=53.78$ $(KL/r)_{den}=74.43$ $b/t=9.5$ 	ATC-24	202.34	125.61	8.00	38406.67	27.74
TB-13 Kutu 70x70x3 $(KL/r)_{teo}=49.39$ $(KL/r)_{den}=63.42$ $b/t=20.33$ 	ATC-24	178.40	125.13	4.00	21140.52	11.32
TB-14 Kutu 70x70x3 $(KL/r)_{teo}=49.39$ $(KL/r)_{den}=91.07$ $b/t=20.33$ 	ATC-24	187.06	135.20	5.00	20277.81	10.80
TB-15 Kutu 70x70x3 $(KL/r)_{teo}=49.39$ $(KL/r)_{den}=89.30$ $b/t=20.33$ 	ATC-24	185.81	141.04	5.00	21442.43	11.48
TB-16 Kutu 70x70x4 $(KL/r)_{teo}=49.39$ $(KL/r)_{den}=104.41$ $b/t=14.5$ 	ATC-24	245.13	154.87	7.00	49088.5	15.33

Çizelge 6.1 (devam) : Deney sonuçları özeti.

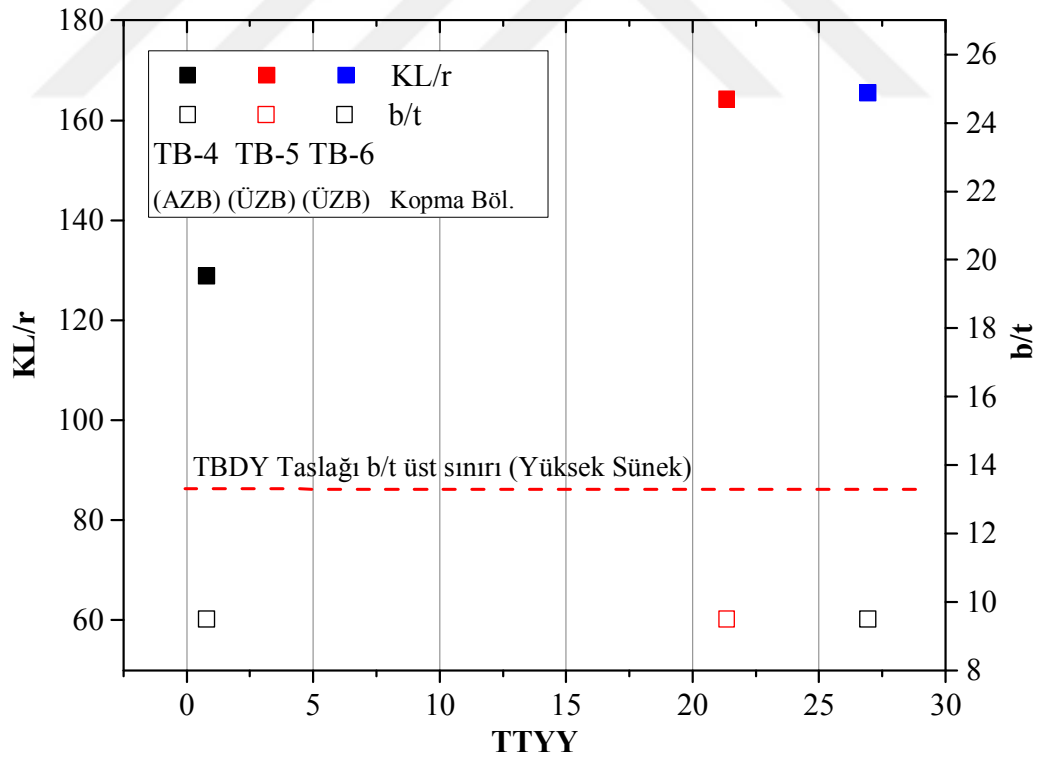
Numuneler	Yükleme Protokolü	Çekme Kapasitesi [kN]	Basınç Kapasitesi [kN]	Yerdeğiştirme Sünekliği	Tüketilen Enerji [kNmm]	TTY [mm]
TB-17 Kutu 70x70x4 $(KL/r)_{teo}=49.39$ $(KL/r)_{den}=95.81$ $b/t=14.5$ 	Yakın Fay	247.74	143.64	-	19993.3	2.42
TB-18 Kutu 70x70x4 $(KL/r)_{teo}=49.39$ $(KL/r)_{den}=76.85$ $b/t=14.5$ 	Yakın Fay	249.90	134.83	-	21918.8	1.24
TB-19 Boru 76.1x3 $(KL/r)_{teo}=68.69$ $(KL/r)_{den}=116.22$ $D/t=25.37$ 	ATC-24	190.93	110.65	5.00	25886.06	13.20
TB-20 Boru 76.1x3 $(KL/r)_{teo}=68.69$ $(KL/r)_{den}=111$ $D/t=25.37$ 	ATC-24	193.20	114.78	7.00	34863.01	16.10
TB-21 Boru 76.1x3 $(KL/r)_{teo}=68.69$ $(KL/r)_{den}=126.52$ $D/t=25.37$ 	ATC-24	193.90	120.59	6.00	28434.87	13.85

Uç zayıflatılmış kesitleri ve orta bölgeleri güçlendirilmiş numunelere ilişkin verilerin incelenmesiyle ulaşılan sonuçlar:

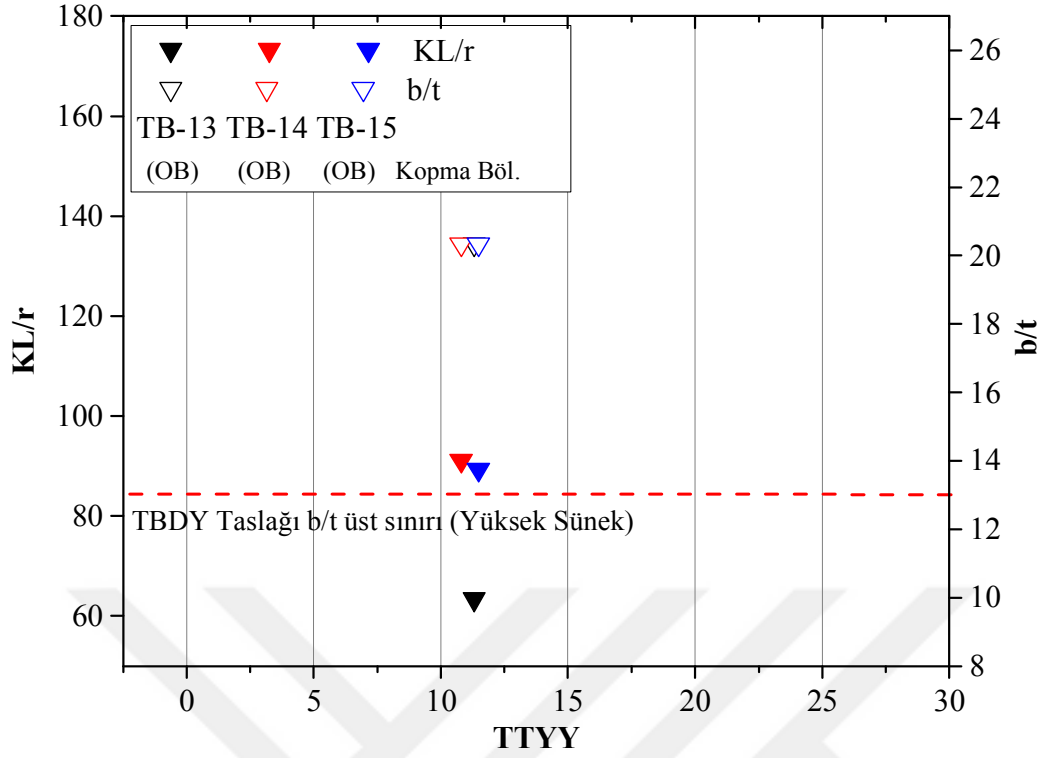
- Orta bölgesinde kısa güçlendirme bulunan numunelerde, güçlendirme plastik mafsallık oluşacak bölgeyi rijitleştirmiş ve plastik mafsallık bölgesinin dışına kaymasına ve yine çıplak numune bölgesinde oluşmasına neden olmuştur. Orta bölgesinde uzun güçlendirme bulunan numunelerde ise orta bölgedeki plastik mafsallık güçlendirme altında oluştuğundan güçlendirmenin %33L kadar alınmasının önemi ortaya çıkmaktadır.
- Yerel olarak narinliği oldukça düşük ($b/t=9.50$) olan 2. numune grubunda güçlendirilmiş numune TTY'yi 34 kat, enerji tüketimini ise 5.5 kat arttırmıştır. Bu sonuç ile daha kompakt kesitlerde CFRP ile güçlendirmenin etkisinin daha fazla olduğu anlaşılmaktadır.
- Yerel narinlikleri $b/t=17$ ve 20 olan TB-3 ve TB-15 numunelerinin TTY'lerinde referans numunelerine göre sırasıyla %32 ve %1 oranlarında artış görülmüştür. Ayrıca, TB-3 ve TB-15 numunelerinde sırasıyla yine referans numunelerine göre %40 ve %1 oranlarında enerji tüketimlerinde artış belirlenmiştir. Buna göre, benzer biçimde yerel narinliğin artmasıyla güçlendirmenin etkisinin oldukça azaldığı tespit edilmiş olup CFRP ile güçlendirmenin $b/t=20$ ve üzerindeki yerel narinliklerde yararsız olduğu sonucuna çıkmaktadır (Şekil 6.5).
- TB-3 ve TB-15 numunelerinin yerdeğiştirme sünekliklerinde bir seviye artışı olmuş ve sırasıyla 7 ve 5'e ulaşılmıştır. Yerel narinliği düşük olan TB-5 numunesinde oldukça fazla artış görülerek 12 seviyesine ulaşılmıştır. Buna ek olarak, yalın numunelere göre TB-5 numunesinin çekme ve basınç kapasitelerinde sırasıyla %10 ve %3 oranlarında, TB-3 ve TB-15 numunelerinde ise çekme ve basınç kapasitelerinde sırasıyla %4 ve %13-21 oranlarında artışlar elde edilmiştir.



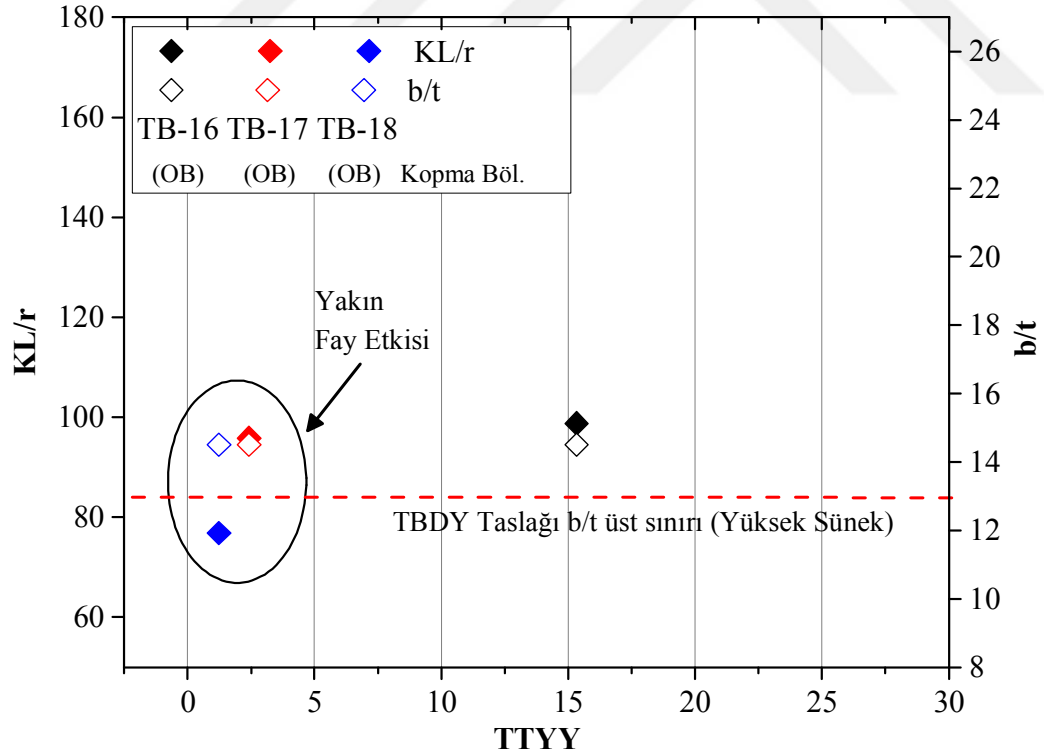
Şekil 6.3 : TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerinin KL/r-b/t-TTYY grafiği.



Şekil 6.4 : TB-3, TB-4 ve TB-5 numunelerinin KL/r-b/t-TTYY grafiği.



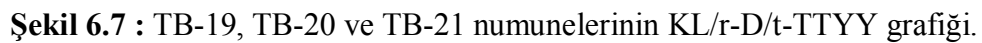
Şekil 6.5 : TB-13, TB-14 ve TB-15 numunelerinin KL/r-b/t-TTY graphı.



Şekil 6.6 : TB-16, TB-17 ve TB-18 numunelerinin KL/r-b/t-TTY graphı.

➤ Yerel narınlığı $b/t=14$ 'ün üzerinde olan güçlendirilmiş numuneler orta bölgeden kopmuştur. Bu tür numunelerde yerel burkulma CFRP'nin varlığı ile

Zayıflatılmış uç kesitleri ve orta bölgeleri güçlendirilmiş boru kesitli numunelere ilişkin deney verileri incelendiğinde ulaşılan sonuçlar;



309

etkili güçlendirme ile numunenin göçme modu zayıflatılmış uç kesitten orta bölgeye kaydırılarak TTYT ve enerji tüketimi arttırılmaktadır.

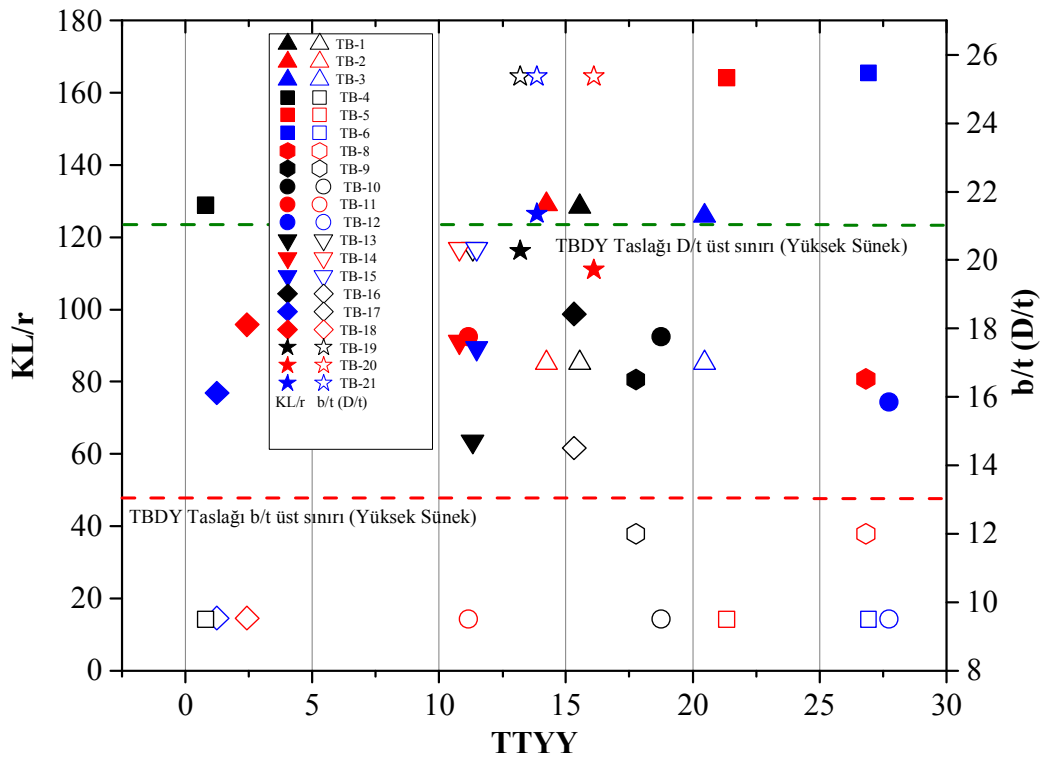
Uygulanan yerdeğiştirme protokollerinden elde edilen deney verileri incelendiğinde ulaşılan sonuçlar:

➤ Yerdeğiştirme protokolünün çevrimsel (ATC-24) ya da yakın fay etkisi olması çaprazın davranışını önemli miktarda etkilemektedir.

➤Yakın fay etkisinde numuneler ilk çevrimlerde büyük yerdeğiştirmeler etkisinde kaldığından TTYT'leri ve enerji tüketimleri olduça düşüktür. Bu durum, çaprazlı çelik çerçevelerin bu tür etkiler altında özenle ve gerektiğı gibi tasarlanması gereğini bir kez daha ortaya koymuştur. Şekil 6.6'da numunelerin TTYT'lerindeki değışim görölmektedir.

➤ Zayıflatılmış uç kesitlerin ve orta bölgenin güçlendirilmesi yönteminin yakın fay etkisinde enejji tüketimini yalın numuneye göre yaklaşık %10 civarında arttırmaktadır.

Tüm numunelerin yerel ve genel narinlikleriyle TTYT'lerinin değışimini gösteren grafik Şekil 6.8'de gösterilmiştir.



Şekil 6.8 : Tüm numunelerin KL/r-D/t-TTYT grafiğı.

7. TÜP ÇAPRAZLARIN HİSTERETİK DAVRANIŞLARININ MODELLENMESİ

7.1 Genel

Bu bölümde, yerel ve genel burkulmanın birlikte görüldüğü TB-1 ve yalnızca genel burkulmanın görüldüğü TB-10 numunelerine ilişkin deneysel davranışların uygun bir modelleme ile doğrulanması amaçlanmaktadır. Histretik davranış sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilmiştir. Modellemede kopma etkileri bu sayısal gerçekleştirme bölümünün dışında tutulmuş olduğundan yalnızca yalın numuneler incelenmiştir. Buna karşın, yerel burkulma dikkate alınmıştır.

Numunelerin yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki davranışlarının modellenmesinde en önemli gereklilik malzeme ve geometri bakımından doğrusal olmayan davranışın model üzerinde tanımlanabilmesidir.

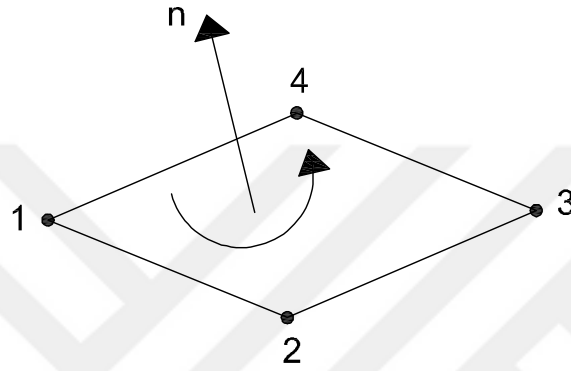
Bu bölümde, doğrusal olmayan malzeme ve geometri etkilerini etkin şekilde inceleyebilmek için ABAQUS 6.14 programı kullanılmıştır. Program, bir çeşit tümevarım yöntemi esasına dayanır. Sonuca ulaşmak için kullanılan sonlu elemanlar yöntemi, önce sistem özelliklerini içeren bağıntıların çıkartılıp, sonrasında tüm sistemi temsil edecek şekilde eleman bağıntılarıyla birleştirilerek, sisteme ilişkin lineer denklem takımının elde edilmesi ilkesine dayanmaktadır. Kuramsal yöntemlerin karmaşık yapı modellerine uygulanmasındaki zorluk ve kabul edilebilecek tolerans sınırları aralığında kalma hassasiyeti elemanların sonlu küçük parçalara ayrılması ile tanımlanabilir. Böylece çeşitli yükleme koşullarında güvenilir modelleme biçimi oluşturulabilir (Karataş, 2014).

7.2 ABAQUS Model Formu

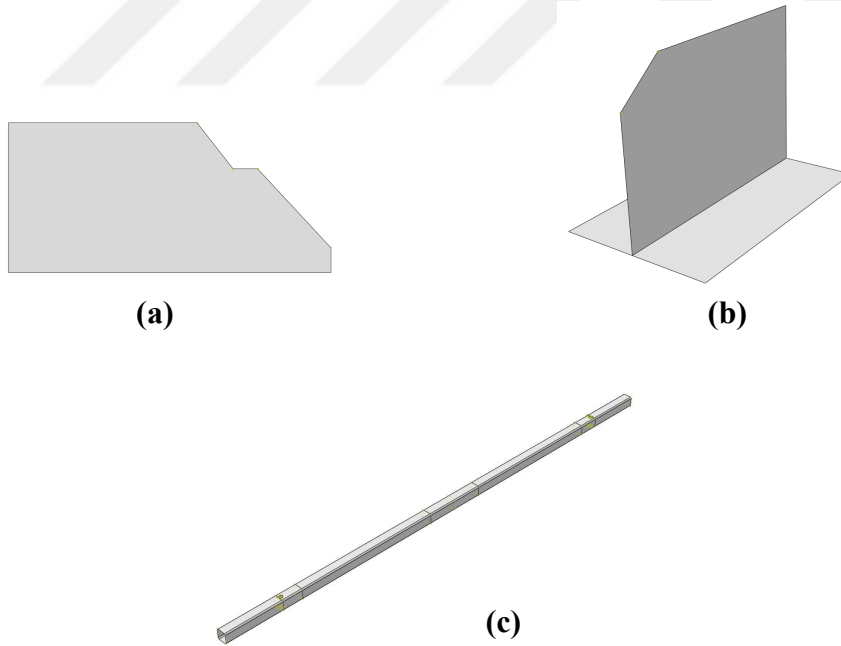
Burkulma probleminin modellenmesinde ABAQUS programında katı (solid), kabuk (shell) ya da shell-solid elemanlar birlikte kullanılmaktadır. Yalnızca deney düzeneğinin test edilmesi sonucunda, önceki bölümlerde belirtildiği gibi, düzeneğin çaprazlara herhangi bir katkısının olmadığı tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak,

yalnızca seçilen numuneler modellenerek bilgisayar ortamında test edilmiştir. Ayrıca deneylerde guse levhalarını deney düzeneğine bağlayan bulonlu birleşimlerde kayma tespit edilmediğinden bulonlara ilgili daha hassas/ileri bir modelleme yapılmamıştır.

Modellerin tamamı ABAQUS içinde oluşturulmuş olup bayrak levhalarının ve tüp çaprazların modellenmesinde yalnızca genel amaçla kullanılan S4R kabuk elemanlardan yararlanılmıştır (Şekil 7.1). S4R kabuk elemanı dört noktalı bir kabuk eleman olup, analizlerde indirgenmiş integrasyon metodunu kullanır. İndirgenmiş integrasyon analiz süresini kısaltarak üstünlük sağlamaktadır.

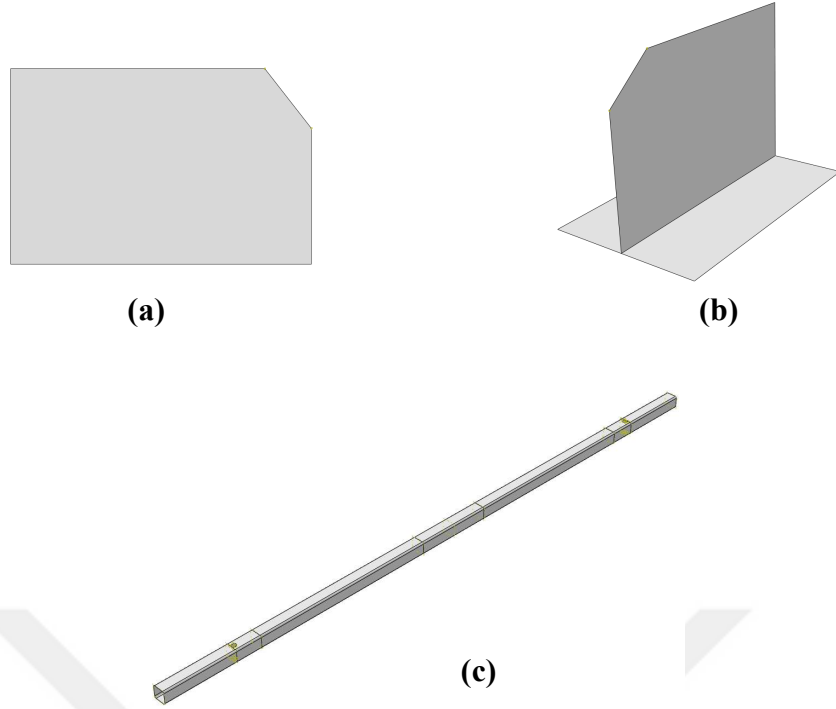


Şekil 7.1 : S4R kabuk elemanının genel görünüşü (ABAQUS, 2014).



Şekil 7.2 : TB-1 numunesini oluşturan parçalar: (a) Alt bayrak levhası. (b) Üst bayrak levhası. (c) Kutu 60x60x3 profil.

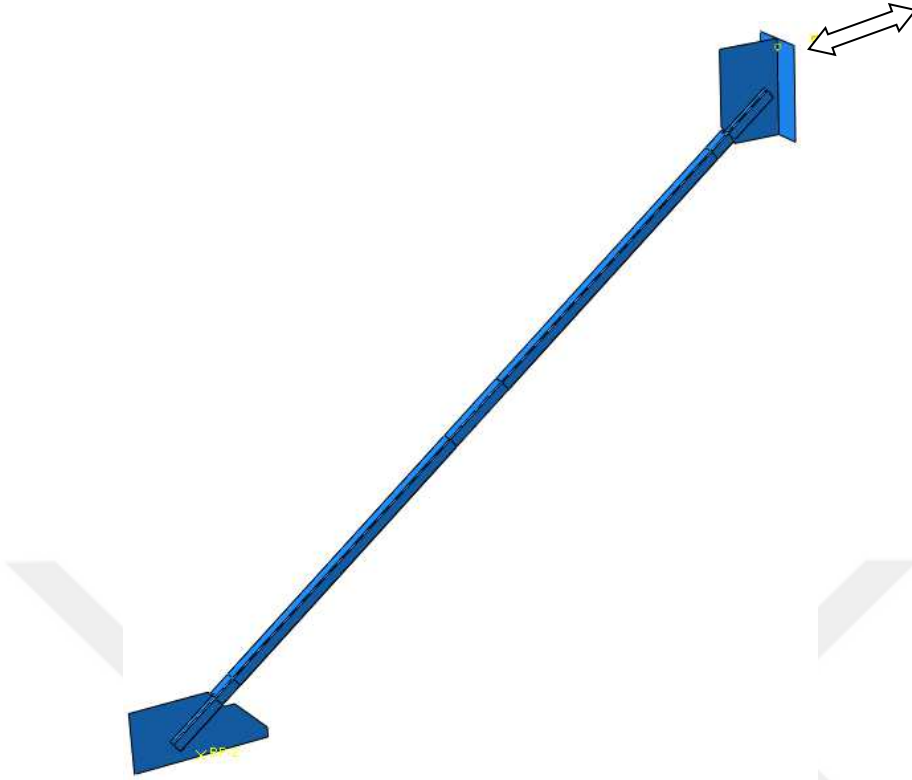
TB-1 ve TB-10 numunelerine ilişkin her bir analiz modeli sırasıyla Şekil 7.2 ve Şekil 7.3 görüldüğü gibi alt bayrak levhası, üst bayrak levhası ve tüp profil olmak üzere üç ana bileşenden oluşmaktadır.



Şekil 7.3 : TB-10 numunesini oluşturan parçalar: (a) Alt bayrak levhası. (b) Üst bayrak levhası. (c) Kutu 50x50x4 profil.

Program içindeki “assembly” modülünde oluşturulan tek parçalar birleştirilerek analiz modeli oluşturulmuştur. Deneyler sırasında herbir guse levhası deney düzeneğine 12 adet öngerilmeli bulon ile bağlanmıştır. Deneylerde elde edilen ölçümlere göre bulonlu birleşim yüzeylerinde herhangi bir hareket ya da kayma tespit edilmemiştir. Bu yüzden modelde guseler ile deney düzeneği arasında “tam birleşme” varsayılmış ve bulonlar modele dahil edilmemiştir. Yine aynı varsayımdan yola çıkılarak alt guse levhasının başlık bölümü modele dahil edilmemiş ve mesnetlerin doğru olarak tanımlanması sonuç açısından oldukça önemli olduğundan alt guse levhası ankastre olarak modellenmiştir.

Tüp numuneleri bayrak levhalarına birleştiren kaynaklarda deneyler sırasında hiçbir hasar görülmemiştir. Buna bağlı olarak, tüp kesitler ile guse levhasının bağlantı bölgelerindeki kaynaklar modele dahil edilmemiş olup bu bölgelerde tam bir birleşim olduğu varsayılarak modellenmiştir. TB-1 numunesine ait analiz modeli örnek olarak Şekil 7.4’te gösterilmiştir.

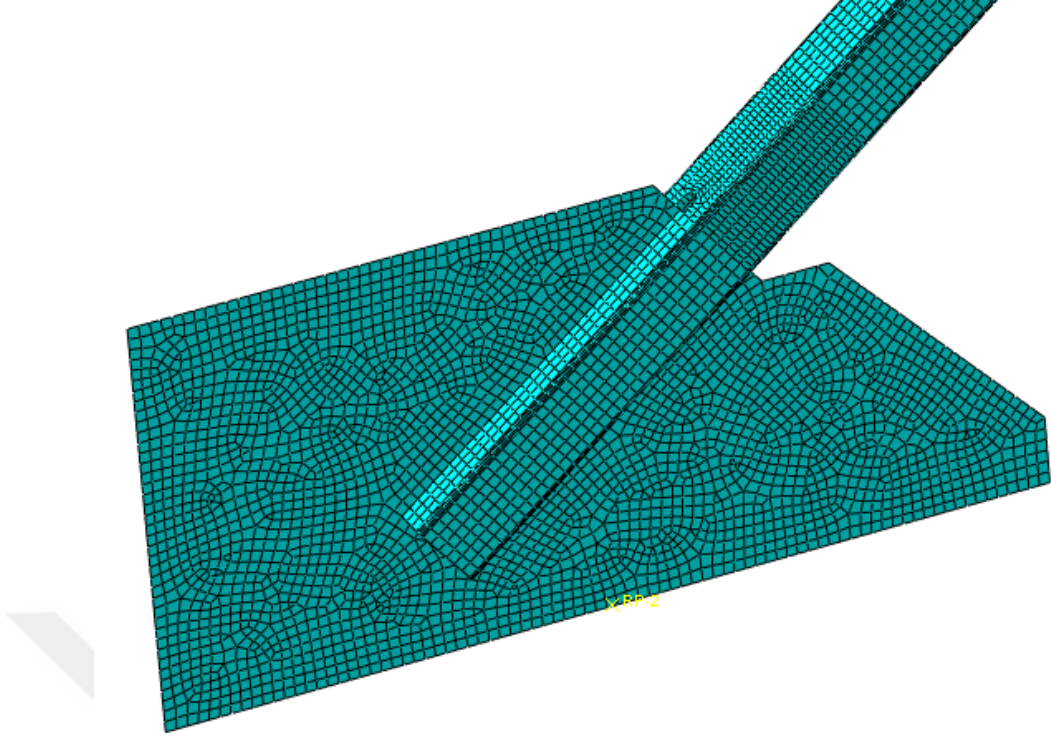


Şekil 7.4 : TB-1 numunesine ilişkin analiz modeli.

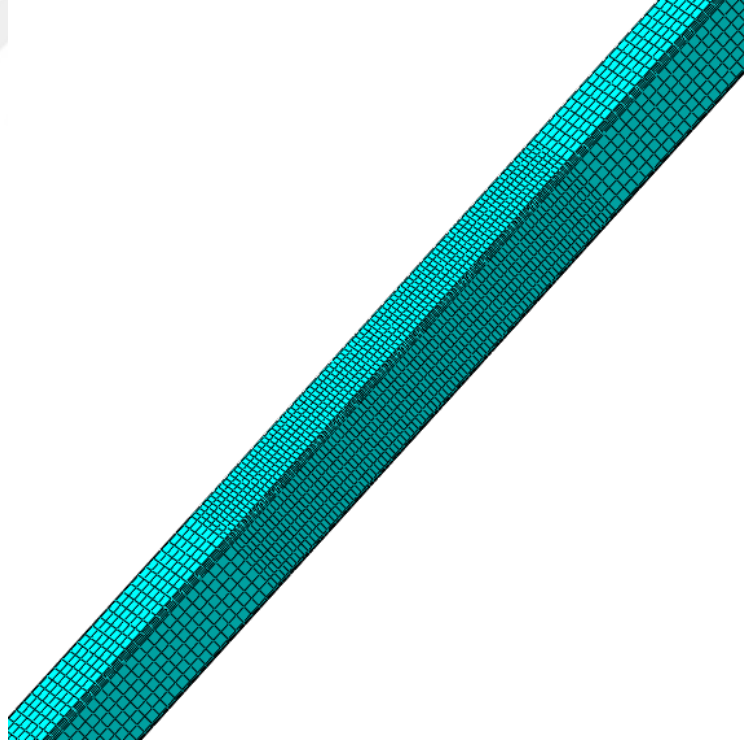
7.3 Sonlu Elemanlara Bölme (Mesh işlemi)

Hazırlanan modellerin analizinin yapılabilmesi için modeller üzerinde bir hesap ağı oluşturulmaktadır. Sonlu elemanlara bölmek olarak adlandırılan bu işlemde analiz modeli genellikle dört ya da üç kenarlı küçük parçalara bölünür. Bu parçalar köşelerindeki noktalardan birbirlerine yük aktarırlar.

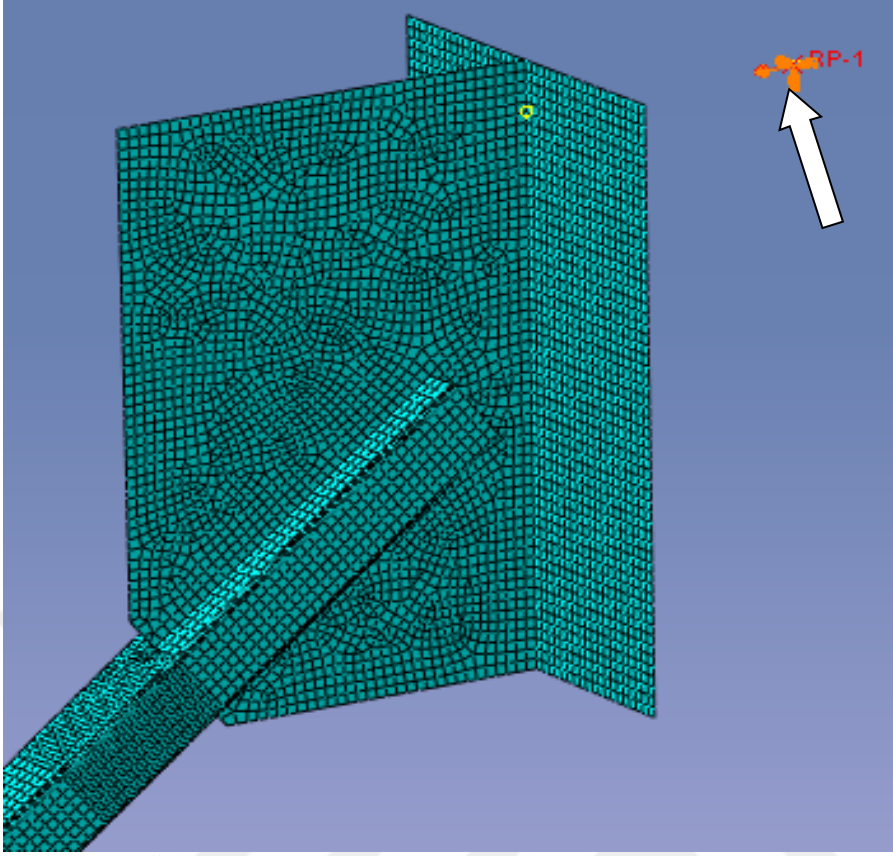
Bu çalışmada, dört kenarlı sonlu elemanlar esas alınarak hesap modelleri oluşturulmuştur. Tüp numuneler kare ya da dikdörtgen olan sonlu elemanlara bölünmüş, yalnızca zayıflatılmış uç kesitleri civarında sınırlı bir bölgede dörtgen ve üçgen elemanlar kullanılmıştır. Bunun yanında, tüp kesitlerin kritik bölgeleri olan zayıflatılmış uç kesitlerinde ve çapraz orta bölgesindeki olası yerel burkulma bölgelerinde daha hassas hesap yapılabilmesi için sonlu eleman ağında sıklaştırmalar yapılmıştır. Kritik bölgelerdeki sonlu eleman sıklaştırmaları Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'da görülmektedir.



Şekil 7.5 : Zayıflatılmış uç bölgesindeki sıklaştırılmış sonlu eleman ağı.



Şekil 7.6 : Orta bölgedeki sıklaştırılmış sonlu eleman ağı.



Şekil 7.7 : Üst bayrak levhasına yerdeğiştirmelerin uygulandığı nokta.

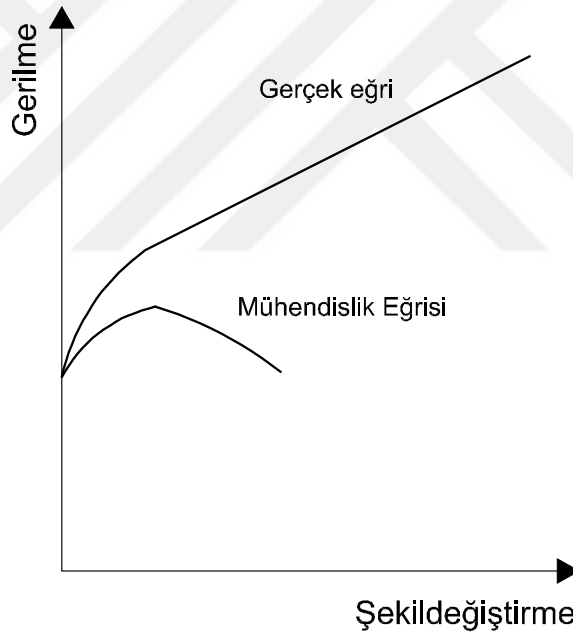
Analiz modeline üst bayrak levhasına deney düzeneğindeki hidrolik verenin hizasında yerdeğiştirmeler uygulanmış olup bu nokta Şekil 7.7’de gösterilmiştir.

7.4 Metallerde Pekleşme ve Pekleşme Üsteli Kavramı

Karataş (2014) tarafından detayları verildiği üzere soğuk şekil verme sırasında kristalli bir malzeme olan çelikte kopma olmadan büyük şekildeğiştirmeler meydana gelir. Soğuk işlemler malzemelerin pekleşmesine ve gevrekleşmesine yol açarlar. Soğuk şekil vermenin temelinde pekleşmenin meydana gelmesi yatmaktadır.

Malzemenin metalik metalürjik süreksizlik noktalarında başlayan bir yırtılmanın malzemede gerilme tekrarları ile yayılması sonucunda yük taşıma kapasitesi aşılmasına yorulma (fatigue) denir. Pekleşen malzemede inelastik şekildeğiştirmelerden dolayı dayanım artar, süneklik azalır ve artık (residual) şekildeğiştirmeler oluşur. Artan, artık şekildeğiştirmeler malzemede bir noktada birikerek plastik mafsalları oluştururlar. İnelastik şekil verme sırasında, malzemenin üniform olmayan bir şekilde biçim değiştirmesinden tüm dış kuvvetler kalktıktan sonra numunede var olmaya devam eden gerilmelere de artık gerilme denir.

Sanayide pekleşme üsteli, metal ve alaşımların şekillendirme kuvvetinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Böylece gerekli motor kapasitesi elde edilmekte ve buna uygun makine seçimi yapılmaktadır. Pekleşme inelastik bölgede homojen şekildeğştirmelerin olduğu noktada oluşmaktadır. Gerçek eğri, kupon deneylerinden elde edilen mühendislik eğrisinden faydalınarak çıkartılır ve pekleşme katsayısının (pekleşme üsteli) bulunması için gereklidir. Bu katsayı, malzemenin pekleşmesiyle ilgili bir malzeme özelliğidir ve inelastik şekildeğştirme sırasındaki pekleşme kapasitesini gösterir. Gerçek eğri, mühendislik eğrisi gibi bir maksimumdan geçmemektedir. Her seviyede oluşan birim şekildeğştirmelerin toplanabilir durumu ile ifade edilmektedir. Mühendislik eğrisi malzemenin başlangıç kesit özellikleri dikate alınarak hesaplanırken, gerçek eğri gerçek kesit ve gerçek şekildeğştirme özelliklerini dikkate almaktadır (Çapan, 2003). Şekil 7.8’de mühendislik eğrisi ve gerçek eğri arasındaki fark görülmektedir.



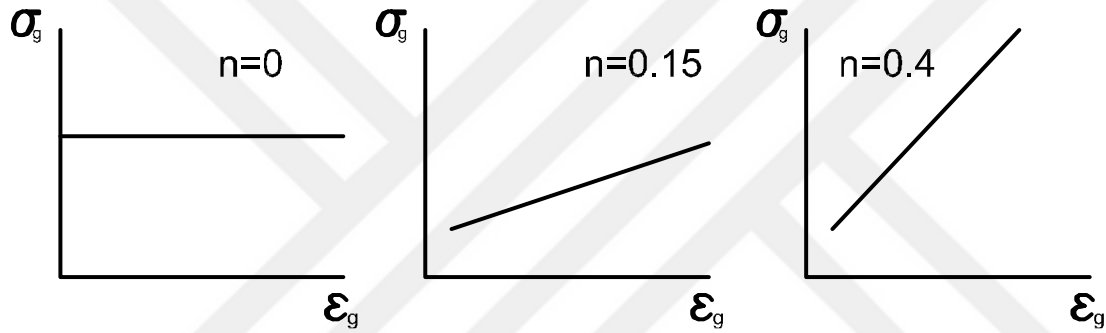
Şekil 7.8 : Gerçek ve mühendislik eğrileriyle karşılıklı noktaların değişimi (Ay (2012)’den uyarlanmıştır.)

Herhangi bir metal malzemenin gerçek gerilme ve şekildeğştirme eğrisinde pekleşme, pekleşme hızı ile ifade edilir. Pekleşme hızı σ_g gerçek gerilme ve ε_g şekildeğştirme eğrisinin eğimidir. Şekildeğştirme esnasında gerçekleşen pekleşme miktarı ise herhangi iki şekildeğştirmeye karşı gelen gerilmeler arasındaki farktır.

Gerçek değerlerle çizilen gerilme-birim şekildeğiştirme ($\sigma_g - \epsilon_g$) eğrisine akma eğrisi adı verilir. Metallerin akma gerilmeleri aşağıdaki Holloman bağıntısı ile ifade edilmiştir.

$$\sigma_g = K_d \epsilon_g^n \quad (7.1)$$

Burada σ_g gerçek gerilme, K_d dayanım katsayısı olup artışı malzeme dayanımı ile doğru orantılıdır ve birimi birim şekildeğiştirmeyle aynıdır. Gerçek birim şekildeğiştirmesini 1 yapan gerilme değeri de dayanım katsayısı olarak adlandırılır. n pekleşme üsteli olup metalik malzemelerde $0 < n < 0.4$ arasında değişmekte ve birimsizdir. Bu ilişki Şekil 7.9’da görülmektedir.



Şekil 7.9 : Pekleşme üstelinin değişimi ile gerçek gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin değişimi arasındaki ilişki (Karataş, 2012).

Kupon deneyinde $\sigma_{\max}$ maksimum çekme dayanımı noktasında ϵ_g gerçek birim şekildeğiştirme değeri n pekleşme katsayısına eşittir ($\epsilon_g = n$). Mühendislik gerilmesi ve mühendislik şekildeğiştirmesi sırasıyla

$$\sigma_{müh} = \frac{F}{A_0} \quad (7.2a)$$

$$\epsilon_{müh} = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_k - l_0}{l_0} = \frac{l_k}{l_0} - 1 \quad (7.2b)$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır. Burada F çekme kuvveti, l_0 ilk ölçü uzunluğu, l_k numunenin kopmadan sonraki boyudur. Gerçek gerilme (σ_g) ve birim şekildeğiştirme sırasıyla 7.3a ve 7.3b bağıntılarıyla hesaplanmaktadır.

$$\sigma_g = \frac{F}{A_k} \quad (7.3a)$$

$$\varepsilon_g = \ln\left(\frac{l_k}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{A_0}{A_k}\right) \quad (7.3b)$$

Burada A_k son kesit alanıdır. Çekme numunesi ölçü boyu arasındaki hacim sabit kaldığı ($V=A_0l_0=A_kl_k$) varsayılarak mühendislik gerilme-birim şekildeğiştirme ile gerçek gerilme-birim şekildeğiştirme arasındaki ilişki sırasıyla 7.4a ve 7.4b bağıntılarıyla hesaplanmaktadır.

$$\sigma_g = \sigma_{müh} (\varepsilon_{müh} + 1) \quad (7.4a)$$

$$\varepsilon_g = \ln(\varepsilon_{müh} + 1) \quad (7.4b)$$

Bu durumda $\varepsilon_g < \varepsilon_{müh}$ olduğu anlaşılmaktadır. Kesit daralması ψ 7.5 bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

$$\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \quad (7.5)$$

Yine hacim sabitliği ilkesi kullanılarak ε_g ve $\varepsilon_{müh}$ ile ψ sırasıyla 7.6a ve 7.6b bağıntıları ile ilişkilendirilebilmektedir:

$$\varepsilon_g = \ln\left(\frac{1}{1-\psi}\right) = \ln\left(\frac{A_0}{A_k}\right) \quad (7.6a)$$

$$\varepsilon_{müh} = \frac{\psi}{1-\psi} \quad (7.6b)$$

Bu ön bilgiler kullanılarak elde edilen TB-1 ve TB-10 numunelerinin gerçek gerilme ve birim şekildeğiştirmeleriyle pekleşme üstelleri Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7.1 : Numunelerin gerçek malzeme özellikleri

Numuneler	A ₀ (mm ²)	A _k (mm ²)	n (%)	ε _g (mm/mm)	σ _g (MPa)
TB-1	37.7	12.18	4.27	1.13	724.88
TB-10	52.4	19.35	3.557	0.996	684.42

ABAQUS analizi sırasında yaparken elemanlar mükemmel kusursuzlukta varsayılarak işlemler yapmaktadır. Bu da numunenin özellikle basınç etkisinde genel veya yerel olarak burkulmaması demek olmasına karşın gerçekte böyle bir durum söz konusu değildir. Gerçek davranışı elde etmek için analize başlamadan önce numuneye belirli bir miktarda kusur tanımlanmaktadır.

Kusurların tanımlanması için ilk olarak doğrusal burkulma analizi yapılmış ve numunenin burkulma modları elde edilmiştir. Kusurlar bu burkulma modlarından seçilenlerin belli miktarda ölçeklendirilerek analize katılmasıyla tanımlanır. Burkulma modlarından en az 10 adedinin incelenmesi kusurların doğru tanımlanmasında önemlidir. Çünkü birinci mod klasik genel burkulma modudur, ancak yerel olarak narin olan profillerde yerel burkulma ilerki modlarda görülebilmektedir. İlk 10 mod içinde tespit edilen yerel burkulma da kusur olarak analiz modeline mutlaka eklenmelidir.

Genel burkulma kusuru L/1500, L/1000 ya da L/500 gibi geniş bir aralıkta alınmaktadır. Bu çalışmada BSI (2006) tarafından tavsiye edilen L/500 dikkate alınmıştır.

Yerel burkulma kusuru ise Walker (1975)'e göre;

$$\omega_d = 0.3t \sqrt{\frac{\sigma_{0.2\%}}{\sigma_{cr}}} = 0.3t \lambda_s \quad (7.7)$$

bağıtısıyla hesaplanarak modele uygulanmıştır.

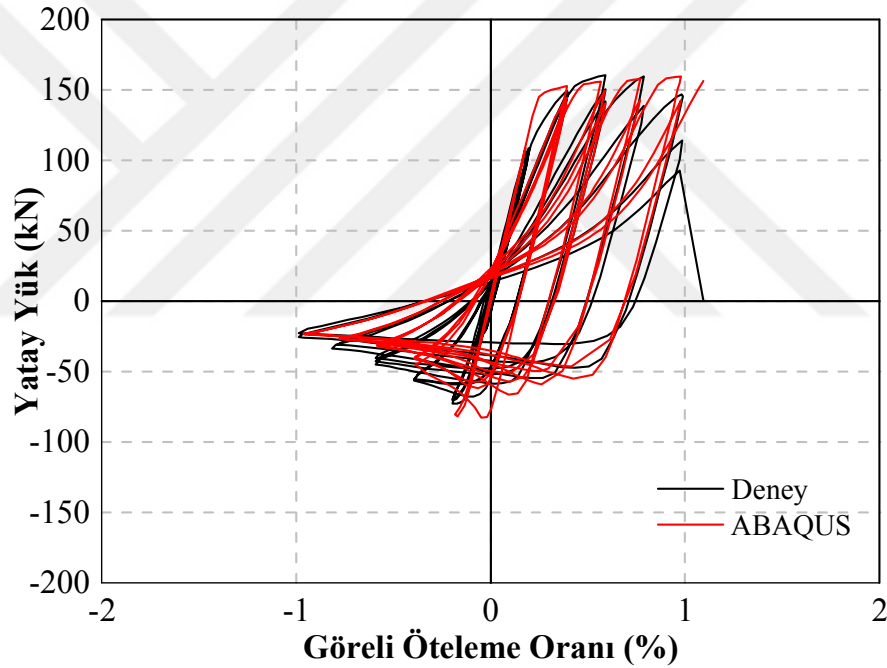
TB-1 numunesinin burkulma modları incelendiğinde yerel burkulma da belirlenmiş olup bu numuneye hem genel hem de yerel burkulma kusurları uygulanmıştır. TB-10 numunesinde yerel burkulma modu elde edilmemiştir; bu yüzden yalnızca genel burkulma kusuru dikkate alınmıştır.

7.5 Analiz Sonuçları ve Değerlendirme

Analizler Intel Core i7 işlemcili ve 32 Gb Ram'lik hafızaya sahip masaüstü bilgisayar ile 6 ila 8 saat arasında tamamlanabilmektedir.

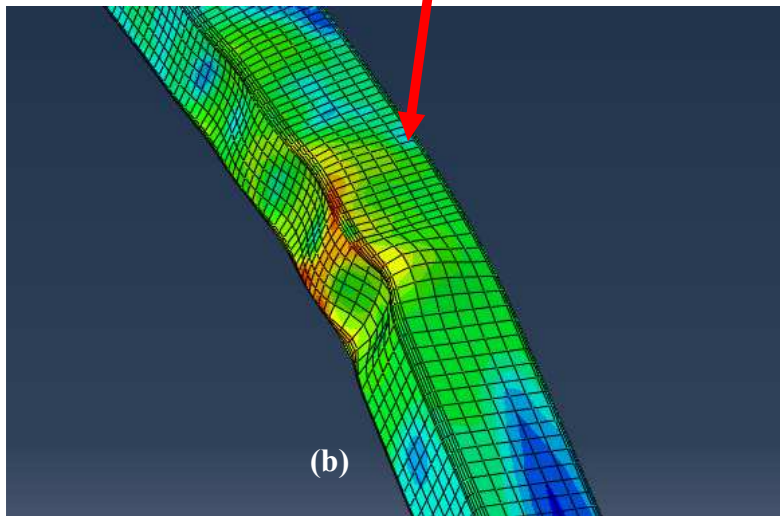
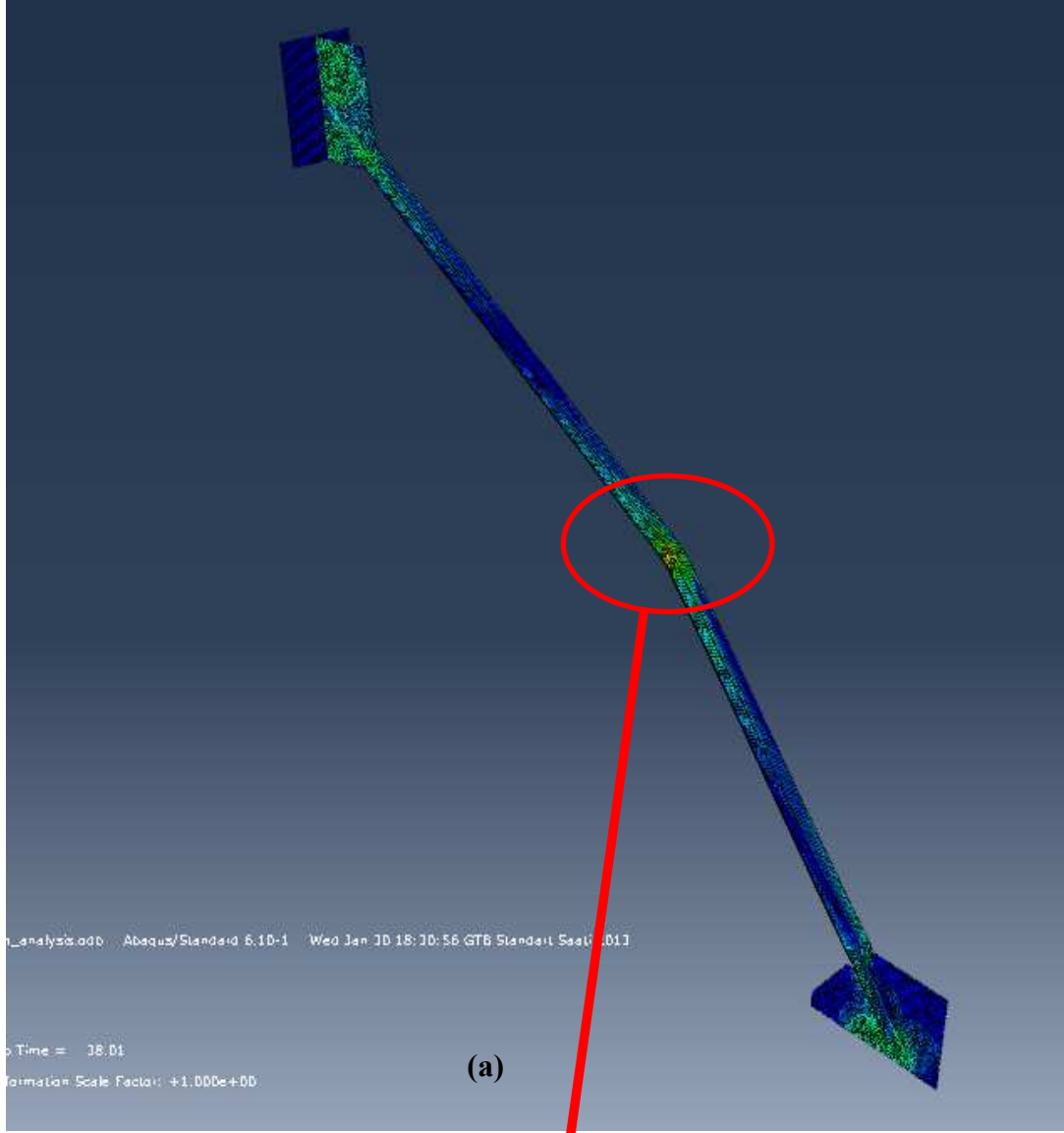
7.5.1 TB-1 numunesi

Üst bayrak levhası hidrolik veren seviyesinde uygulanan yerdeğiştirmelere karşı alt bayrak levhasına tanımlanan mesnetten elde edilen tepkilerin histeretik eğrileri çizilmiştir. Deneyde uygulanan aynı yerdeğiştirme protokolü uygulanarak analiz edilen sonlu eleman modelinden ve deneyden elde edilen histeretik eğrileri Şekil 7.10'da karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Histeretik eğrilerin yeterince yakın oldukları düşünülmektedir.



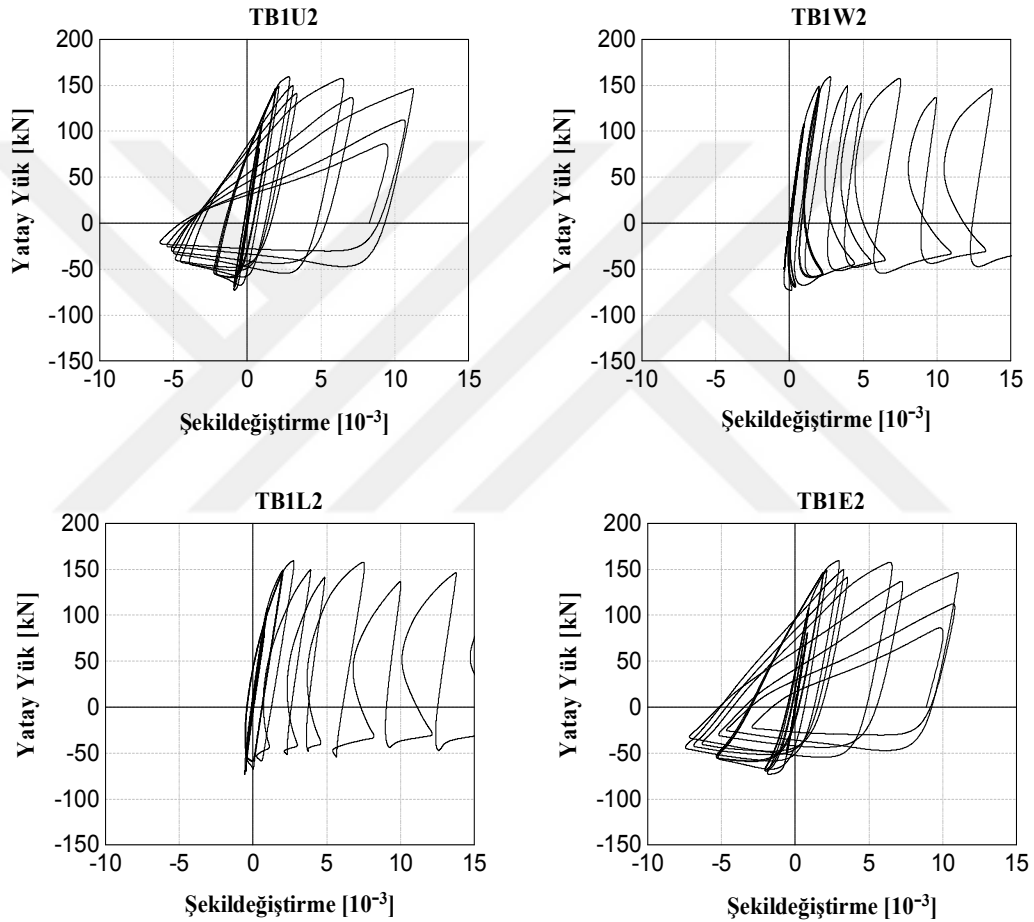
Şekil 7.10 : TB-1 için deneysel ve kuramsal histeretik eğrilerinin karşılaştırılması.

Analizlerden elde edilen eğri deneysel eğriye oldukça yakın olup başlangıç rijitliği analizde doğru olarak elde edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen, numunenin genel burkulmuş ve yerel burkulma oluşmuş durumları Şekil 7.11'de görülmektedir.



Şekil 7.11 : TB-1 numunesinin basınç etkisindeki durumu: (a) Genel burkulma.
(b) Yerel burkulma.

TB-1 numunesinin deneyi sırasında belirgin bir yerel burkulma görülmemiş olmasına karşın Şekil 7.12’de verilen orta bölgedeki şekildeğiştirme eğrileri daha detaylı olarak incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda, numunenin üst (TB1U2) ve çekme (doğu – TB1E2) yüzlerinde stabil bir histeretik davranış görülürken batı (basınç) yüzünde (TB1W2) ve alt yüzünde (TB1L2) şekildeğiştirmelerin stabil olmayıp hızla arttığı görülmüştür. Şekildeğiştirmelerdeki bu hızlı artış bu bölgedeki çok da belirgin olmayan bir yerel burkulmanın oluştuğunu/başladığını göstermekte ve analizi doğrulamaktadır.



Şekil 7.12 : TB-1 numunesinin orta bölgesindeki şekildeğiştirme eğrileri.

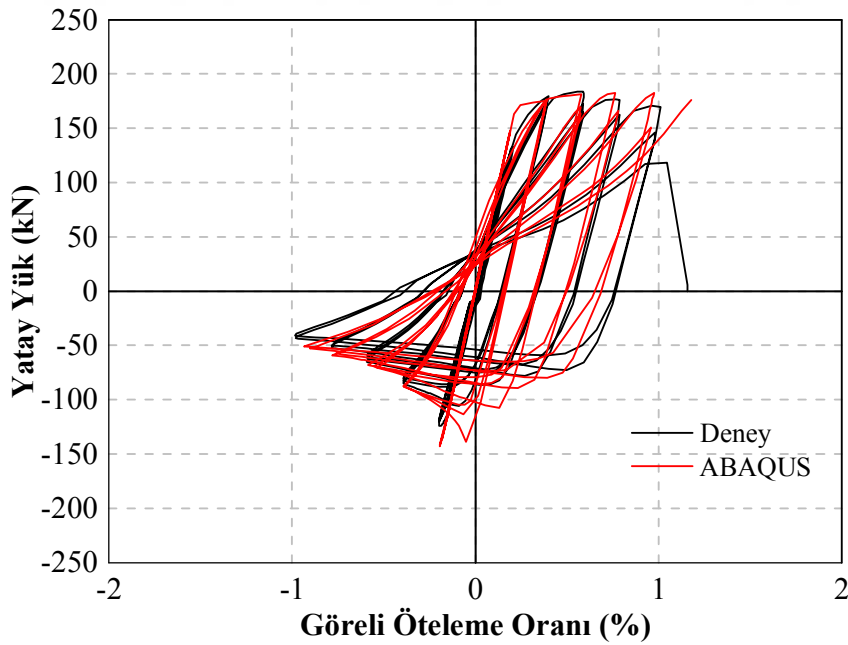
Deney sırasında orta bölgenin yakın bir fotoğrafı çekilememiş olmasına karşın (belirgin bir burkulma fark edilememesinden dolayı) son çevrimdeki çekme etkisindeki kopmadan sonra çekilmiş fotoğrafta her ne kadar çekme kuvveti oluşan hafif yerel burkulmayı geri alacak yönde olmuş olsa da numunenin üst yüzeyinde hafif yerel burkulma izleri ve kabarma görülmektedir.



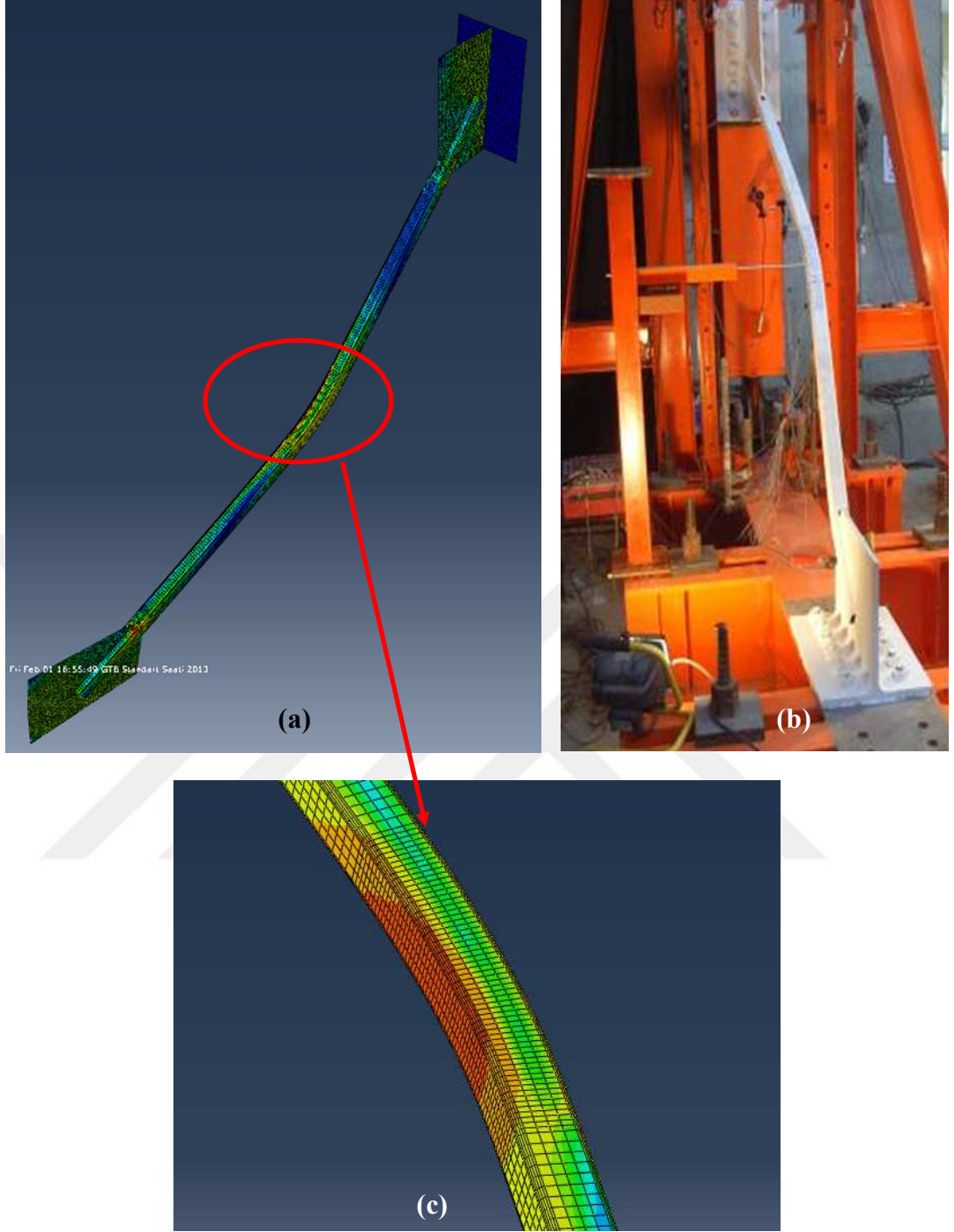
Şekil 7.13 : Kopma sonrasında TB-1 numunesinin orta bölgenin durumu.

7.5.2 TB-10 numunesi

TB-10 numunesinin modeline de deneylerde kullanılan yerdeğiştirme protokolü uygulanmıştır. Bu protokol etkisinde yapılan analiz sonucunda ve deneyden elde edilen eğrilerin karşılaştırılması Şekil 7.14’te görülmektedir. Histeretik eğrilerin yeterince yakın oldukları düşünülmektedir.



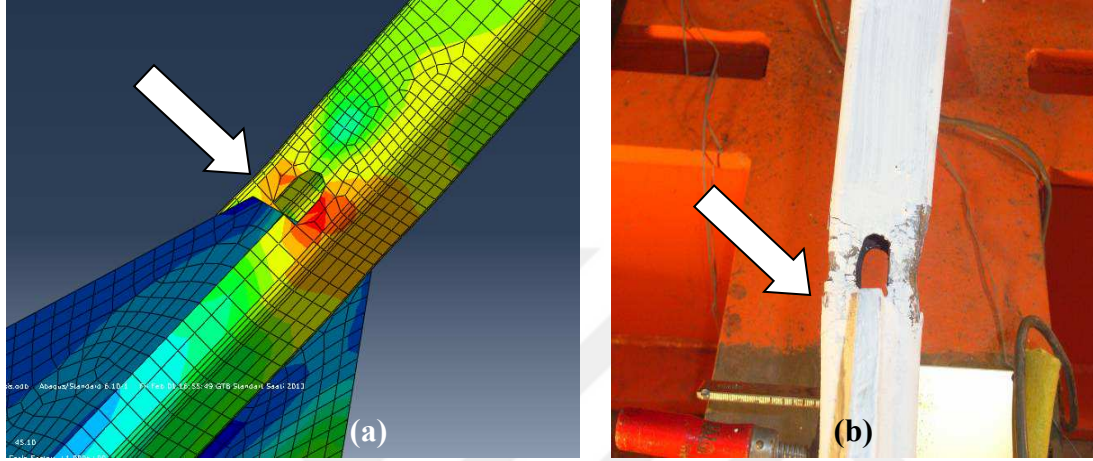
Şekil 7.14 : TB-10 için deneysel ve kuramsal histeretik eğrilerinin karşılaştırılması.



Şekil 7.15 : TB-10 numunesinin sonlu eleman analizi ve deneylerdeki genel davranışı: (a) Analizde numunenin burkulmuş durumu. (b) Deneyde numunenin burkulma modu.(c) Analizde orta bölgede yerel burkulma oluşmaması.

Sonlu eleman analizi sonucunda deneyle aynı genel burkulma moduna ulaşılmış olup orta bölgede yerel burkulma görülmemiştir. Numunenin deney ve sonlu eleman analizindeki genel davranışı Şekil 7.15’de verilmiştir. Ek I’da detaylı olarak verilen şekildeğiştirme eğrilerinden numunenin orta bölgesine ait olanlar incelendiğinde orta bölgede stabil bir davranış olduğu, yerel burkulma oluşmadığı bu eğrilerden de açık bir şekilde tespit edilmektedir.

Diğer taraftan, TB-1 numunesinde Şekil 7.16-a'da görüldüğü üzere alt zayıflatılmış uç bölgesinde yerdeğiştirme protokolünün ilerleyen adımlarında gerilme yığılması olduğu anlaşılmaktadır. Analizin ilerleyen adımlarında bu bölgede çekme etkisinde oluşan boğumun analiz ve deney esnasındaki görünüşleri Şekil 7.16'da verilmiştir. Bu bölgede deanaliz ve deney sonuçlarının oldukça uygun/uyumlu olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 7.16 : TB-10 numunesinin zayıflatılmış uç bölgesinin durumu: (a) Sonlu eleman analizi sonucundaki gerilme yığılması. (b) Deneyde alt uç zayıflatılmış kesitindeki gerilme yığılması ve boğum oluşumu.

7.5.3 Değerlendirme

Bu çalışmada, genel ve yerel burkulmanın davranışı birlikte etkilediği ve yalnızca genel burkulmanın etkilediği iki yalın numune ABAQUS programı kullanılarak sonlu eleman yöntemiyle gerçek malzeme özelliklerinin de dikkate alındığı malzeme modeliyle sayısal olarak incelenmiştir. Bu analiz sonucunda deney sonuçlarıyla uyumlu, dengeli ve kararlı histeretik davranış eğrileri elde edilmiştir (Şekil 7.10 ve Şekil 7.14).

Sonlu eleman analizleri sonucunda numunelerin başlangıç rijitlikleri deneylerle uyumlu olarak elde edilmiştir. Bunun yanında kesit alanı ve akma gerilmesiyle ilişkili olan çekme dayanımı deneysel değerlere çok yakın bir şekildedir. Numunelerin basınç altındaki davranışları mevcut durumdaki tahmin edilmesi güç olan numune kusurlarına, eleman boyuna, kesit özelliklerine çok bağlıdır. Bunlar dikkate alındığında numunenin basınç davranışı da büyük ölçüde doğru olarak tahmin edilmiştir. Bunlara karşın, bu bölümün girişinde de belirtildiği üzere kopma modellenmemiştir. Zaten bu da Şekil 7.10 ve Şekil 7.14'deki histeretik eğrilerin son çekme çevrimlerinde açık olarak görülmektedir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1 Genel

Bu bölümde önceki bölümlerde detaylı olarak sunulan deneysel ve kuramsal çalışmaların özeti verilmektedir. Elde edilen sonuçların yakınsaklığı ve farklılıkları, olası nedenleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Bu sonuçlardan faydalanılarak hazırlanacak analiz ve deney çalışmalarında tasarımcı tarafından dikkat edilmesi gereken konular, izlenmesi önerilen boyutlandırma ilkeleri ve CFRP elemanlarla güçlendirme önerileri vurgulanmıştır.

Çalışmanın ana amacı, mevcut kesit ve sistem özellikleri nedeniyle enerji yutma kapasiteleri ve TTY'leri az olan tüp çaprazların, enerji yutma kapasitelerinin ve TTY'lerinin, zayıflatılmış enkesit ve yerel burkulma olabilecek bölgelerinde, CFRP plaka ve kumaşlarla yeterli miktar ve uzunlukta güçlendirilmesiyle yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki davranışının iyileştirilmesidir. Çalışma deneysel ağırlıklı olup kuramsal bir gerçekleştirme bölümünü de içermektedir. Deneysel bölümde, malzeme mekanik özellikleri detaylı olarak belirlenmiş, basit uç detayına sahip 17'si kutu, 3'ü boru profilden olmak üzere 1/1'e yakın ölçekli toplam 20 numunenin, tekrarlı, yöndeğiştiren statik yükler altındaki davranışı incelenmiştir.

Numuneler kesit özellikleri, genel ve yerel narinliklerine göre gruplandırılmışlardır; Böylece bir genelleme yapılmaya çalışılmıştır. Üretimindeki sorunlar yüzünden denenemeyen bir numunenin bulunduğu grup iki numuneyi, diğer altı grup ise üçer numuneyi içermektedir. İki grup numune yalnızca zayıflatılmış uç kesitlerdeki güçlendirmenin etkinliğini araştırmak üzere denenmiştir. Diğer dört grup ise yalın numune ile, zayıflatılmış uç kesitleri ve orta bölgelerinde farklı uzunluklarda güçlendirmiş numuneleri kapsamaktadır. Ayrıca, yakın fay etkisinin çaprazlar ve önerilen güçlendirme yöntemi üzerindeki etkilerinin incelendiği, sırasıyla çevrimsel (ATC-24) ve yakın fay etkisi yükleme protokolleriyle denenene iki yalın numuneyle, yine yakın fay yükleme protokolüyle test edilen zayıflatılmış uç kesitleri ve orta bölgesi güçlendirilmiş bir numune incelenmiştir. Tüm numunelerin ayrıntılı deney

sonuçları 4. Bölüm’de, aynı gruptaki numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılıp değerlendirilmesi ise 5. Bölüm’de sunulmuştur.

Yapılan kapsamlı literatür araştırmasında 1980’lerden günümüze çaprazların genel davranışlarına, kutu çaprazlar için belirlenmiş yerel burkulma sınırlarına, yönetmeliklerde yerel burkulmanın engellenmesi ya da geciktirilmesi için benimsenen yerel narinlik sınırlarına ulaşılmıştır. Ayrıca, tamamı FRP malzemeyle güçlendirilmiş çapraz elemanların ve değişik sektörlerde kullanılmak üzere FRP elemanlarla güçlendirilen kutu profil parçalarının ezilme (crash-test) davranışları incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda bu tez kapsamında önerildiği şekliyle tüp çaprazların çevrimsel davranışlarının iyileştirilerek, TTY’sinin uzatıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu doğrultuda tasarlanan tüp kesitli çaprazların uç zayıflatılmış kesit bölgelerinin ve orta bölgelerinin CFRP ile kısmi olarak güçlendirilerek bu tür çaprazların çevrimsel davranışlarına olan etkisinin araştırılması bu doktora tezi kapsamında amaçlanmıştır.

Numuneler genel ve yerel narinlikleri göz önünde tutularak 3558mm, 1936mm ve 2667mm’lik temiz uzunluklara sahip olacak şekilde tasarlanmış olup yerleşim açıları sırasıyla 38°, 38° ve 49°’dir. Güçlendirmelerde BASF YKS firması tarafından üretilen MBrace Laminate LM10/1.4 isimli CFRP plaka, MBrace Adesivo yapıştırıcı ile MBrace Fiber C1-23 CFRP kumaş ise MBrace Adesivo Saturant yapıştırıcı ile kullanılmıştır. Uygulanan kısmi güçlendirmelerde zayıflatılmış uç bölgelerindeki güçlendirme boyları 620mm, 670mm ve 760mm olarak değişmekte olup yalnızca TB-11 numunesinin zayıflatılmış uç bölgesine yalnızca CFRP plaka yapıştırılmış olup diğer uç kesit güçlendirmelerinde CFRP plakalar CFRP kumaş ile sarılarak aderansları arttırılmıştır. Orta bölgedeki güçlendirmede ise çapraz temiz boyunun %33’ü, %25’i, %28 (~30)’i, %22 (~20)’si ve bunların yarısı (%50’si) uzunluklarındaki CFRP sargılar uygulanmıştır.

Çapraz numunelerin uçlarına HE400A profilden atölyede lazerli kesim tezgahında kesilerek üretilmiş bayrak levhaları laboratuvarında gaz altı kaynaklama yöntemiyle kaynaklanmış olup çaprazların bayrak levhasıyla birleştiği bölgelerde çaprazın sünek davranışını sağlamak amacıyla AISC (2016a)’da önerildiği şekliyle boyutu 8mm ile 20mm arasında değişen oval uç boşluk detayı uygulanmıştır. Böylece, boşluk uzunluğunun bu aralıktaki etkisi de görülmüştür. Bayrak levhalarının deney

düzenine birleştirilmesinde ise 10.9 kalitesindeki yüksek dayanımlı ve öngerilmeli bulonlar kullanılmıştır.

Deneyisel çalışmada İ.T.Ü. Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda maksimum 250kN çekme ve itme kapasiteli, toplam ± 300 mm yerdeğiştirme uygulayabilen hidrolik veren ile numunelere çekme ve basınç kuvvetleri akmadan önce kuvvet kontrollü, sonra ise yerdeğiştirme kontrollü olarak uygulanmıştır. Deney numuneleri, HEA400 profillerinden üretilen deney düzeneğine hidrolik verenle herhangi bir dışmerkezlik oluşmayacak şekilde yerleştirilmiş, hidrolik verenden gelen yük, çaprazın eksenel doğrultusunun kolonla kesiştiği noktaya uygulanmıştır. Deney düzeneği, çaprazların denenmesi için özel olarak tasarlanarak üretilmiş, sistemin tümsel davranışına yatay yük ve rijitlik olarak katkısı olmayan, birbirine mafsallı birleşimli, Japonya'da çokça kullanıldığı gibi L-şeklindeki bir kolon-kiriş taşıyıcı sisteminden oluşmaktadır.

Her numunenin deneyinde 7'si yerdeğiştirme ölçer, 20'si şekildeğiştirme ölçer olmak üzere toplam 27 cihazdan kanal okuması yapılmıştır. Çerçeve ve numunelere yerleştirilen şekildeğiştirme ve yerdeğiştirme ölçerler yardımıyla davranışın olabildiğince doğru biçimde izlenebilmesi sağlanmıştır.

Çalışmanın sayısal/kuramsal bölümünde numunelerin öngörülen süneklik kapasiteleri, dayanım, akma ve göçme limit durumlarını kapsayan çekme ve basınçta davranış tahminleri SAP2000 v10 (Computers and Structures Inc., 2007) ile yapılmıştır. Deneyde kullanılan çevrimsel ve yakın fay etkisi yükleme protokolleri altında numuneler kopuncaya kadar deneye devam edilmiştir.

8.2 Sonuçlar

Gereği gibi tasarlanmamış mevcut çelik tüp çaprazların sünekliklerinin arttırılması ve daha uzun TTY'ye sahip olabilmeleri için önemli depremler sırasında plastikleşme/kopma beklenen zayıflatılmış uç kesitlerinin ve orta bölgelerinin CFRP elemanlarla güçlendirilmesi bilindiği kadarıyla ilk kez bu çalışmada önerilmiştir. Bu deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Yalın tüp çapraz numuneler üzerinde yapılan deneyler, kümülatif şekildeğiştirmelerin büyük oranda çaprazların zayıflatılmış uç birleşim bölgelerinde toplandığını ve oval zayıflatılmış uç birleşim detayının sünekliği

ciddi oranda arttırdığını göstermiştir. Bazı numunelerde, çekme etkisinde zayıflatılmış uç bölge çevresinde oluşan uzama, sonraki yükleme çevrimindeki basınç etkisiyle yerel burkulma oluşmasına neden olmuştur.

- Yalın numuneler için FEMA 356'ya göre tanımlanan eksenel plastik mafsalları kullanılarak tamamlanan itme analizi sonucunda çekme bölgesinde itme ve histeretik eğrilerin zarflarının üst üste düştüğü görülmüş olmasına karşın basınç bölgesinde FEMA'nın plastik mafsalları tanımlarının gerçek davranışı yansıtmadığı ortaya çıkmıştır.
- Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007)'de çelik tüp çaprazlar için verilen yerel narinlik koşullarının sağlanması, olası yerel burkulmanın numunenin genel burkulmasından sonra gerçekleşmesini sağlamak amaçlı olup ileriki çevrimlerde yerel burkulma oluşumunu engelleyememektedir. Diğer bir deyişle, kompakt kesitlerde yerel burkulma oluşumu ancak geciktirilebilmektedir.
- Pek çok diğer etkene bağlı olmakla birlikte, yalın tüp kesitlerin yarılp kılıcına bayrak levharına kaynaklanmasıyla oluşturulan çapraz elemanların tasarımında düzlem dışı genel burkulma boyu katsayısı $K=0.85$ alınarak tasarım yapılabilir.
- Genel ve yerel narinlikleri daha az olan yalın tüp çaprazların, çoğunlukla, TTY'lerinin daha uzun olduğu tespit edilmiştir.
- Yerel narinliği (b/t) 14'ten büyük olan numuneler, yalnızca TB-1 numunesi (b/t=17) hariç, çevrimsel yükleme sonunda orta bölgeden kopmuşlardır. Bu da genel olarak yerel narinliği 14'ten büyük olan kutu kesitli numunelerin orta bölgedeki yerel burkulma oluşumundan sonra yine aynı bölgeden kesitin köşelerinden başlayarak kopma eğiliminde olduğunu göstermektedir.
- Çaprazların orta bölgelerinde basınç etkisiyle oluşan plastik mafsalları bölgesinin yaklaşık olarak kesit boyutunun 3 katı kadar bir uzunluğa ($\sim 3b$) yayıldığı görülmüştür.
- Çelik tüp çaprazlarda zayıflatılmış kesit ve yerel burkulma bölgelerinde oluşabilecek erken kopmalar sünek detaylandırma sonucunda engellenebilir.

- Kompakt kesitli çaprazlarda eksenel, dayanımı ve rijitliği arttırmadan, çelik plaka kaynaklanmasına alternatif olarak, CFRP plaka ve kumaş kullanılabilir.
- CFRP elemanlarla güçlendirme yöntemi mevcut yapılarda çaprazların daha sünek davranışa sahip olması için kullanılabilir. Uygulanması çelik levha kaynaklama işlemine göre daha kolay olup ısı etkileri de olmadığından çeliğin özellikleri değişmemektedir.
- CFRP malzemenin çelik yüzeye uygulanmasında yüzey temizliği mutlaka uygulanmalıdır. Kumlama yapılabilecek durumlarda Sa 2.5 düzeyinde kumlama yapılarak yüzey temizlenmelidir. Kumlama yapılmasının mümkün olmadığı yerlerde elle spiral makinesi kullanılarak kesit et kalınlığına fazla zarar vermeden temizlik ve pürüzlendirme yapılmalıdır. Macun epoksi kullanılacak bölgelerde temizlik ve pürüzlendirme, yalnızca sıvı epoksi kullanılacak bölgelerde ise temizlik yapılmalıdır. Pürüzlendirme için spiral taşı ve temizlik için spiral makinesi ucuna takılan tel fırçalar kullanılabilir.
- Çaprazların zayıflatılmış kesitlerinde bölgesel olarak yapılan güçlendirmede CFRP plakaların ve CFRP kumaşın kullanılması önerilmiştir. CFRP plaka kesiti yükü güvenle aktaran ana güçlendirme elemanı olup CFRP kumaş ise esas olarak CFRP plakaların yapışma dayanımlarını arttırmakla görevlidir. Güçlendirmede kullanılacak CFRP plaka alanının ve yapışma dayanımının hesabında çaprazın bulunduğu ortamın fiziksel koşulları (nemli, güneş ışığı etkisinde, soğuk v.b.) ve işçilikte karşılaşılabilecek sorunlara da dikkat edilerek güvenlik katsayısı en az 2 alınarak hesap yapılmalıdır. Ağır fiziksel koşullara sahip olunan yerlerde ve işçiliğe güvenilmediği durumlarda bu güvenlik katsayısı artırılmalıdır.
- Zayıflatılmış uç kesitlere uygulanan CFRP plakaların aderansını arttırmak için lifleri sargı doğrultusunda olan en az 2 kat CFRP kumaş sargı kullanılmalıdır. Kumaş sargı bayrak levhasından itibaren numune ortasına doğru CFRP plaka bitimine kadar uygulanmalıdır. CFRP kumaş genişliğinin yeterli olmadığı yerlerde kumaş parçaları 50mm boyunda üst üste bindirme yapılarak istenen sargı boyuna ulaşılabilir.
- Tüp çaprazlı numunelerin iki zayıflatılmış uç bölgesine uygulanan CFRP güçlendirme çaprazların uçlarına ek rijitlik katmaktadır. Bazı numunelerin

burkulma boyları %20 oranında kısılrken bazılarında belirgin bir değişiklik gör lmemiştir. Burkulma boyunu azaltmada pozitif bir katkısı olduğu öngörülmekte olsa da elde edilen bulgulara göre bu güçlendirme etkisinde burkulma boyu kesin azalır sonucuna varmak pek doğru değildir.

- CFRP plaka ve CFRP kumaş sargı ile yapılan zayıflatılmış uç güçlendirmesinin kopma/göçme modunu değiştirerek TTTY'isini yaklaşık 1.50 kat, enerji tüketimini ise ortalama 1.75 kat arttırdığı görülmüştür. Yapılan güçlendirme çapraz elemanın çekme kapasitesini yaklaşık %10 oranında arttırmıştır. Basınç kapasitesinde bazı numunelerde aynı kalırken, bazılarında artış göstermiştir.
- Yerel olarak daha narin kesitli t p çaprazlar için önerilen kısmi CFRP sargı yerel burkulma oluşumunu geciktirmekte ve daha sünek bir davranış ile daha uzun TTTY'yi sağlamaktadır.
- T p  aprazların orta bölgelerinin, çapraz temiz uzunluğunun 1/3'  kadar ($L/3$) uunlukta 2 kat lifleri sargı doğrultusunda olan CFRP kumaş ile sarılması orta bölgede oluşabilecek yerel burkulmanın geciktirilmesi için önemli bir tasarım kriteri olarak belirlenmiştir.
- Orta bölgenin güçlendirilmesi belirli yerel narinlik oranları arasında etkilidir. Deney verilerine göre $b/t=20$ ve üzeri yerel narinlikler seviyesinde orta bölgedeki güçlendirmenin  aprazın TTTY'isini uzatmakta etkili olmadığı tespit edilmiştir. Buna göre, konservatif tarafta kalınarak bu güçlendirme yerel narinliği $b/t=14$ ila 19 arasındaki çaprazlar için etkili olduğu sonucuna varılmıştır.
- Önerilen güçlendirme yöntemi, belirlenen yerel narinlik sınırları içinde kalınmak koşuluyla TTTY'yi yaklaşık %20~30 oranında ve enerji tüketimini ise yaklaşık %30~40 oranında arttırmaktadır.
- CFRP ile yerel güçlendirme sonucunda  aprazların eksenel dayanım ve rijitliğinin önemli miktarda artmaması, önerilen yöntemin mevcut  aprazlı  elik çerçevelerin depreme karşı sünekliklerinin iyileştirilerek güçlendirilmesi için uygun bir yol olduğunu göstermektedir.
- ABAQUS sonlu eleman analiz programı kullanılarak yapılan kuramsal çalışma sonunda, analizi yapılan yalın numuneler için, elde edilen histeretik eğrilerin

deneylerden elde edilenlerle oldukça iyi bir biçimde örtüşmesi kuramsal modeli kurarken yapılan varsayımların oldukça doğru olduğunu kanıtlamaktadır.

- Sonlu eleman modelinde numuneler üzerindeki gerilme yığılmaları, deneylerden elde edilenlere oldukça yakın olarak elde edilmiştir.

8.3 Sonraki Çalışmalar İçin Öneriler

CFRP elemanlarla yerel olarak güçlendirilen çelik tüp çaprazların histeretik davranışlarının iyileştiği, çaprazların daha sünek davranarak, daha çok enerji tükettiği ve daha uzun TTYT'ye sahip olduğu gerçek ölçülere yakın numuneler üzerine uygulanan çok sayıdaki deneylerle bu çalışmanın kapsamında kanıtlanmıştır.

Yerel olarak CFRP elemanlarla güçlendirilen çelik tüp çaprazlar üzerinde yapılan deneysel ve kuramsal çalışmalarda elde edilen veriler ve ilgili konuda diğer araştırmacıların vardığı sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde dikkate alınması gereken noktalar aşağıda sıralanmıştır:

- Bu çalışmada incelenmeyen diğer genel ve yerel narinlik oranları için çalışma geliştirilebilir ve böylece daha geniş bir veritabanı oluşturulabilir.
- Farklı uç birleşim detayları incelenebilir.
- Tüp kesitlerin dışında açık kesitler (örneğin L, T, I gibi) incelenebilir.
- CFRP ile kısmi sarmanın dışında çaprazın tamamen sarılması durumunun getirebileceği olası üstünlükler incelenebilir. Hatta, CFRP sargı çelik çaprazın dışında sürekli bir dış tüp düşünülebilir ve bir tür burkulması önlenmiş çapraz (BÖÇ) elde edilebilir.
- CFRP dışında GFRP gibi diğer kompozitlerle sarmanın etkinliği incelenebilir. Buna ek olarak farklı lif yönlerinin etkisi araştırılabilir. Erken ayrılmaların önlenmesi amacıyla farklı elastikiyetteki epoksilerin etkisi denenebilir.
- Sayısal modellemede tam göçmeyi/kopmayı dikkate alan modeller geliştirilebilir, var olan modeller iyileştirilebilir.

- Belirli miktarda korozyona uğramış tüp kesitli çaprazların histeretik davranışı incelenebilir. Böylece, çelik çaprazlı çerçevelerde yoğun biçimde gözlenen bu soruna da bir çözüm getirilmiş olabilir.
- Önerilen güçlendirme yönteminin etkinliği yalnızca çekme etkisindeki ya da çekme ile birlikte bir miktar basınç da alan X şeklindeki konfigürasyonlarında incelenebilir.



KAYNAKLAR

- ABAQUS** (2014). *Release Notes (6.14)*. Simulia.
- AISC** (2005). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 341-05). Chicago, IL : American Institute of Steel Construction.
- AISC** (2016a). *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-16). Chicago, IL : American Institute of Steel Construction.
- AISC** (2016b). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 341-16). Chicago, IL : American Institute of Steel Construction.
- ASTM** (2008). *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products* (ASTM 370-08a). West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- ATC** (1992). *Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures* (ATC-24), Redwood City, CA: Applied Technology Council.
- Aguilera, J. & Fam, A.** (2013). Retrofitting tubular steel T-joints subjected to axial compression in chord and brace members using bonded FRP plates or through-wall steel bolts, *Engineering Structures*, 48 (2013), 602-610.
- Alam, M. I., Fawzia, S., Zhao, X. & Remennikov, A. M.** (2017). Experimental study on FRP-strengthened steel tubular members under lateral impact, *Journal of Composites for Construction*, 04017022-2.
- Astaneh-Asl, A.** (1998). *Seismic behavior and design of gusset plates for braced frames*. California : Structural Steel Educational Council Technical Information & Product Service (Steel Tips).
- Astaneh-Asl, A., Goel, S. C., & Hanson, R. D.** (1985). Cyclic out-of-plane buckling of double-angle bracing, *Journal of Structural Engineering*, 111 (5), 1135–1153.
- Ay, İ.** (2012). *İmalat Yöntemleri II Ders Notları*. Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü.
- Bambach, M. R., & Elchalakani, M.** (2007). Plastic mechanism analysis of steel SHS strengthened with CFRP under large axial deformation, *Thin-Walled Structures*, 45 (2), 159–170.
- BASF** (2008). *Lifli Polimer (FRP) Güçlendirme Sistemleri*. İstanbul.
- Bayındırlık ve İskan Bakanlığı** (2007). *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*. Ankara.

- Bradley, C. R., Fahnestock, L. A., Hines, E. M., & Sizemore, J. G.** (2017). Full-scale cyclic testing of low-ductility concentrically braced frames, *Journal of Structural Engineering*, 143 (6).
- Bruneau, M., Uang, C.-M., & Sabelli, R.** (2011). *Ductile Design of Steel Structures*. New York : McGraw-Hill.
- BSI** (2006). *Hot finished structural hollow sections of nonalloy and fine grain steels-Part 2: Tolerances, dimensions and sectional properties*, (BS EN 10210-2), London : UK.
- Celik, O. C., Berman, J. W., & Bruneau, M.** (2004). *Cyclic Testing of Braces Laterally Restrained by Steel Studs to Enhance Performance During Earthquakes* (Report No: MCEER-04-0003). New York: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- Celik, O. C., Berman, J. W., & Bruneau, M.** (2005). Cyclic testing of braces laterally restrained by steel studs, *Journal of Structural Engineering*, 131 (7), 1114-1124.
- Chopra, A. K.** (2001). *Dynamics of Structures: Theory and Applications of Earthquake Engineering (2nd ed.)*. New Jersey : Prantice-Hall.
- CSI** (2005). *Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-dimensional Structures: SAP2000 Basic Analysis Reference Manual*. Berkeley, California : Computers and Structures, Inc.
- CSI** (2007). *SAP2000 V10.0 User Manual*. Berkeley, California : Computers and Structures, Inc.
- Çapan, L.** (2016). *Metallere Şekil Verme*. İstanbul : Çağlayan Kitabevi.
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı** (2016). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği Taslağı*. Ankara.
- Ding, X., Foutch, D., & Han, S.W.** (2008). Fracture modeling of rectangular hollow section steel braces, *Engineering Journal*, Third Quarter, 171–186.
- Egilmez, O., Alkan, D., & Ozdemir, T.** (2009). Cyclic behavior of steel I-beams modified by a welded haunch and reinforced with GFRP, *Steel and Composite Structures*, 9 (5), 419–444.
- Ekiz, E., & El-Tawil, S.** (2008). Restraining steel brace buckling using a carbon fiber-reinforced polymer composite system: Experiments and computational simulation, *Journal of Composites for Construction*, 12 (5), 562-569.
- Elchalakani, M.** (2016). Rehabilitation of corroded steel CHS under combined bending and bearing using CFRP, *Journal of Constructional Steel Research*, 125 (2016), 26-42.
- Elchalakani, M., Karrech, A., Basarir, H., Zhao, X. L., Fawzia, S. & Hassanein, M. F.** (2017). Strengthening of mild steel struts using CFRP sheets subjected to uniform axial compression, *Thin-Walled Structures*, 116 (2017), 90-112.
- El-Tawil, S., Ekiz, E., Goel, S., & Chao, S. H.** (2011). Retraining local and global

- buckling behavior of steel plastic hinges using CFRP, *Journal of Constructional Steel Research*, 67 (3), 261–269.
- El-Tayem, A.** (1986). Effective length factor for the design of X-bracing systems. *Engineering Journal*, 23 (1), 41.
- European Committee for Standardization (CEN/TC 340).** (2009). *Anti-seismic devices* (EN 15129).
- FEMA** (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings* (FEMA-356), Washington, DC: USA.
- Fell, B. V., Kanvinde, Deierlein, G. G., & Myers, A. T.** (2009). Experimental investigation of inelastic cyclic buckling and fracture of steel braces, *Journal of Structural Engineering*, 135 (1), 19–32.
- Gao, X. Y., Balendra, T. & Koh, C. G.** (2013). Buckling strength of slender circular tubular steel braces strengthened by CFRP, *Engineering Structures*, 46 (2013), 547–556.
- Ghaemdoost, M. R., Narmashiri, K. & Yousefi, O.** (2016). Structural behaviors of deficient steel SHS short columns strengthened using CFRP, *Construction and Building Materials*, 126 (2016), 1002–1011.
- Haddad, M., Brown, T., & Shrive, N.** (2011). Experimental cyclic loading of concentric HSS braces, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38 (1), 110–123.
- Han, S., Kim, W. T., & Foutch, D. A.** (2007a). Tensile strength equation for HSS bracing members having slotted end connections, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36 (January), 995–1008.
- Han, S., Kim, W. T., & Foutch, D. A.** (2007b). Seismic behavior of HSS bracing members according to width – thickness ratio under symmetric cyclic loading, *Journal of Structural Engineering*, 133 (2), 264–273.
- Harries, K. A., Peck, A. J., & Abraham, E. J.** (2009). Enhancing stability of structural steel sections using FRP, *Thin-Walled Structures*, 47 (10), 1092–1101.
- Huang, C., Chen, T. & Wang, X.** (2017). Compressive characteristics of damaged circular hollow section (CHS) steel columns repaired by CFRP or grout jacketing, *Thin-Walled Structures*, 119 (2017), 635–645.
- Ikeda, K., & Mahin, S. A.** (1984). *A Refined Physical Theory Model for Predicting the Seismic Behavior of Braced Steel Frames* (Report No: UCB/EERC-84/12). Berkeley: University of California.
- Ikeda, K., Mahin, S. A., Dermitzakis, S. A., & Dermitzakis, S. N.** (1984). *Phenomenological Modeling of Steel Braces Under Cyclic Loading* (Report No: UCB/EERC-84/09). Berkeley: University of California.
- Karataş, Ç.** (2012). *Çelik ve Alüminyum Alaşımli Çekirdekli Burkulması Önlenmiş Çaprazların (BÖÇ) Tasarımı, Üretimi ve Yön Değiştiren Tekrarlı Yükler Etkisindeki Davranışı.* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

- Krawinkler, H., Gupta, A., Median, R., & Luco, N.** (2000). *Loading Histories for Seismic Performance Testing of SMRF Components and Assemblies* (Report No: SAC/BD-00/10). Stanford: The SAC Joint Venture.
- Lee, K., & Bruneau, M.** (2002). *Review of Energy Dissipation of Compression Members in Concentrically Braced Frames* (Technical Report MCEER-02-0005). New York: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research.
- Lee, S., & Goel, S. C.** (1987). *Seismic Behavior of Hollow and Concrete-Filled Square Tubular Bracing Members* (Report No: UMEE 87-11). Ann Arbor, Michigan : The University of Michigan.
- Midorikawa, M., & Okazaki, T.** (2012). Earthquake and tsunami damage to steel structures, *Structures Congress 2012*, Chicago, Illinois, USA : March 29-31.
- Nakashima, M., & Wakabayashi, M.** (1992). Analysis and Design of Steel Braces and Braced Frames in Building Structures. In Y. Fukumoto, G. C. Lee (Eds.), *Stability and Ductility of Steel Structures Under Cyclic Loading* (pp. 309-321). Boca Raton, Florida : CRC Press.
- Remennikov, A. M., & Walpole, W. R.** (1997). Analytical prediction of seismic behaviour for concentrically-braced steel systems, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26 (8), 859–874.
- Sen, A. D., Swatosh, M. A., Ballard, R., Sloat, D., Johnson, M. M., Roeder, C. W., Lehman, D. E. & Berman, J. W.** (2017). Development and evaluation of seismic retrofit alternatives for older concentrically braced frames, *Journal of Structural Engineering*, 143 (5),
- Shaath, A., & Fam, A.** (2006). Axial loading tests on short and long hollow structural steel columns retrofitted using carbon fibre reinforced polymers, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33 (4), 458–470.
- Shaath, A., & Fam, A. Z.** (2009). Slender steel columns strengthened using high-modulus CFRP plates for buckling control, *Journal of Composites for Construction*, 13 (1), 2–12.
- Takeuchi, T., & Matsumi, R.** (2011). Cumulative deformation capacity of steel braces under various cyclic loading histories, *Journal of Structural Engineering*, 137 (11), 1311-1318.
- Tavakkolizadeh, M., & Saadatmanesh, H.** (2003). Strengthening of steel-concrete composite girders using carbon fiber reinforced polymers sheets, *Journal of Structural Engineering*, 129 (1), 30-40.
- Tremblay, R.** (2001). Seismic behavior and design of concentrically braced steel frames, *Engineering Journal, Third Quarter*, 148–166.
- Tremblay, R.** (2002). Inelastic seismic response of steel bracing members, *Journal of Constructional Steel Research*, 58 (5), 665–701.
- Tremblay, R., Archambault, M. H., & Filiatrault, A.** (2003). Seismic response of concentrically braced steel frames made with rectangular hollow bracing members, *Journal of Structural Engineering*, 129 (12), 1626–

1636.

Walker, A. C. (1975). *Design and Analysis of Cold-Formed Sections*. New York : Halsted Press.

Yang, F., & Mahin, S. A. (2005). *Limiting Net Sections Fracture in Slotted Tube Braces*. California : Structural Steel Educational Council Technical Information & Product Service (Steel Tips).

Zayas, V. A., Popov, E. P., & Mahin, S. A. (1980a). *Cyclic Inelastic Buckling of Tubular Steel Braces* (Report No: UCB/EERC-80/16). Berkeley: University of California.

Zayas, V. A., Popov, E. P., & Mahin, S. A. (1980b). *Cyclic Inelastic Behavior of Steel Offshore Structures* (Report No: UCB/EERC-80/27). Berkeley: University of California.





EKLER

EK A: Çelik malzeme gerilme-şekildeğiştirme eğrileri (Eğrilerde verilen düşey eksenindeki gerilme (σ) MPa birimindedir.)

EK B: TB-1 numunesine ilişkin şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) verileri

EK C: TB-2 numunesine ilişkin şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) verileri

EK D: TB-3 numunesine ilişkin şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) verileri

EK E: TB-4 numunesine ilişkin şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) verileri

EK F: TB-5 numunesine ilişkin şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) verileri

EK G: TB-8 numunesine ilişkin şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) verileri

EK H: TB-9 numunesine ilişkin şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) verileri

EK I: TB-10 numunesine ilişkin şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) verileri

EK J: TB-11 numunesine ilişkin şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) verileri

EK K: TB-12 numunesine ilişkin şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) verileri

EK L: TB-13 numunesine ilişkin şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) verileri

EK M: TB-14 numunesine ilişkin şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) verileri

EK N: TB-15 numunesine ilişkin şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) verileri

EK O: TB-16 numunesine ilişkin şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) verileri

EK P: TB-17 numunesine ilişkin şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) verileri

EK R: TB-18 numunesine ilişkin şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) verileri

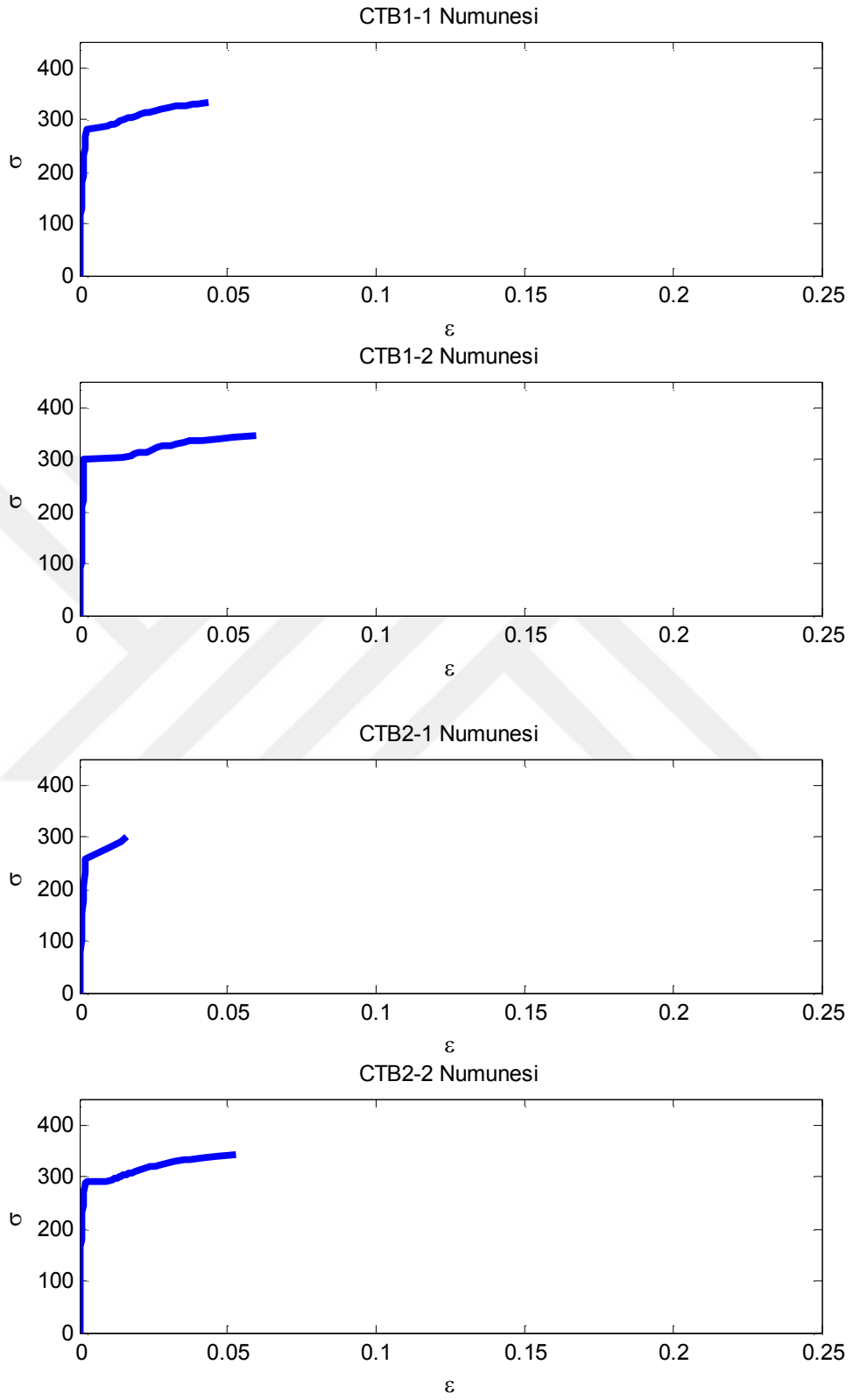
EK S: TB-19 numunesine ilişkin şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) verileri

EK T: TB-20 numunesine ilişkin şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) verileri

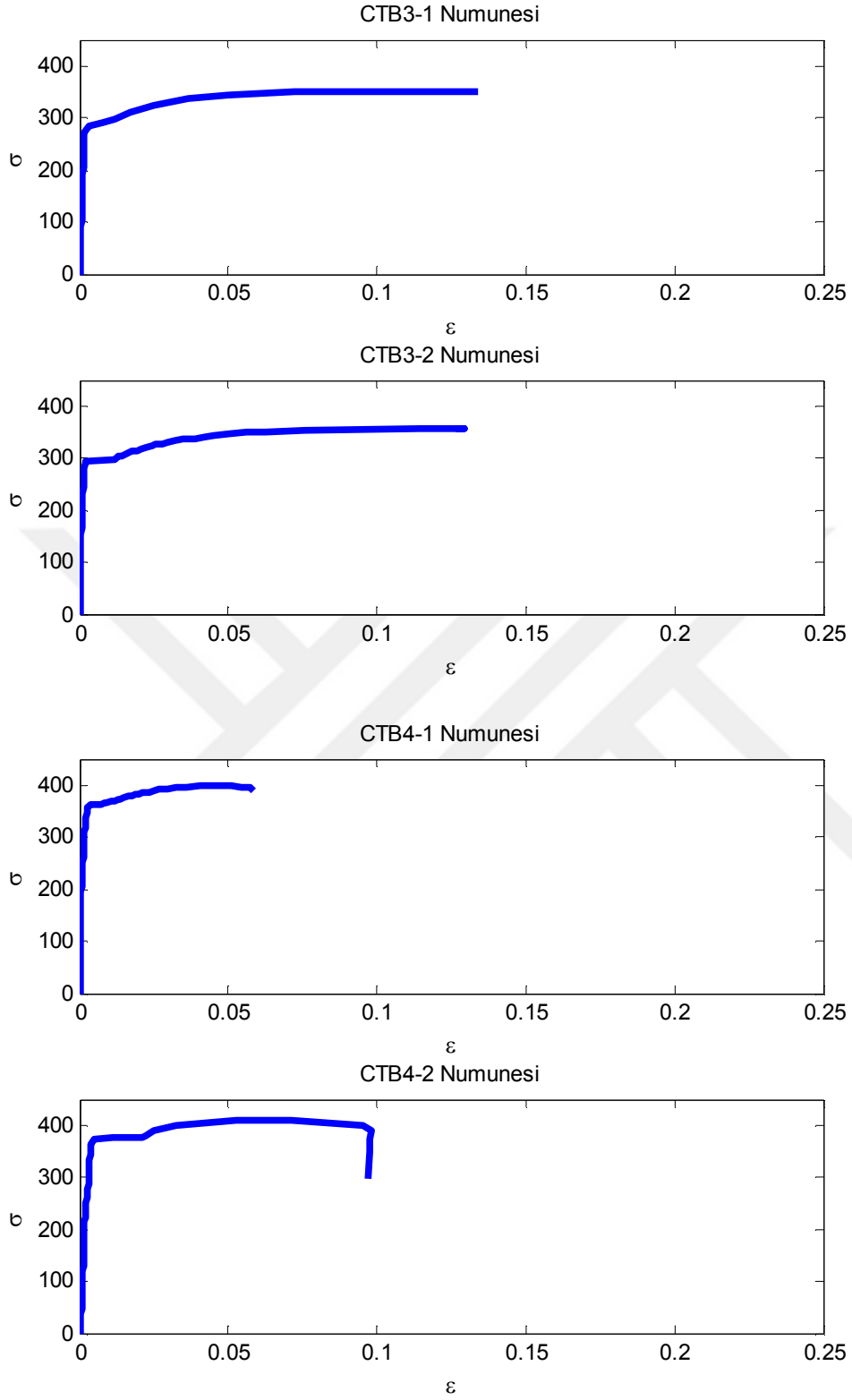
EK U: TB-21 numunesine ilişkin şekildeğiştirme ölçer (strain gauge) verileri



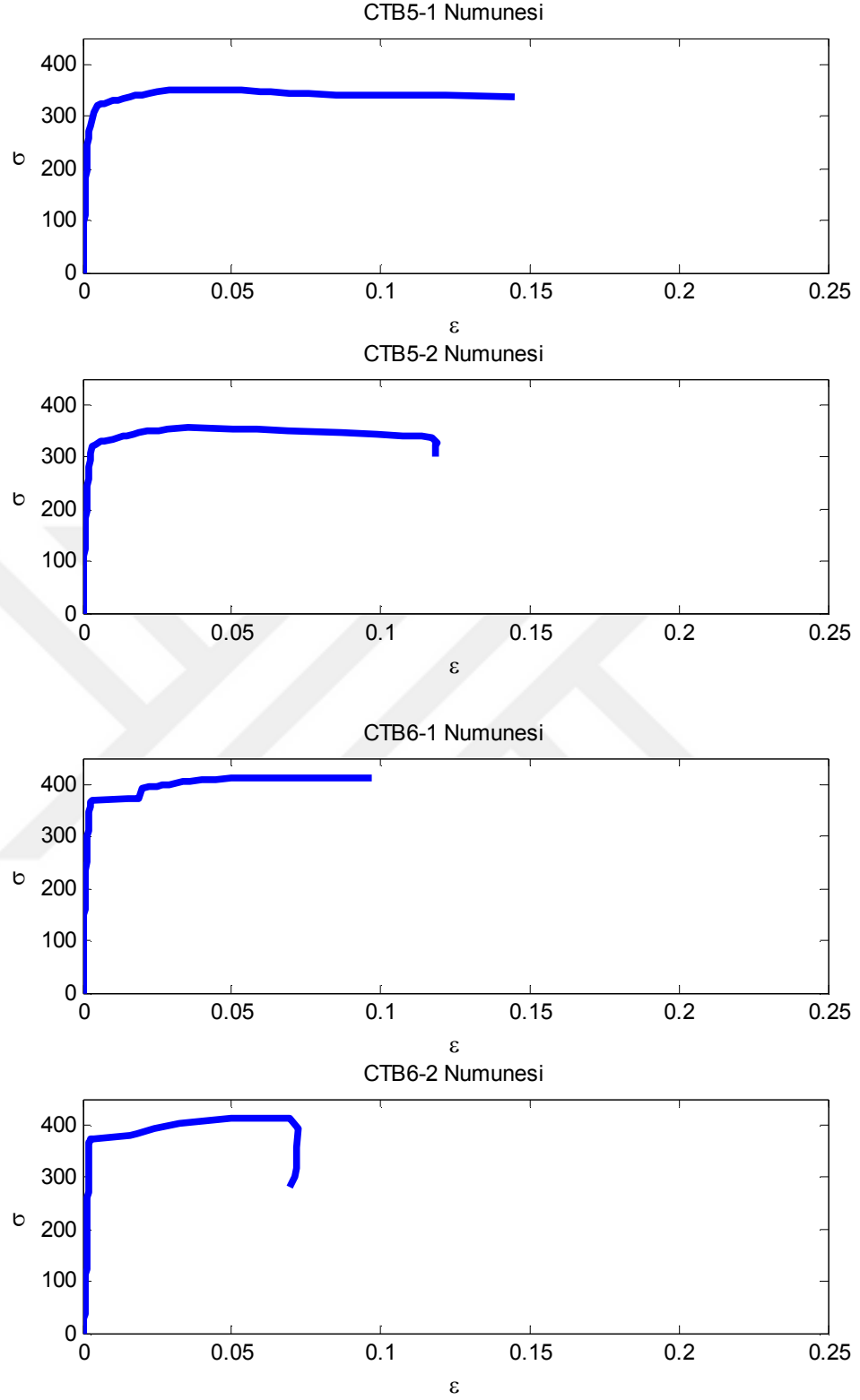
EK A



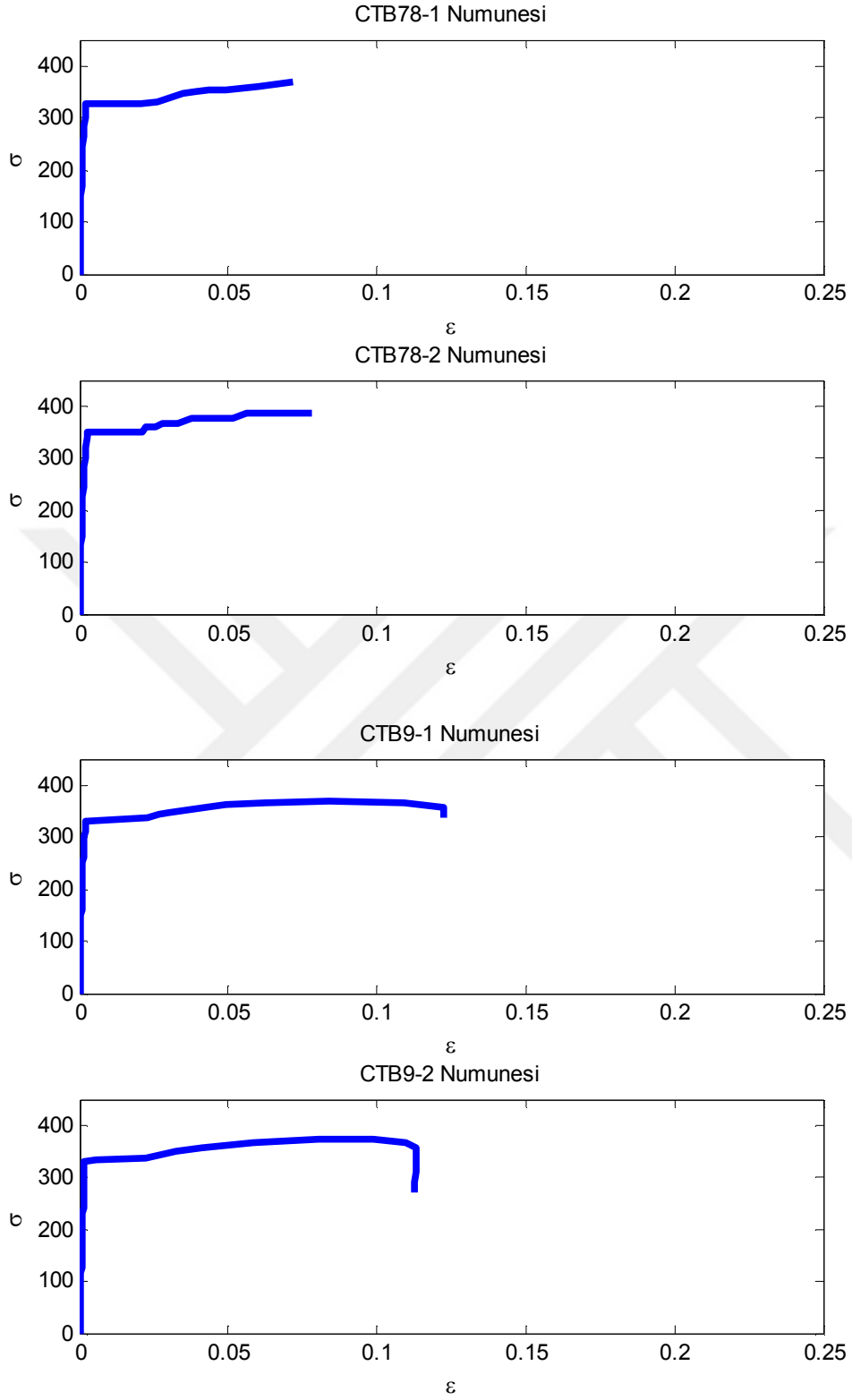
Şekil A.1 : TB-1 ve TB-2 numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.



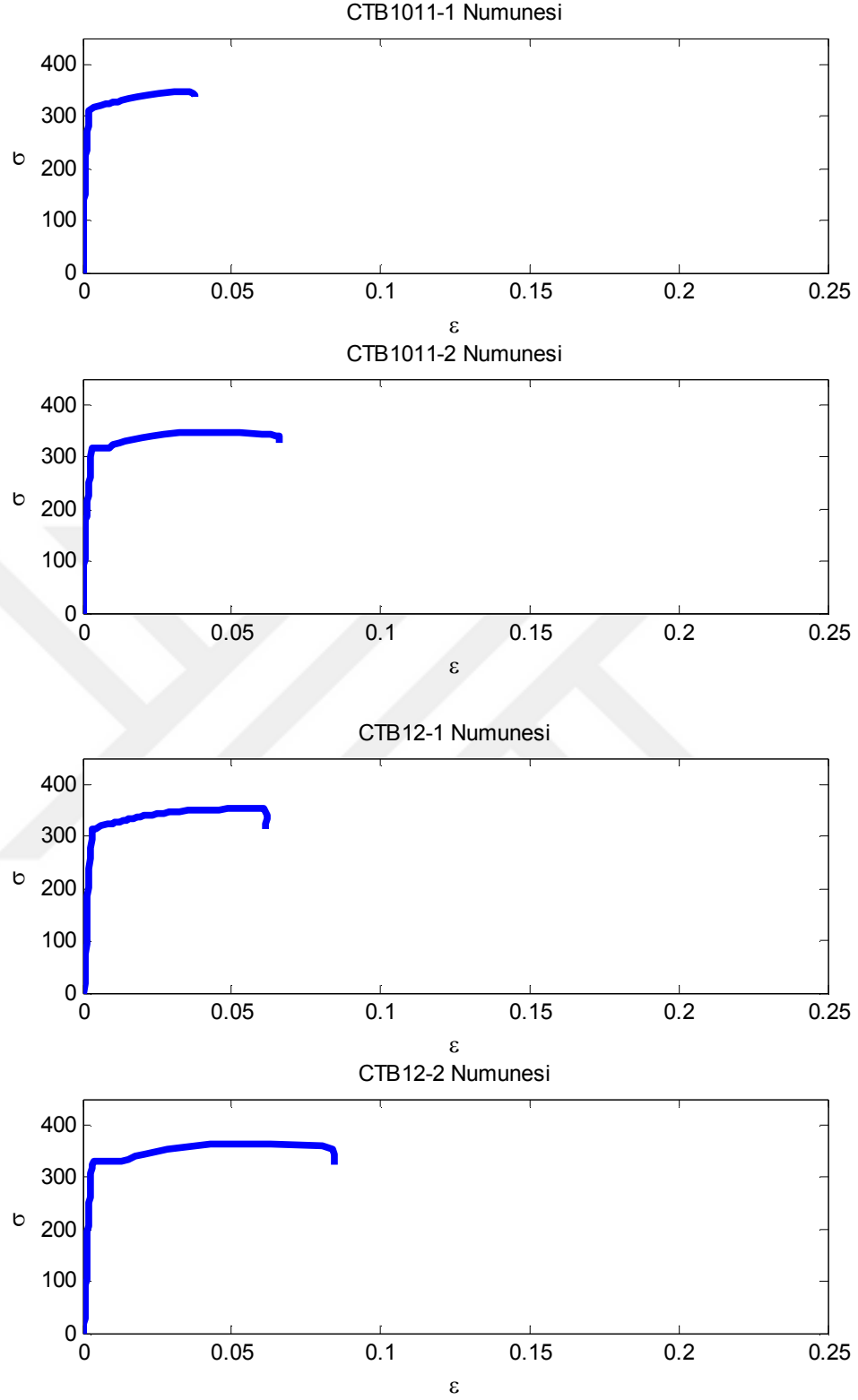
Şekil A.2 : TB-3 ve TB-4 numunelerine ilişkin gerilme-şekil değiştirme eğrileri.



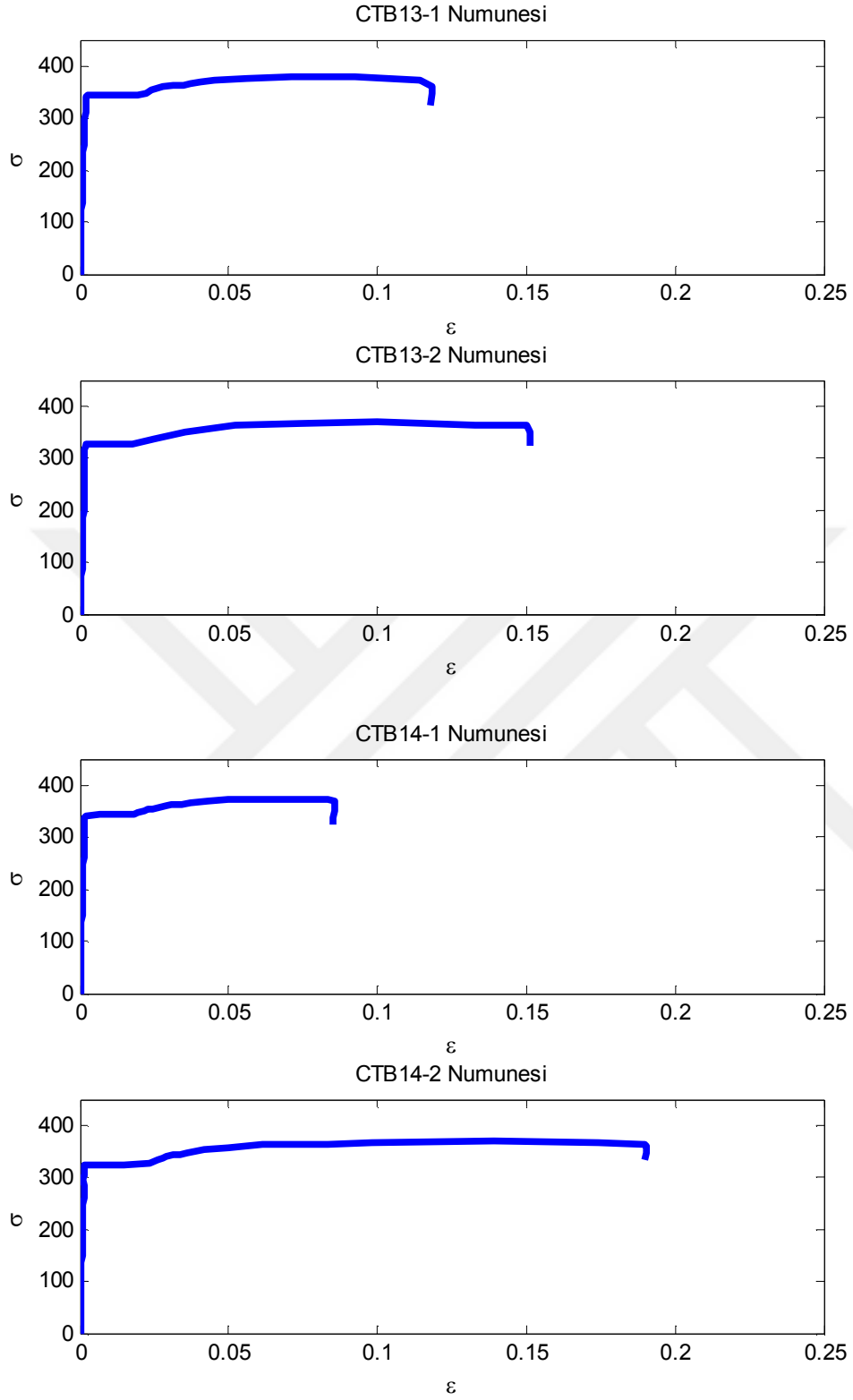
Şekil A.3 : TB-5 ve TB-6 numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.



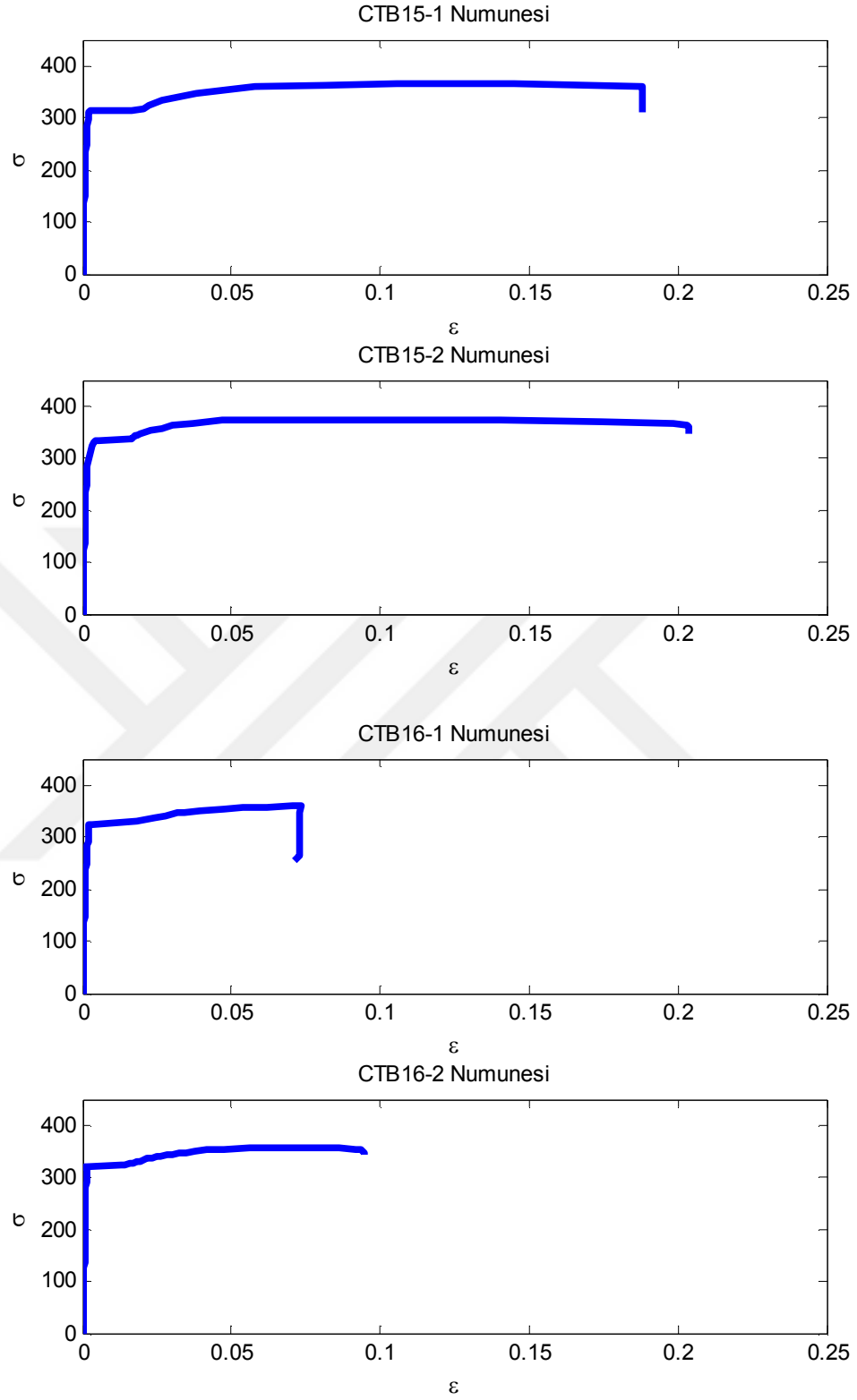
Şekil A.4 : TB-7, TB-8 ve TB-9 numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.



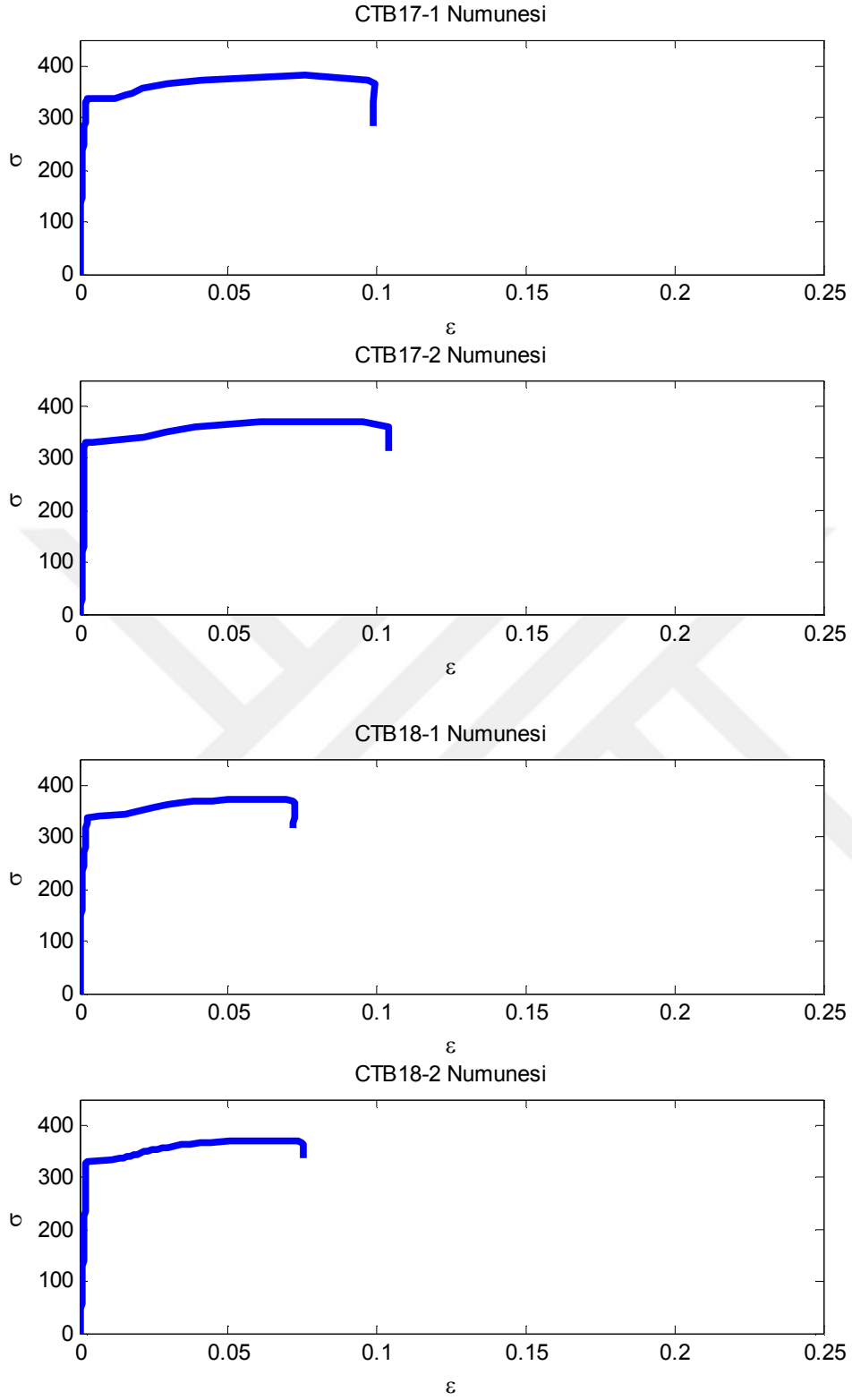
Şekil A.5 : TB-10, TB-11 ve TB-12 numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.



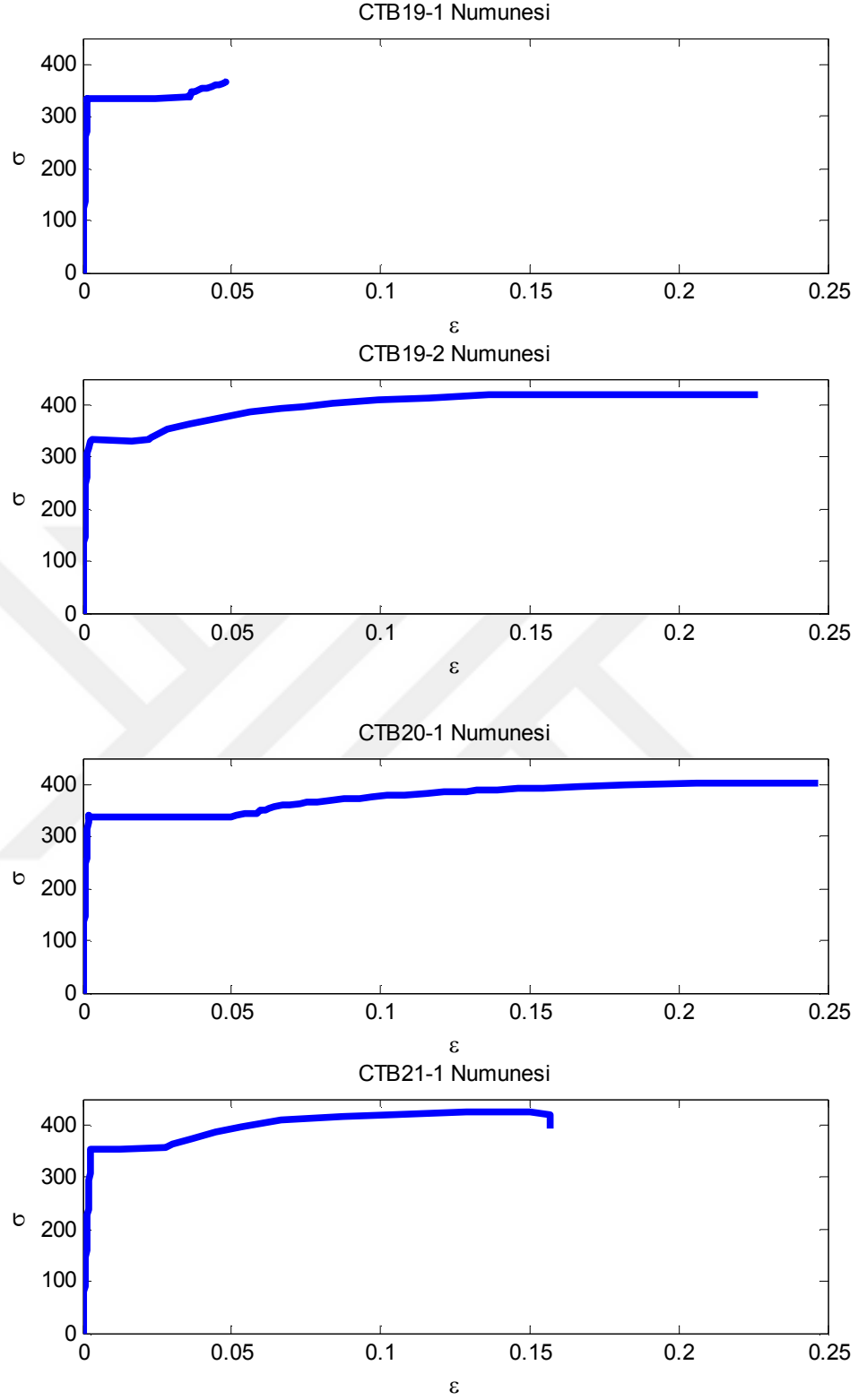
Şekil A.6 : TB-13 ve TB-14 numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.



Şekil A.7 : TB-15 ve TB-16 numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.



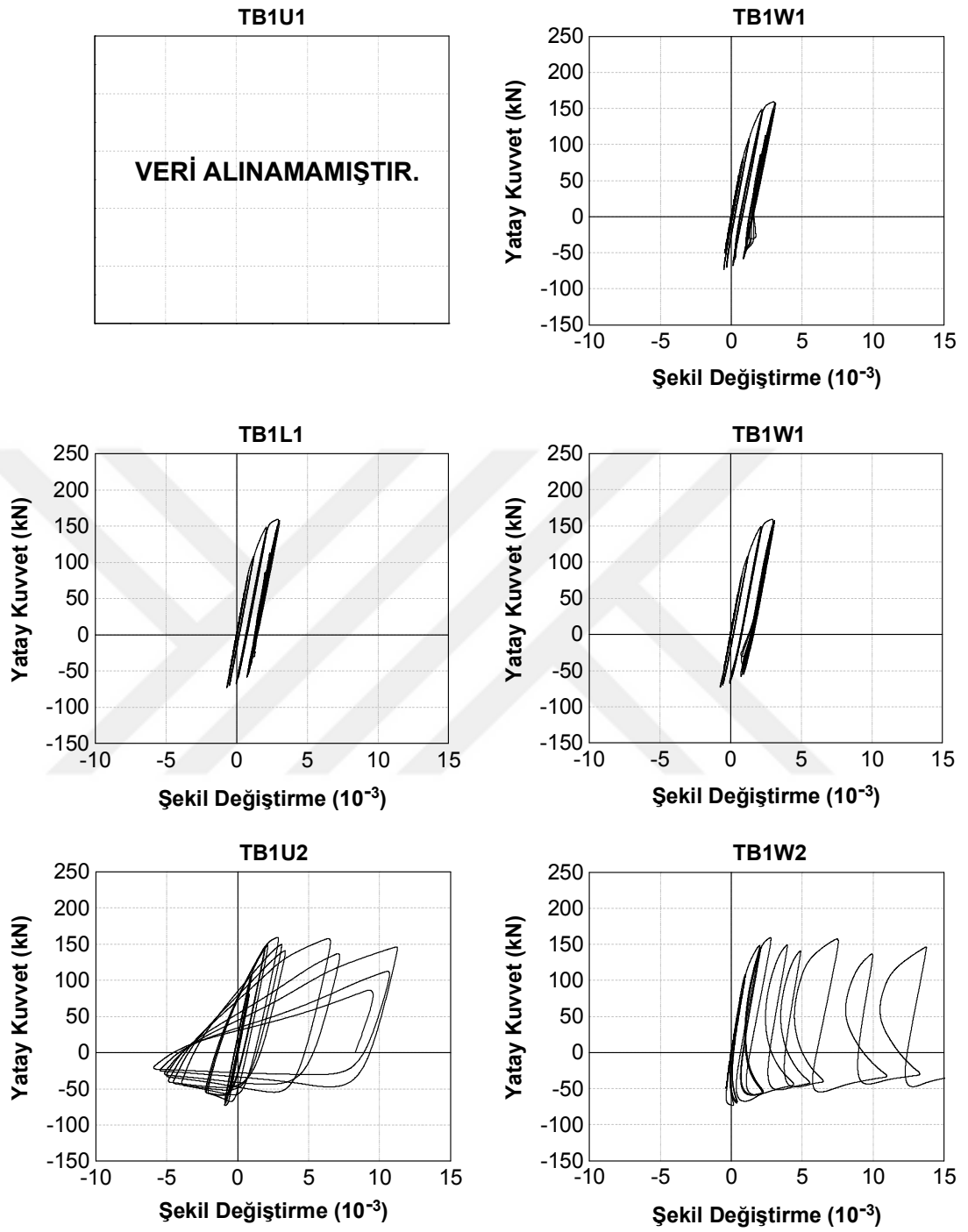
Şekil A.8 : TB-17 ve TB-18 numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.



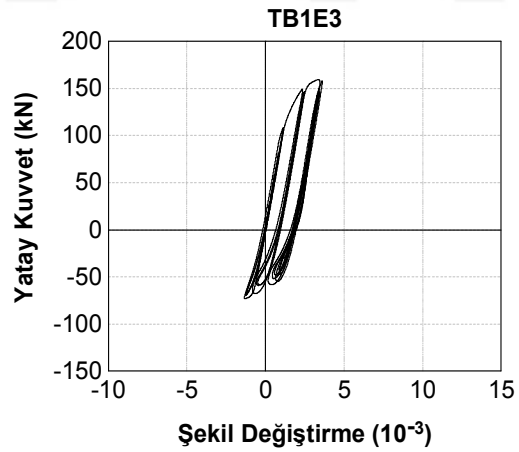
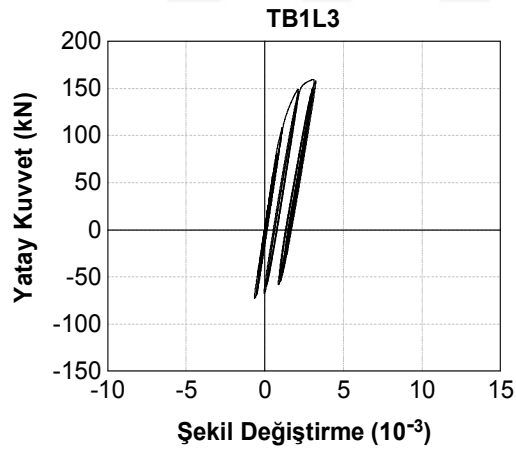
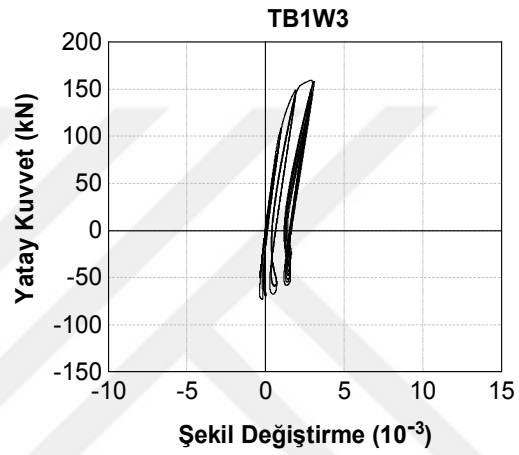
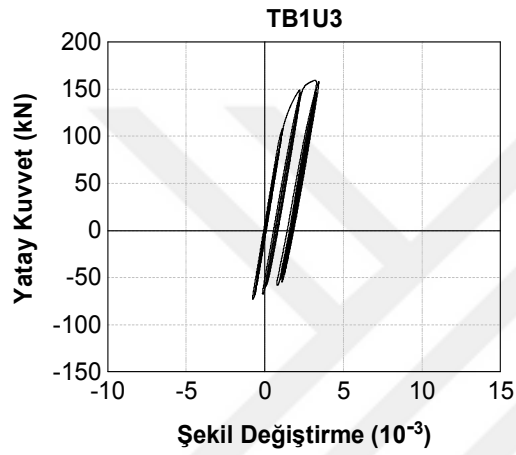
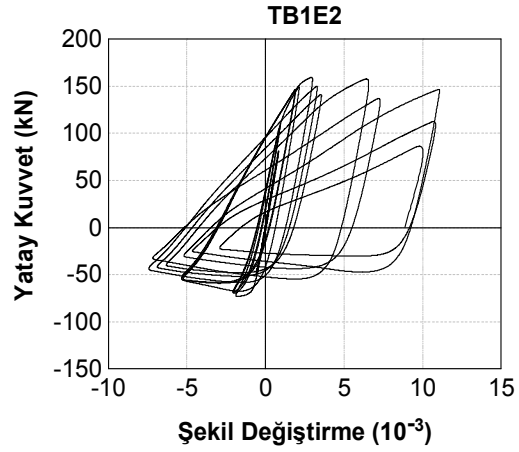
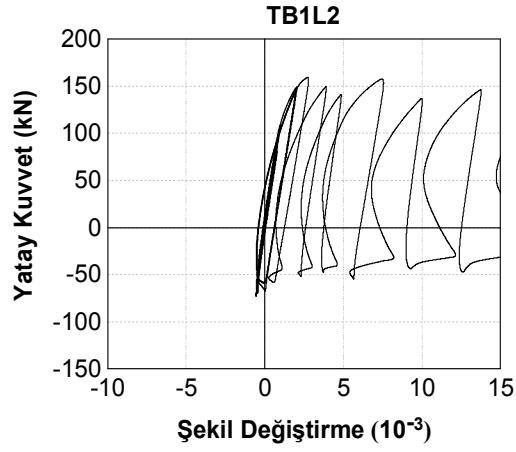
Şekil A.9 : TB-19,TB-20 ve TB-21 numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.



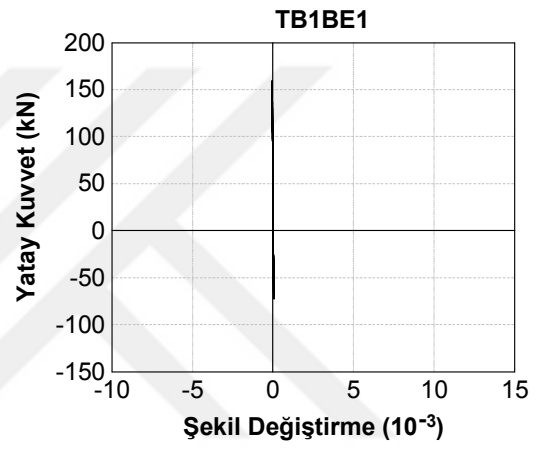
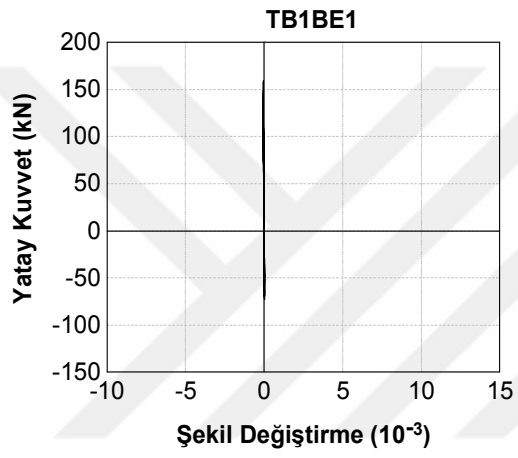
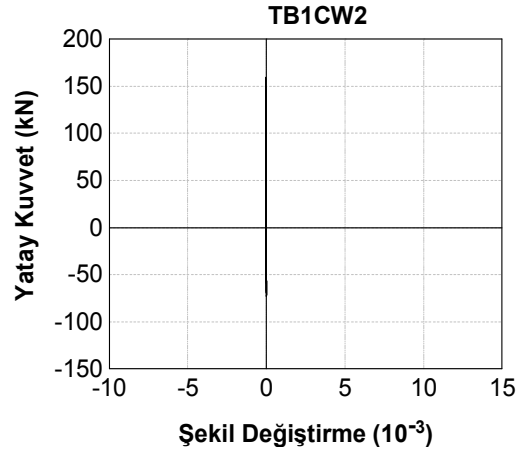
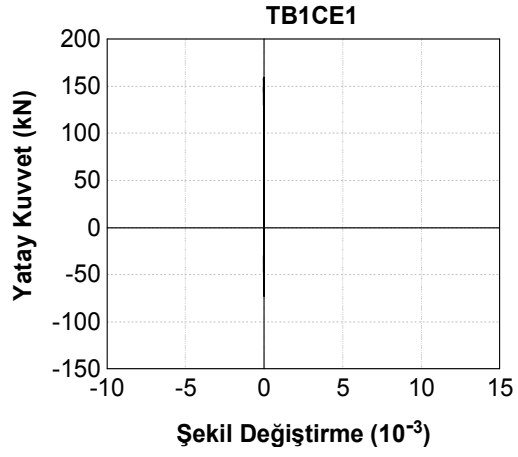
EK B



Şekil B.1 : TB-1 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



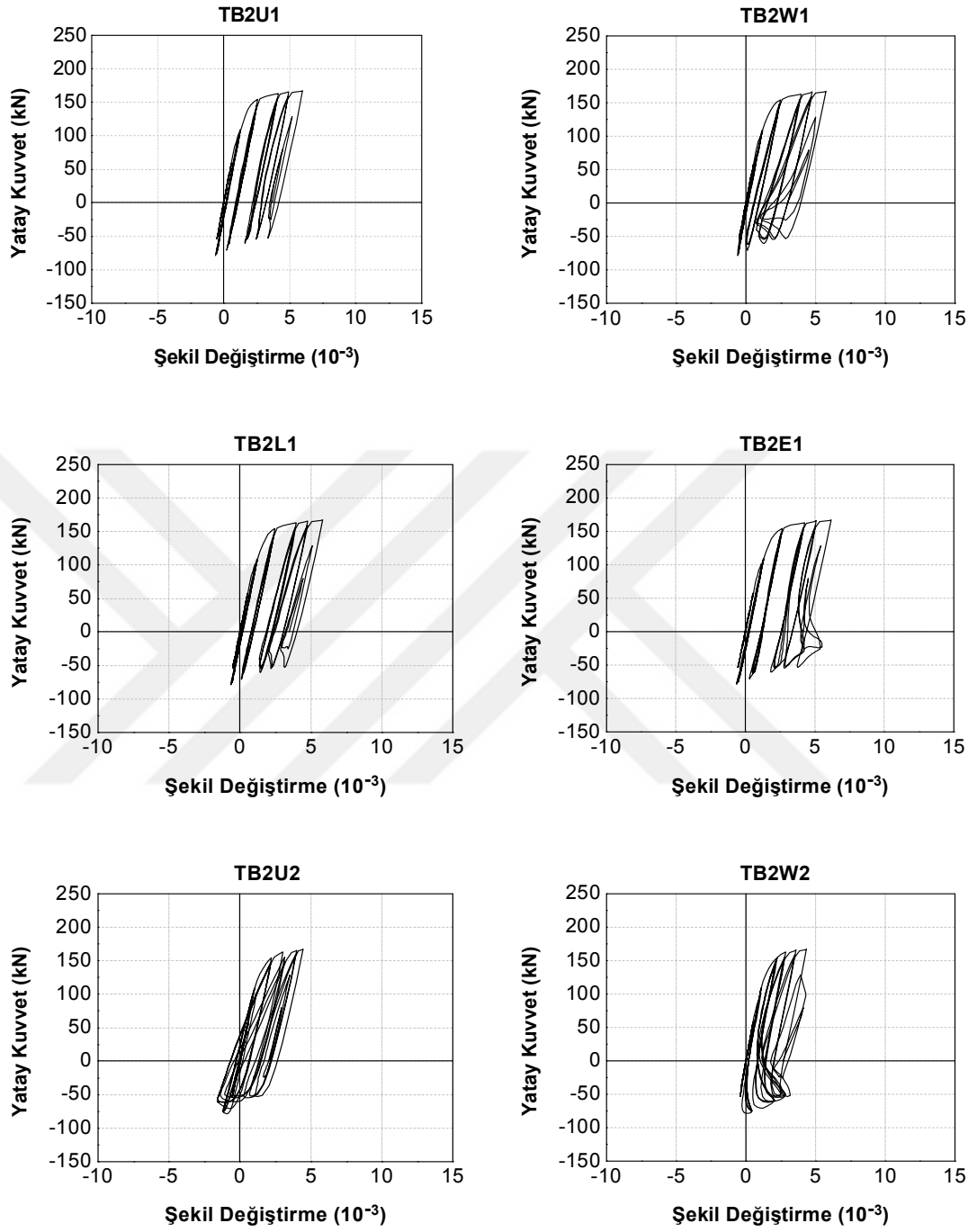
Şekil B.1 (devam) : TB-1 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



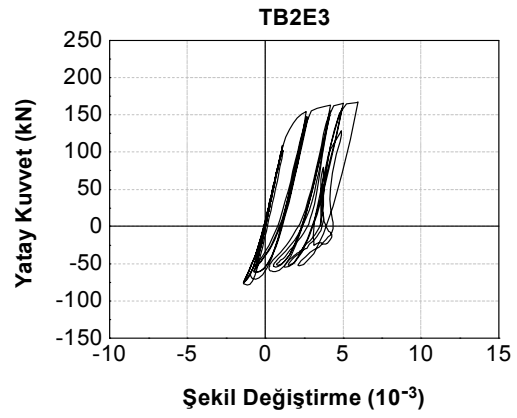
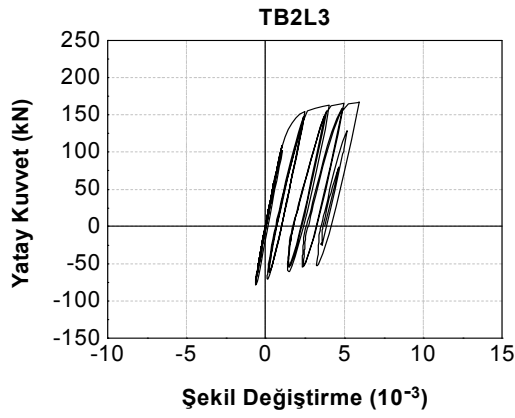
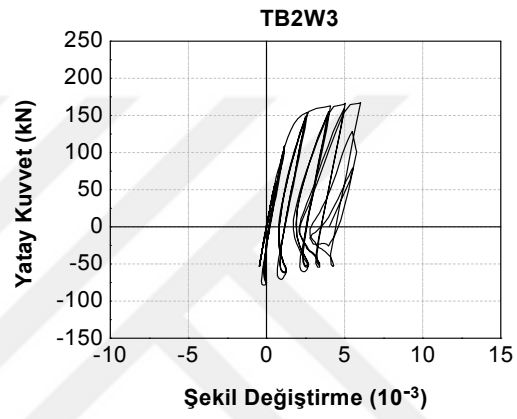
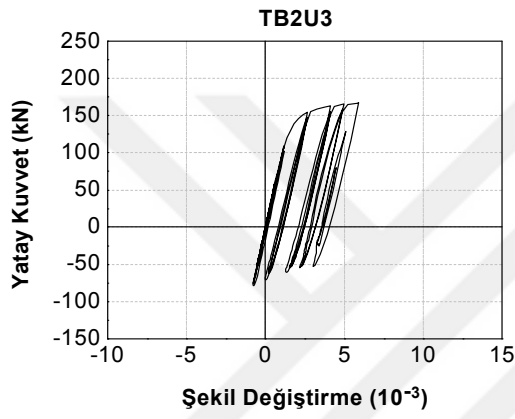
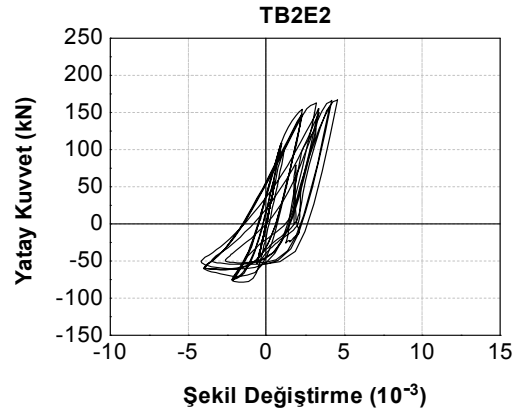
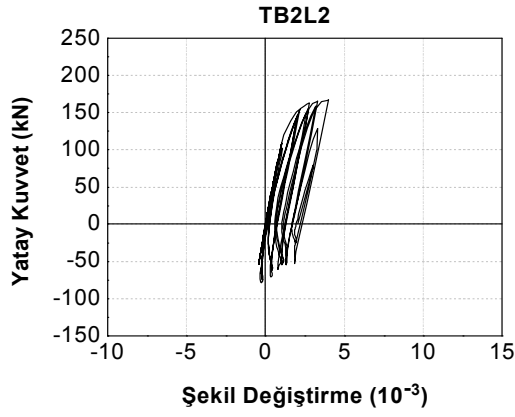
Şekil B.2 : Deney düzeneği yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



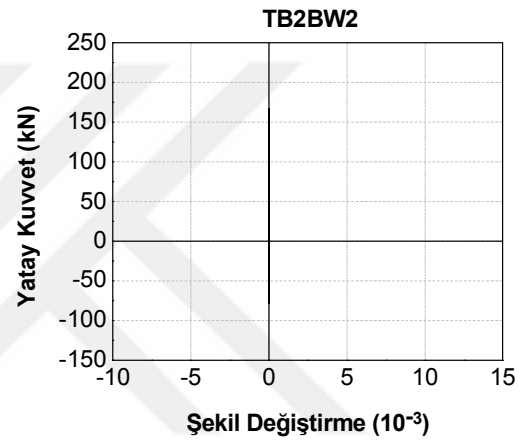
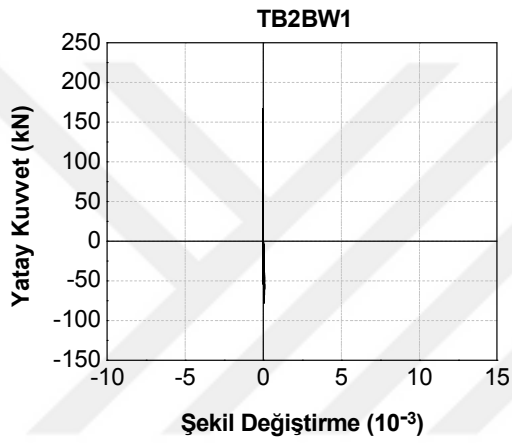
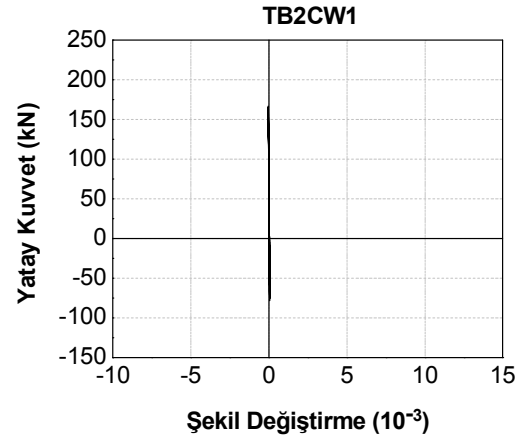
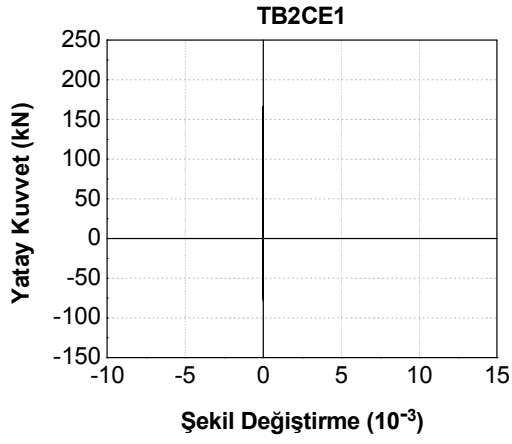
EK C



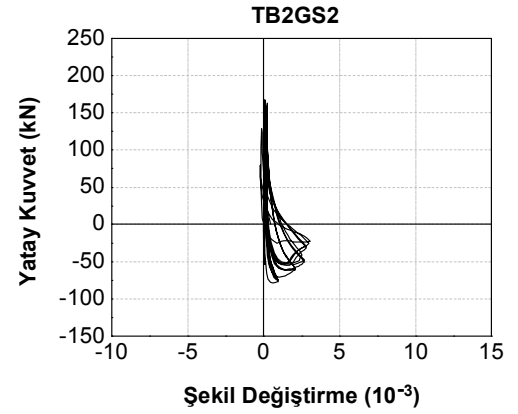
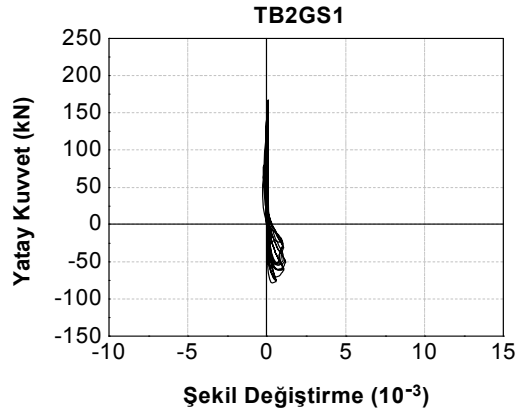
Şekil C.1 : TB-2 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



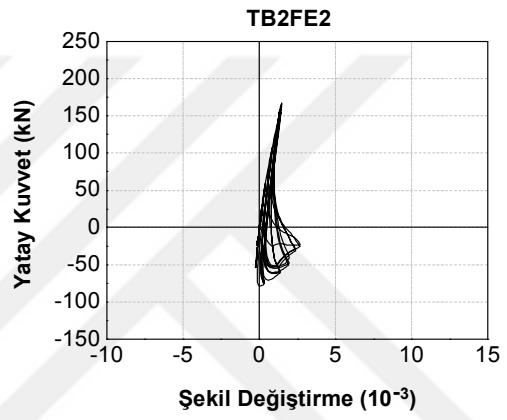
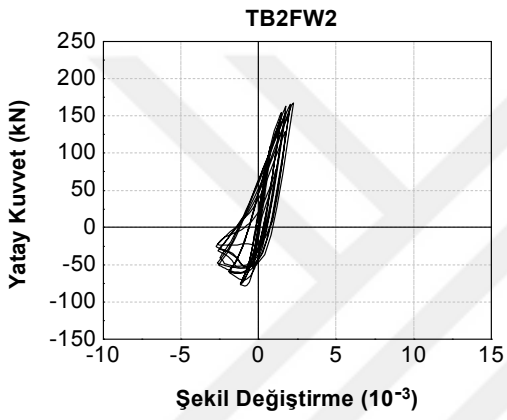
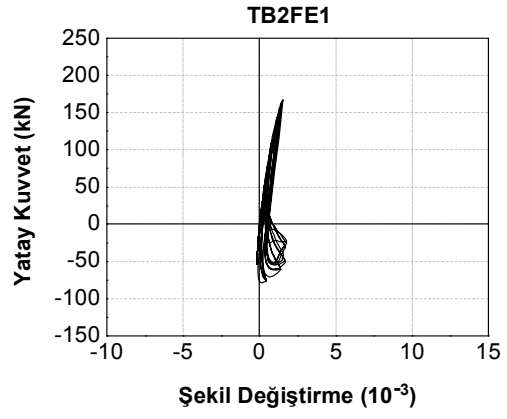
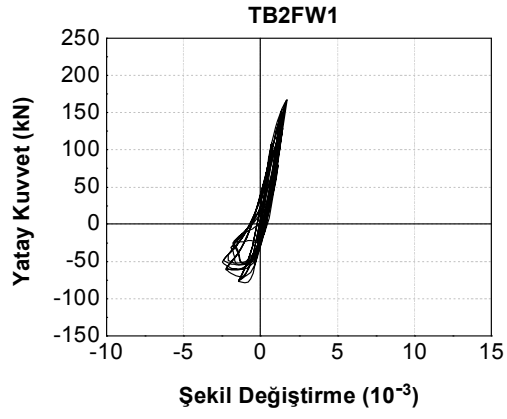
Şekil C.1 (devam) : TB-2 numunesi yatay kuvvet – aksenal şekildeğişirme histeretik eğrileri.



Şekil C.2 : Deney düzeneği yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.

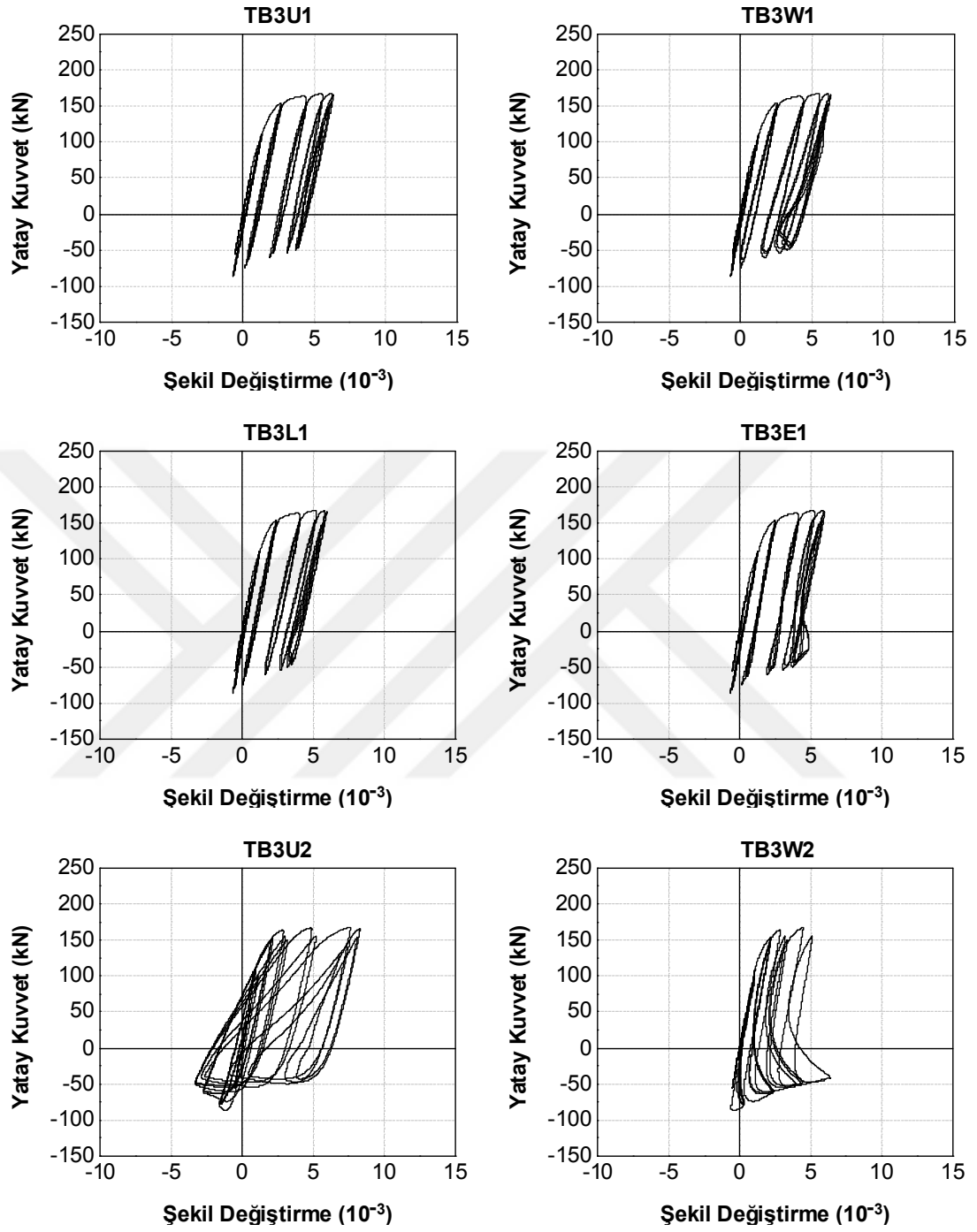


Şekil C.3 : Bayrak levhaları yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.

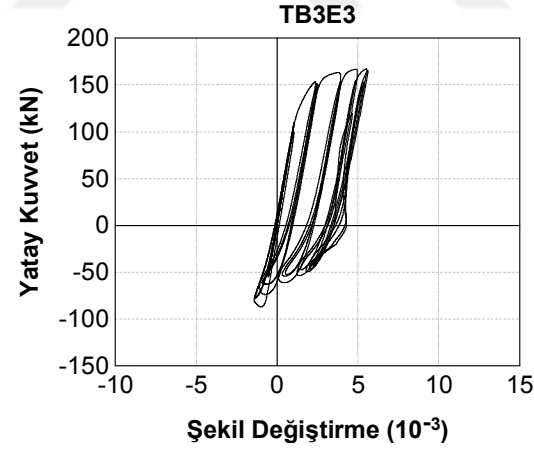
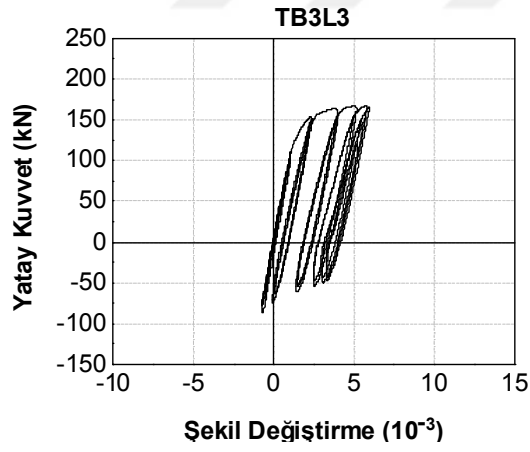
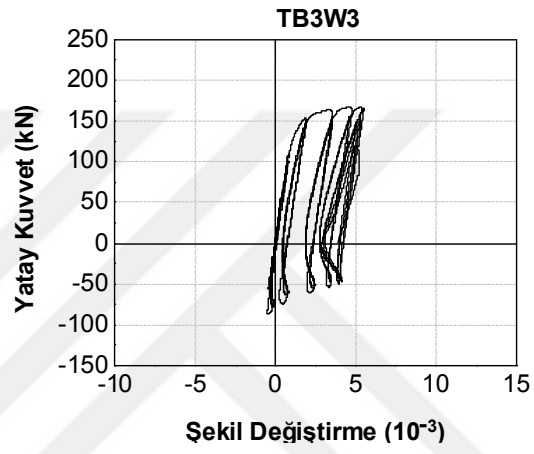
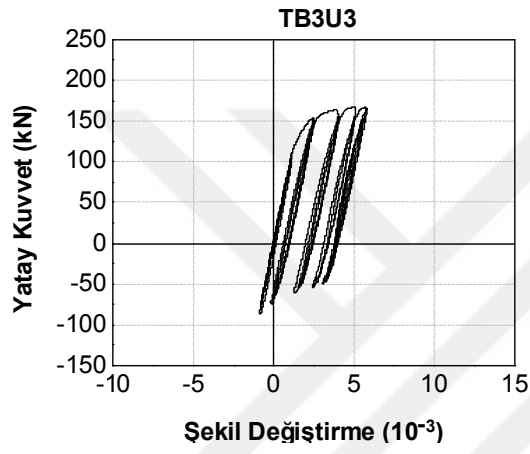
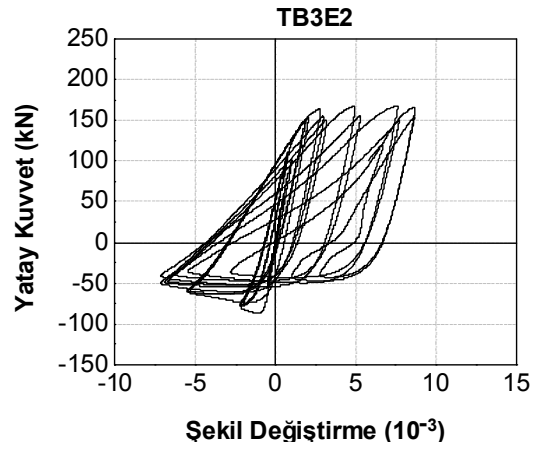
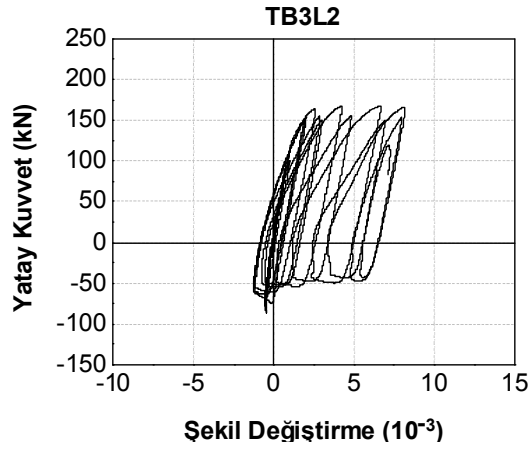


Şekil C.4 : CFRP plakalar yatay kuvvet – eksenel şekil değiştirme histeretik eğrileri.

EK D

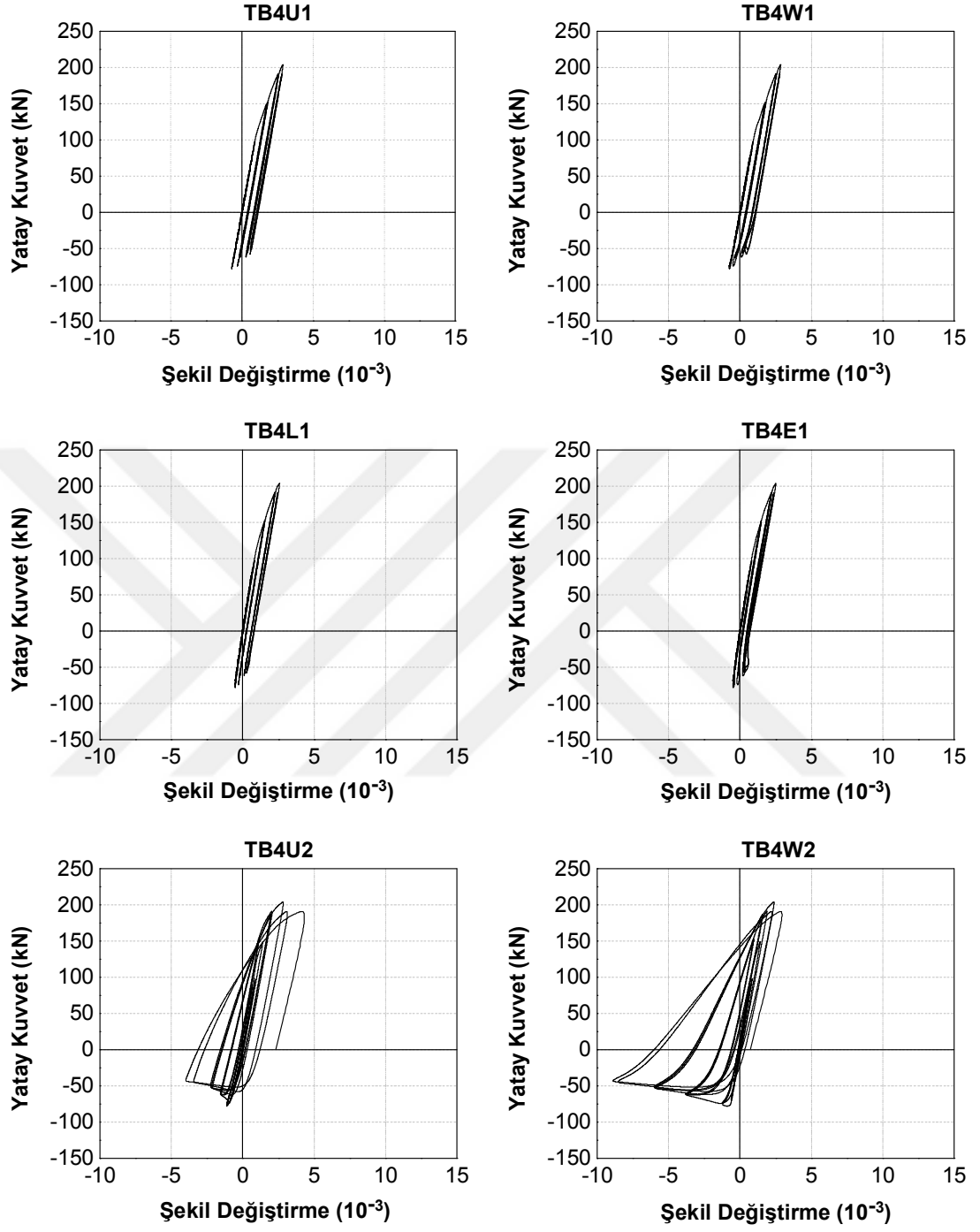


Şekil D.1 : TB-3 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.

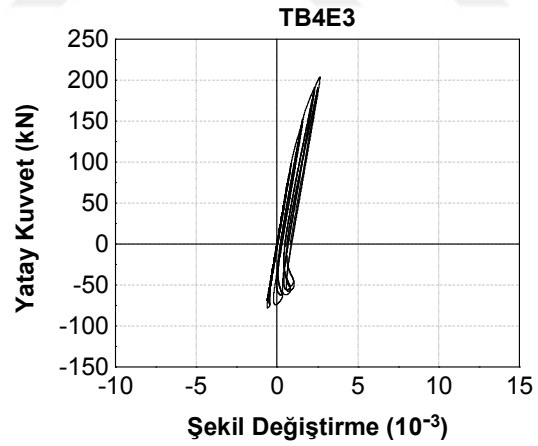
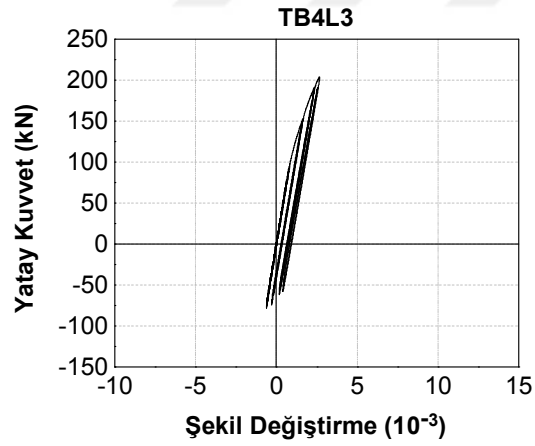
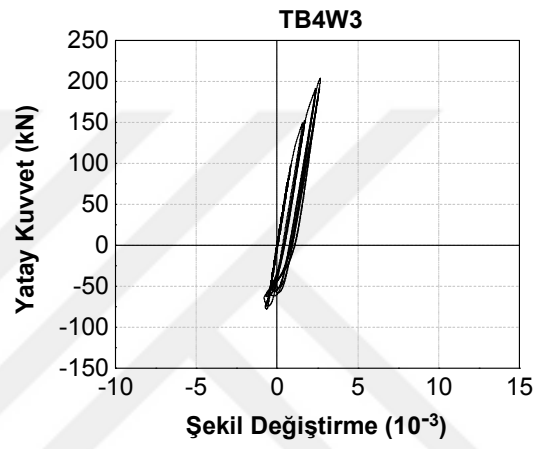
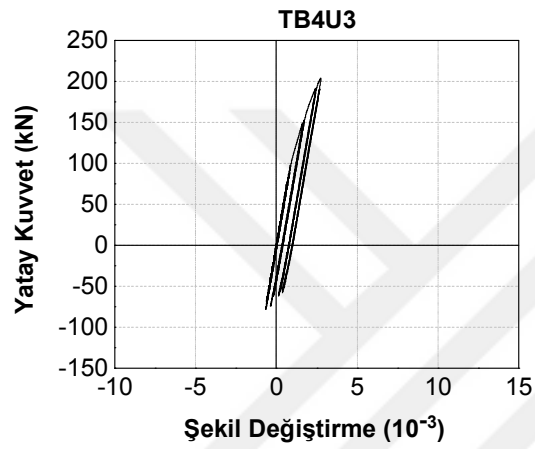
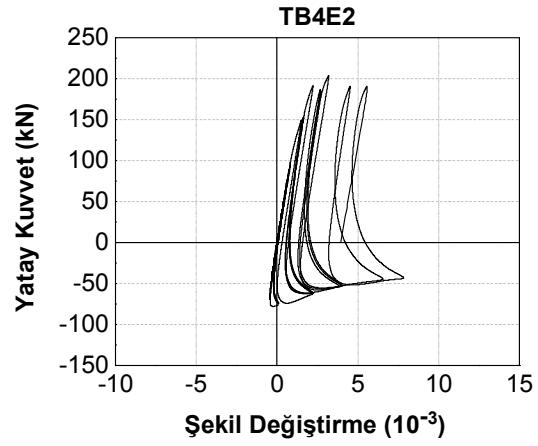
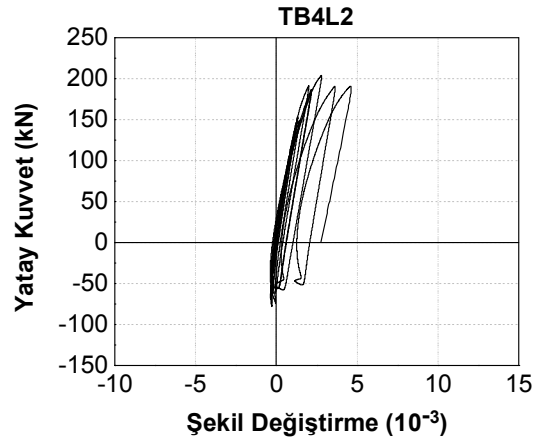


Şekil D.1 (devam) : TB-3 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.

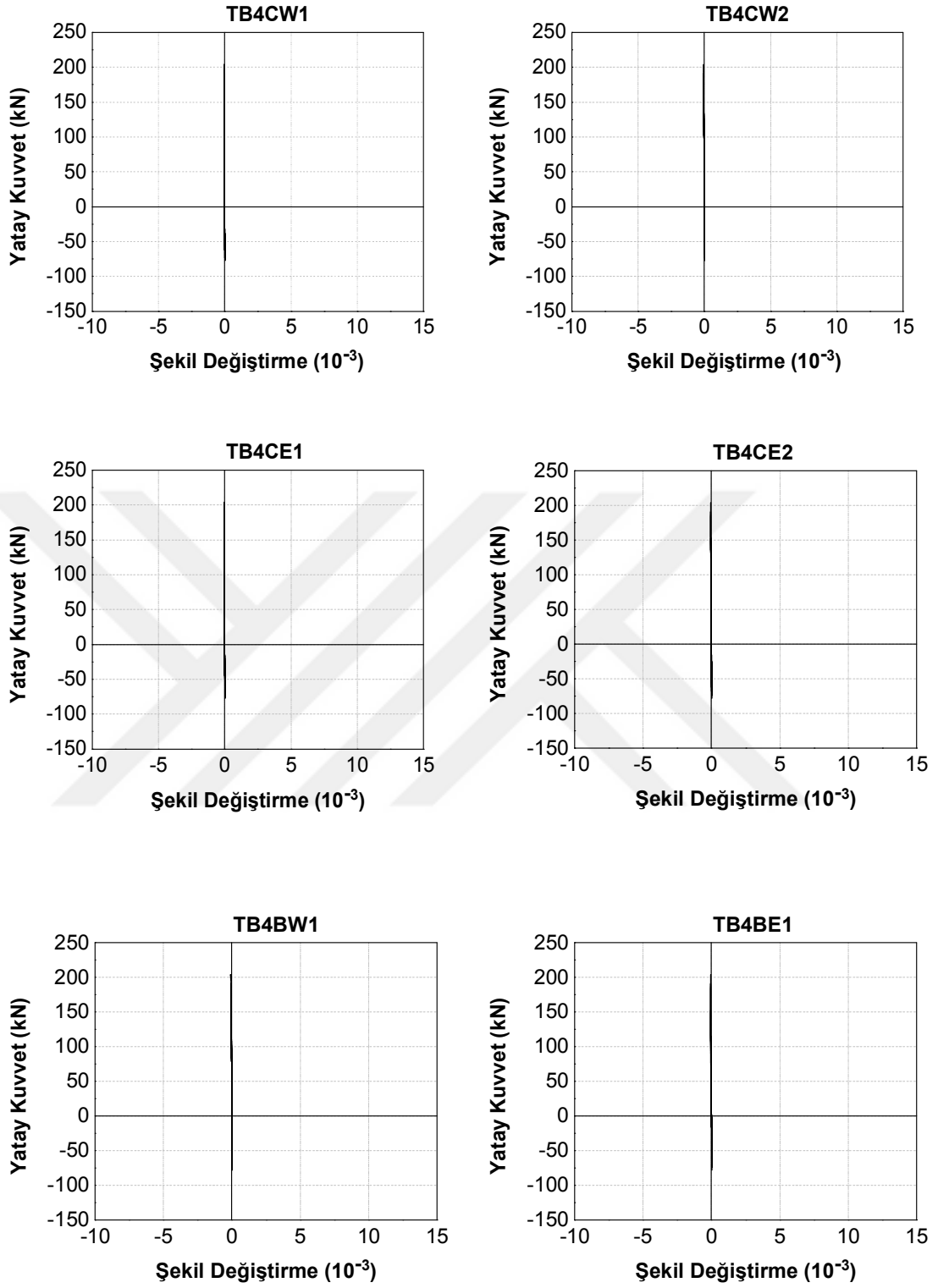
EK E



Şekil E.1 : TB-4 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekil değiştirme histeretik eğrileri.



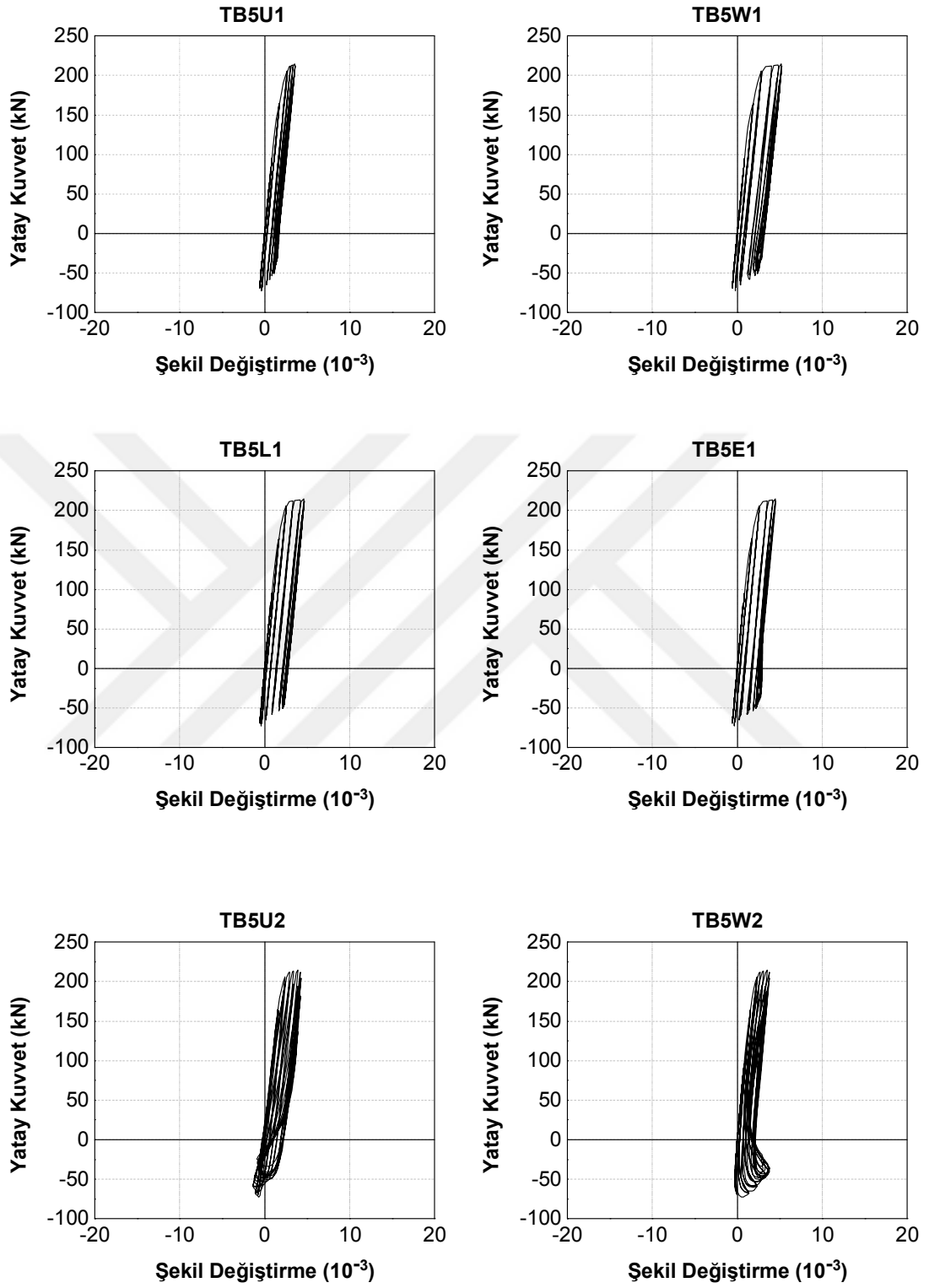
Şekil E.1 (devam) : TB-4 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



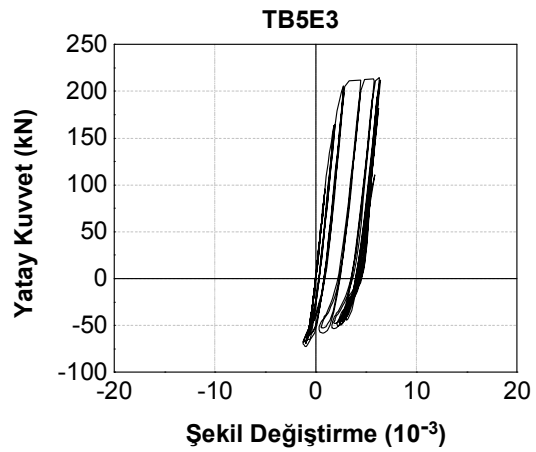
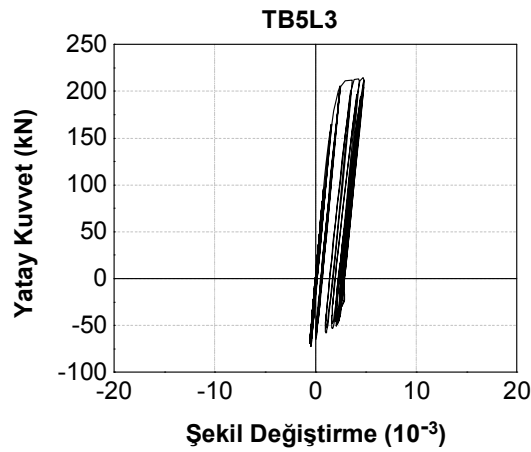
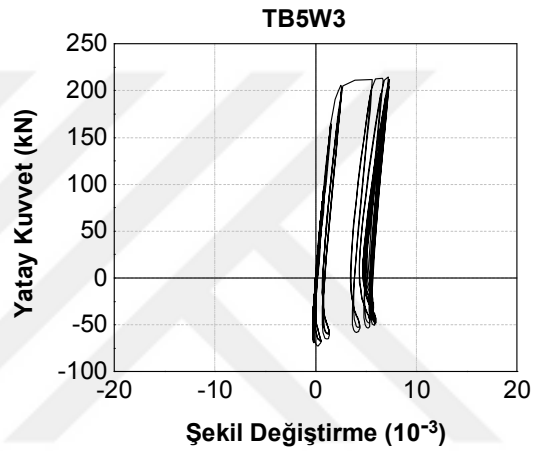
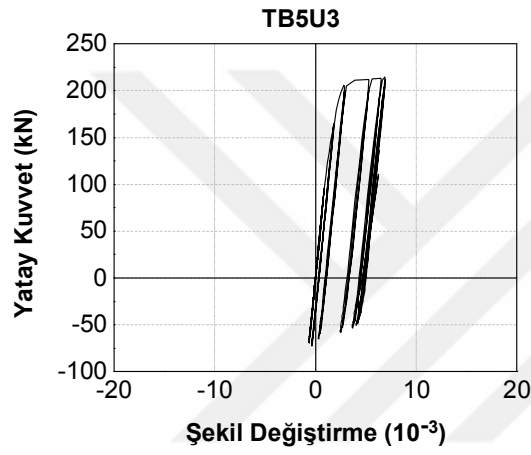
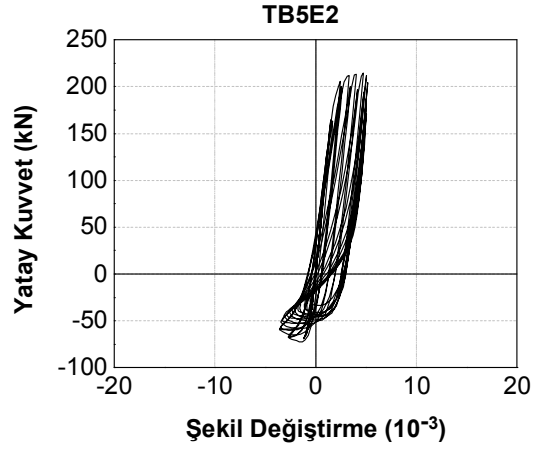
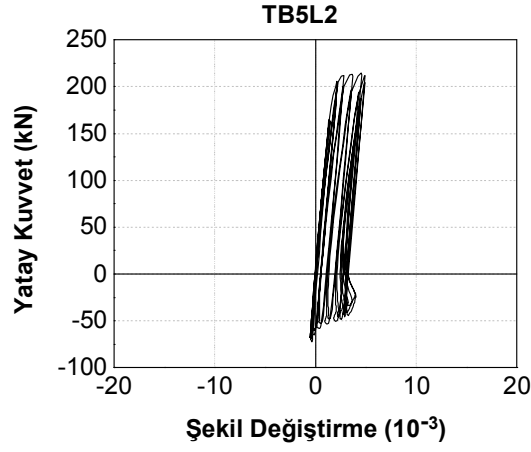
Şekil E.2 : Deney düzeneği yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



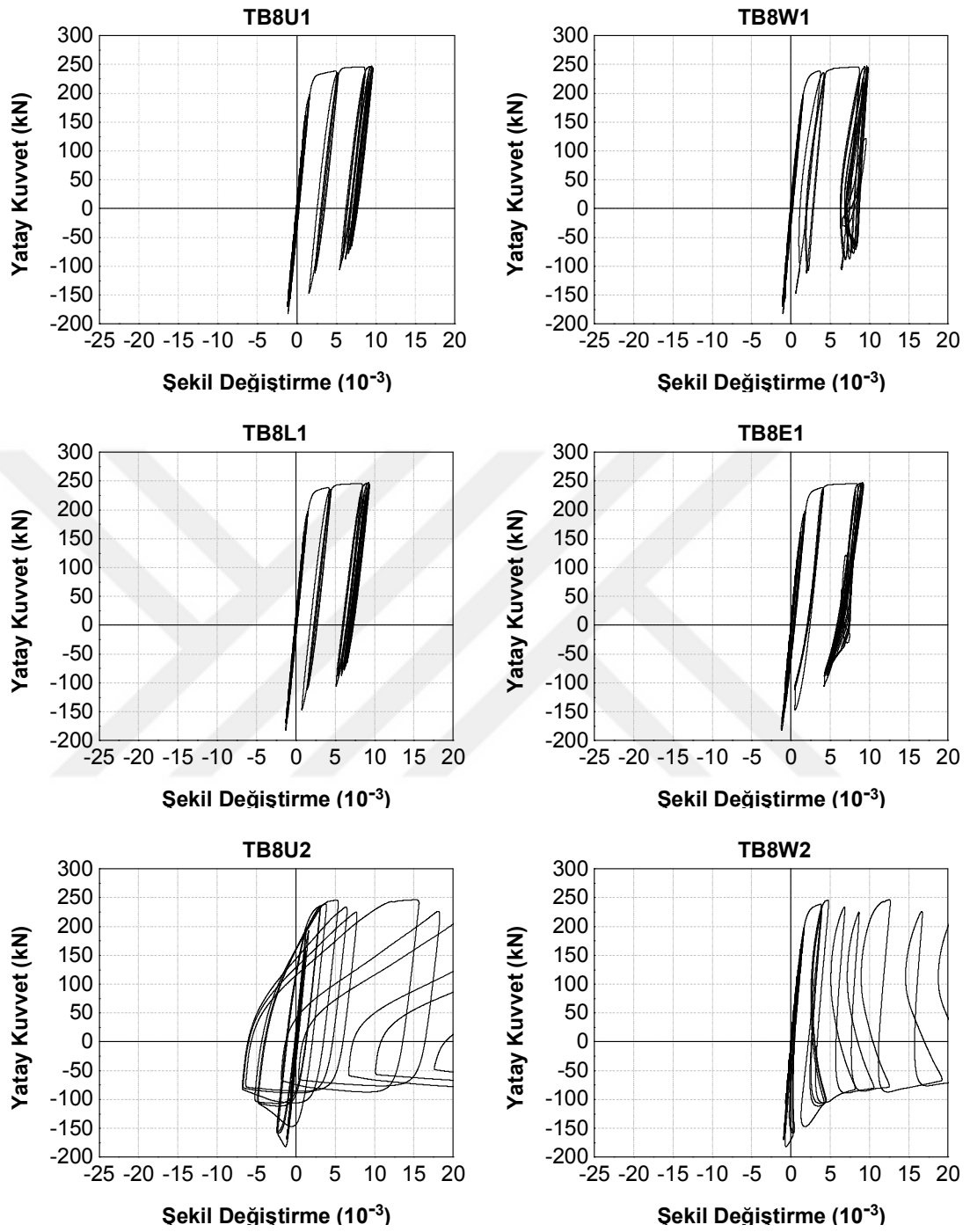
EK F



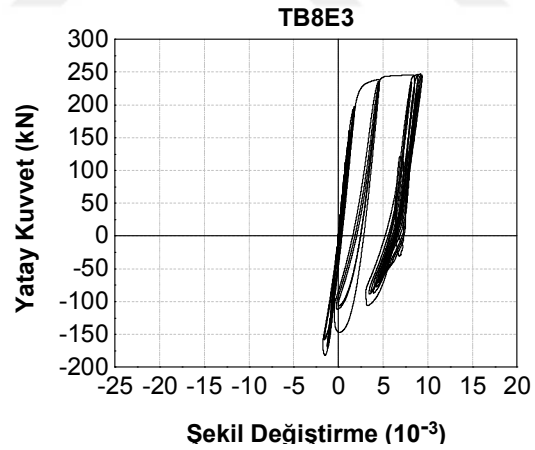
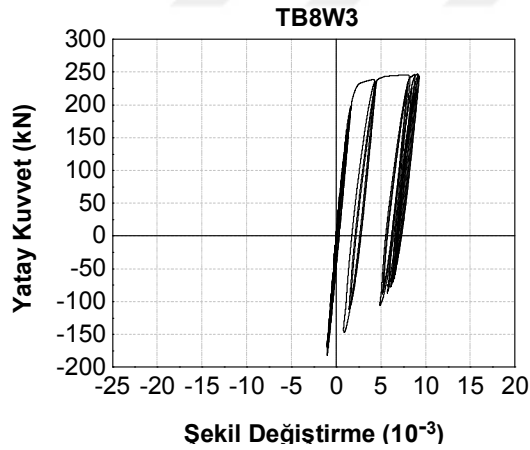
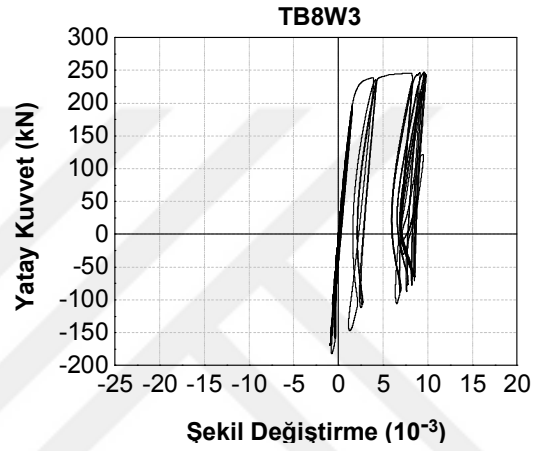
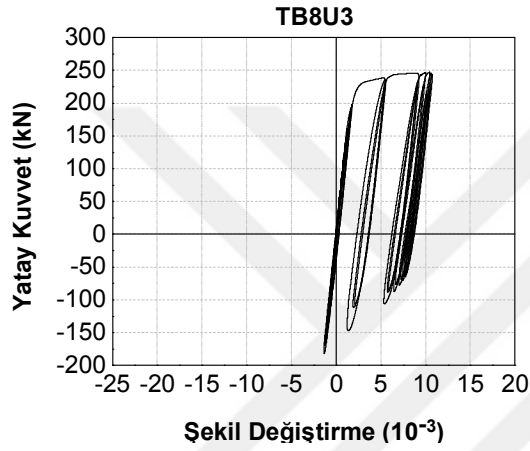
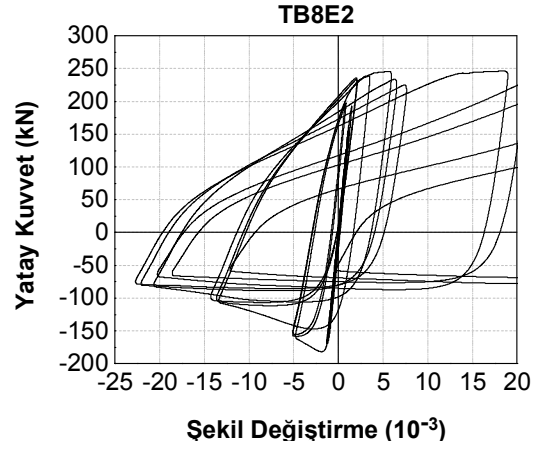
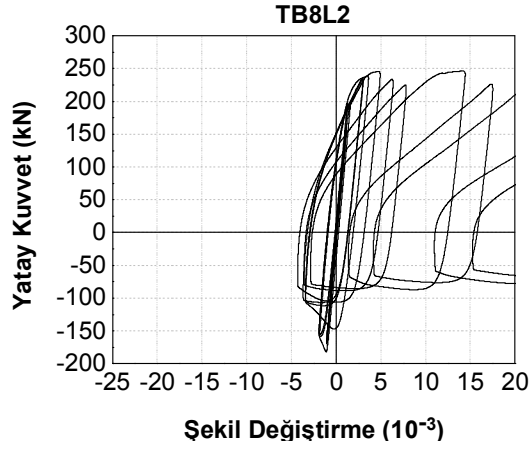
Şekil F.1 : TB-5 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.



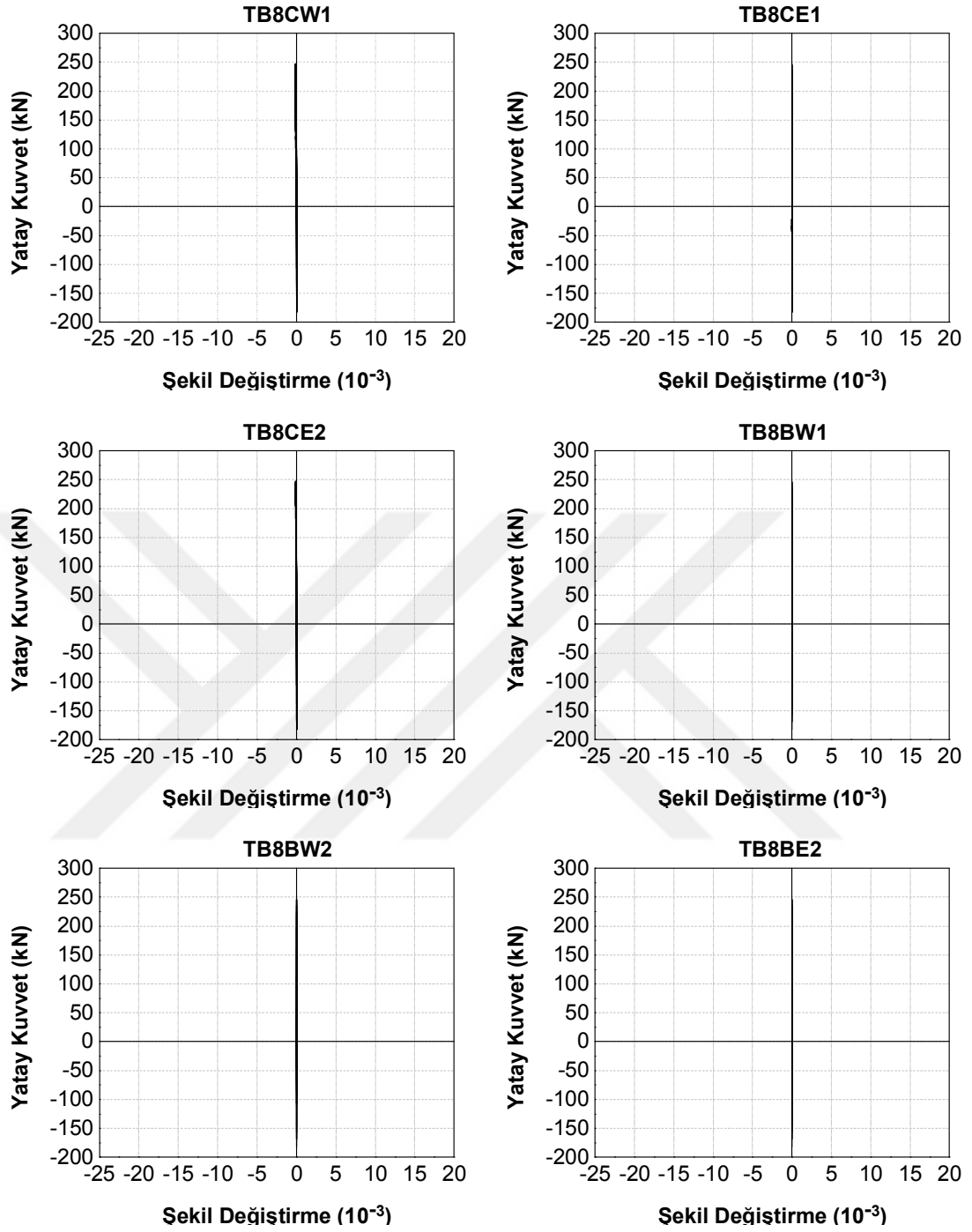
Şekil F.1 (devam) : TB-5 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



Şekil G. 1 : TB-8 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



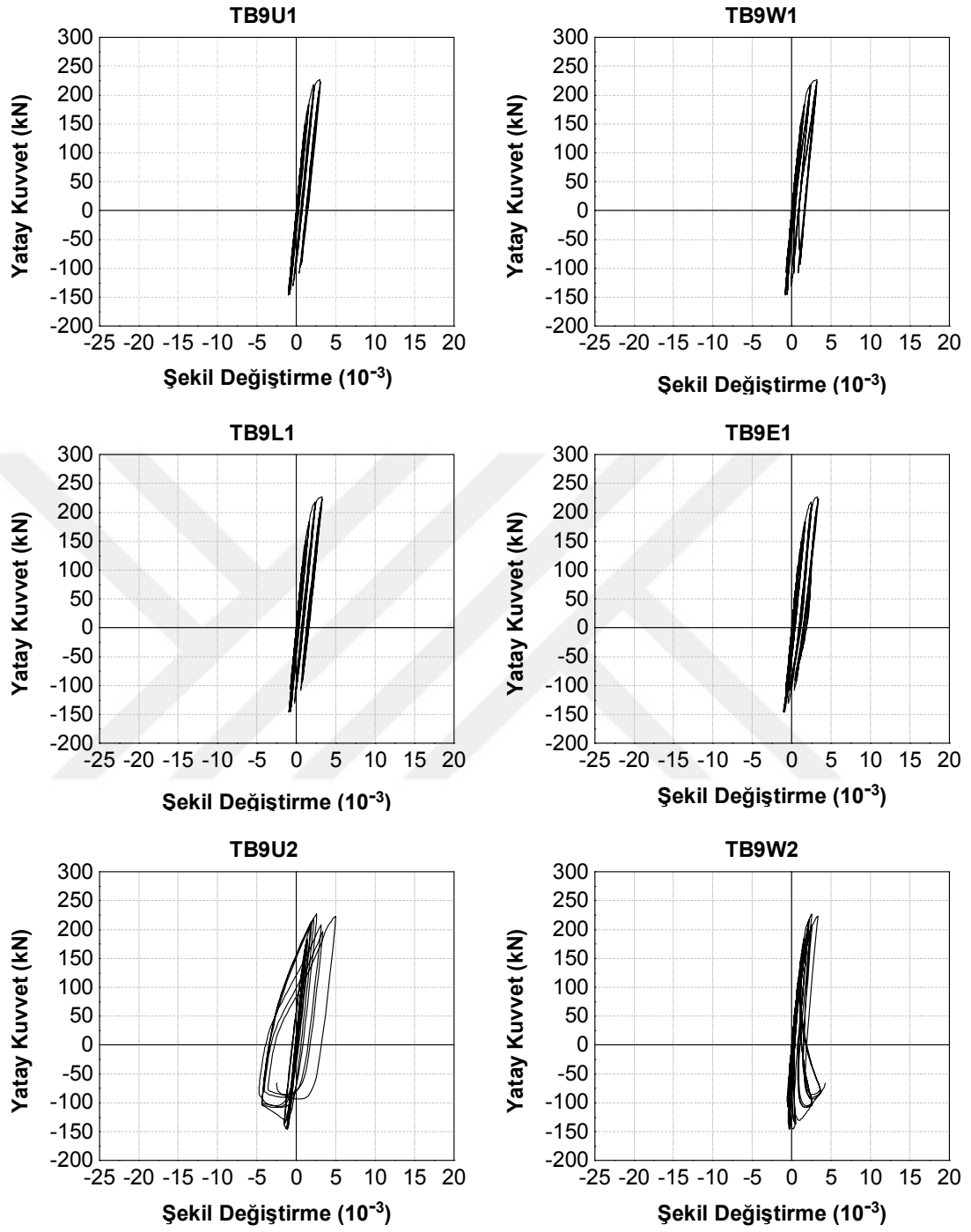
Şekil G.1 (devam) : TB-8 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.



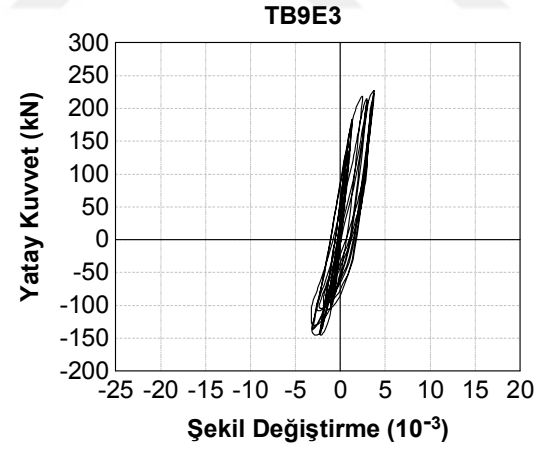
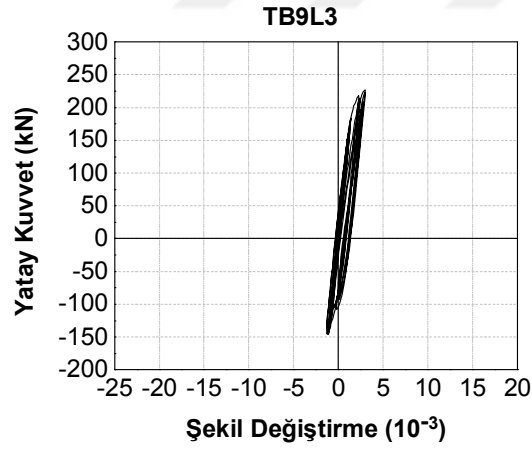
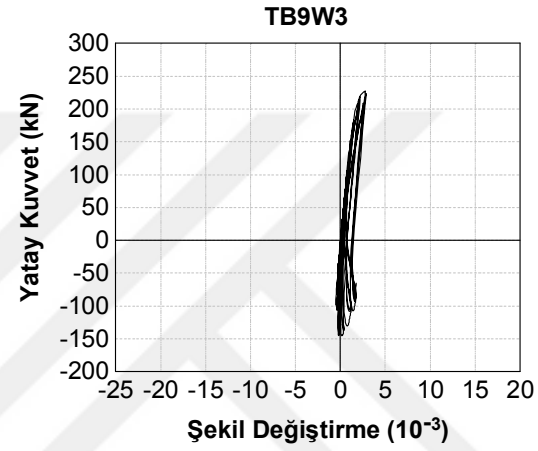
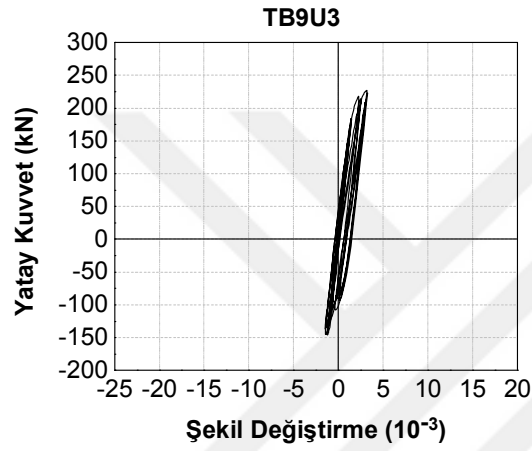
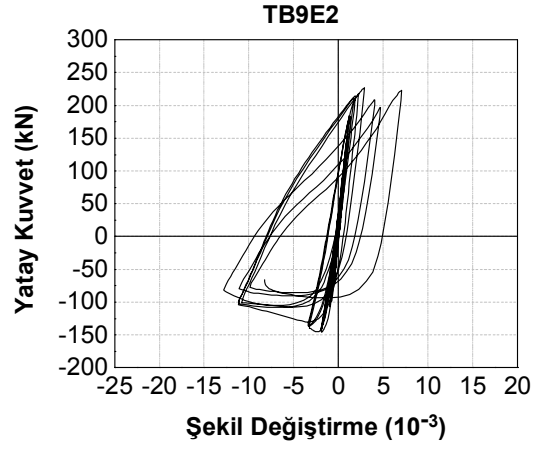
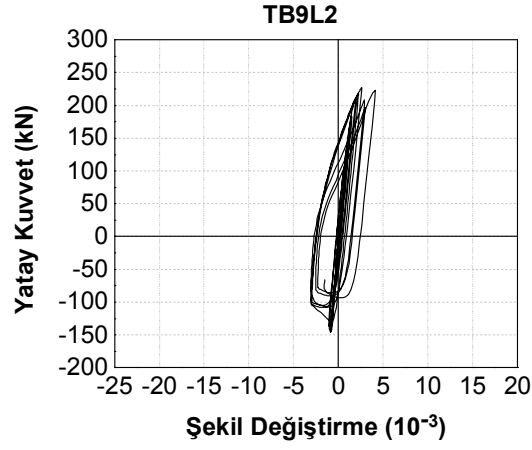
Şekil G.2 : Deney düzeneği yatay kuvvet – eksenel şekil değiştirme histeretik eğrileri.



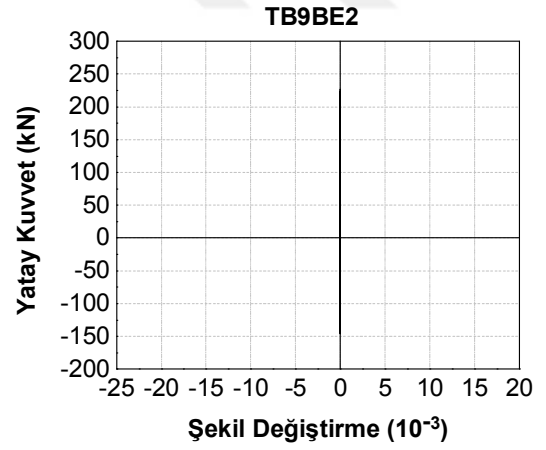
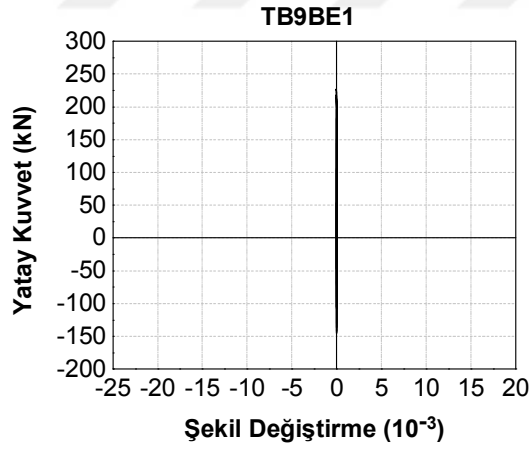
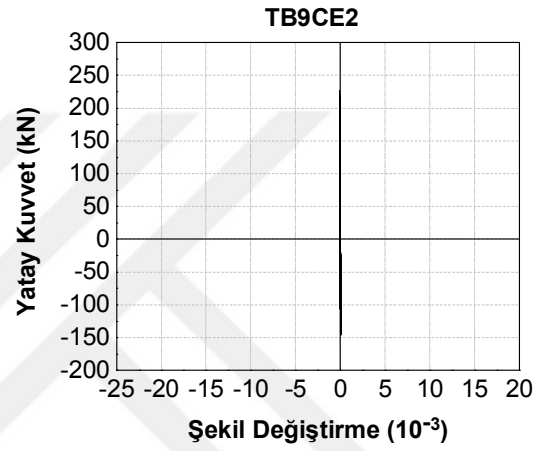
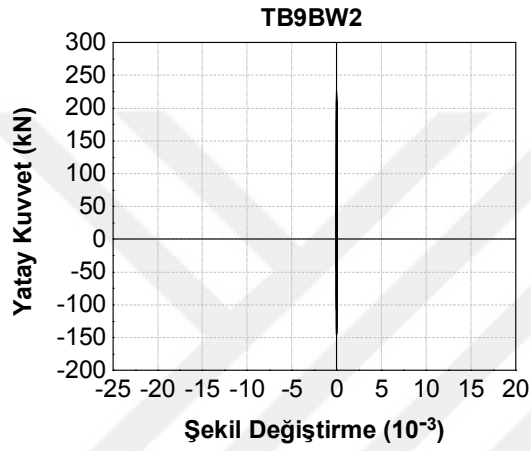
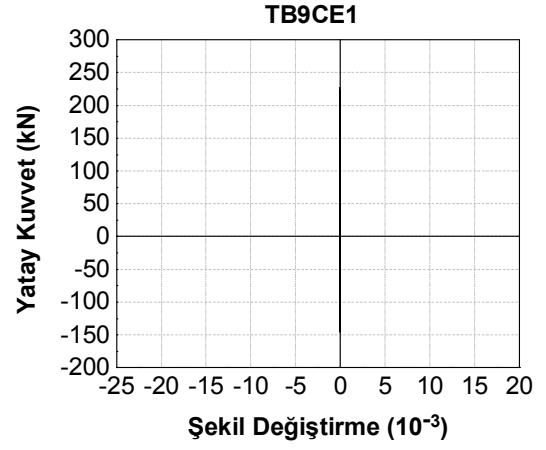
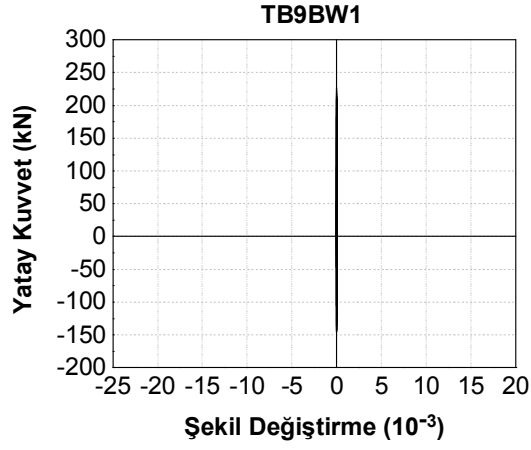
EK H



Şekil H.1 : TB-9 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



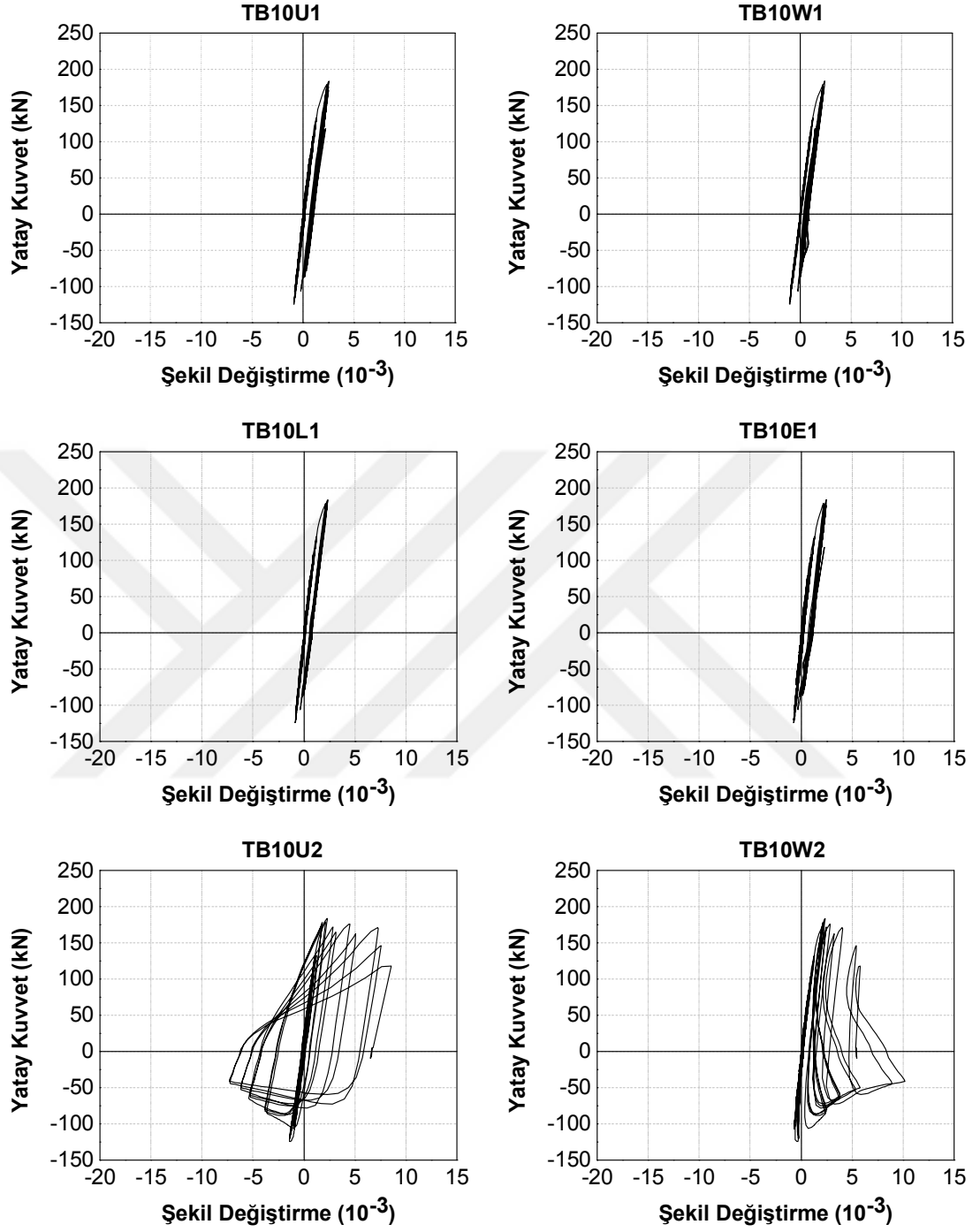
Şekil H.1 (devam) : TB-9 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



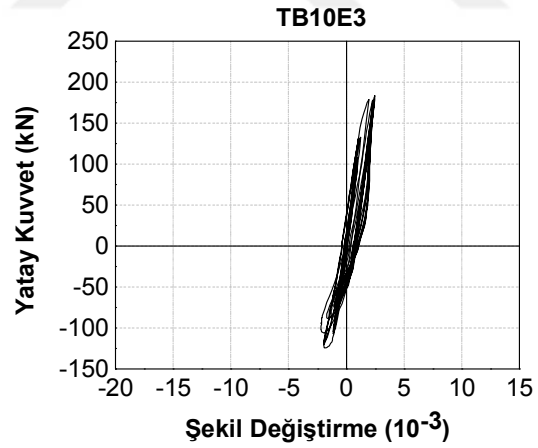
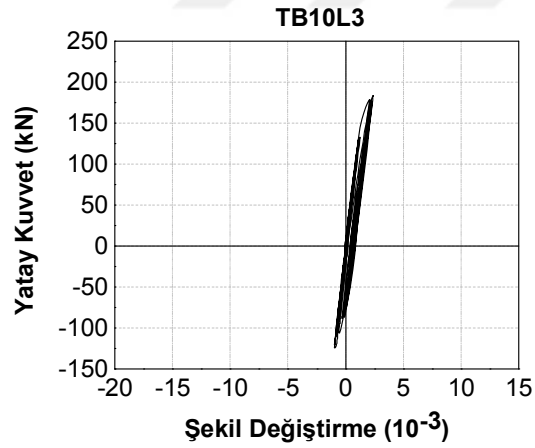
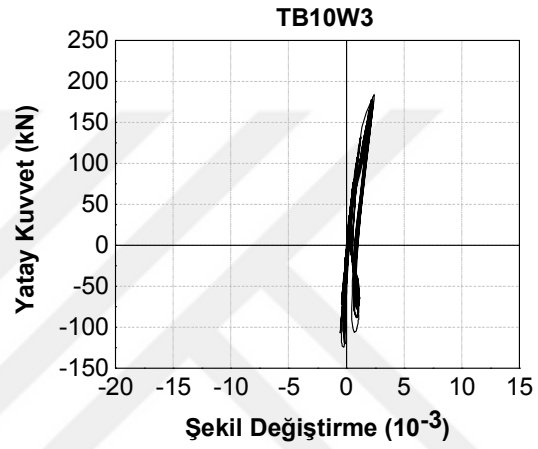
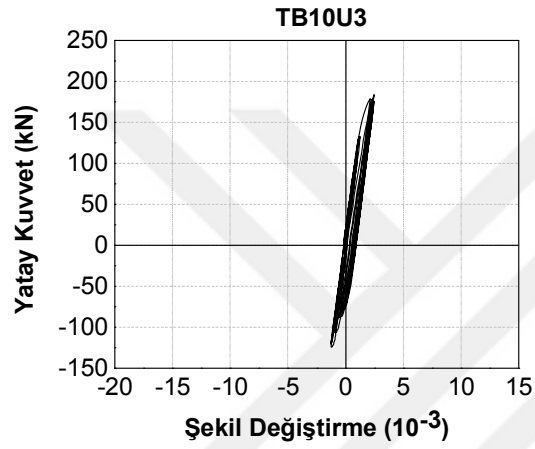
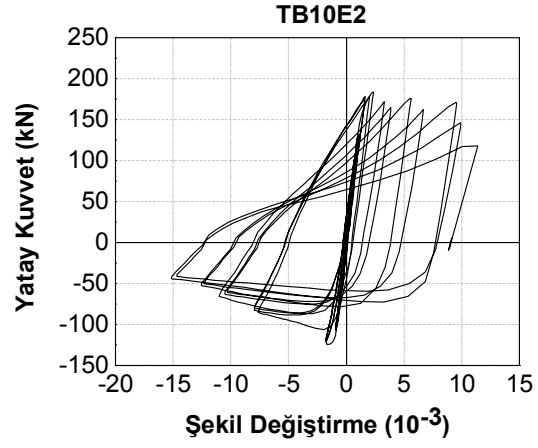
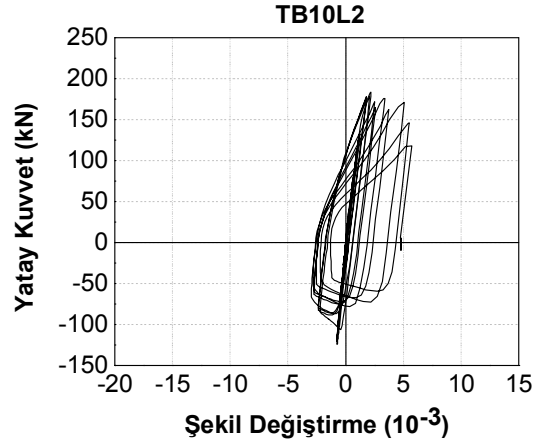
Şekil H.2 : Deney düzeneği yatay kuvvet – eksenel şekildeğiştirme histeretik eğrileri.



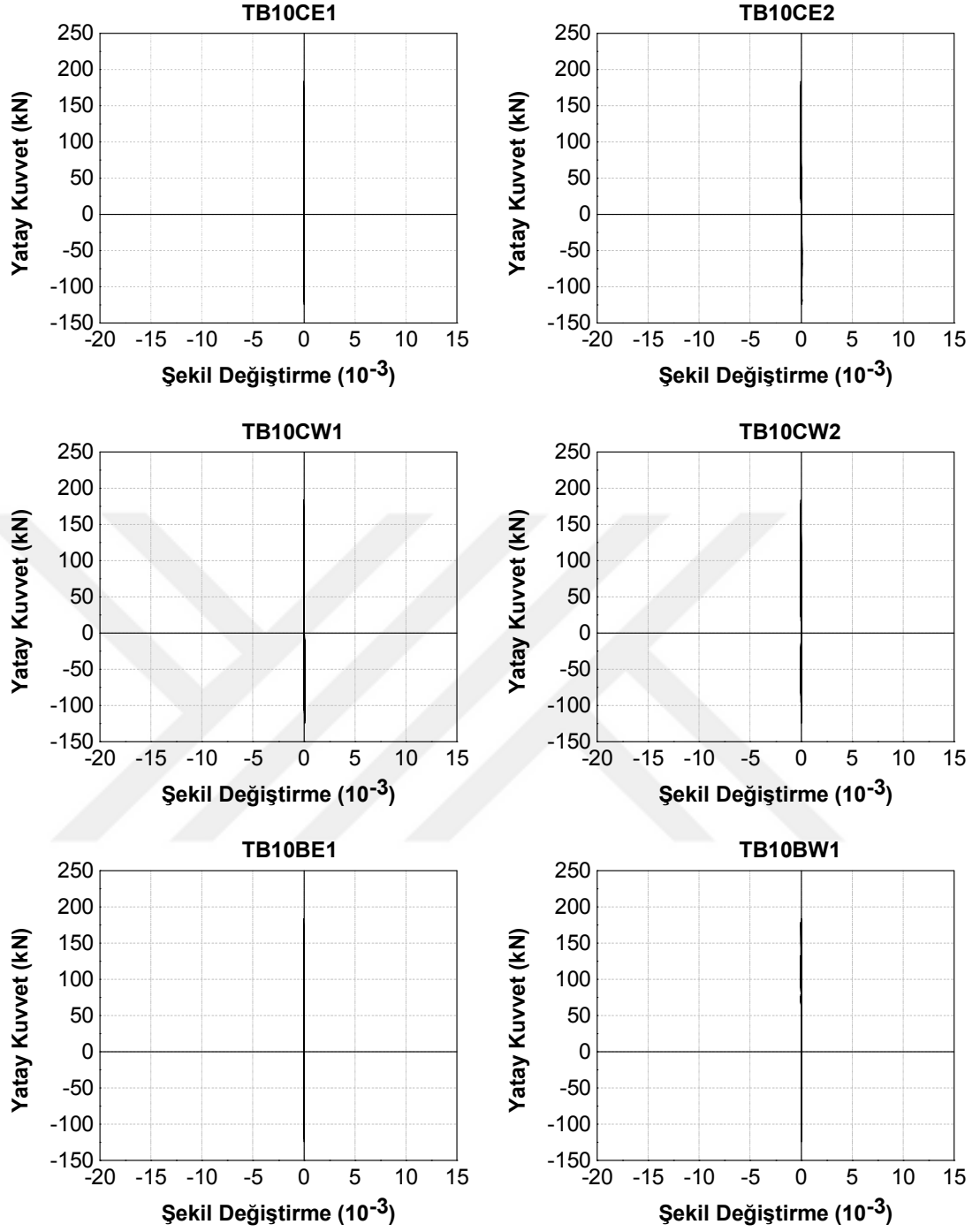
EK I



Şekil I.1 : TB-10 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



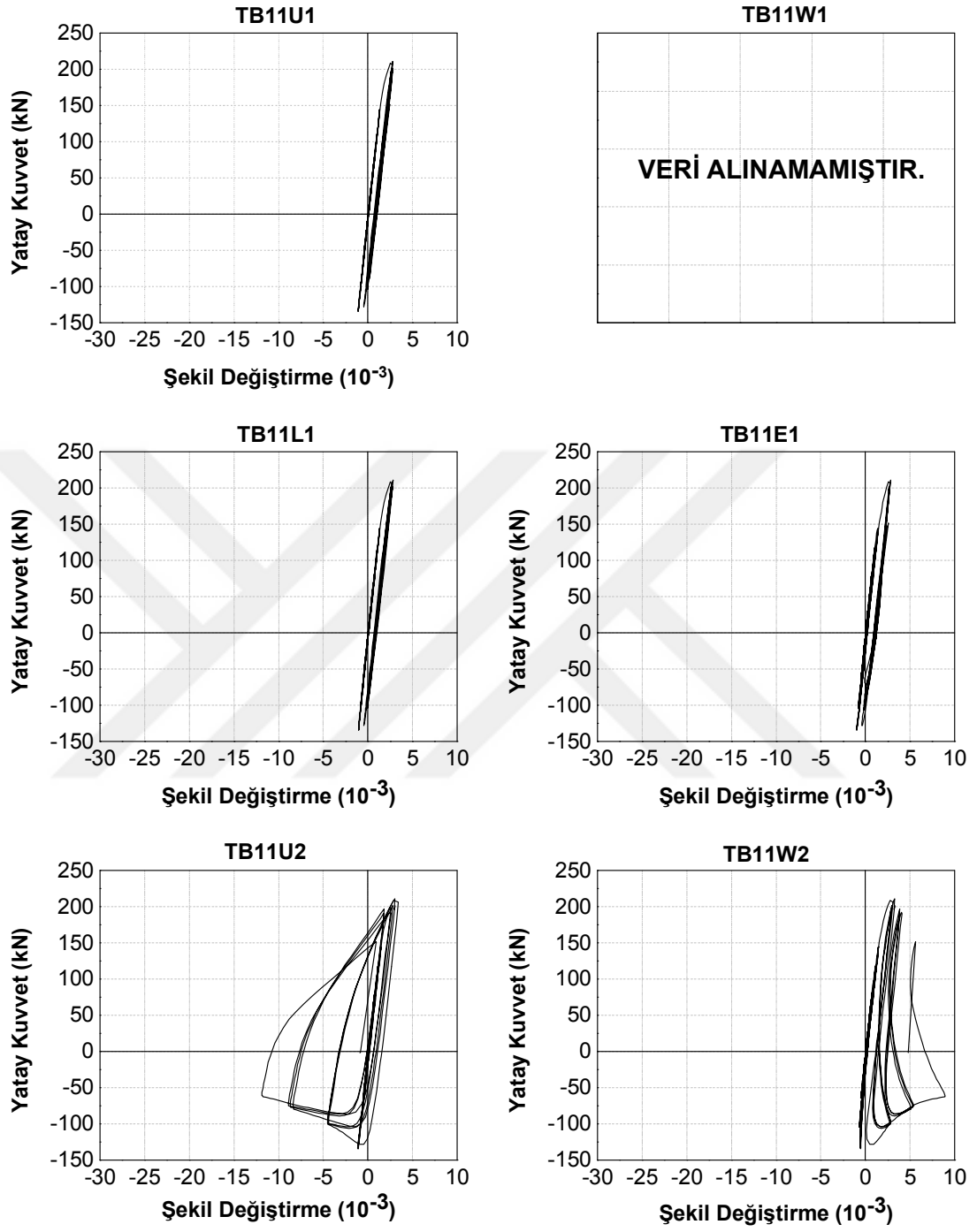
Şekil I.1 (devam) : TB-10 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



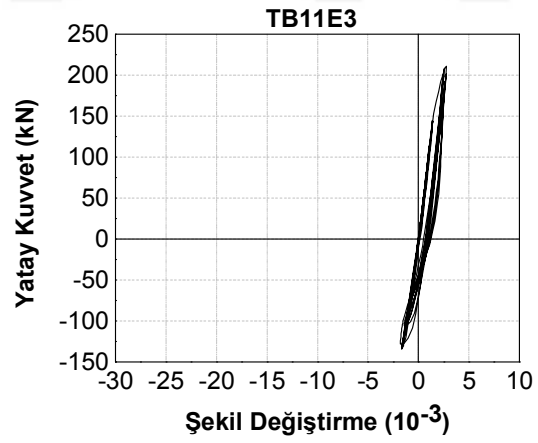
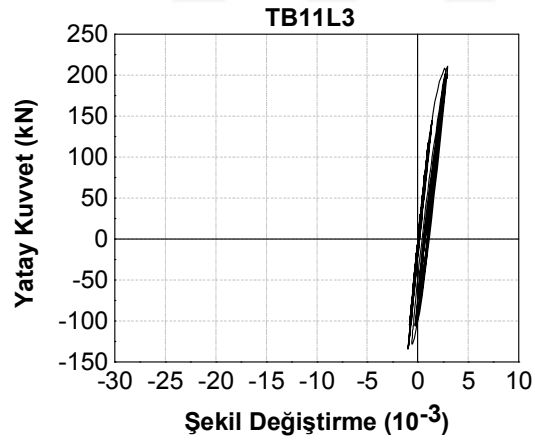
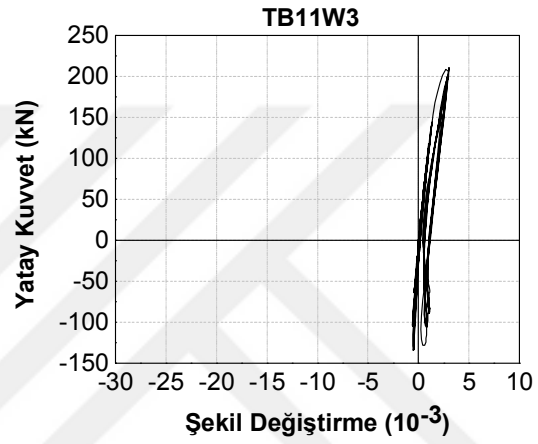
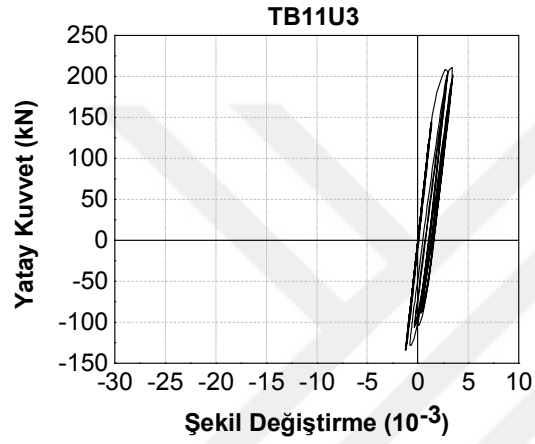
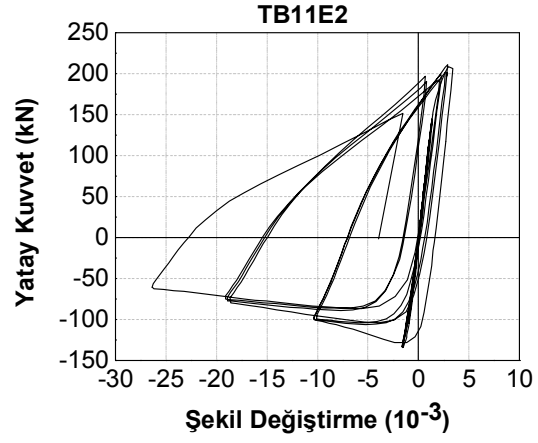
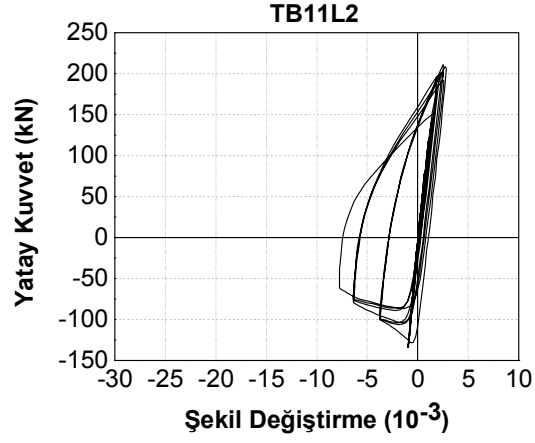
Şekil I.2 : Deney düzeneği yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



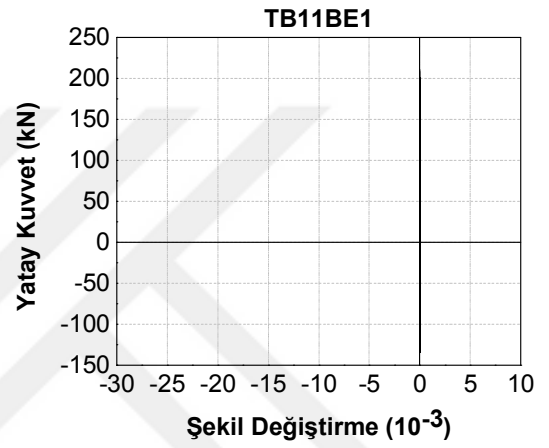
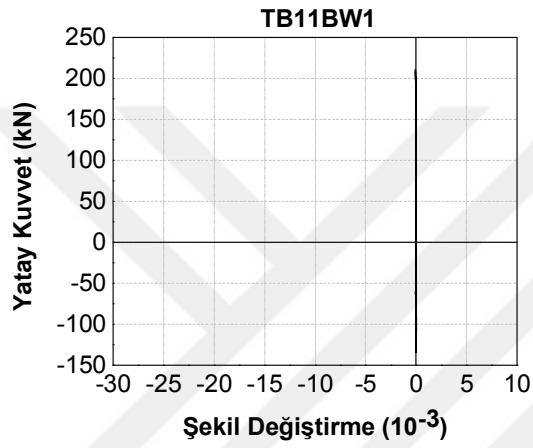
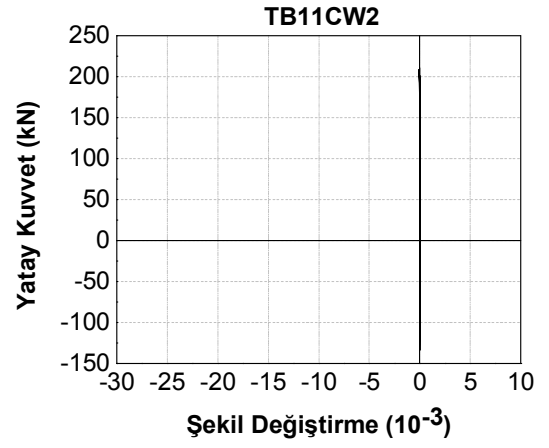
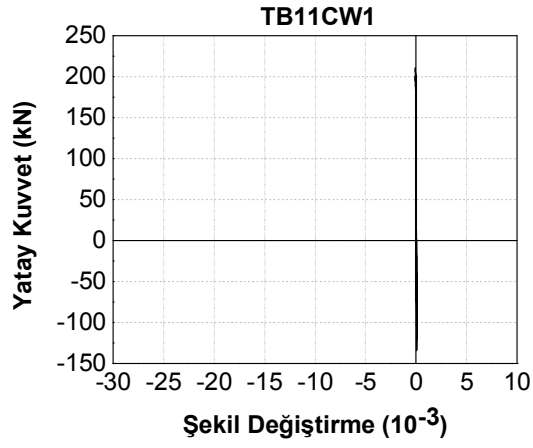
EK J



Şekil J.1 : TB-11 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.

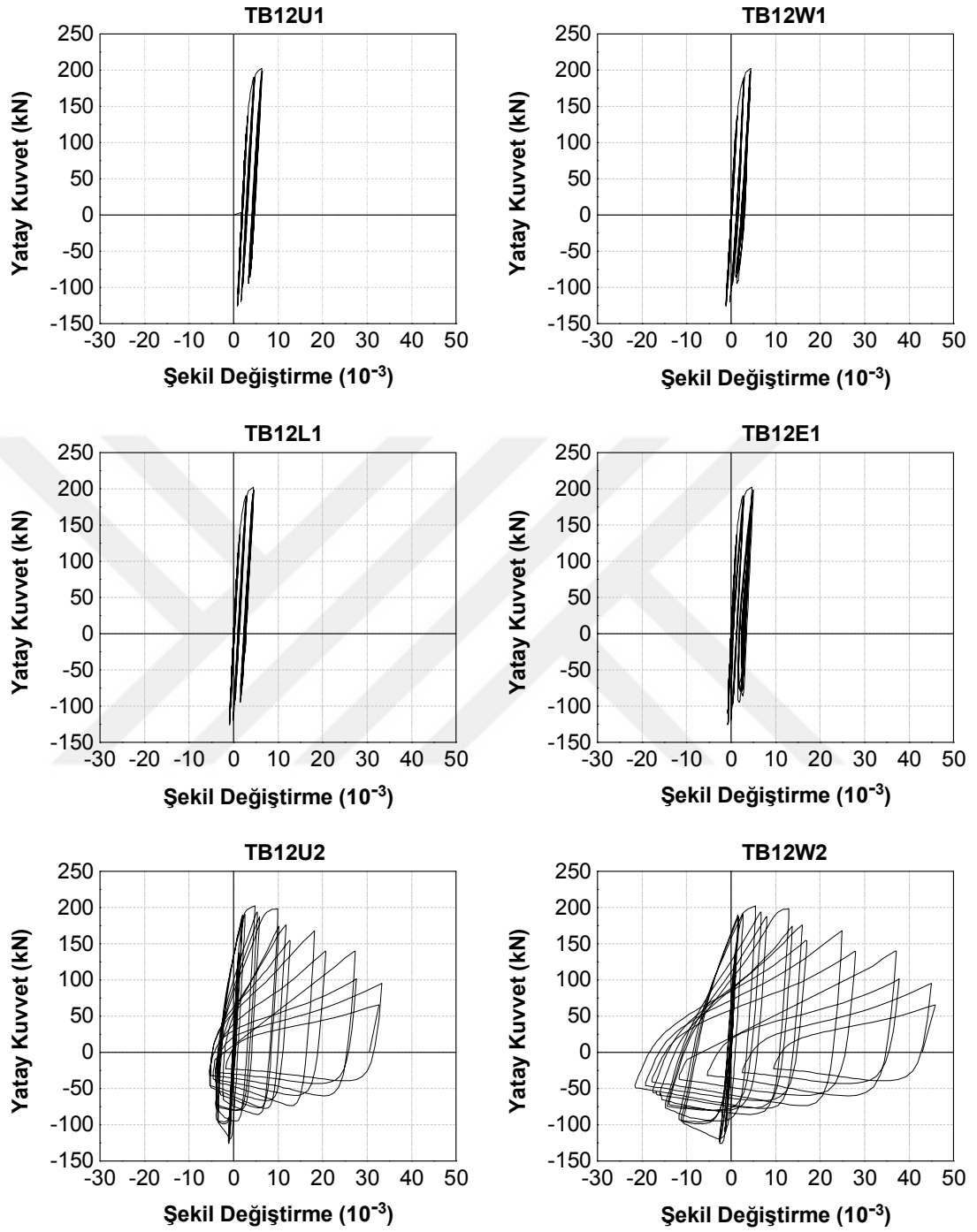


Şekil J.1 (devam) : TB-11 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.

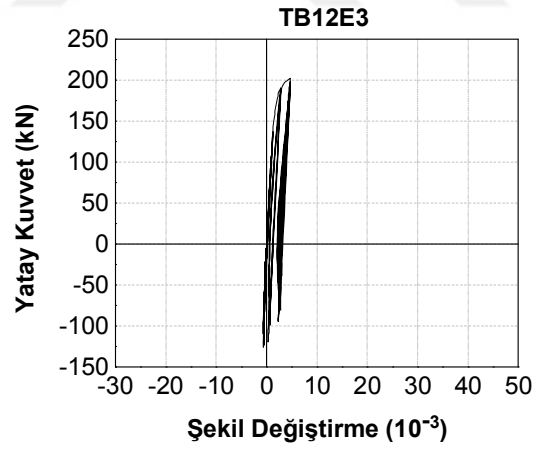
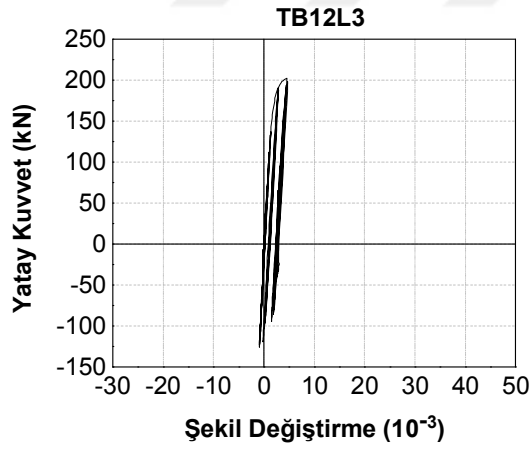
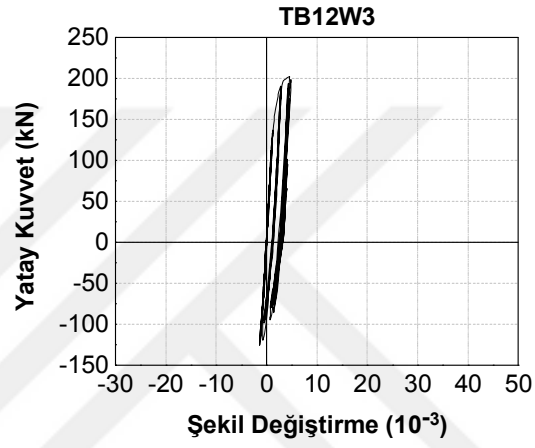
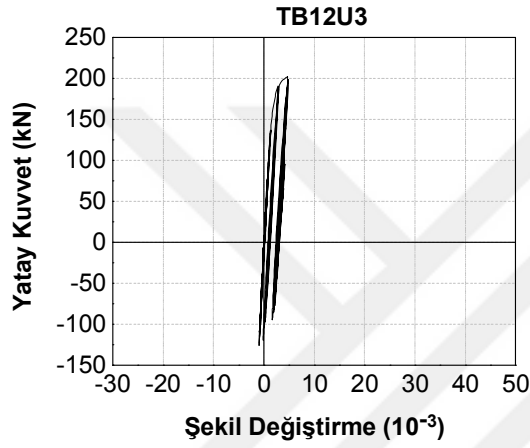
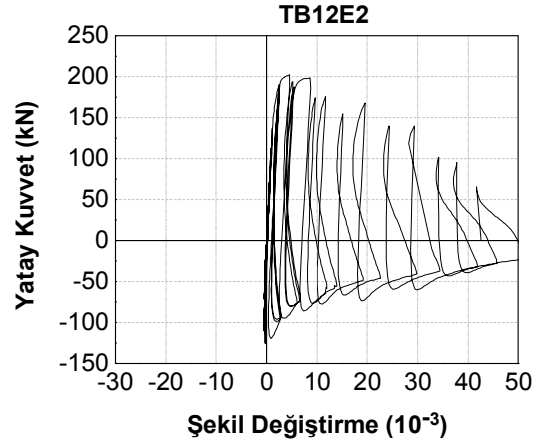
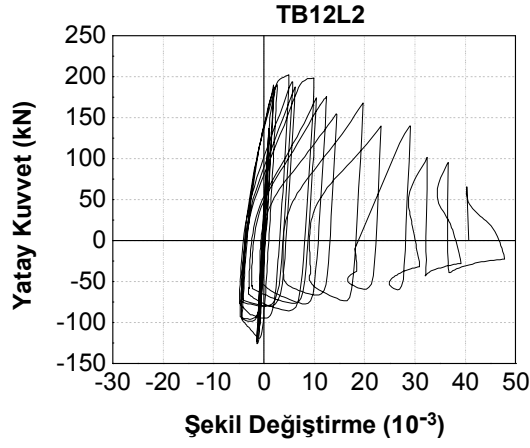


Şekil J.2 : Deney düzeneği yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.

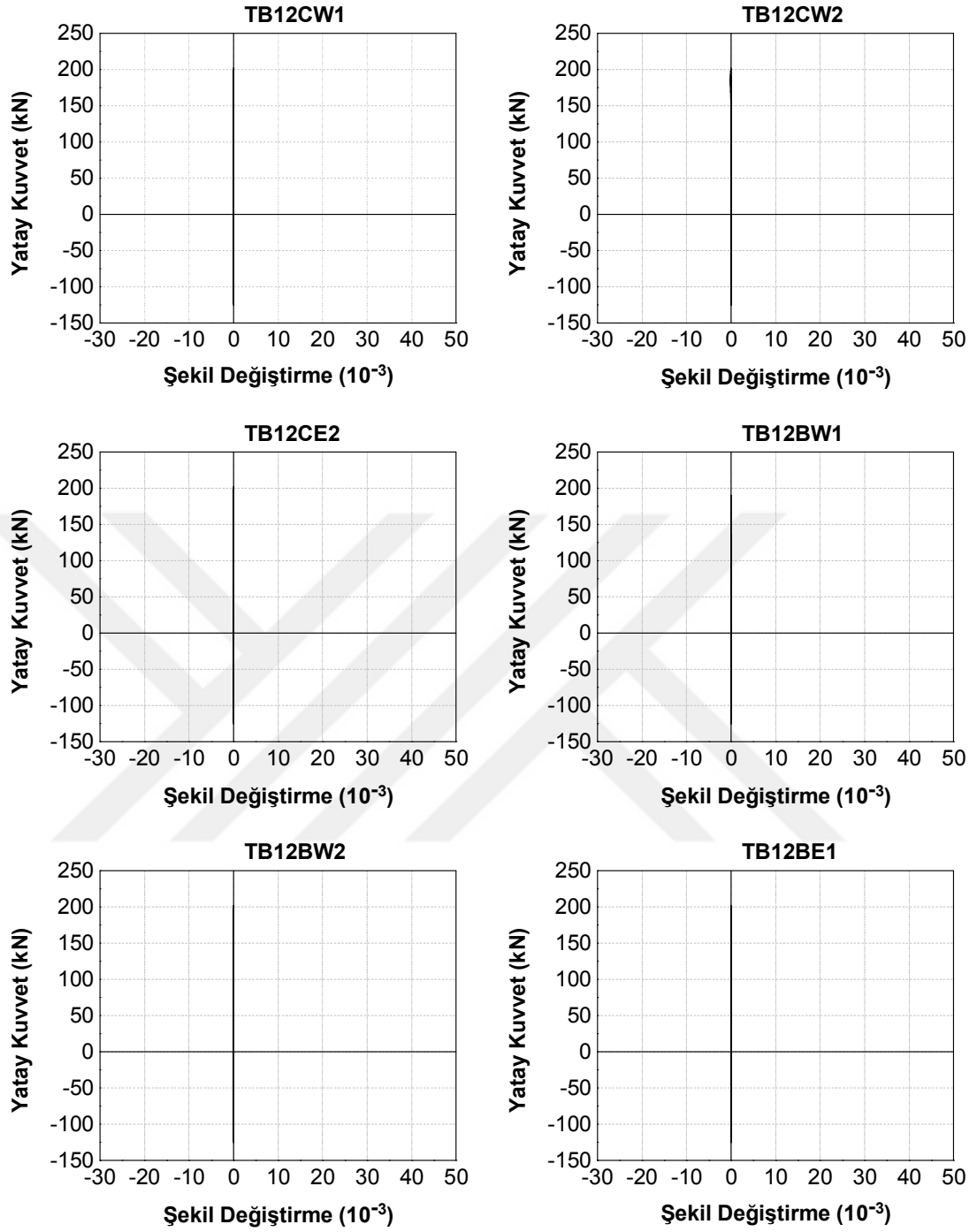




Şekil K.1 : TB-12 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



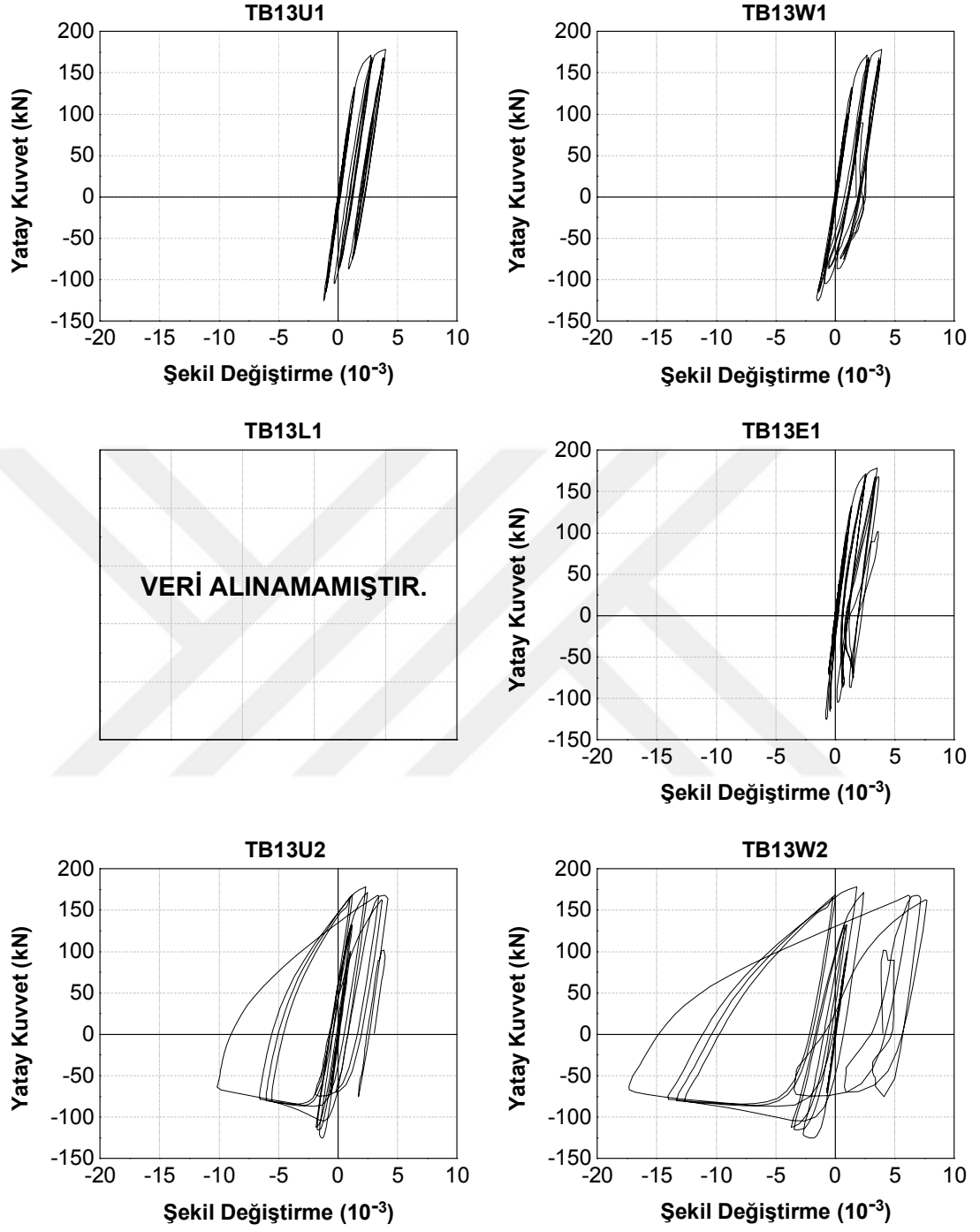
Şekil K.1 (devam) : TB-12 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



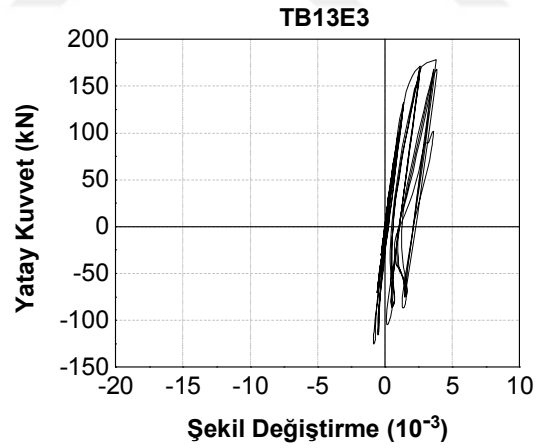
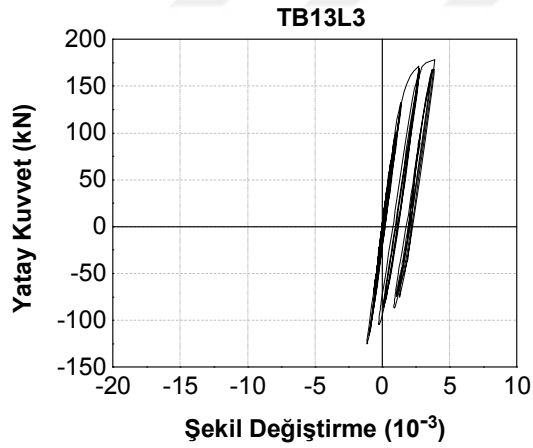
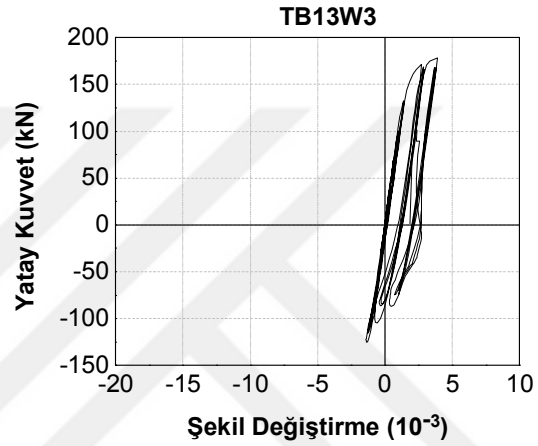
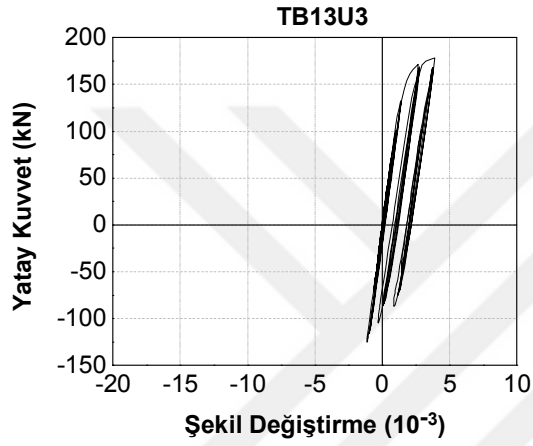
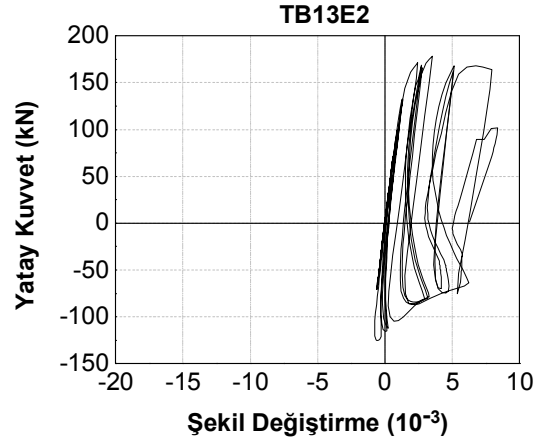
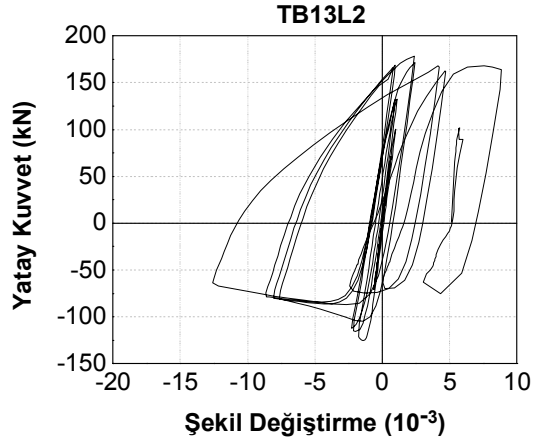
Şekil K.2 : Deney düzeneği yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



EK L

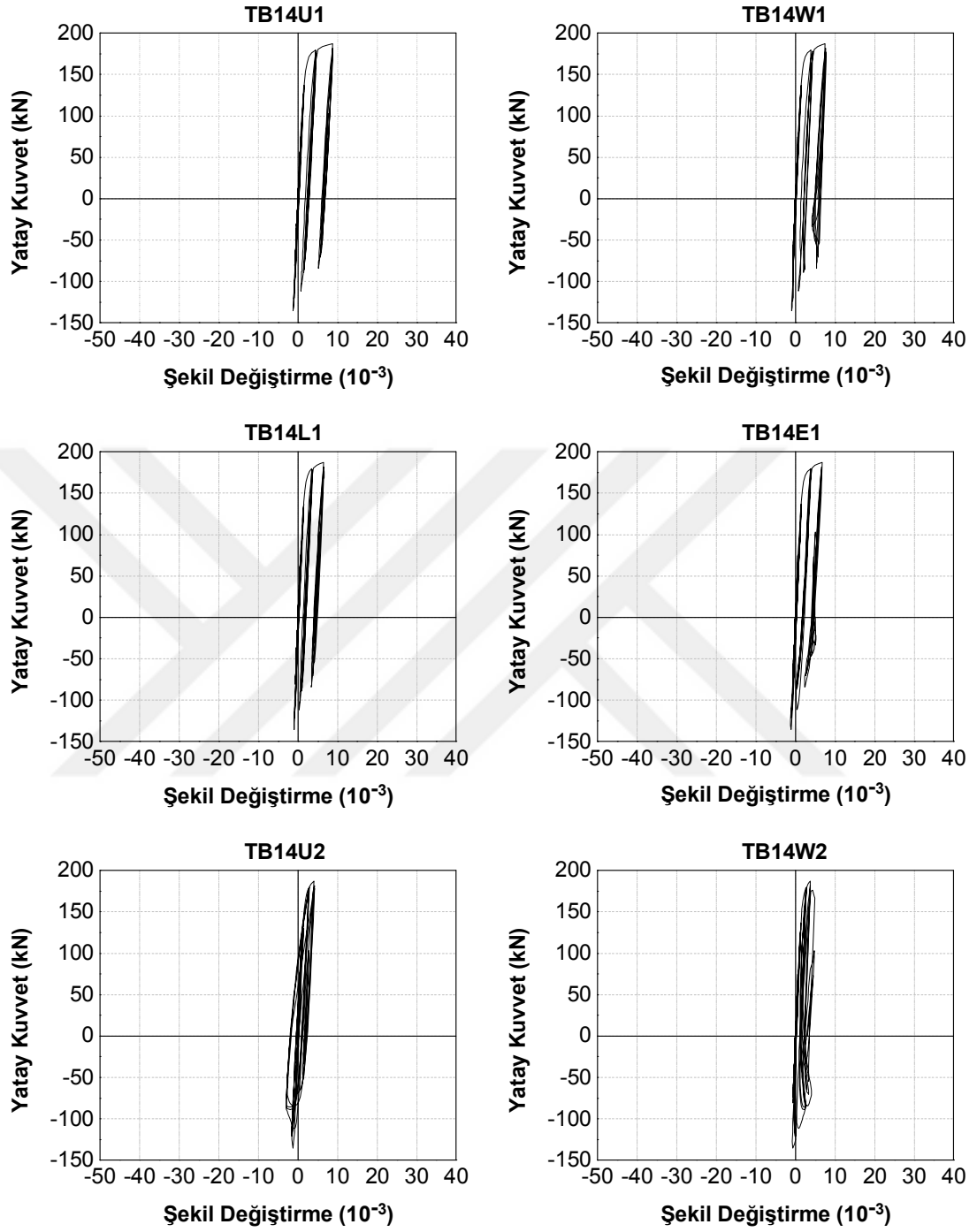


Şekil L.1 : TB-13 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.

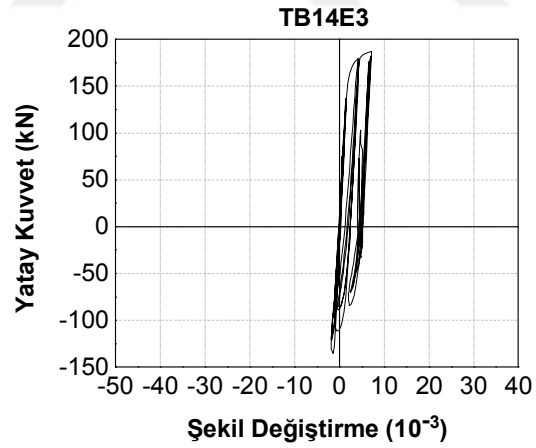
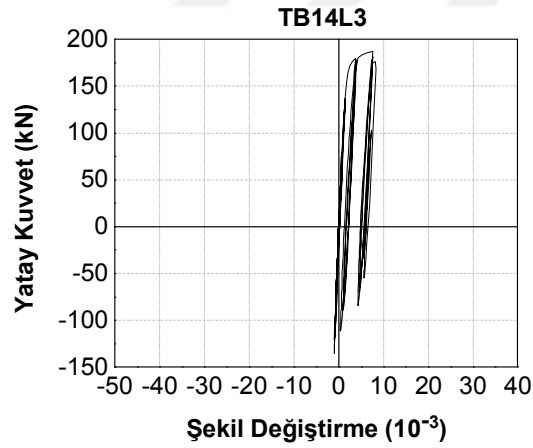
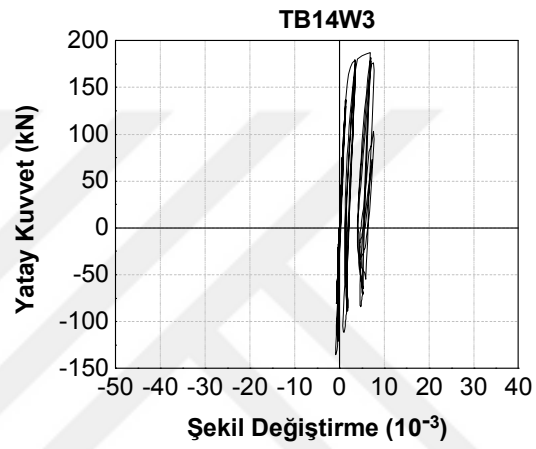
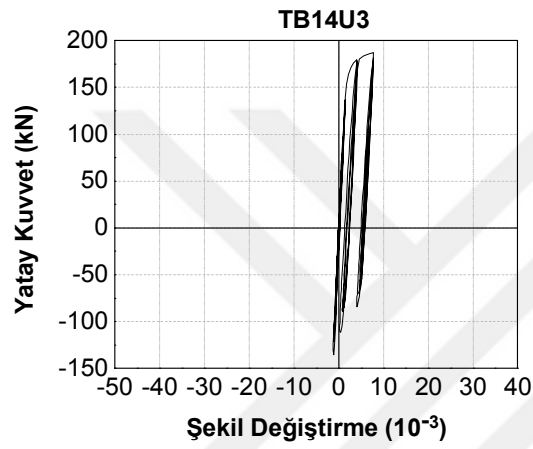
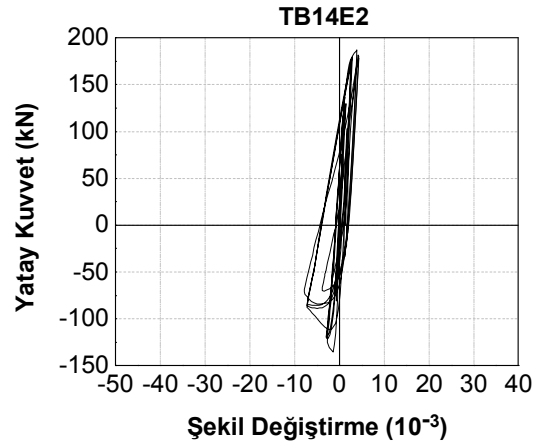
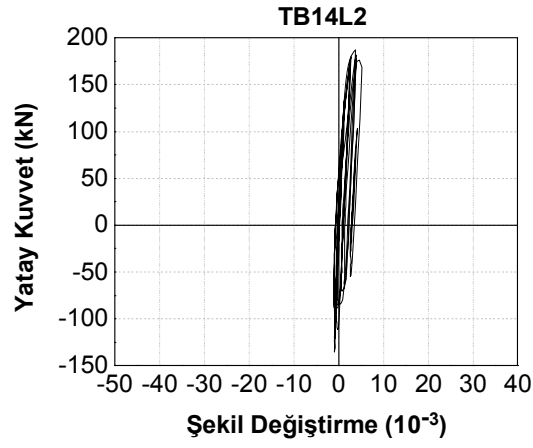


Şekil L.1 (devam) : TB-13 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.

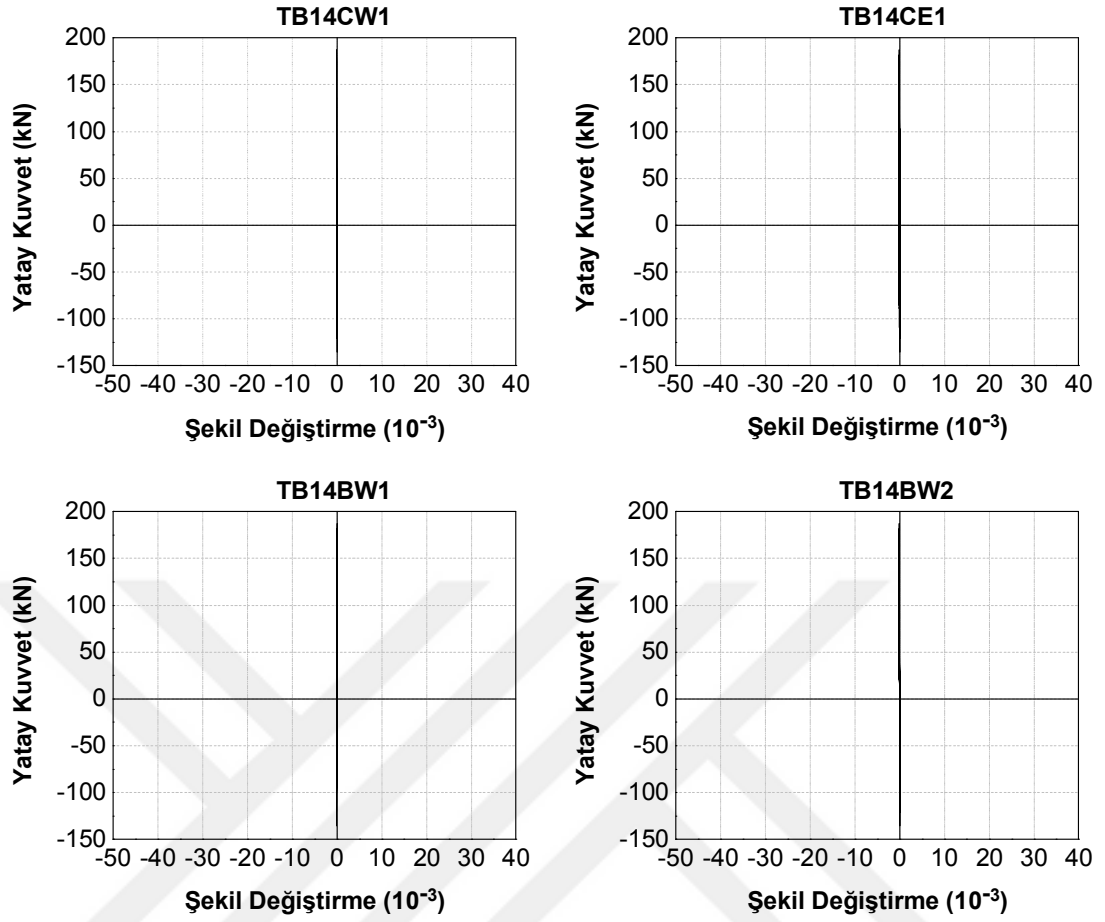
EK M



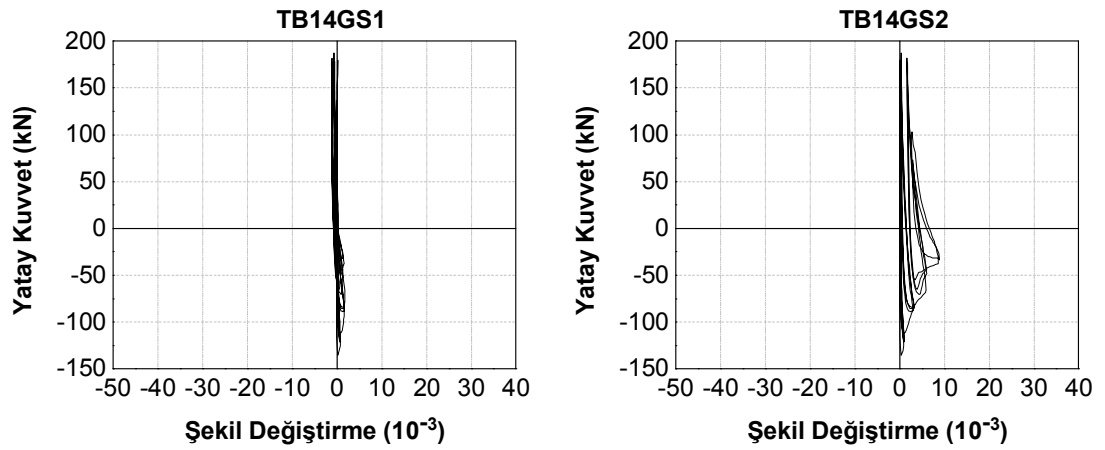
Şekil M.1 : TB-14 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



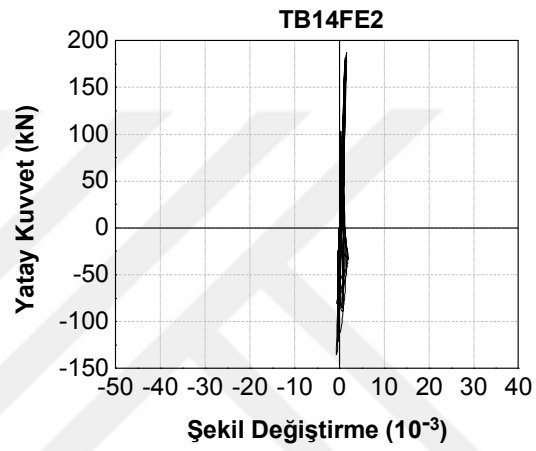
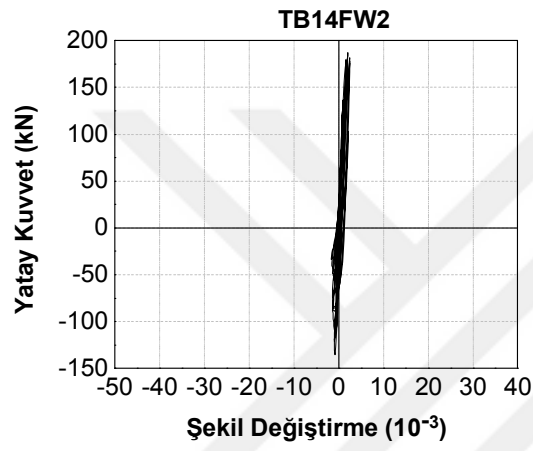
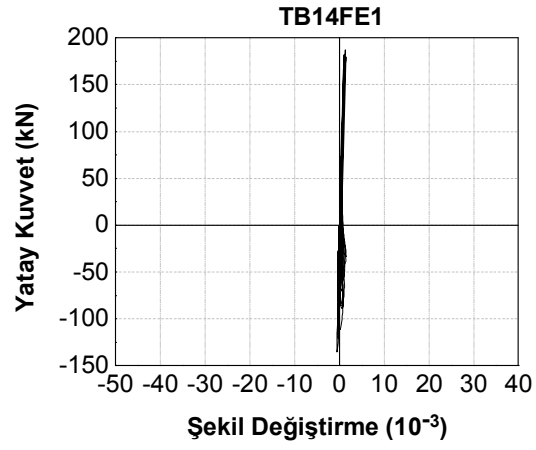
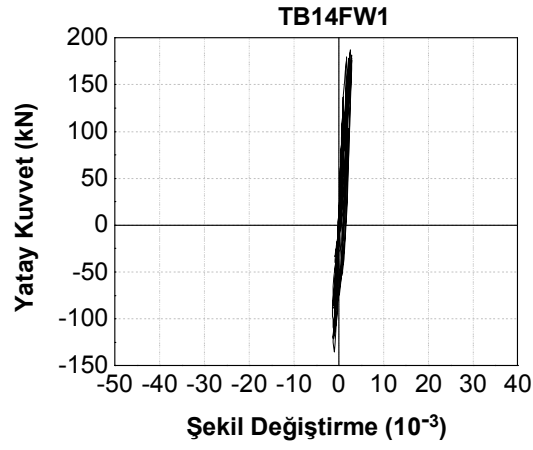
Şekil M.1 (devam) : TB-14 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



Şekil M.2 : Deney düzeneği yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.

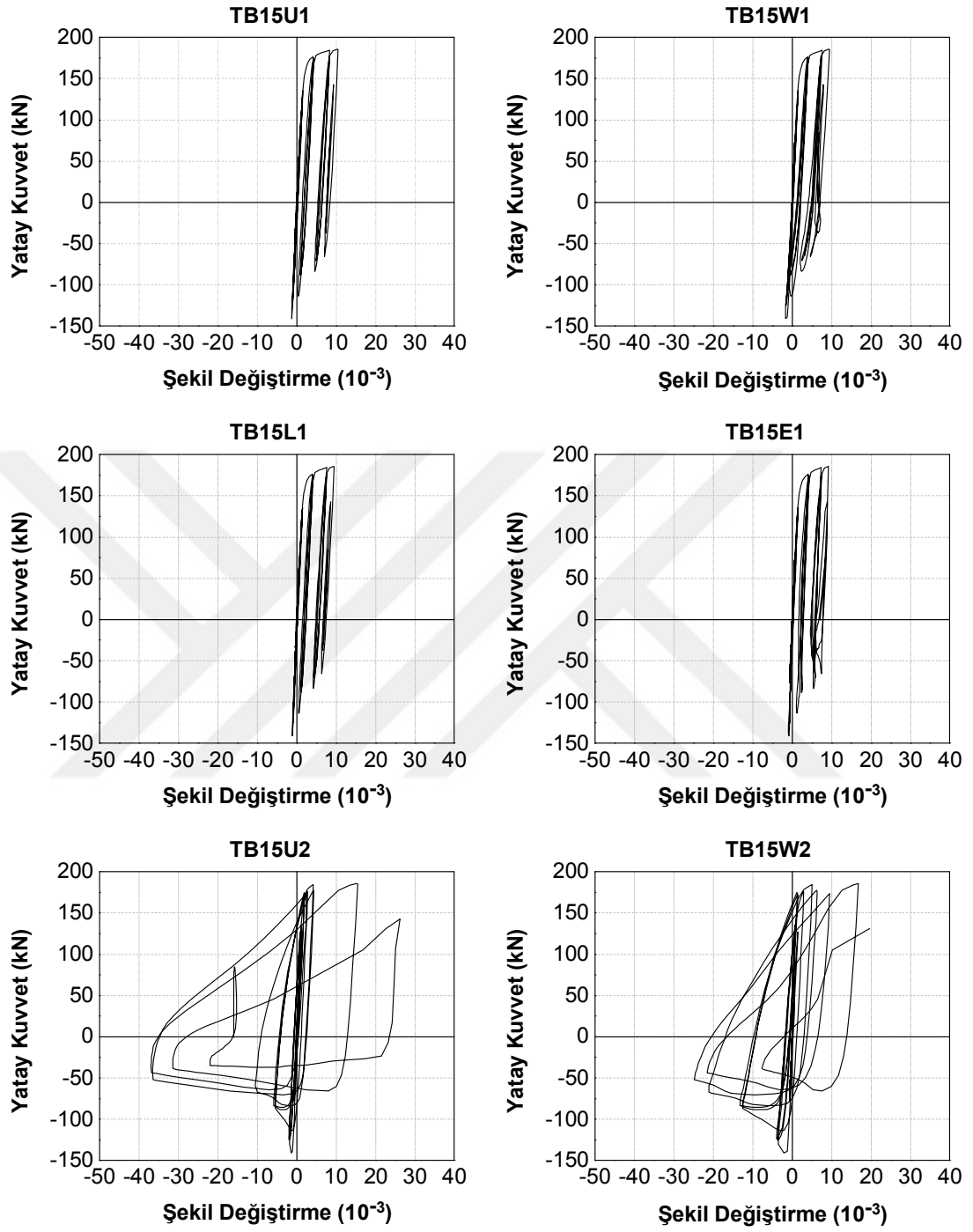


Şekil M.3 : Bayrak levhaları yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.

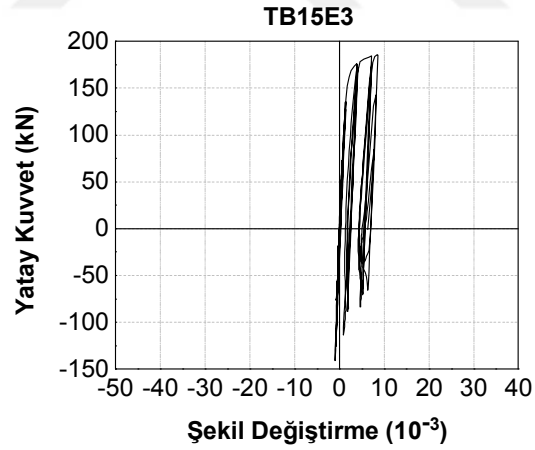
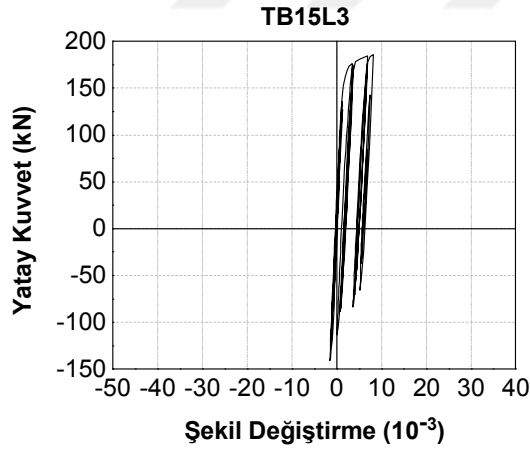
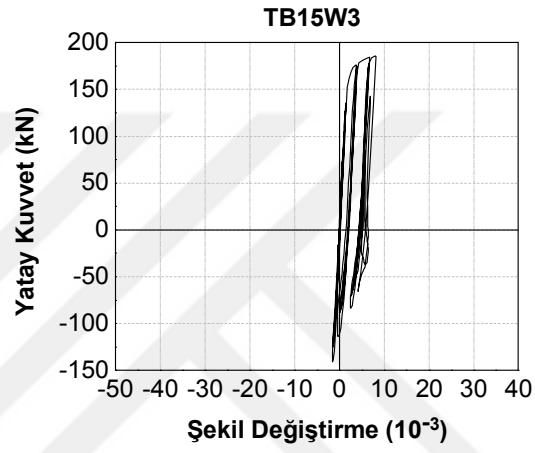
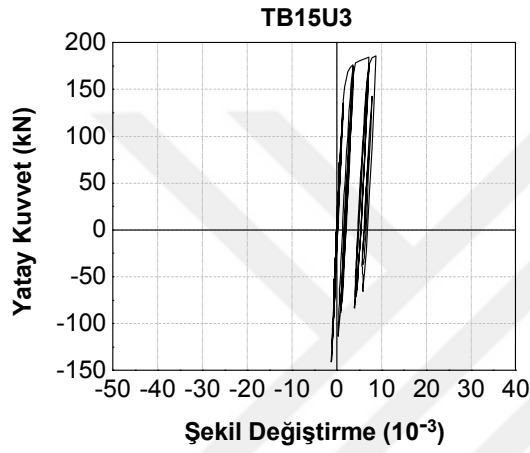
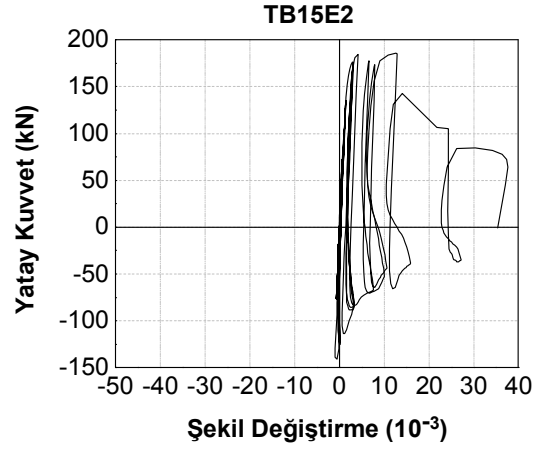
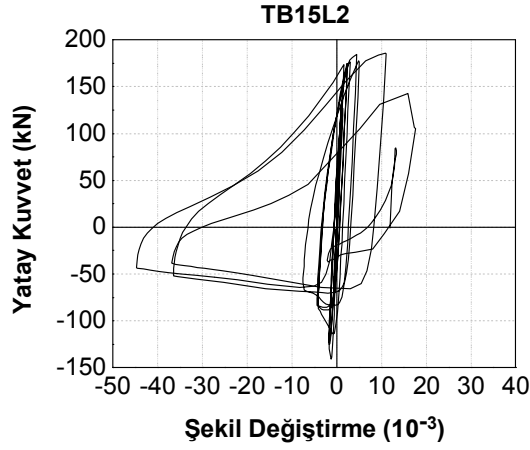


Şekil M.4 : CFRP plakalar yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.

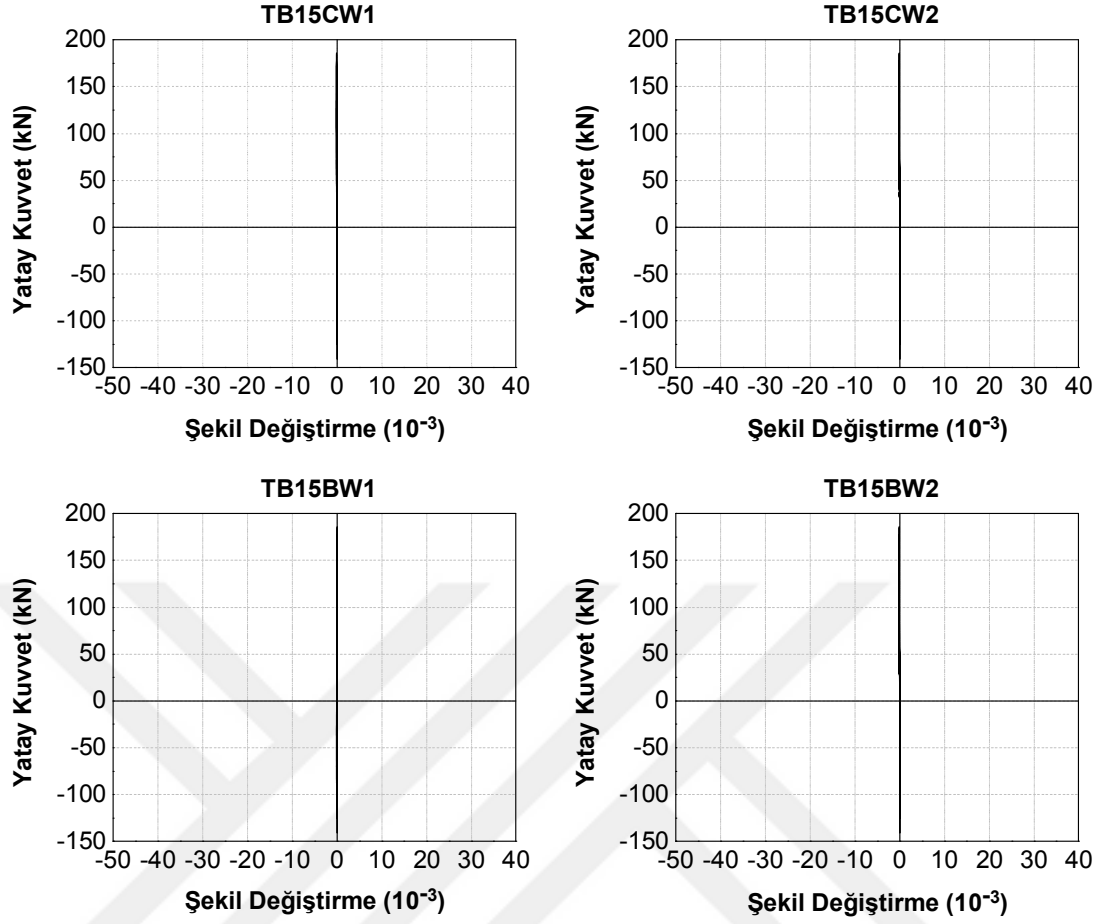
EK N



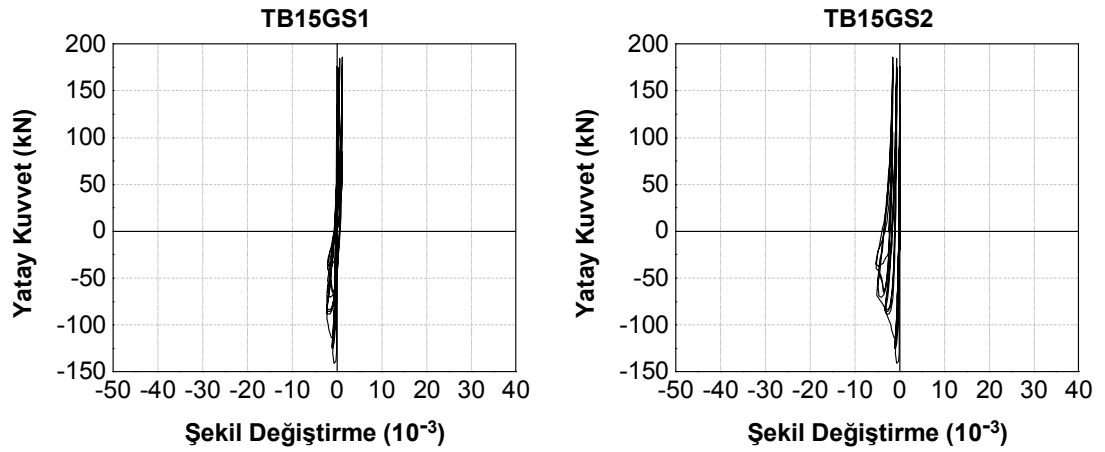
Şekil N.1 : TB-15 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



Şekil N.1 (devam) : TB-15 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



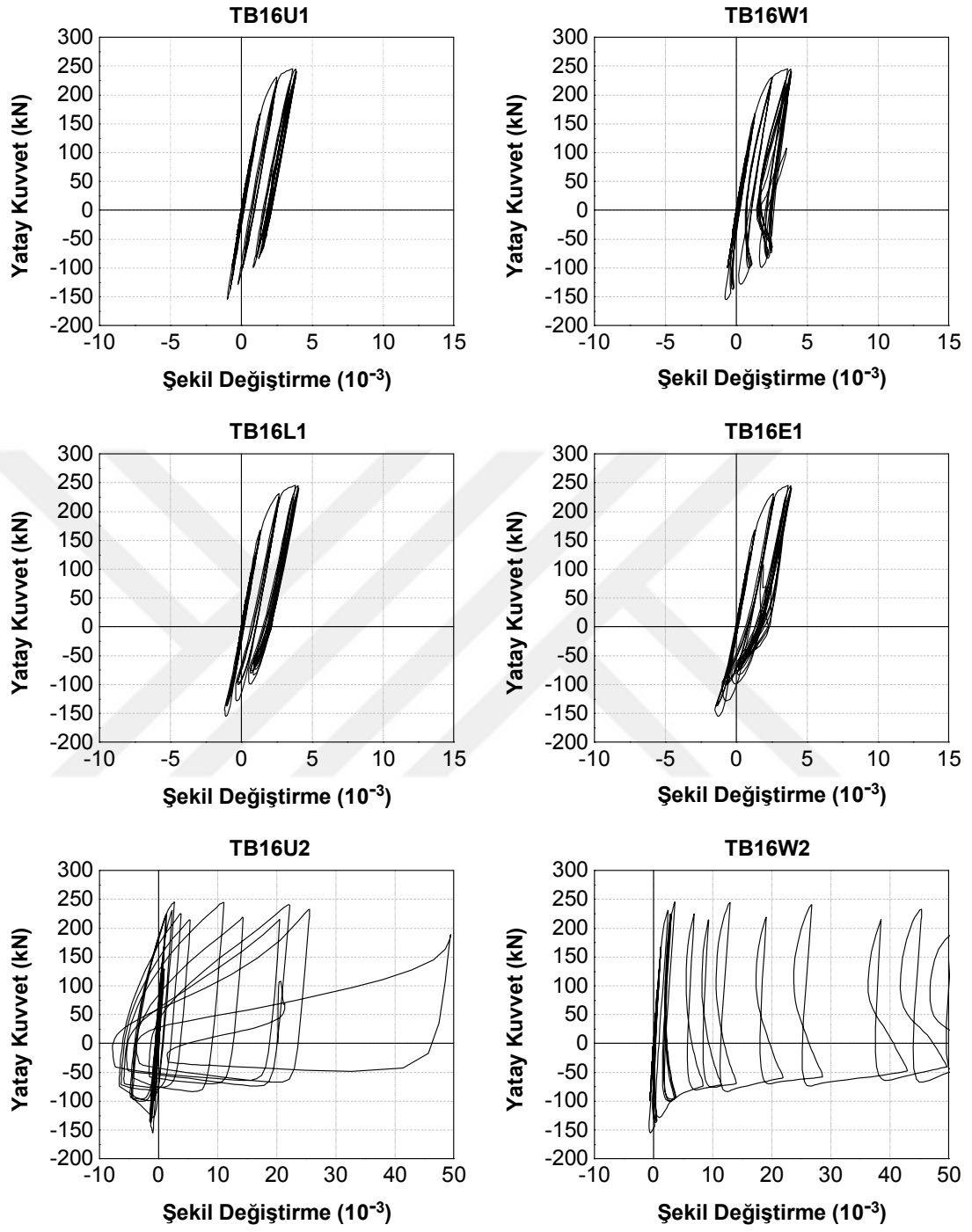
Şekil N.2 : Deney düzeneği yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



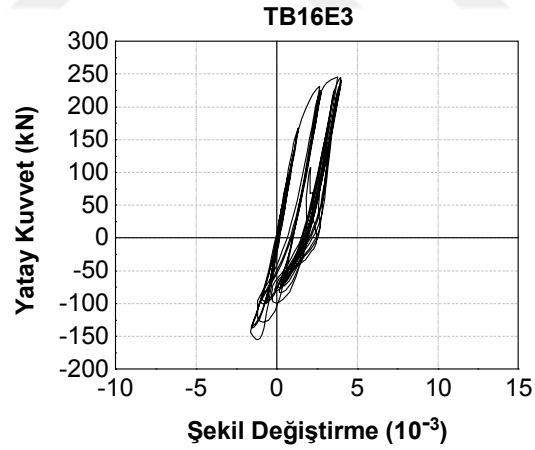
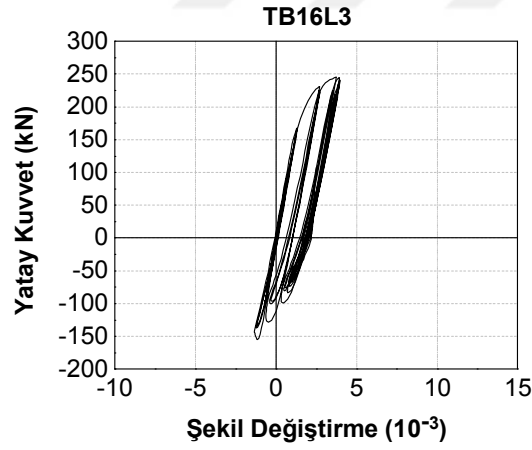
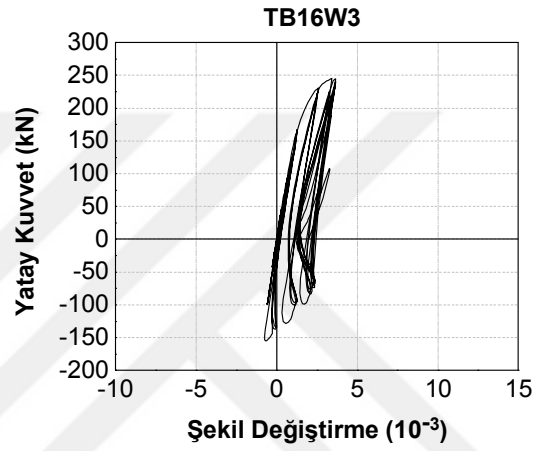
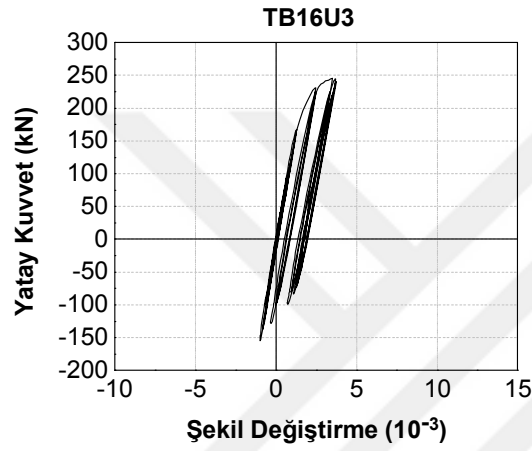
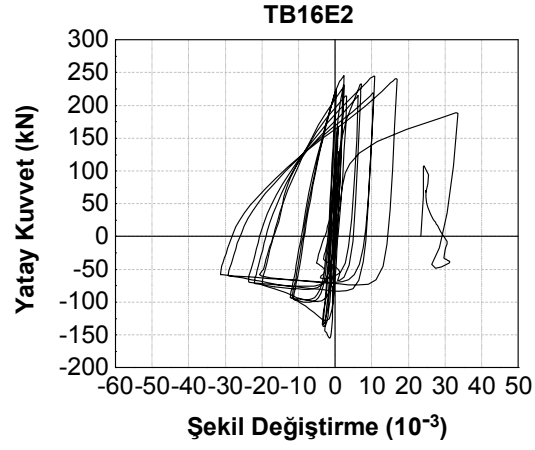
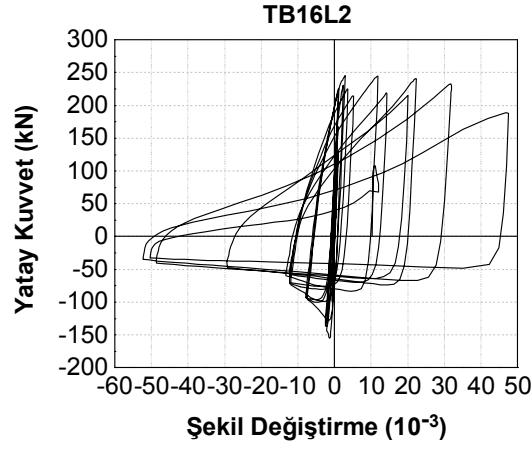
Şekil N.3 : Bayrak levhaları yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



EK O

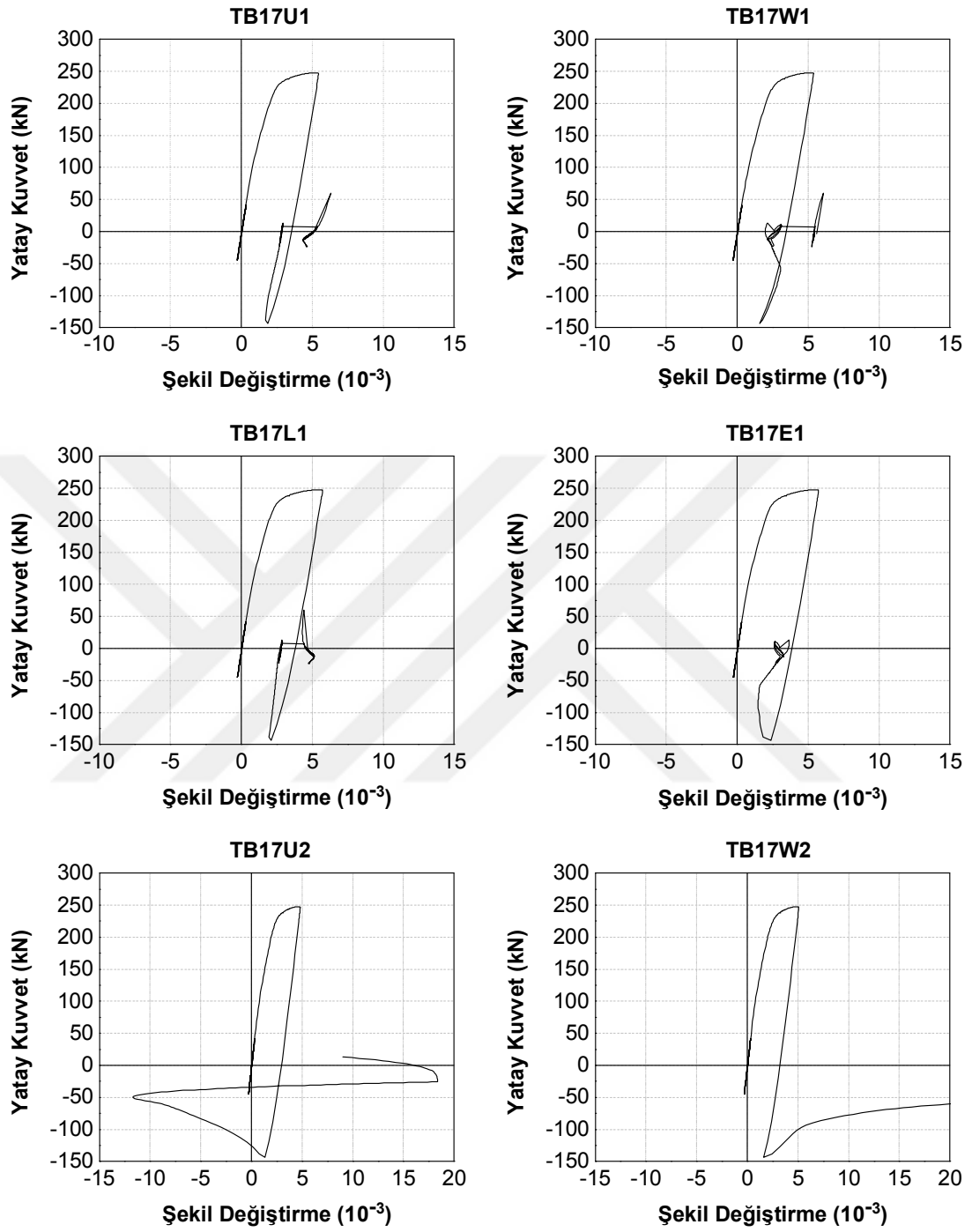


Şekil O.1 : TB-16 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



Şekil O.1 (devam) : TB-16 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.

EK P

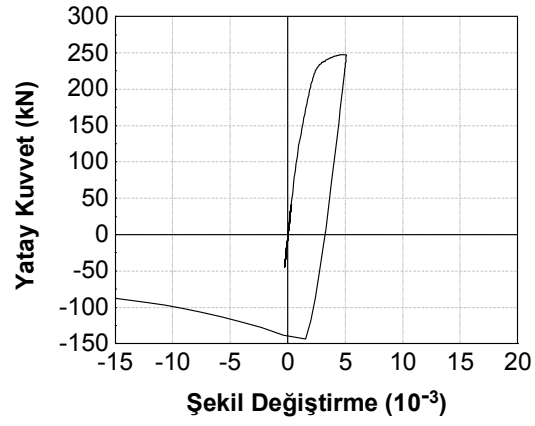


Şekil P.1 : TB-17 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.

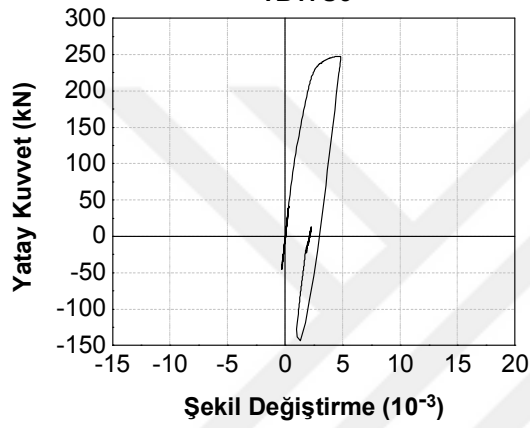
TB17L2



TB17E2



TB17U3



TB17W3



TB17L3

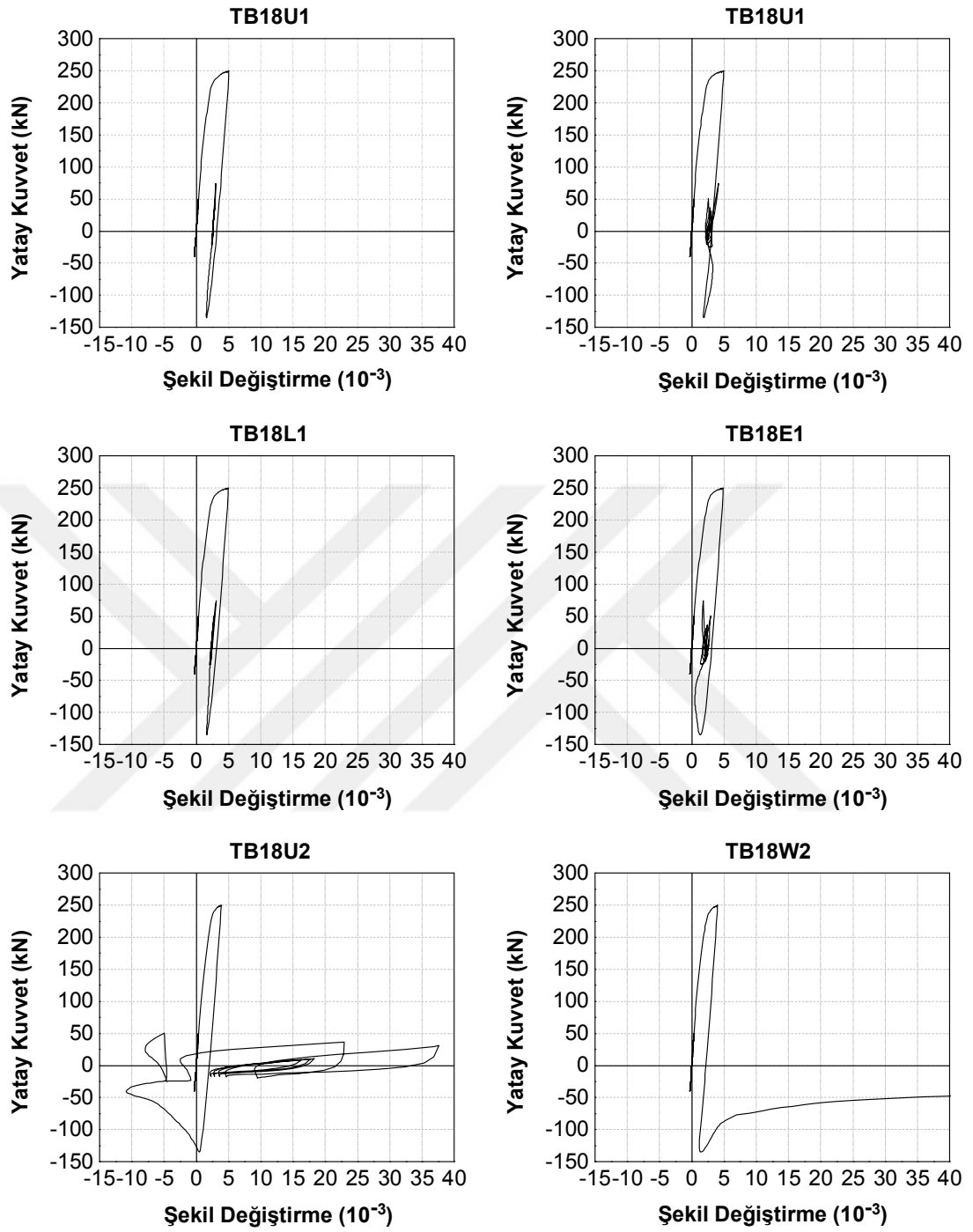


TB17E3

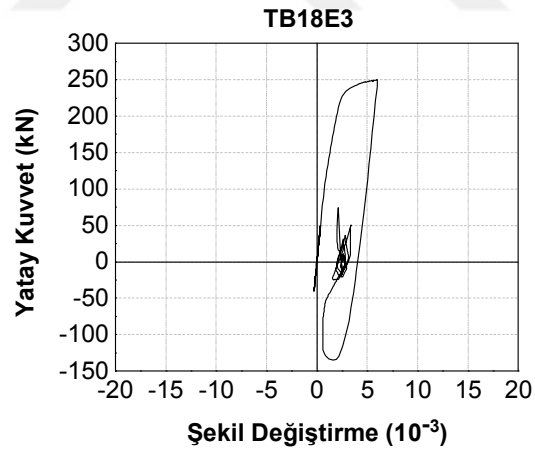
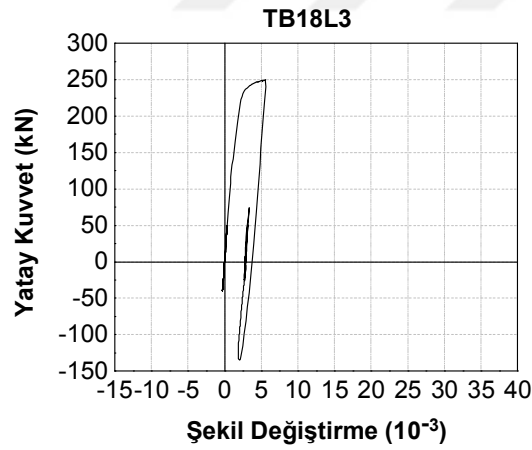
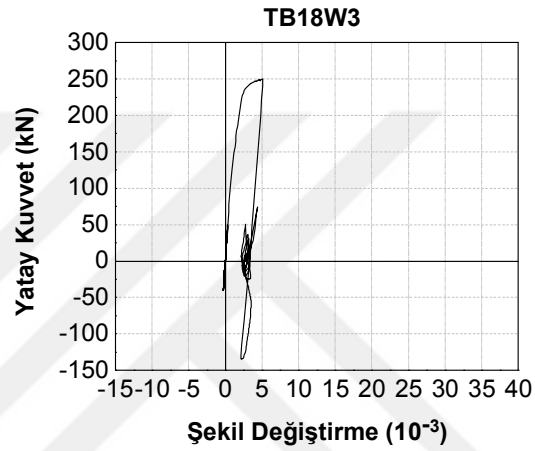
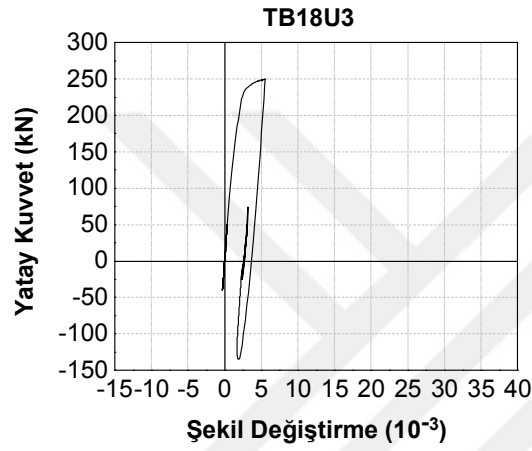
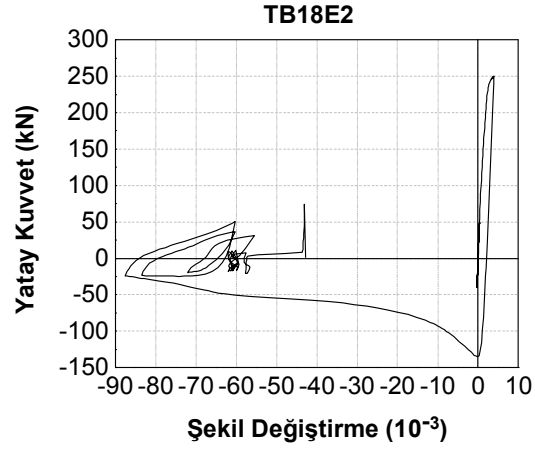
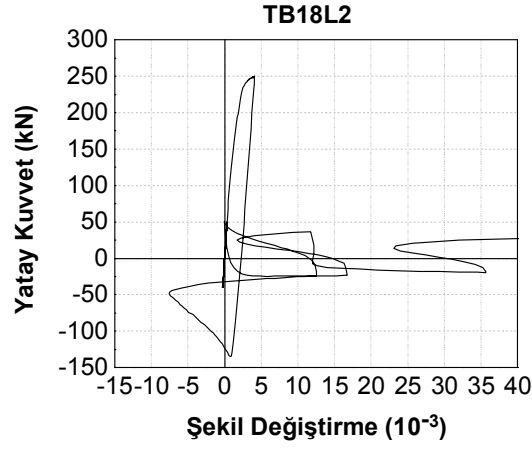


Şekil P.1 (devam) : TB-17 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.

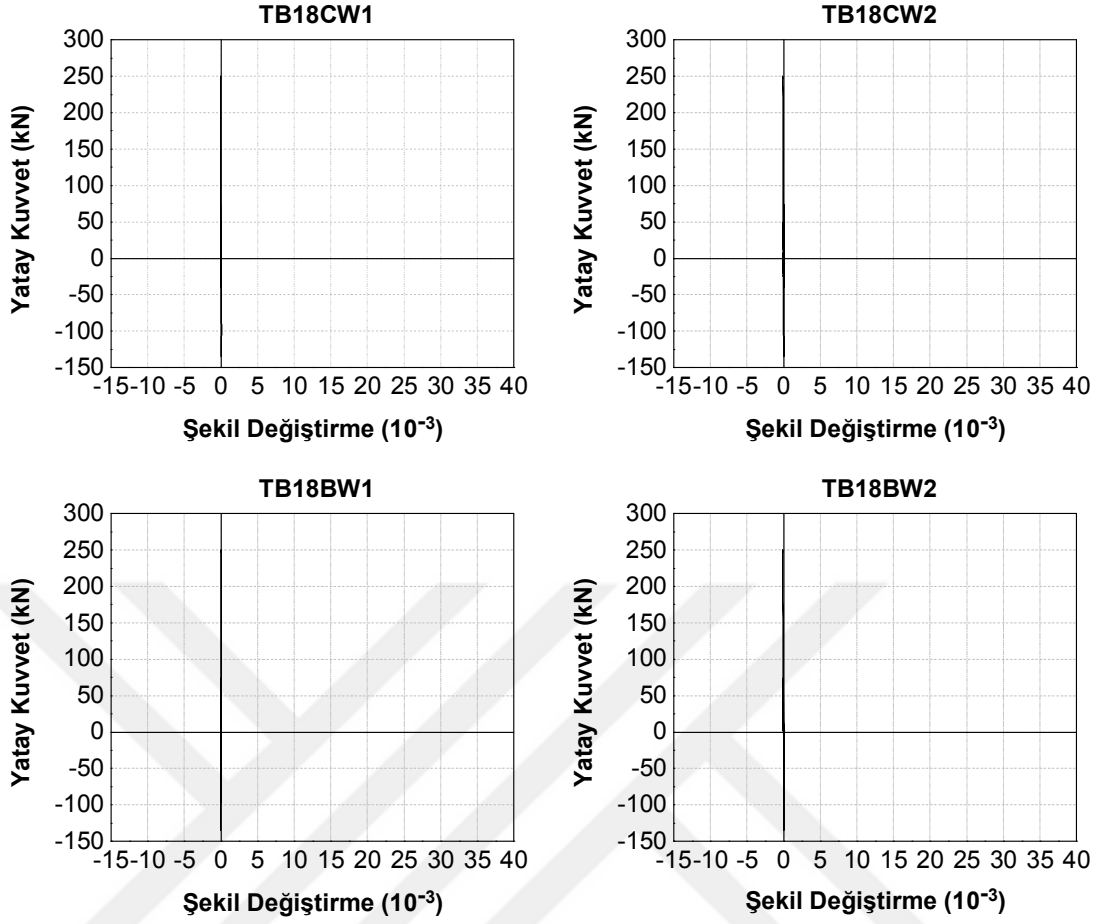
EK R



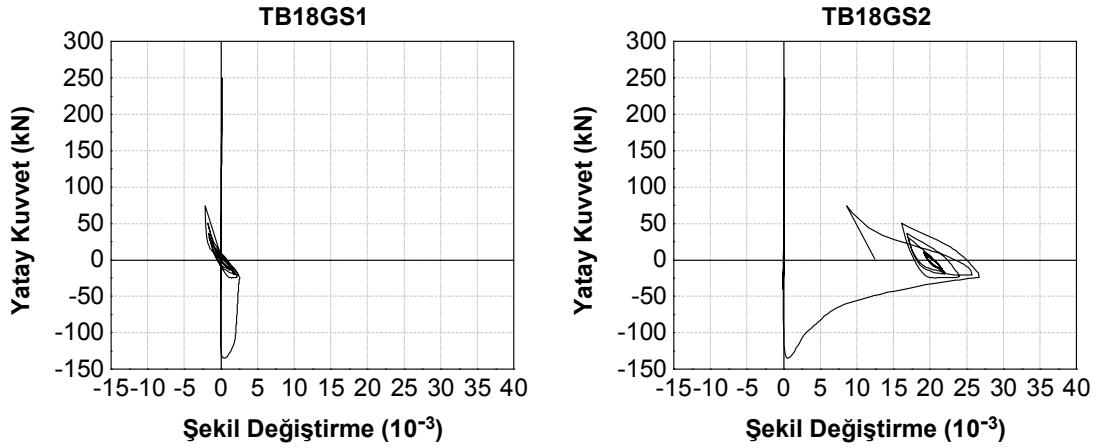
Şekil R.1 : TB-18 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



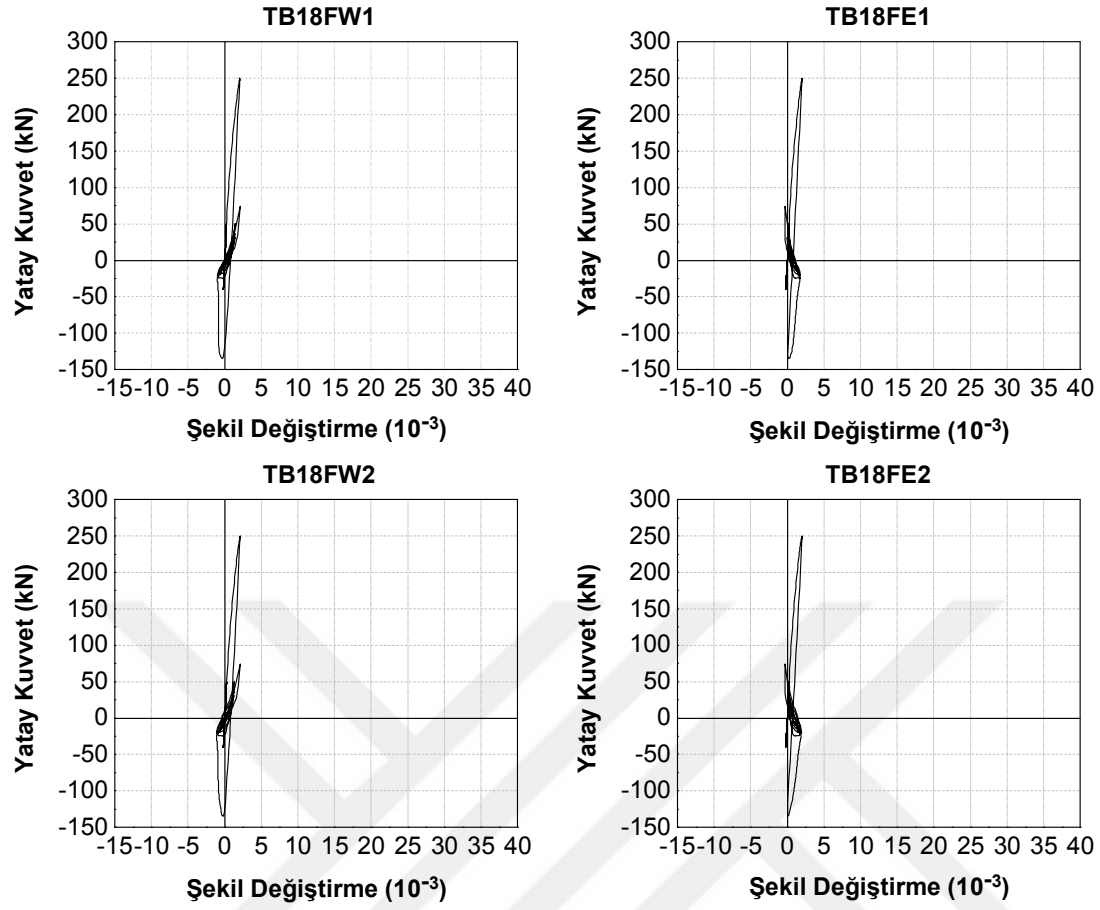
Şekil R.1 (devam) : TB-18 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



Şekil R.2 : Deney düzeneği yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.

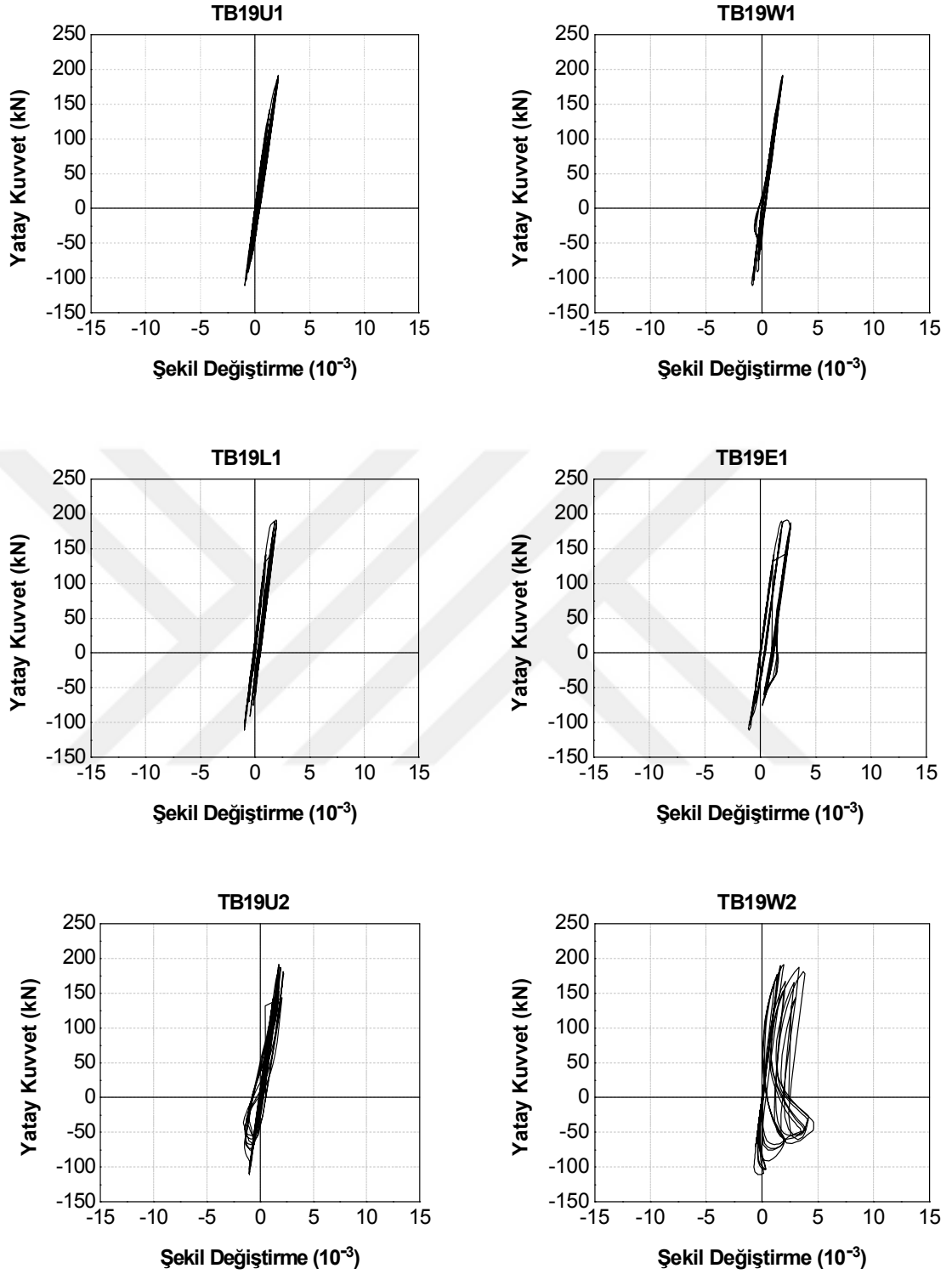


Şekil R.3 : Bayrak levhaları yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.

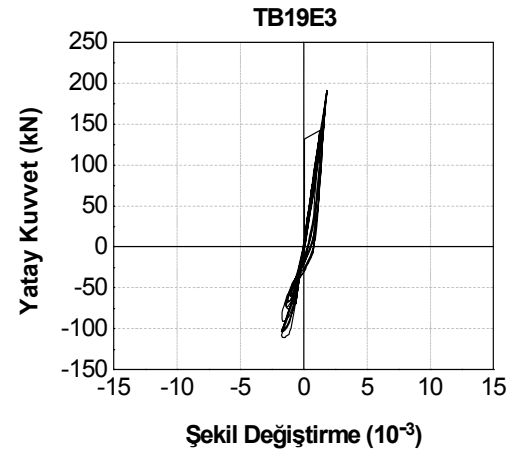
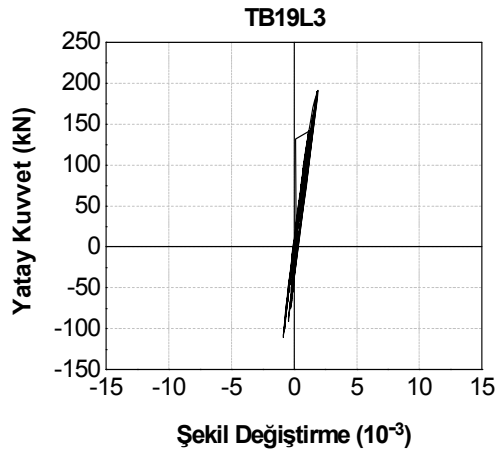
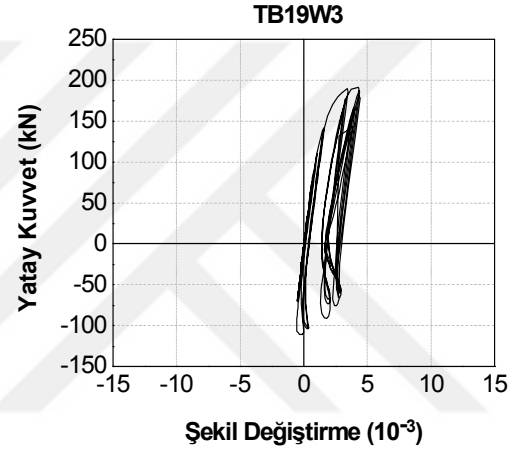
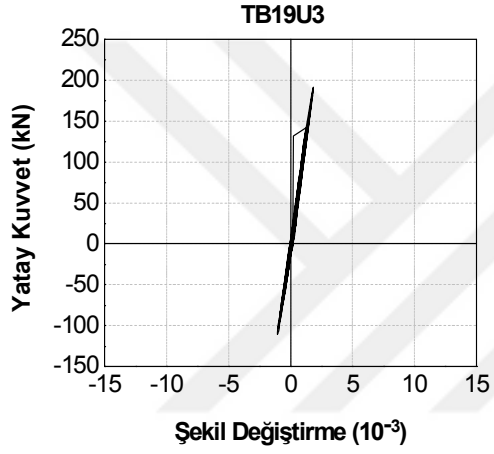
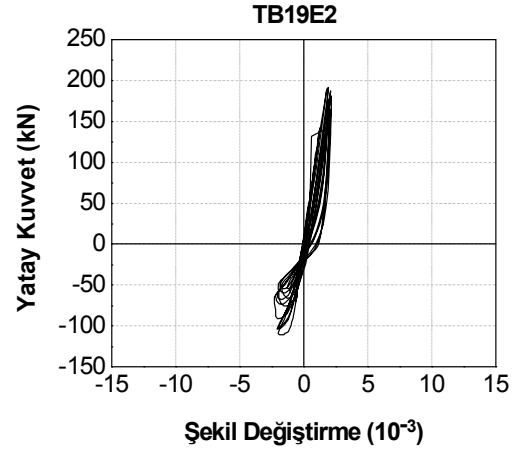
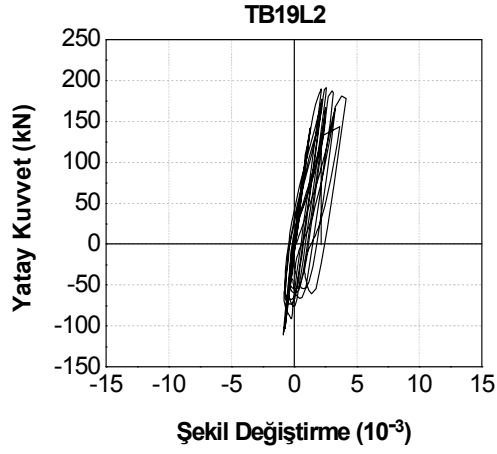


Şekil R.4 : CFRP plakalar yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.

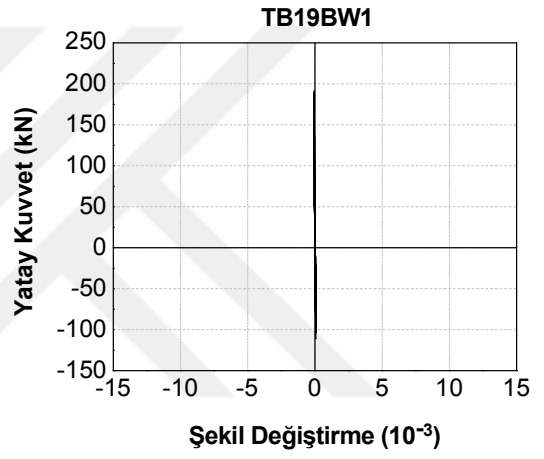
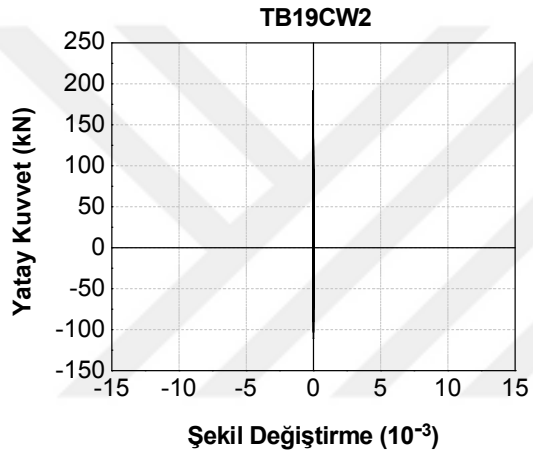
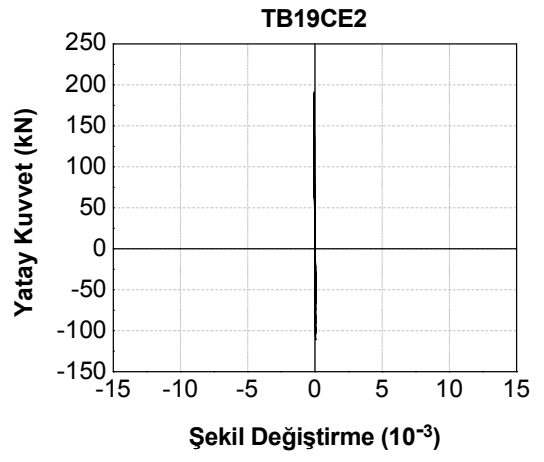
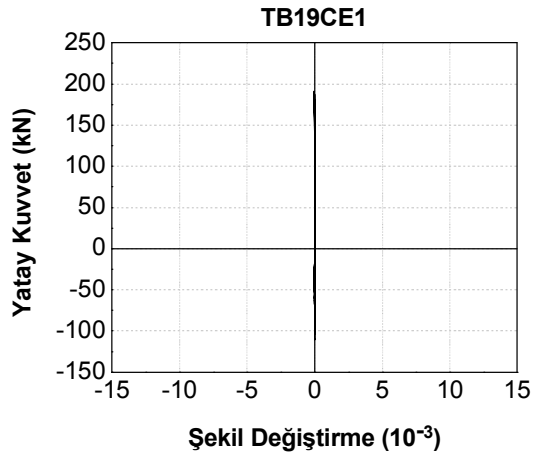
EK S



Şekil S.1 : TB-19 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



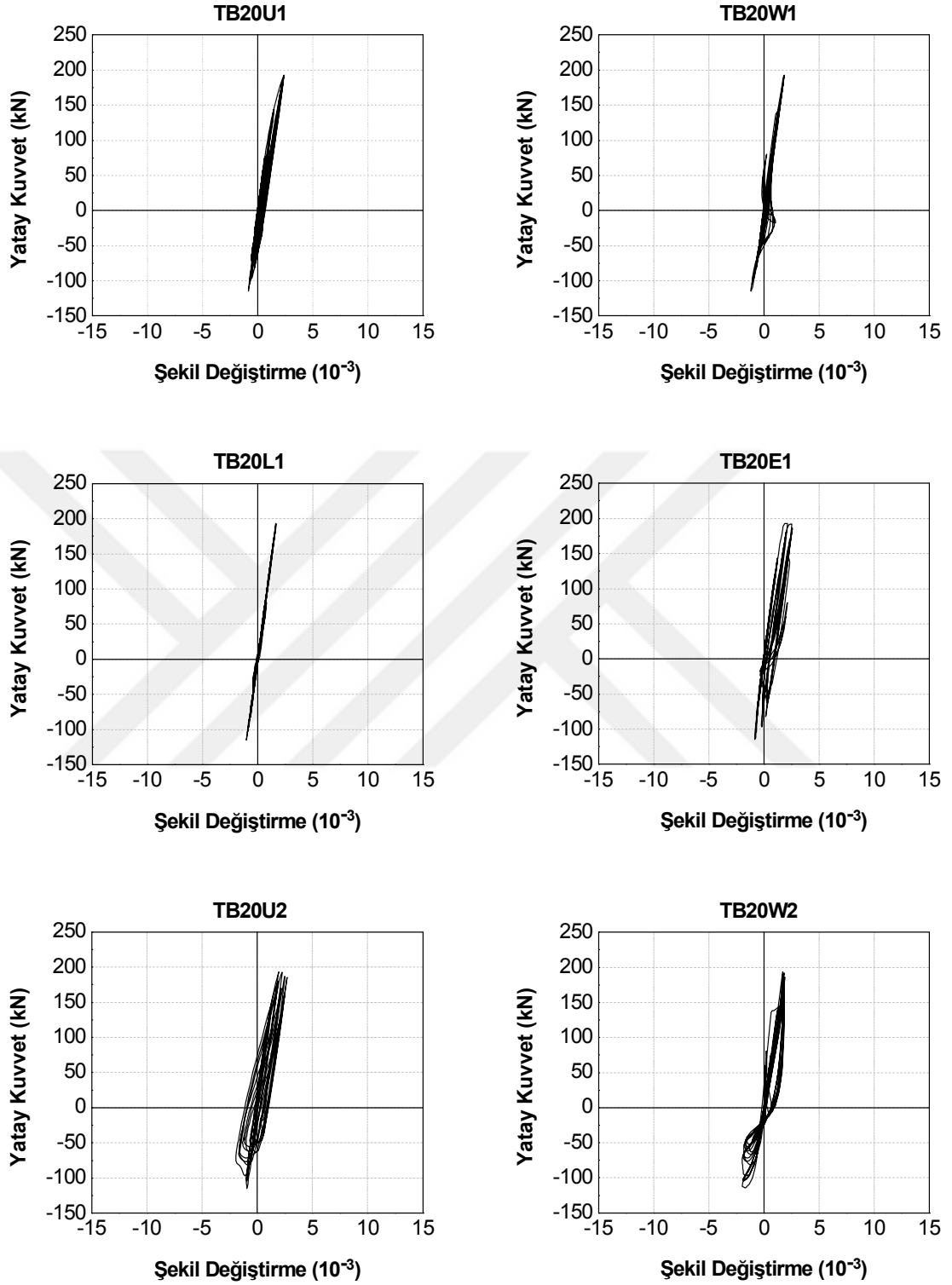
Şekil S.1 (devam) : TB-19 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



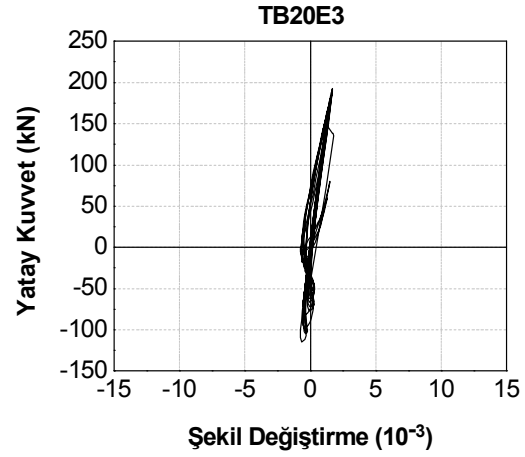
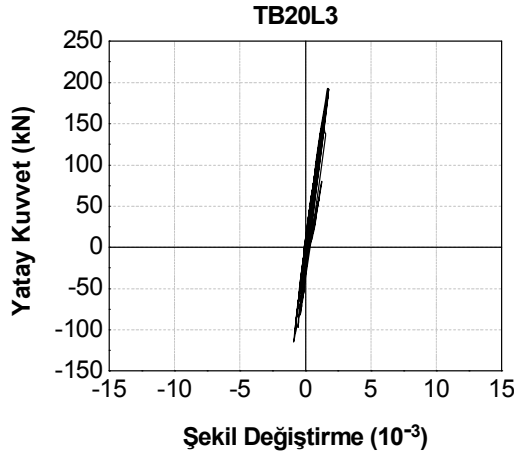
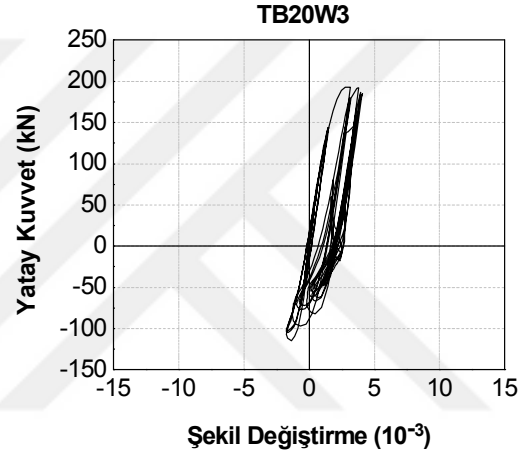
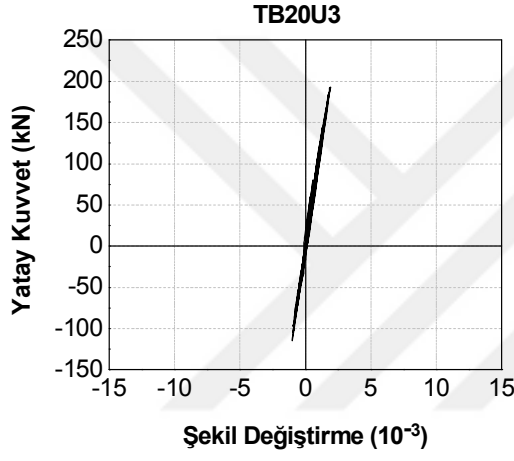
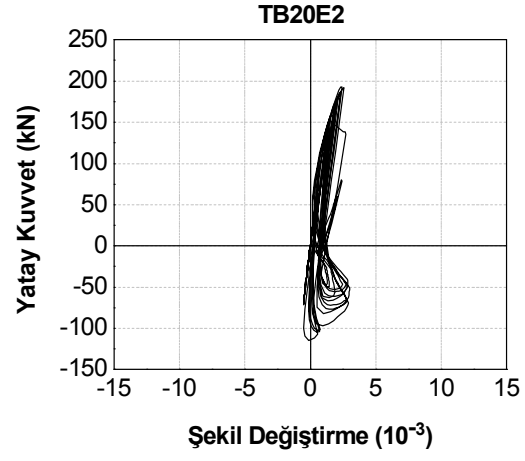
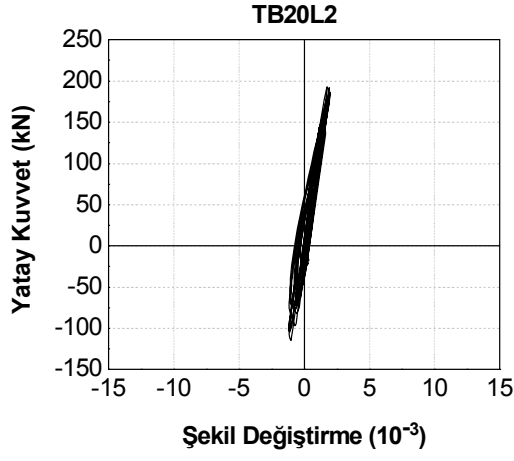
Şekil S.2 : Deney düzeneği yatay kuvvet – eksenel şekil değiştirme histeretik eğrileri.



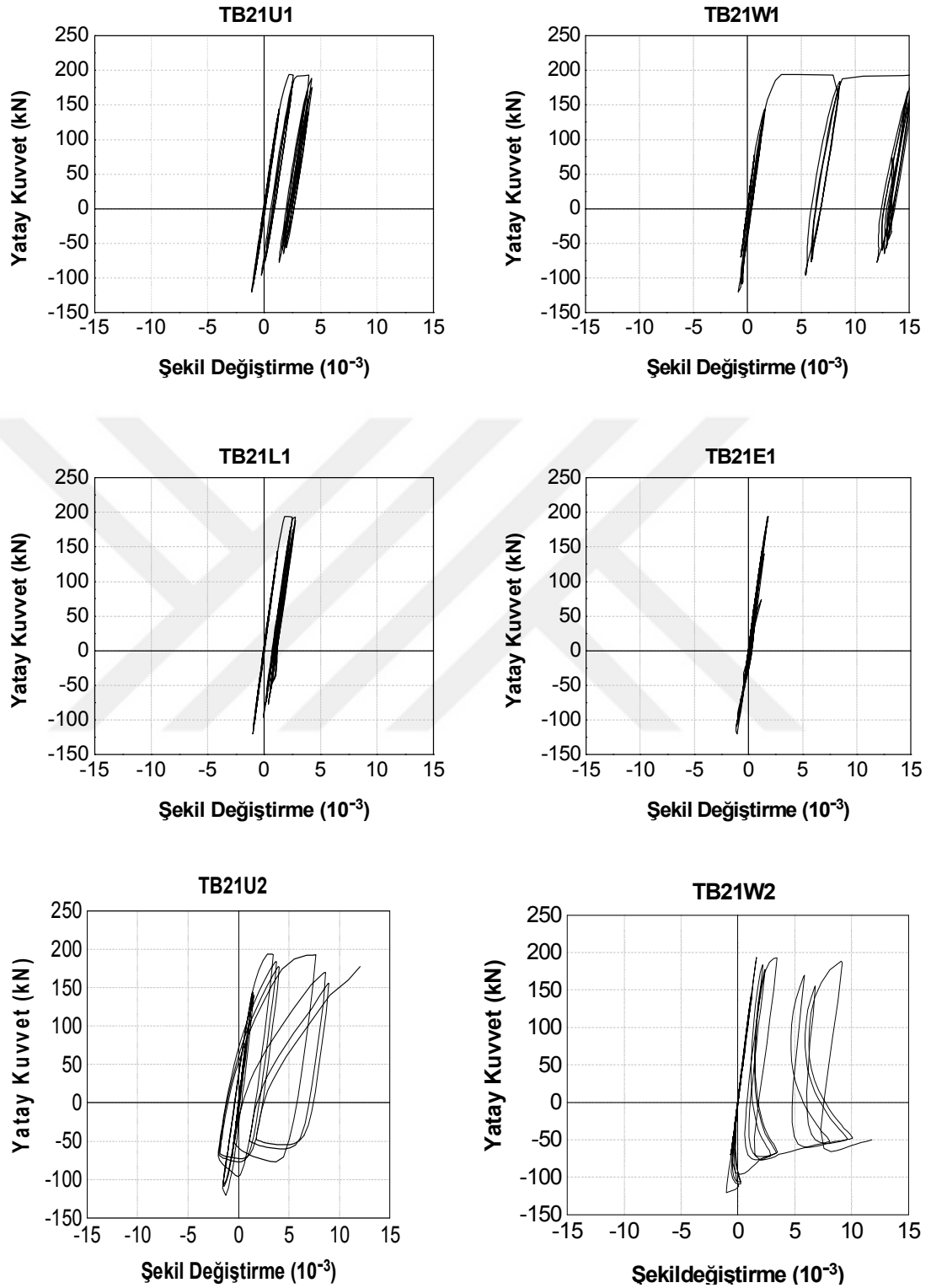
EK T



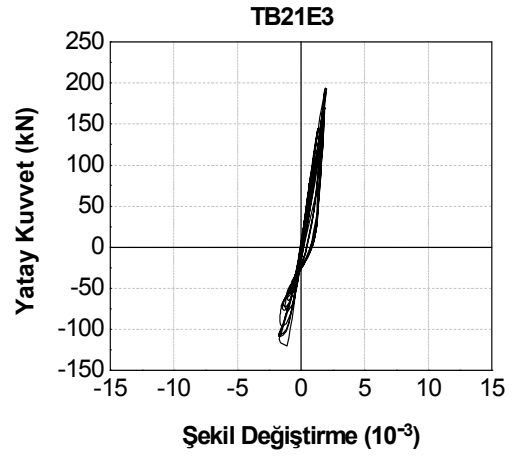
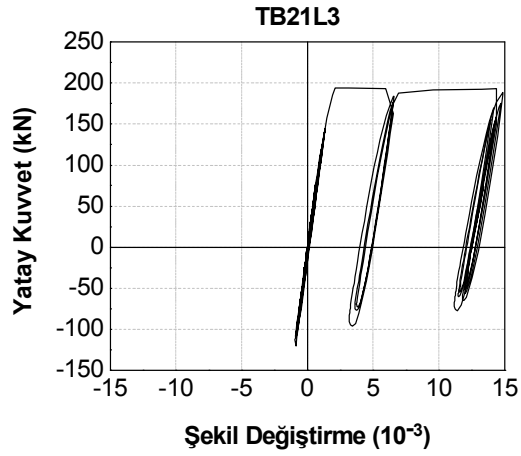
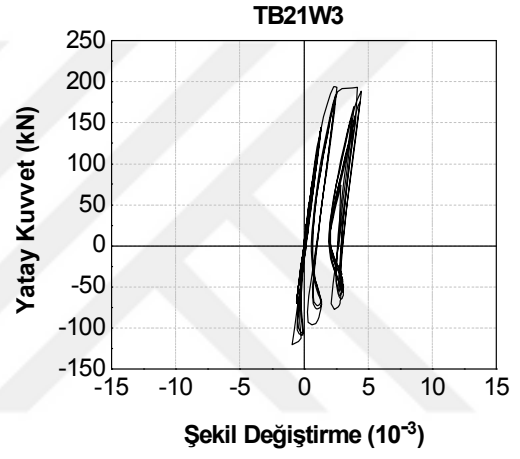
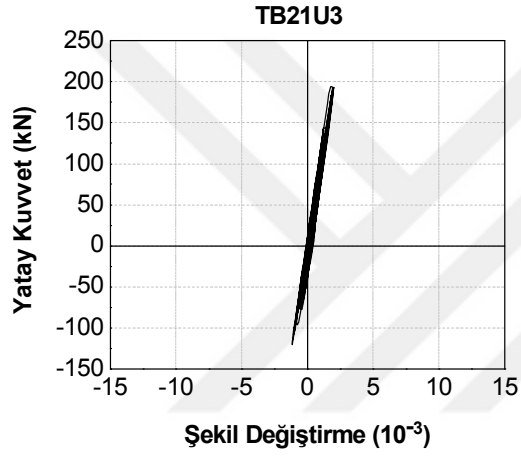
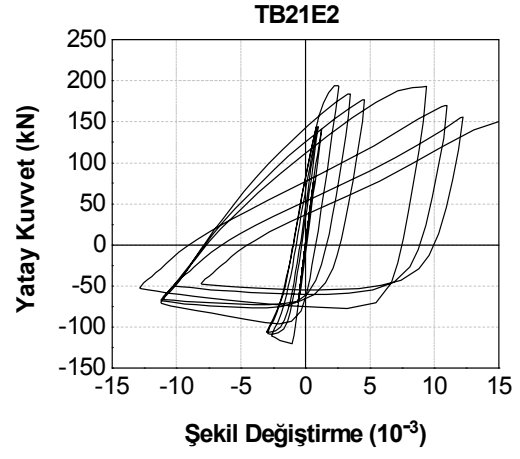
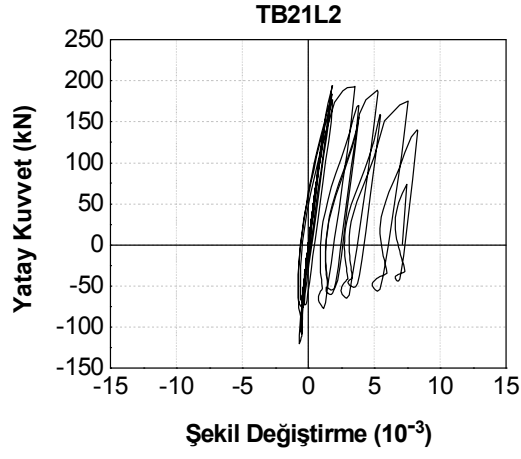
Şekil T.1 : TB-20 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekildeğişirme histeretik eğrileri.



Şekil T.1 (devam) : TB-20 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekil değiştirme histeretik eğrileri.



Şekil U.1 : TB-21 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekil değiştirme histeretik eğrileri.



Şekil U.1 (devam) : TB-21 numunesi yatay kuvvet – eksenel şekil değiştirme histeretik eğrileri.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Cem HAYDAROĞLU
Doğum Tarihi ve Yeri : İstanbul / 07.08.1980
E-posta : cem.haydaroglu@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2003, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
- **Yüksek lisans** : 2005, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, Yapı Mühendisliği / Yapı Analizi ve Tasarımı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2004-2006 yılları arasında Galvaçelik'te çelik yapı tasarım mühendisi olarak çalıştı.
- 2006 yılından beri ARUP Mühendislik ve Müşavirlik Ltd. Şti.'de Kıdemli Yapı Mühendisi olarak görev yapmaktadır.
- 2013-2015 yılları arasında Yeditepe Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde yarı zamanlı öğretim görevlisi olarak görev yapmıştır.
- 2015 yılından beri İstanbul Bilgi Üniversitesi Mimarlık Bölümü'nde yarı zamanlı öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR:

- Haydaroglu, C.**, Çelik, O.C. 2015. Zayıflatılmış Uç Kesitleri Karbon Lifli Polimer Elemanlarla Güçlendirilmiş Çelik Tüp Çaprazların Histeretik Davranışı, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi (PAJES)*, 21(6), 203-212.
- Haydaroglu, C.**, Avci-Karatas, C., Celik, O.C. 2014. Cyclic Testing and Comparison of Locally CFRP Confined HSS Braces and Buckling Restrained Braces. *2nd European Conference on Earthquake Engineering And Seismology (2ECEES2014)*, August 25-29, 2014 Istanbul, Turkey.
- Haydaroglu, C.**, Celik, O.C. 2012. Experimental Investigation of Partially CFRP Wrapped Steel HSS Braces for Seismic Performance Improvement, *15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE 2012)*, September 24-28, 2012 Lisbon, Portugal.
- Haydaroglu, C.**, Turker, A., Taskin, K., Celik, O.C. 2011. Improving Hysteretic Behavior of Tubular Steel Braces Using Advanced Composites, *6th International Conference on Thin Walled Structures (ICTWS 2011)-Recent Research Advances and Trends*, September 5-7, 2011 Timisoara, Romania.
- Haydaroglu, C.**, Türker, A., Taşkın, K., Çelik, O.C. 2011. Çelik Tüp Kesitli Çaprazların Histeretik Davranışlarının ve Kopma Ömürlerinin Deneysel Olarak İncelenmesi, *4. Ulusal Çelik Yapılar Sempozyumu (4UCYS 2011)*, 24 – 26 Ekim, 2011 İstanbul, Türkiye.
- Haydaroglu, C.**, Taskin, K., Celik, O.C. 2011. Ductility Enhancement of Round HSS Braces Using CFRP Sheet Wraps, *6th European Conference on Steel and Composite Structures (Eurosteel 2011)*, August 31 – September 2, 2011 Budapest, Hungary.
- Haydaroglu, C.**, Taşkın, K., Çelik, O.C. 2011. CFRP Elemanlarla Güçlendirilmiş Çelik Tüp Çaprazların Histeretik Davranışlarının Deneysel İncelenmesi, *7. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı (7UDMK 2011)*, 30 Mayıs – 3 Haziran, 2011 İstanbul, Türkiye.
- Haydaroglu, C.**, Turker, A., Taskin, K., Celik, O.C. 2010. Cyclic Testing of Tubular Steel Braces with CFRP Reinforced Net Sections, *4th International Conference on Steel & Composite Structures (ICSCS 2010)*, July 21-23, 2010 Sydney, Australia.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Okten Balaban, B., Okten, M.S., **Haydaroglu, C.**, Benzoni, G. 2016. Structural Engineering Perspective on Historic Building Restoration, *The First European and Mediterranean Structural Engineering and Construction Conference*, May 24 – 29, 2016 Istanbul, Turkey.
- Haydaroglu, C.**, Gezen, D., Akbaş, T.T., Karahasanoğlu, S. 2015. Ortotropik Kompozit Döşemelerde Sönüm ve Yürüyüş frekansının Titreşime Etkisinin Analitik İncelenmesi, *6.Ulusal Çelik Yapılar Sempozyumu (6UCYS 2015)*, 9 – 11 Aralık, 2015 Eskişehir, Türkiye.

- Akbas, T.T., **Haydaroglu, C.**, Timur, T. 2015. Sismik Yalıtım Kullanımının Yapısal Performans Üzerindeki Etkisinin Değerlendirilmesi, *3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı*, 14 – 16 Ekim, 2015 İzmir, Türkiye.
- Haydaroglu, C.**, Akbas, T.T., Gumusbas, O., Karahasanoglu, S. 2015. Comparison of Footfall Induced Vibration Responses of Steel Passenger Boarding Bridges with Different Floor Types, *8th International Symposium on Steel Bridges*, September 14 – 16, 2015 Istanbul, Turkey.
- Ökten, M.S., **Haydaroglu, C.**, Ökten Balaban, B., Bozdağ, B. 2013. Ahşap Minarelerin Taşıyıcı Sistemleri ve Zıbıncı Camii Örneği, *4.Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu*, 27 – 29 Kasım, 2013 Istanbul, Türkiye.
- Okten, M.S., **Haydaroglu, C.**, Okten Balaban, B., 2013. A Structural Design Case Study on Reconstruction of a Historical Timber Mansion, *Built Heritage 2013 Management Conservation Monitoring Conference (BH 2013)*, November 18 – 20, 2013 Milan, Italy.
- Çetinkaya, S., Avcı Karataş, Ç., **Haydaroglu, C.**, Çelik, O.C. 2013. Çelik Çekirdekli Bir Burkulması Önlenmiş Çaprazın (BÖÇ) Histeretik Davranışının Deneyisel Olarak İncelenmesi, *5.Ulusal Çelik Yapılar Sempozyumu (5UCYS 2011)*, 13 – 15 Kasım, 2013 İstanbul, Türkiye.
- Haydaroglu, C.**, Karahasanoglu, S., Vesey, D.G. 2010. Bamboo Structures: A State-of-The Art Review, *International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2010)*, May 26 – 28, 2010 Ankara, Turkey.
- Haydaroglu, C.**, Kaya, D., Karahasanoğlu, S. 2009. Bir Çelik Heliport Taşıyıcı Sistem Tasarımı ve Yapımı Deneyimi, *3.Ulusal Çelik Yapılar Sempozyumu (3UCYS 2009)*, 8 – 10 Ekim, 2009 Gaziantep, Türkiye.