

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ISIL İŞLEM GÖRMÜŞ HASARLI ARTI KESİTLİ
ÇELİK BASINÇ ELEMANLARININ FRP İLE
GÜÇLENDİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Emine AYDIN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : YAPI
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Muharrem AKTAŞ

Kasım 2012

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

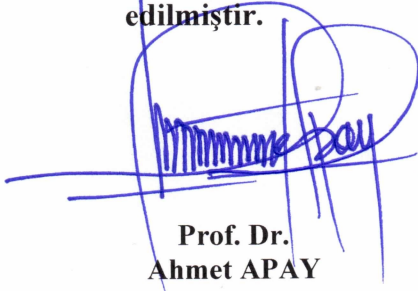
ISIL İŞLEM GÖRMÜŞ HASARLI ARTI KESİTLİ
ÇELİK BASINÇ ELEMANLARININ FRP İLE
GÜÇLENDİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Emine AYDIN

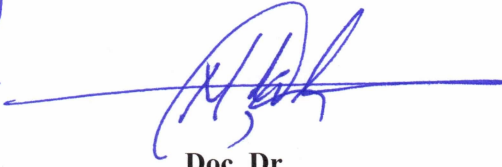
Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 30 / 11 /2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr.
Ahmet APAY

Jüri Başkanı



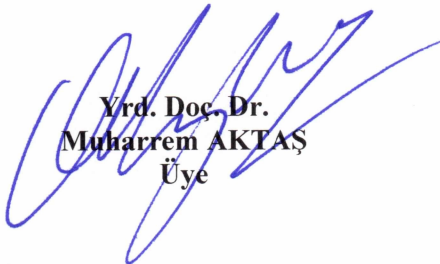
Doç. Dr.
Naci ÇAĞLAR

Üye



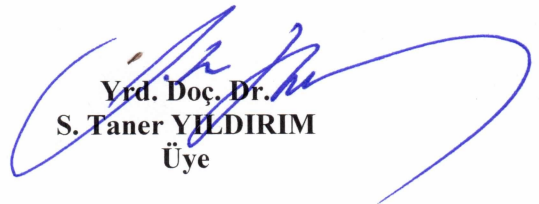
Doç. Dr.
Seval PINARBAŞI
ÇUHADAROĞLU

Üye



Yrd. Doç. Dr.
Muharrem AKTAŞ

Üye



Yrd. Doç. Dr.
S. Taner YILDIRIM

Üye

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, akademik bakış açısı kazandıgım, çalışkanlığı, insani ve ahlaki değerleri ile de örnek aldığım, birlikte çalışmaktan onur duyduğum tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Muharrem AKTAŞ'a en içten teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam süresince destek olan sayın hocalarım Prof. Dr. Ahmet APAY ve Doç. Dr. Naci ÇAĞLAR'a, birlikte çalışmaktan mutluluk duyduğum sevgili mesai arkadaşlarıma, bilgisayar modellemelerinde yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Yusuf SÜMER ve Yrd. Doç. Dr. Elif AĞCAKOCA'ya, deneysel çalışmalarında sabırla yardım eden Tekniker Sami GÜRSES'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında benden desteğini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan sevgili eşim Semih AYDIN'a, hayatım boyunca beni her konuda destekleyen ve çalışmalarım nedeniyle yeterince zaman ayıramadığım sevgili babam Feyzullah BAHÇIVANCI, annem Refiye BAHÇIVANCI, kardeşlerim Emel ve Cemil BAHÇIVACI'ya sevgilerimi sunarım.

Bu doktora çalışması Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiv
SUMMARY.....	xv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı.....	2
1.2. Tezin Kapsamı.....	3
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR TARAMASI.....	5
2.1. Çelik Kolon Deneyleri.....	5
2.2. Isıl ve Presleme İşlemi.....	8
2.3. FRP ile Güçlendirme.....	10
BÖLÜM 3.	
DENEY NUMUNELERİ VE DÜZENEKLERİ.....	16
3.1. Deney Numunelerinde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	16
3.1.1. Çelik.....	16
3.1.2. GFRP.....	18
3.1.3. CFRP.....	20
3.1.4. Epoksi.....	22

3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	24
3.2.1. Çelik plakaların hazırlanması.....	25
3.2.2. Isıl işlem ve düzeltme.....	27
3.2.2.1. Isıl işlem sıcaklık ölçüm cihazı.....	27
3.2.2.2. Presleme makinası.....	28
3.2.3. Yüzey pürüzlülüğünün artırılması.....	29
3.2.4. GFRP ve CFRP yapıştırılması.....	30
3.3. Deney Düzenekleri.....	31
3.3.1. Eksenel basınç deneyi.....	32
3.3.1.1. Eksenel basınç makinası.....	32
3.3.1.2. Yer değiştirme ölçüm cihazı.....	33
3.3.1.3. Veri toplama cihazı.....	33
3.3.2. Eksenel çekme deneyi.....	34
3.3.3. Brinell sertlik deneyi.....	35
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	39
4.1. Rijitleştirilmemiş Plakalar.....	39
4.1.1. Kılavuz plaka deneyleri.....	41
4.1.2. GFRP ile güçlendirilmiş ısıl işlem görmüş plaka deneyleri.....	46
4.1.3. Epoksi belirleme deneyleri.....	50
4.2. Rijitleştirilmiş Plakalar.....	52
4.2.1. Rijitleştirilmiş çelik plakaların GFRP elemanlar ile onarımı.....	54
4.2.2. Rijitleştirilmiş çelik plakaların CFRP elemanlar ile onarımı.....	62
4.3. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	66
4.3.1. Isıl işlem gören rijitleştirilmiş çelik plaklara uygulanan GFRP ve CFRP sonuçlarının karşılaştırılması.....	66
4.3.2. Maliyet analizi.....	69

BÖLÜM 5.

SONLU ELEMAN MODELİ VE MODELİN DOĞRULANMASI.....	71
5.1. Malzeme Modelleri.....	71
5.1.1. Çelik malzeme modeli.....	72
5.1.2. Yapıştırıcı malzeme modeli.....	74
5.1.3. FRP malzeme modeli.....	76
5.2. Sonlu Elemanlar Modelinde Kullanılan Eleman Tipleri.....	77
5.2.1. S4R eleman tipi.....	78
5.2.1. COH3D8 eleman tipi.....	79
5.3. Çözüm Ağı.....	79
5.4. Sınır Koşulları ve Yer değiştirme Uygulaması.....	81
5.5. Geomerik Kusur.....	81
5.6. Deneylelerin Nümerik Modelleme İle Doğrulanması.....	83
5.6.1. Referans ve ısı çelik plakaların nümerik modeli.....	84
5.6.2. FRP ile güçlendirilen çelik plakaların nümerik modeli.....	85

BÖLÜM 6.

PARAMETRİK ÇALIŞMA.....	90
6.1. GFRP Yerleşimi.....	91
6.2. Çelik Kesitleri.....	102
6.3. Parametrik Çalışma Sonuçları.....	107
6.3.1. b2a çelik plakaları.....	107
6.3.2. b4a çelik plakaları.....	109
6.3.3. b6a çelik plakaları.....	112
6.3.4. b8a çelik plakaları.....	116
6.4. Parametrik Çalışma Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	120
6.4.1. GFRP yerleşim düzeninin etkisi.....	121
6.4.2. GFRP boyunun etkisi.....	122
6.4.3. Narinlik etkisi.....	125

BÖLÜM 7.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	134
---------------------------	-----

KAYNAKLAR.....	136
ÖZGEÇMİŞ.....	142

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

FRP	: Fiber takviyeli polimer
GFRP	: Cam fiber takviyeli polimer
CFRP	: Karbon fiber takviyeli polimer
k	: Burkulma katsayısı
E	: Elastisite modülü
μ	: Poisson oranı
b	: Çelik plaka genişliği
t	: Çelik plaka kalınlığı
L	: Çelik plaka yüksekliği
a	: GFRP genişliği
h	: GFRP yüksekliği
σ_a	: Akma gerilmesi
σ_{cr}	: Kritik burkulma gerilmesi
K_{nn}	: Elemanın normali yönündeki rijitlik matrisi
K_{ss}	: Elemanın kayma yönündeki rijitlik matrisi
K_{tt}	: Elemanın kayma yönündeki rijitlik matrisi
t_n	: Elemanın normali yönündeki gerilme
t_s	: Elemanın kayma yönündeki gerilme
t_t	: Elemanın kayma yönündeki gerilme
ϵ_n	: Elemanın normali yönündeki şekil değiştirme
ϵ_s	: Elemanın kayma yönündeki şekil değiştirme
ϵ_t	: Elemanın kayma yönündeki şekil değiştirme
t_n^o	: Elemanın normali yönünde hasar başladığında oluşan gerilme
t_s^o	: Elemanın kayma yönünde hasar başladığında oluşan gerilme
t_t^o	: Elemanın kayma yönünde hasar başladığında oluşan gerilme

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Basınç elemanlarında yerel burkulma.....	2
Şekil 2.1.	H ve C kesitli kolonların deney ve sonlu eleman modelleri.....	5
Şekil 2.2.	Açık kanallı kesitlerde deney ve sonlu eleman modeli.....	6
Şekil 2.3.	Sıcaklık artışı ile çeliğin burkulma davranışı.....	7
Şekil 2.4.	Açık kanallı kolon deneyi.....	7
Şekil 2.5.	Kalıcı gerilmeler ve kalıcı geometrik kusurlar.....	8
Şekil 2.6.	Isıl ve presleme işlemi.....	9
Şekil 2.7.	Isıl ve presleme işlemi uygulanan kare kesitli kolon.....	9
Şekil 2.8.	GFRP eklenen çelik plaka.....	11
Şekil 2.9.	Çelik profillere GFRP ve CFRP eklenmesi.....	11
Şekil 2.10.	CFRP ile güçlendirilen içi boş kolonlar.....	12
Şekil 2.11.	Dairesel kesitli kolonlara GFRP eklenmesi.....	13
Şekil 3.1.	Çelik çekme deney numune boyutları.....	16
Şekil 3.2.	Çelik çekme deneyi.....	17
Şekil 3.3.	Çelik çekme deney numuneleri.....	17
Şekil 3.4.	Referans ve Isıl çelik numulere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	18
Şekil 3.5.	GFRP çekme deney numune boyutları.....	19
Şekil 3.6.	GFRP çekme deneyi.....	19
Şekil 3.7.	GFRP çekme deney numuneleri.....	19
Şekil 3.8.	GFRP numulere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	20
Şekil 3.9.	CFRP çekme deney numune boyutları.....	21
Şekil 3.10.	CFRP çekme deneyi.....	21
Şekil 3.11.	CFRP çekme deney numuneleri.....	21
Şekil 3.12.	CFRP numulere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	22
Şekil 3.13.	1.Epoksinin bileşenleri.....	23

Şekil 3.14.	2.Epoksinin uygulaması.....	23
Şekil 3.15.	3.Epoksinin bileşenleri.....	24
Şekil 3.16.	Çelik plakaların birleştirilmesi ile oluşturulmuş profil örneği....	25
Şekil 3.17.	a-Rijitleştirilmemiş çelik plakalar b- Rijitleştirilmiş çelik plakalar	26
Şekil 3.18.	Rijitleştirilmemiş ve rijitleştirilmiş plakalara ısıtma işlem ve presleme işlemi uygulama adımları.....	27
Şekil 3.19.	Thermocouple ve veri toplama cihazı.....	28
Şekil 3.20.	Thermocouple cihazı ile ölçüm yapılması.....	28
Şekil 3.21.	Pres Makinası.....	29
Şekil 3.22.	Çelik yüzeyin çizilmesi.....	29
Şekil 3.23.	Yüzey taşlama işlemi.....	30
Şekil 3.24.	Epoksi uygulaması.....	30
Şekil 3.25.	Sıkıştırma işlemi.....	31
Şekil 3.26.	Deney için hazır olan numunelerden birer örnek	31
Şekil 3.27.	Eksenel basınç deney düzeneği ve ölçüm cihazları.....	32
Şekil 3.28.	Eksenel basınç makinası.....	33
Şekil 3.29.	Dijital yer değiştirme ölçüm cihazı	33
Şekil 3.30.	a-Veri toplama Cihazı b- Verilerin aktarılması.....	34
Şekil 3.31.	Çekme Makinası ve Donanımı.....	35
Şekil 3.32.	Brinell sertlik ölçüm cihazı.....	36
Şekil 3.33.	Deney numunesinin kaynaklı ve serbest uçları.....	36
Şekil 3.34.	Brinell sertlik deneyi.....	37
Şekil 3.35.	Brinell sertik deney sonuçları.....	38
Şekil 4.1.	Rijitleştirilmemiş çelik plakaların burkulması.....	40
Şekil 4.2.	Rijitleştirilmemiş referans ve ısıtma plaka grafiği	40
Şekil 4.3.	GFRP ile güçlendirilen kılavuz rijitleştirilmemiş plakaların deney grafikleri	43
Şekil 4.4.	Rijitleştirilmemiş kılavuz plaka gruplarına ait karşılaştırma grafiği	45
Şekil 4.5.	Isıtma işlem görmüş GFRP ile güçlendirilmiş rijitleştirilmemiş plaka deney grafikleri.....	47

Şekil 4.6.	Isıl işlem görmüş GFRP ile güçlendirilmiş rijitleştirilmemiş plaka gruplarına ait karşılaştırma grafiği	49
Şekil 4.7.	Deneysel olarak kullanılan üç farklı epoksinin karşılaştırılması.....	51
Şekil 4.8.	Rijitleştirilmiş çelik plakaların burkulması	52
Şekil 4.9.	Rijitleştirilmiş çelik plakalara ait burkulma mod şekilleri.....	53
Şekil 4.10.	Rijitleştirilmiş referans ve ısıl plaka grafiği	53
Şekil 4.11.	Isıl işlem görmüş rijitleştirilmiş çelik plakaların GFRP ile onarım grafikleri	56
Şekil 4.12.	Isıl işlem görmüş GFRP ile güçlendirilmiş rijitleştirilmiş plaka gruplarına ait karşılaştırma grafiği.....	59
Şekil 4.13.	Isıl ve GFRP ile onarılan çelik plakaların burkulma modları	61
Şekil 4.14.	Isıl işlem görmüş rijitleştirilmiş çelik plakaların CFRP ile onarım grafikleri	64
Şekil 4.15.	Isıl işlem görmüş CFRP ile güçlendirilmiş rijitleştirilmiş plaka gruplarına ait karşılaştırma grafiği.....	65
Şekil 4.16.	GFRP ve CFRP ile güçlendirilen çelik plakaların karşılaştırılması.....	67
Şekil 4.17.	Maliyet analizi yapılan çelik plaka ve FRP boyutları.....	70
Şekil 5.1.	Çeliğin gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	72
Şekil 5.2.	İdeal elasto-plastik malzeme diyagramı.....	73
Şekil 5.3.	Dinamik yükleme ve statik yükleme arasındaki fark.....	74
Şekil 5.4.	a-Yapıştırıcıya ait gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı b- Sonlu eleman programının önerdiği model.....	75
Şekil 5.5.	Yapıştırıcının kesme etkisindeki gerilme-birim şekil değiştirme grafiği.....	76
Şekil 5.6.	Lineer ve kuadratik eleman integrasyon noktaları.....	77
Şekil 5.7.	Azaltılmış integrasyonlu lineer ve kuadratik eleman.....	78
Şekil 5.8.	S4R eleman tipi.....	78
Şekil 5.9.	COH3D8 eleman tipi.....	79
Şekil 5.10.	Çözüm ağı sıklığı.....	80
Şekil 5.11.	Rijitleştirilmiş referans çelik plakada çözüm ağı sıklığının etkisi..	80
Şekil 5.12.	Çelik plakaya uygulanan sınır koşulu ve yer değiştirme uygulaması.....	81

Şekil 5.13.	Kusursuz elemana ait burkulma mod şekilleri.....	82
Şekil 5.14.	Deneysel sonuçların doğrulanması için kullanılan modellemeye modların etkisi.....	83
Şekil 5.15.	Referans ve ısıtıl çelik plakaların nümerik modeli.....	84
Şekil 5.16.	Rijitleştirilmiş referans ve ısıtıl çelik plakaların deney ve SEM sonuçlarının karşılaştırılması.....	85
Şekil 5.17.	Yapıştırıcının çelik plakadan sıyrılması.....	85
Şekil 5.18.	GFRP ve CFRP ile güçlendirilen çelik plakaların deney ve SEM sonuçlarının karşılaştırılması.....	86
Şekil 6.1.	Parametrik çalışmada kullanılan değişkenler	91
Şekil 6.2.	Parametrik çalışmadaki numunelerin isimlendirme örneği	92
Şekil 6.3.	Parametrik çalışmada kullanılan GFRP yerleşim düzeni	93
Şekil 6.4.	b2a genişliğine sahip çelik plakaların parametrik çalışma grafikleri	108
Şekil 6.5.	b4a genişliğine sahip çelik plakaların parametrik çalışma grafikleri	111
Şekil 6.6.	b6a genişliğine sahip çelik plakaların parametrik çalışma grafikleri	114
Şekil 6.7.	b8a genişliğine sahip çelik plakaların parametrik çalışma grafikleri	119
Şekil 6.8.	Parametrik çalışma sonuçlarının b/t oranına göre değerleri.....	121
Şekil 6.9.	GFRP boyunun uzamasına örnek bir gösterim.....	122
Şekil 6.10.	Parametrik çalışmada maksimum sonucu veren yerleşim düzenlerinde GFRP boyunun değişiminin etkisi.....	123
Şekil 6.11.	<i>k</i> değerleri değişimi.....	132
Şekil 6.12.	<i>k</i> burkulma katsayısı grafiği.....	133

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1.	Referans ve ısı1 elik numunelerin mekanik zellikleri.....	18
Tablo 3.2.	GFRP numunelerin mekanik zellikleri.....	20
Tablo 3.3.	CFRP numunelerin mekanik zellikleri.....	22
Tablo 3.4.	Epoksi zellikleri.....	24
Tablo 4.1.	elik plakalara GFRP yerleşim düzenleri.....	42
Tablo 4.2.	Rijitleştirilmemiş elik plakların GFRP uygulanması ile meydana gelen maksimum yük taşıma kapasiteleri.....	45
Tablo 4.3.	Rijitleştirilmemiş elik plakların ısı1 işlemin sonrası GFRP uygulanması ile meydana gelen maksimum yük taşıma kapasiteleri	49
Tablo 4.4.	Isıl işlemin görmüş rijitleştirilmiş elik plakalara uygulanan GFRP yerleşimi.....	54
Tablo 4.5.	Isıl işlemin görmüş GFRP ile onarılan rijitleştirilmiş plakalara ait dayanım değerleri.....	59
Tablo 4.6.	Isıl işlemin görmüş rijitleştirilmiş elik plakalara uygulanan CFRP yerleşim düzeni.....	63
Tablo 4.7.	Isıl işlemin görmüş CFRP ile onarılan rijitleştirilmiş plakalara ait dayanım değerleri.....	66
Tablo 4.8.	Isıl işlemin görmüş rijitleştirilmiş elik plakaların CFRP ve GFRP uygulandığında maksimum yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırması.....	68
Tablo 4.9.	Isıl işlemin sonra FRP ile onarım işlemin için malzeme maliyeti.....	69
Tablo 4.10.	elik malzeme maliyeti.....	69
Tablo 4.11.	Maliyet karşılaştırması.....	70
Tablo 5.1.	Sonlu eleman modelinde kullanılan elik malzemesine ait malzeme zellikleri.....	74

Tablo 5.2.	Epoksi 3 yapıştırıcısına ait malzeme özellikleri	75
Tablo 5.3.	FRP sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri.....	77
Tablo 6.1.	Parametrik çalışmadaki numunelerin isimlendirmesi	94
Tablo 6.2.	Parametrik çalışmada kullanılan çelik plaka boyutları	102
Tablo 6.3.	Çelik plakalara ait kesit görünüş ve grafikler.....	103
Tablo 6.4.	b2a çelik plakalarının yük taşıma kapasiteleri ve % artış değerleri	107
Tablo 6.5.	b4a çelik plakalarının yük taşıma kapasiteleri ve % artış değerleri	110
Tablo 6.6.	b6a çelik plakalarının yük taşıma kapasiteleri ve % artış değerleri	113
Tablo 6.7.	b8a çelik plakalarının yük taşıma kapasiteleri ve % artış değerleri	117
Tablo 6.8.	Parametrik çalışma maksimum sonucu veren yerleşim düzeni sonuçları.....	122
Tablo 6.9.	b2a için yapılan parametrik çalışmadan elde edilen σ_{cr} ve k değerleri.....	126
Tablo 6.10.	b4a için yapılan parametrik çalışmadan elde edilen σ_{cr} ve k değerleri.....	127
Tablo 6.11.	b6a için yapılan parametrik çalışmadan elde edilen σ_{cr} ve k değerleri.....	128
Tablo 6.12.	b8a için yapılan parametrik çalışmadan elde edilen σ_{cr} ve k değerleri.....	130
Tablo 6.13.	b/t için seçilen k değerleri.....	132

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Artı kesitli çeli basınç elemanları, Cam fiber takviyeli polimerler (GFRP), Karbon fiber takviyeli polimerler (CFRP), Isıl işlem, Burkulma, Kalıcı onarım.

Çelik yapı elemanları gerek eğilmede gerekse aksenal basınç yükleri altında yerel burkulma problemleriyle karşı karşıyadırlar. Hasar gören bu elemanların yenisi ile değiştirilmesi yerine ısıl işlem uygulanarak düzeltilmesi mümkündür. Böylece deprem gibi acil durumlarda yerel burkulma gözlenen yapı elemanları hızlı bir şekilde onarılabilir. Ancak elemana uygulanan ısıl işlem, gerek elemanın rijitliğinde azalma meydana getireceğinden gerekse elemanda kalıcı geometrik kusurlar oluşturacağından dolayı geçici bir onarımdır.

Bu tezin amacı, çelik yapı elemanlarına uygulanan geçici onarım tekniklerinden biri olan ısıl işlem ile düzeltmenin eleman için kalıcı bir onarım haline dönüştürülebileceğini göstermektir. Yapılan deneysel ve nümerik çalışmalar, ısıl işlem nedeni ile onarım görmüş elemanlarda gözlenen zayıflıkların, elemanlara yapıştırılan fiber takviyeli polimer plakalar ile giderilebildiğini göstermektedir.

Deneysel çalışmalarda, iki kenarından mesnetlenerek rijitleştirilmemiş ve üç kenarından mesnetlenerek rijitleştirilmiş çelik plakalar olmak üzere iki tipte deney numuneleri seçilmiştir. Bu deney numuneleri gerçekte çelik profillerin kesitlerinin çelik plakaların birleştirilmesi ile oluştuğu düşünülerek seçilmiştir. Bu numuneler üzerine farklı yerleşim düzenlerine sahip FRP plakalar yerleştirilmiştir. Bu şekilde yapılan bir onarım ile ısıl işlem sonrası azalan rijitlik ve dayanım kayıplarını artırmak hedeflenmiştir. Deneyler sonucunda dayanım ve rijitlik artışında en önemli olanın FRP plakaların özelliklerinin değil yapıştırıcının özelliklerinin olduğu görülmüştür.

Parametrik çalışmalarda, ilk olarak deneylerden elde edilen sonuçlar doğrulanarak nümerik modeller oluşturulmuştur. Doğrulama işleminden sonra, uygulaması kolay, ekonomik, yeterli dayanım ve rijitliğe sahip deney numunesi seçilerek bu numunenin çelik kesit özellikleri, ve üzerine yerleştirilen GFRP plakanın yerleşim ve boyutları değiştirilerek 200 adet sayısal deney numuneleri hazırlanmıştır. Çalışma sonuçları değerlendirilerek b/t oranına göre değişen yerleşim düzeni önerilmiştir.

Deneysel ve parametrik çalışmalar sonucunda ısıl işlem sonrası FRP plakalar yapıştırılarak kalıcı bir onarım edilebileceği ve GFRP ile güçlendirilen çelik plakalar için b/t oranına bağlı olan formül üretilmiştir.

STRENGTHENING OF HEAT-TREATED DAMAGED STEEL CRUCIFORM COMPRESSION MEMBERS WITH FRP PLATES

SUMMARY

Key Words: Cruciform steel compression members, Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP), Carbon Fiber-Reinforced Polymers (CFRP), Heat Treatment, Buckle, Permanent Repair.

Steel structural elements face local buckling problems under both bending and axial compressive loads. It is possible to rectify this buckled element by applying heat treatment method instead of replacing it with a new one. This retrofit process can quickly be performed to repair locally buckled structural elements in emergency situations such as earthquakes. However; heat treatment technique is addressed as temporary retrofit due to the decrease in the stiffness of the original material and the existence of permanent geometrical imperfections implemented in the repaired structural element. Buckling behavior of the repaired element truly will be different from the original element because of these effects.

The aim of this study is to prove that heat treatment, being one of the temporary retrofits, can be used as a permanent one. The experimental and numerical studies illustrated the fact that the weaknesses of rectified structural elements due to heat treatment can be overcome by using fiber reinforced polymers.

For the experimental purposes, two different types of test samples were selected. While one was fixed through two support, the other one was fixed through three points. In addition, it was considered that these samples were obtained by joining cross sectional-steel profiles with steel plates. Furthermore, FRP plates having different locational arrangements were bonded on these samples. By doing this, it was targeted that the reduced rigidness and strength of the samples resulting from heat treatment could be improved. The outcomes obtained proved that the main factor to increase the rigidness and strength was primarily related to the adhesive rather than physical and mechanical properties of FRP plates.

In parametric studies, numerical models were initially established by validating the experimental results. Following, 200 hundred numerical experimental samples were prepared by choosing easily applicable, economical test sample having also enough rigidness and strength. The cross-sectional parameters along with the size and locations of the bonded GFRP plates of this sample were also changed to obtain the samples.

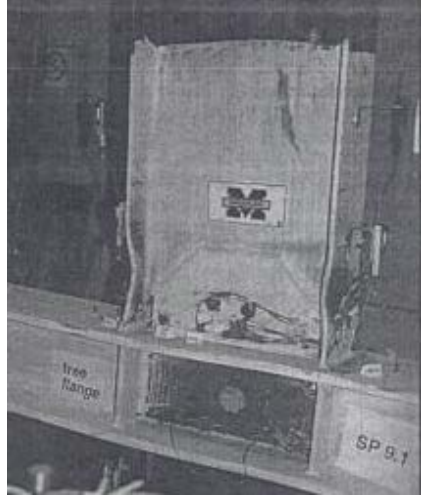
The close relationship between b/t ratio and the placement of GFRP plates were introduced through the results obtained. It was shown after experimental and parametric studies that permanent retrofit could be attained by bonding FRP plates after heat treatment. The formulae were further developed based on the b/t ratio for the steel plates strengthened by GFRP.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Ülkemizin organize sanayi bölgelerinin yoğun olarak bulunduğu Marmara Bölgesi deprem açısından aktif bir bölgedir. Bu bölgede yer alan endüstri yapılarının olası bir deprem sonrası hızlı bir şekilde onarılarak üretime sokulması ülke ekonomimiz açısından büyük önem arz etmektedir.

Deprem ve yangın gibi afetler sonucunda göçmeyen ancak hasar gören çelik yapı elemanları hızlı bir şekilde onarılarak geçici de olsa hizmete sunulmalıdır. 1995 Hanshin-Awaji (Japonya) depreminden sonra bu amaçla yapılmış onarımlar, acil yardımların yerlerine ulaştırılması konusunda büyük önem sergilemiştir. Bu tür acil onarımlarda ısıtma işlemi sonrasında presleme işlemi kullanılmaktadır. Isıtma işlemi uygulanarak yapılan bu tip onarımların servis yükleri altında geçici bir onarım olabileceği unutulmamalıdır. Kalıcı onarım için tavsiye edilen standart yöntem, hasar gören elemanların yenileri ile değiştirilmesidir. Afet sonrası onarımlar için bu yenileme yöntemi, ısıtma işlemi kıyasla daha pratik bir yöntem değildir. Isıtma işlemi sonrası malzemelerin rijitliklerinde meydana gelen azalma giderilerek, kalıcı bir güçlendirme sağlanması konusunda araştırmalar yapılmalıdır.

İnce cidarlı çelik yapı elemanları narinliklerinden dolayı gerek eğilmede gerekse eksenel yük altında yerel burkulma problemiyle karşı karşıyadır (Şekil 1.1). Ani yüklemeler ve deprem yüklemeleri altında narin çelik yapı elemanları yerel ve global burkulma davranışı gösterirler. Burkulma sonucu kararsız denge haline geçen bu elemanlar yapı güvenliği açısından büyük tehdit haline gelebilirler. Eleman rijitliği, malzemenin elastik modülü, eleman narinliği, var olan doğal kusurlar burkulmayı etkileyen temel faktörlerdir.



Şekil 1.1. Basınç elemanlarında yerel burkulma [1]

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, deprem, aşırı yükleme vb. nedenler ile yerel burkulma gözlenen çelik yapı elemanlarının ısıtılma işlemiyle yapılan geçici onarımlarını kalıcı hale getirmektir. Kalıcı bir onarım elde etmek için, çelik elemanlara FRP olarak bilinen fiber takviyeli polimer plakaların yapıştırılması önerilmektedir. Böylece ısıtılma işlemi uygulanan çelik plakaların azalan dayanım ve rijitliklerinin artırılması hedeflenmektedir. Hasar görmemiş bir çelik elemanın burkulma yükü ve rijitlikleri, ısıtılma işlemi ile onarılan elemanın burkulma yükü ve rijitlikleri ile kıyaslanacak meydana gelen zayıflamanın eklenen polimer plakalarla giderilmesi sağlanacaktır.

Çalışmanın ilk aşamasında gerçekleştirilen küçük ölçekli deneylerde, polimerlerin farklı yerleşim düzenlerinin ve yapıştırma yüzeyinin pürüzlülüğünün güçlendirmeye etkileri incelenmiştir.

İkinci aşamada ise ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılarak lineer olmayan analizler yapılmış, analiz sonucunda elde edilen veriler deneylerden elde edilen veriler ile doğrulanmıştır.

Deney sonuçları incelenerek, dayanımı yüksek, uygulaması kolay, ekonomik bir numune tipi seçilmiş, bu numune tipine büyük ölçekli deneyler yapıldığında nasıl

sonuç vereceğini araştırmak üzere ABAQUS programında parametrik çalışma yapılmıştır. Parametrik çalışmada, incelenen temel parametreler elik plakların boyu, FRP elemanların boy ve yerleşim dzenleridir.

1.2. Tezin Kapsamı

Bu tezde, elik yapılarda kullanılan kesitleri oluşturan elik plakların ısıı işlem sonrası FRP plaklar ile güçlendirilmesinde, rijitleştirilmemiş (iki tarafından mesnetlenmiş) ve rijitleştirilmiş ( kenarından mesnetlenmiş, artı kesitli) elik plaklar kullanılmıştır.

Tezin birinci bölümünde tezin amacı ve kapsamı özetlenmektedir.

İkinci bölümünde, literatür çalışmalarında elik elemanlara uygulanan onarım yöntemleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. FRP malzemesinin tarihi gelişimi ve genel özellikleri üzerinde durulmuştur.

nc bölümünde, yapılan deneysel çalışmada kullanılan malzeme ve metodlar sunulmuştur. Deneylede kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin nasıl belirlendiği açıklanmıştır. Devamında ise, deney numunelerinin nasıl hazırlandığı, uygulanan ısıı ve düzeltme işlemlerinin nasıl yapıldığı, deneylede kullanılan bütün düzenekler, cihazlar ve makinalar sunulmuştur.

Dördüncü bölümünde, hazırlanan deney numunelerinin aksenal basınç deneyledeki dayanım ve davranışları incelenmiştir. Deney numunelerinin bir kısmı rijitleştirilmemiş (iki tarafından mesnetli) diğer kısmı ise rijitleştirilmiş ( tarafından mesnetli) elik plakalardan oluşmaktadır. elik plakalara farklı dzenlerde yapıştırılan CFRP ve GFRP plakaların elemanların davranışlarına etkileri incelenmiş, elde edilen deney sonuçları değerlendirilmiştir.

Beşinci bölümünde, deneyleyi yapılan elik elemanların sonlu elemanlar modelinin nasıl oluşturulduğu anlatılmıştır. Kullanılan malzeme ve sonlu eleman özellikleri

verilmiştir. Bu bölümde analizler ABAQUS sonlu elemanlar programı ile yapılmış, elde edilen sonuçlar deneyler ile karşılaştırılmış ve nümerik modeller doğrulanmıştır.

Altıncı bölümde, beşinci bölümde yapılan doğrulama işlemi sonrasında parametrik çalışmaya geçilmiştir. Farklı kesit alanı ve yüksekliklere sahip çelik plakalara, farklı genişlik ve yerleşim düzeninde GFRP elemanlar yapıştırılarak analizler yapılmıştır. Böylece gerçek numune üzerinde sınırlı sayıda yapılmış olan laboratuvar deneyleri, doğrulanmış nümerik model ile artırılmıştır. Parametrik çalışmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Rijitleştirilmiş ve GFRP ile güçlendirilen çelik plakaların k burkulma katsayısı için b/t oranına bağlı formül önerilmiştir.

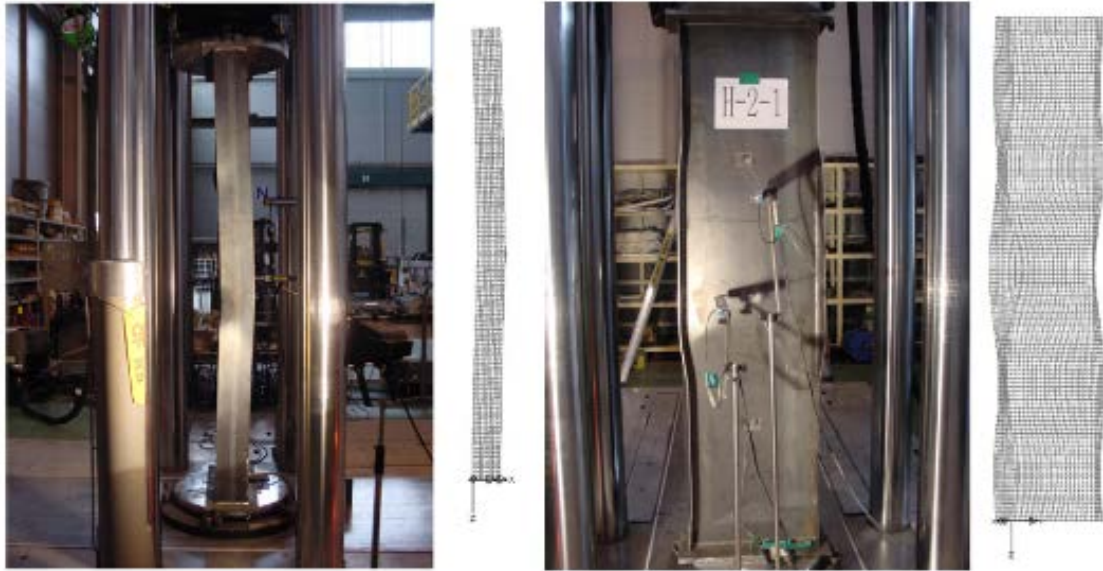
Tezin son bölümünde ise yapılan çalışmalardan çıkartılan temel sonuçlar özetlenmiş, gelecekte bu konuda yapılacak araştırmalara temel olacak öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde çelik yapı elemanlarına uygulanan aksenal basınç deneyleri ile hasar görmüş yapı elemanlarına uygulanan ısıl-presleme işlemi ve FRP ile güçlendirme alanlarında yapılan literatür çalışmaları sırası ile özetlenmiştir.

2.1. Çelik Kolon Deneyleri

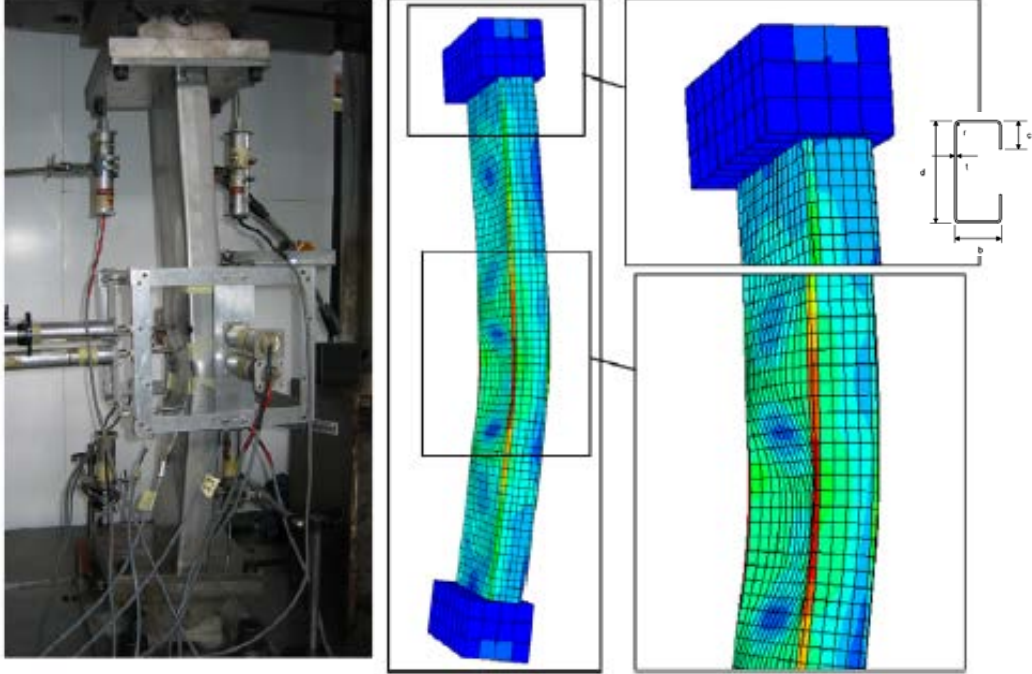
Kwon ve diğerleri [2], H ve C kesitli soğukta şekil verilmiş ince cidarlı kolonların yerel ve global burkulma arasındaki doğrusal olmayan karşılıklı etkileşimini araştırmışlardır (Şekil 2.1). İnce cidarlı kolonlarda bu etkileşimin kolonun kapasitesine olumsuz yönde etkileri olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca yapılan deneysel çalışmaları sonlu eleman modeli ile doğrulamışlardır.



Şekil 2.1. H ve C kesitli kolonların deney ve sonlu eleman modelleri [2]

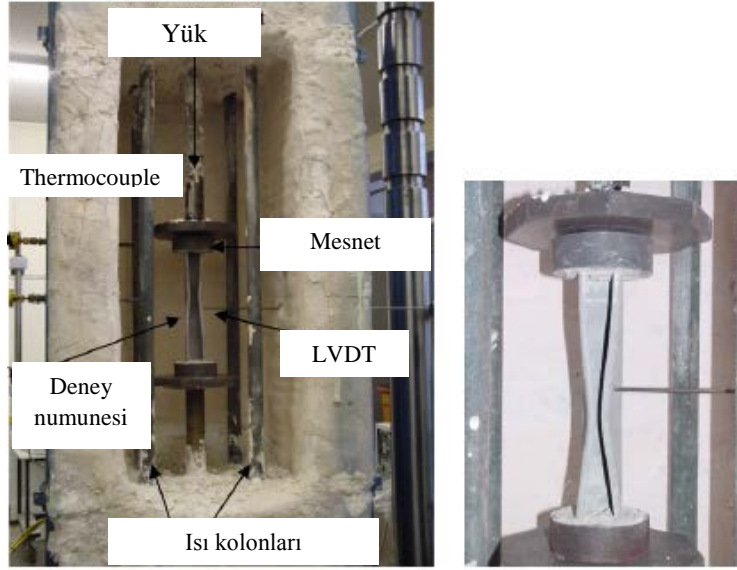
Becque ve Rasmussen [3], çalışmalarında Kuzey Amerika, Avustralya ve Yeni Zelanda şartnamelerdeki yerel burkulma narinlik değerlerinin emniyetli tarafta

kaldığını saptamışlardır. Yaptıkları 29 deney sonucunu sonlu eleman modeli ile doğrulanmış ve parametrik çalışmaları nümerik olarak yapmışlardır (Şekil 2.2).



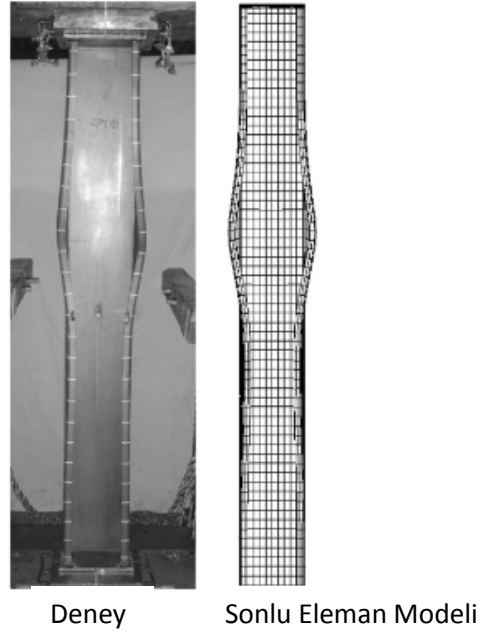
Şekil 2.2. Açık kanallı kesitlerde deney ve sonlu eleman modeli [3]

Ranawaka ve Mahendra [4], soğukta şekil verilmiş çelik profillerin yüksek sıcaklıklardaki burkulma davranışlarını incelemişlerdir. Çeliğe aynı anda sıcaklık ve aksenal basınç yükü verebilecekleri bir düzenek hazırlamışlardır (Şekil 2.3). Bu amaçla 20-800 °C arasında değişen sıcaklıklarda 150'den daha fazla burkulma deneyi yapmışlardır. Yüksek sıcaklıklarda elemanların yük taşıma kapasitelerini tahmin etmeye çalışmışlardır.



Şekil 2.3. Sıcaklık artışı ile çeliğin burkulma davranışı [4]

Zhang ve diğerleri [5], deneysel ve sonlu eleman modellemesinden oluşan çalışmalarında 36 adet numunenin basınç deneylerini yapmışlardır (Şekil 2.4). Sonlu eleman modeli ile de kolonların burkulma yüklerinin tahmin edebildiğini göstermişlerdir.

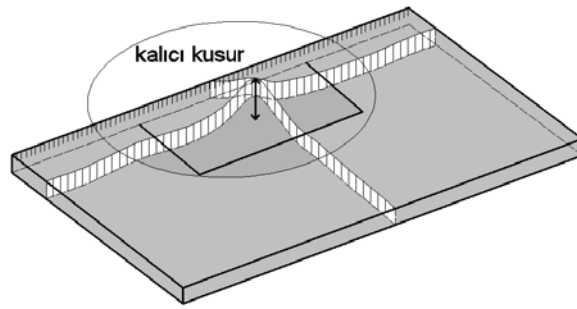


Şekil 2.4. Açık kanallı kolon deneyi [5]

2.2. Isıl ve Presleme İşlemi

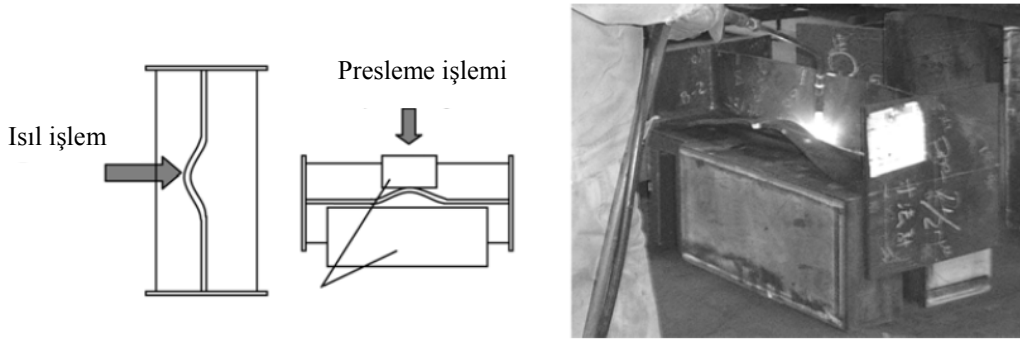
Literatürde önerilen geçici onarım yöntemlerinden birinde [6-8], hasar gören çelik elemanlar ısıtılma işlemine tabi tutulmakta ve sonrasında yumuşayan bölgelerdeki geometrik kusurları yok etmek için presleme işlemi yapılmakta ve ardından hava sıcaklığında soğutulmaya bırakılmaktadır.

Hirohata ve diğerleri [6], ısıtılma ve presleme işlemi uygulanan artı kesitli çelik elemanları burkulma deneyine tabi tutarak, presleme işleminin levha birleşim noktalarında tam olarak yapılamaması nedeni ile kalıcı şekil değiştirmelerin tamamen giderilememesi sonucu elemanların basınç altındaki davranışlarının değişmekte olduğunu göstermişlerdir (Şekil 2.5).



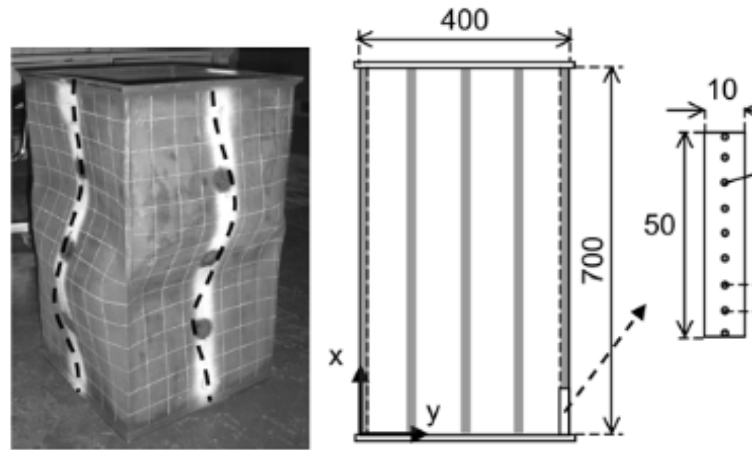
Şekil 2.5. Kalıcı gerilmeler ve kalıcı geometrik kusurlar [6]

Kim ve Hirohata [7], aksenal yük altında test ettikleri artı kesitli basınç elemanlarının ait burkulma yüklerini ve yatay yer değiştirmelerini raporlamışlardır. Daha sonra hasar gören aynı deney numunelerini ısıtılma işlemi ile düzelterek tekrar aksenal basınç yükü altında test etmişlerdir. Numunelere uygulanan bu işlem Şekil 2.6'da gösterilmektedir. Deney sonuçları her iki durumda da maksimum yükler arasında kayda değer fark bulunmadığını ancak ısıtılma işlemi gören numunelerin rijitliklerinde artık gerilmelerden dolayı azalma meydana geldiğini göstermiştir. Araştırmacılar deney sonuçlarını sonlu eleman modeli ile de doğrulamışlardır.



Şekil 2.6. Isıl ve presleme işlemi [7]

Kim ve Hirohata [8], yaptıkları çalışmada genişliği 400 mm, kalınlığı 20 mm ve yüksekliği 700 mm olan içi boş kare kesitli çelik kolonları incelemiştir (Şekil 2.7). Bu kolonlara burkulma deneyinin ardından ısıtıl ve presleme işlemi uygulamışlardır. Kolonların yükseklikleri boyunca sertlik deneyi uygulayarak ölçümler almışlardır. Burkulma sonrası elemanlara uygulanan ısıtıl-presleme işleminin kolonların maksimum yük taşıma kapasitelerinde çok önemli bir değişikliğe neden olmadığını, ancak elemanların burkulma modlarının değiştiğini, ayrıca kalıcı gerilmeler ve sertlikteki değişiklikler nedeniyle elemanın burkulma yükü altındaki davranışının değiştiğini hem deneysel hem de sonlu elemanlar modelini oluşturarak göstermişlerdir.



Şekil 2.7. Isıl ve presleme işlemi uygulanan kare kesitli kolon [8]

2.3. FRP ile Güçlendirme

Birçok çelik yapı elemanı (köprüler, sahil platformları, binalar v.b) güçlendirilmeye ihtiyaç duyarlar. Çelik yapılarda kullanılan geleneksel onarım yöntemlerinde elemanın kesilerek yerine yenisi yerleştirilmekte veya elemanların üzerine çelik plakalar eklenmektedir. Çoğu zaman ek plakaların hacimleri ve dolayısıyla ağırlıkları, uygulaması zor, korozyon ve yorulmaya karşı dirençleri de azdır [9]. Bu noktada alternatif güçlendirme tekniklerinin aranması gerekmektedir. Bu tip güçlendirmelerde FRP elemanların kullanımı bir çözüm olarak sunulmaktadır [10-12].

FRP ağırlığına oranla yüksek dayanıma, mükemmel korozyon dayanımına ve çevre koşullarına dirence sahiptir. Ayrıca esnek bir yapıya sahiptir, bütün şekillerde üretilebilmekte ve kolay bir şekilde uygulanabilmektedir [13-15].

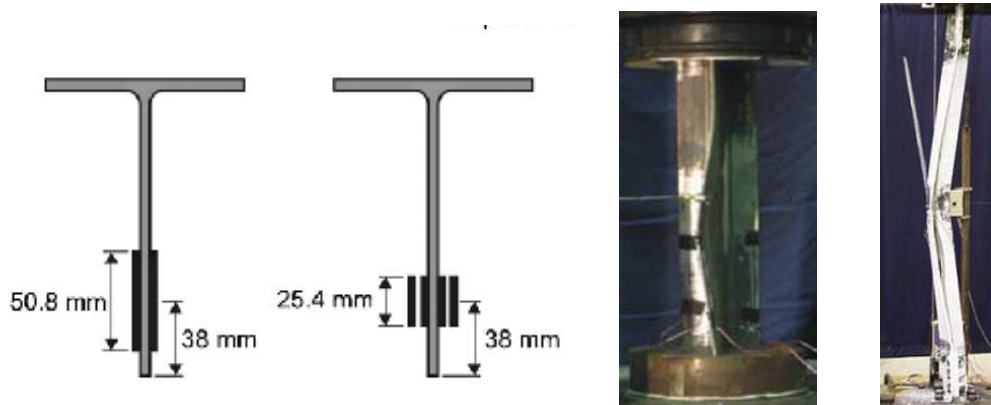
FRP betonarme yapılarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Amerika [16-20], İngiltere [21-24], Japonya [25], ve İsviçre [26]' de yapılan son çalışmalar çelik yapıların güçlendirilmesinde CFRP' nin kullanımında büyük bir artış olduğunu göstermektedir.

Güven [27], yaptığı çalışmada yerel burkulma kapasitelerini artırmak amacıyla 200 mm genişliğinde ve 350 mm yüksekliğinde çelik plakalara 3 farklı (2, 4 ve 16) katman ve 2 farklı genişliğe (80 ve 160 mm) sahip GFRP plakalar yapıştırılmıştır. Hazırladığı bu deney numunelerini eksenel basınç deneyine tabi tutmuştur (Şekil 2.8). Deney sonuçları elemanların basınç kapasitelerinin %11 arttığını göstermektedir.



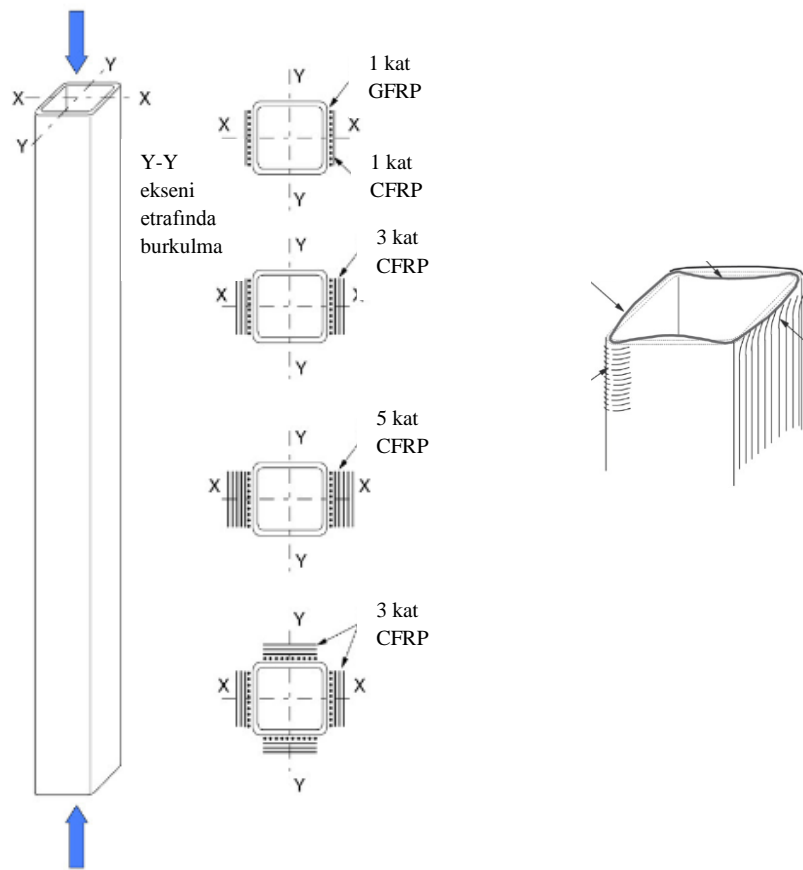
Şekil 2.8. GFRP eklenen çelik plaka [27]

Harries ve diğerleri [28], WT kesitinde çelik profillerin basınç altındaki kararlılık durumlarını artırmak amacıyla profillere CFRP ve GFRP plakalar yapıştırmışlardır (Şekil 2.9). Biri FRP yapıştırılmamış referans WT çelik profili olmak üzere, bir ve iki tabaka halinde ikişer adet GFRP ve CFRP plaka yapıştırılmış beş adet deney numunesi hazırlamışlardır. Bu numunelerin elastik ve elastik olmayan burkulma davranışlarını incelemek üzere 1664 mm ve 356 mm olmak üzere iki farklı boyda çelik profil kullanmışlardır. Deney sonuçları çelik profillere FRP yapıştırmanın yerel burkulma davranışında olumlu katkılar sağlandığını ve maksimum yük taşıma kapasitesinin %4-14 arasında bir artışa neden olduğunu göstermişlerdir.



Şekil 2.9. Çelik profillere GFRP ve CFRP eklenmesi [28]

Shaht ve Fam [29], CFRP kumaş kullanılarak güçlendirilen içi boş dikdörtgen kesitli kısa ve uzun çelik kolonların aksenal basınç davranışını incelemişlerdir. Deney elemanlarında CFRP kumaşları farklı yönlerde ve katmanlarda yapıştırmışlardır. Kopmaların köşe noktalardan olduğunu gözlemlemişlerdir (Şekil 2.10). Yük taşıma kapasitesinin kısa kolonlarda % 18, uzun kolonlarda ise %13-23 arasında arttığını belirtmişlerdir.



Şekil 2.10. CFRP ile güçlendirilen içi boş kolonlar [29]

Ekiz ve El-Tawil [30], CFRP plakalar ile güçlendirilmiş çeliğin basınç yükü altındaki burkulma davranışını incelemek için analitik ve deneysel araştırma yapmışlardır. Yaptıkları küçük ölçekli testlerde CFRP plakalar kullanıldığında çeliklerin burkulma öncesi ve sonrası yük taşıma kapasitesinde önemli artışlar elde edilebildiğini göstermişlerdir.

Shaaf ve Fam [31], içi boş dikdörtgen kesitli narin çelik kolonların CFRP kumaşlarla güçlendirilmesi için analitik model geliştirmişlerdir.

Teng ve Hu [32], FRP kumaş sarılarak güçlendirilen dairesel kesitli çelik kolonların aksenal yük altındaki davranışlarını hem deneysel hemde sonlu elemanlar modeli ile incelemişlerdir. Dış çapı 165 mm, kalınlığı 4.2 mm ve yüksekliği 450 mm olan kolonlara 1, 2 ve 3 kat FRP kumaş sarıp elemanlara burkulma deneyi yapmışlardır (Şekil 2.11). Bu şekilde yapılan güçlendirme ile yük taşıma kapasitesinde önemli artışlar olduğunu göstermişlerdir. Bu tip bir güçlendirmenin tanklarda ve silolarda kullanılabileceğini önermişlerdir.



Şekil 2.11. Dairesel kesitli kolonlara GFRP eklenmesi [32]

Patnaik ve Bauer [33], çelik kirişlerin güçlendirilmesinde CFRP elemanların etkisini incelemişlerdir. Eğilme yükü altında çekme bölgesinde CFRP ile güçlendirilen kirişleri test ederek yük taşıma kapasitesinde % 30'luk bir artış, kesme kapasitelerinde ise % 62'lik bir artış elde etmişlerdir.

Sayed-Ahmed [34], burkulma bölgelerinde CFRP uygulanan I kesitli çelikler üzerinde yerel burkulmanın etkisi üzerine analitik bir çalışmaya odaklanmıştır. Bu tekniğin amacı kirişin gövdesinde oluşacak yerel burkulmayı geciktirecek bir etki

oluşturmaktır. Bu şekilde hem kritik yükün % 20-60 oranında arttığını hem de maksimum gerilmenin % 2-9 arasında arttığını göstermiştir.

Miller ve diğerleri [35], çelik köprü kirişlerinin CFRP plakalar ile güçlendirilmesine odaklanmışlardır. CFRP plakalar çeliğin eğilme rijitliğini % 11.6 oranında artırdığını ve ayrıca bu plakaların çelik elemanların korozyondan korunmasına yardımcı olduğunu belirtmişlerdir.

Accord ve diğerleri [36], yaptıkları çalışmada GFRP elemanlar kullanarak çelik kirişlerin dayanımlarını artırmaya çalışmışlardır. Sonlu elemanlar modeline dayalı araştırmalarında, başlıkların yerel burkulma gözlenen bölgelerindeki dayanımını artırmak için kirişin plastik mafsallık bölgesinde basınç başlığına GFRP plakaları yerleştirmişlerdir. Böylece kirişin dayanımını % 25 artırdığını aynı zamanda kirişin sünekliliğinde de önemli bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca GFRP' nin yerleşim ve uzunluğunun etkisini de inceleyip, GFRP yerleşiminin önemli olduğunu raporlamışlardır.

Scherch ve diğerleri [37], çelik köprü ve yapıların CFRP ile güçlendirilmesini araştırmışlardır. Çekme başlıklarında, çeşitli yapıştırıcılarla uygulanan CFRP plakalarla güçlendirilen I kirişin davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Güçlendirme uygulamalarında yapıştırıcının önemli olduğunu gözlemlemişlerdir.

Chiew ve diğerleri [38], FRP plakaların çelik kirişlere yapıştırılma hatalarını incelemişlerdir. Çalışma aynı yapıştırıcı için sonlu eleman modeli ve deneysel sonuçların farklı yük durumlarını içermektedir. FRP ile güçlendirilmiş yapılarıdaki yapıştırma hatalarını sonlu elemanlar ve deneysel analiz sonuçlarına göre geliştirmişlerdir.

Sen ve diğerleri [39], CFRP plakalar kullanarak çelik köprü kesitlerinin güçlendirilmesi konusunda çalışmışlardır. Hasar gören kirişler çekme başlıklarına yapıştırılan 2 ve 5 mm kalınlığında 3,65 m uzunluğunda CFRP plakalar ile

güçlendirilmiştir. Deney sonuçlarında maksimum gerilmenin arttığını gözlemlemişlerdir.

El Damatty ve diğerleri [40], çelik elemanların yüzeyi ile FRP arasındaki en önemli faktörün yapışma olduğunu ortaya çıkarmışlardır.

Photiou ve diğerleri [41], yaptıkları çalışmada dikdörtgen kesitli çelik kirişlere CFRP ve GFRP yapıştırmışlardır. Güçlendirilen kirişlere dört noktalı eğilme deneyi yaparak, yük taşıma kapasitesini artırmışlardır.

Colombi ve Poggi [42], H kesitli (HEA 140) çelik kirişin güçlendirme deneylerini yapmışlardır. Üç farklı yapıştırıcı ve üç farklı CFRP tipi kullanmışlardır. Bu şekilde yapılan güçlendirme ile çeliğin akma yükünü % 11-65 oranlarında artırmışlardır.

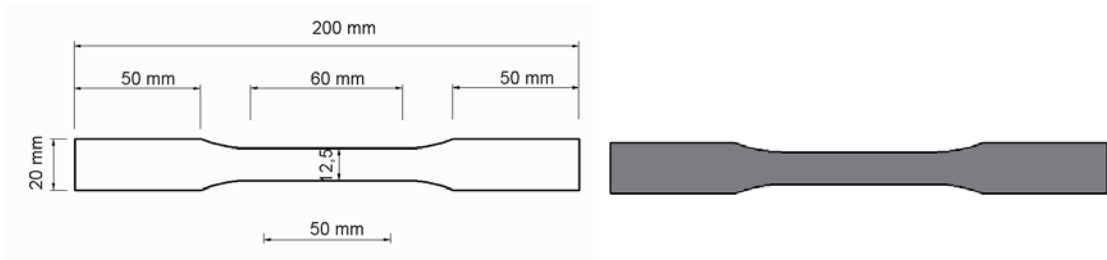
BÖLÜM 3. DENEY NUMUNELERİ VE DÜZENEKLERİ

Bu bölümde, ısıl-presleme işlemi uygulanan hasarlı çelik plakaların FRP elemanlarla onarılması ile elde edilen deney numunelerinde kullanılan malzemelerin; referans çelik, ısıl çelik, GFRP, CFRP ve epoksinin, mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneyler ile çalışma kapsamında hazırlanan deney düzenekleri, kullanılan ekipmanlar ve cihazlar hakkında bilgi verilecektir. Ayrıca deney numunelerinin hazırlama işlemleri hakkında detaylı bilgi sunulacaktır.

3.1. Deney Numunelerinde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

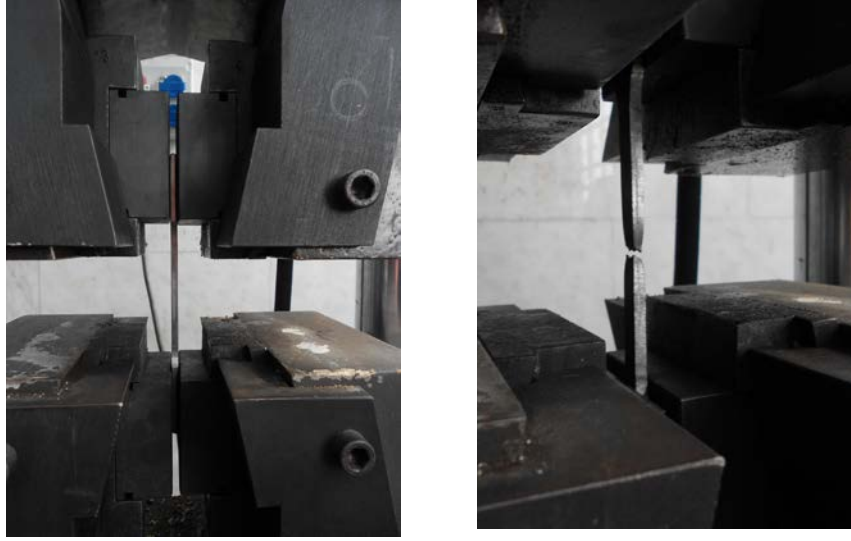
3.1.1.Çelik

Deneylerde kullanılan çelik plakalar St 37 çeliğinden üretilmiştir. Herhangi bir ısıl işlem uygulanmayan çelikler “Referans”, ısıl işlem uygulanan çelikler ise “Isıl” olarak adlandırılmaktadır. Eksenel çekme deneyi için deney numunelerinden üçer adet örnekler alınmıştır. Alınan örnekler ASTM A370-10 standardına göre boyutlandırılmıştır (Şekil 3.1) [43].



Şekil 3.1. Çelik çekme deney numune boyutları

Hazırlanan bu numunelerin deneyleri Bölüm 3.3.2’de özellikleri belirtilen eksenel çekme cihazında yapılmıştır (Şekil 3.2).



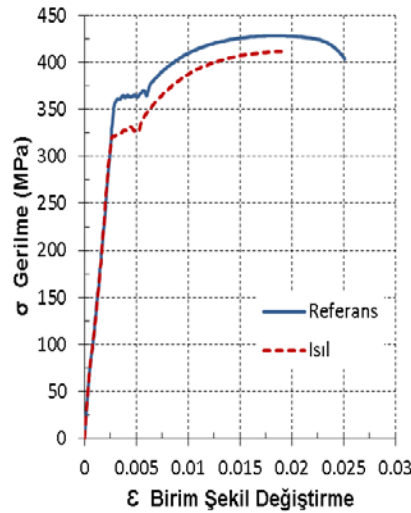
Şekil 3.2. Çelik çekme deneyi

Çelik numunelerin deney öncesi ve sonrası fotoğrafları Şekil 3.3'te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Çelik çekme deney numuneleri

Referans ve ısıtılmış çelik numuneler için gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 3.4'te verilmektedir. Grafikteki değerler her iki numune grubu için, üçer adet numunenin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Grafik incelendiğinde referans ve ısıtılmış numunelerin Elastisite modülleri arasında bir değişiklik meydana gelmediği, ancak ısıtılmış işlem uygulanan çeliklerin akma değerlerinin düştüğü görülmüştür.



Şekil 3.4. Referans ve Isıl çelik numulere ait gerilme-şekil değişirme grafiği

Çelik numuneler için elde edilen mekanik özellikler Tablo 3.1’de sunulmuştur..

Tablo 3.1. Referans ve ısı çelik numunelerin mekanik özellikleri.

	Referans	Isıl
Elastisite Modülü (GPa)	210	210
Akma Dayanımı (MPa)	350	315

3.1.2. GFRP

Deneylerde kullanılan GFRP elemanlar, ülkemizde faaliyet gösteren Esa Kimya Metal Sanayi ve Tic. Ltd. Şti.’nin üretimidir. Polimer matris ve cam lifi takviyesi ile istenilen şekil ve ebatlarda üretilebilen bu elemanlar, üstün mekanik özelliklerinin yanında ağırlığa oranla yüksek dayanım, su ve atmosferik etkilere dayanıklılık, mükemmel elektriksel yalıtıcılık, anti mikrobik, burulma ve sıkıştırma gibi zorlanmalarda şekillerini ve boyutlarını koruyabilme gibi özelliklere sahiptirler. Çelik elemanlara yapıştırılan bu GFRP elemanların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 25 mm genişliğinde, 3 mm kalınlığında ve 250 mm uzunluğunda üç adet numune çekme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 3.5). Numune boyutları ilgili standartlara [44-46] ve deney şartlarına uygun şekilde hazırlanmıştır.



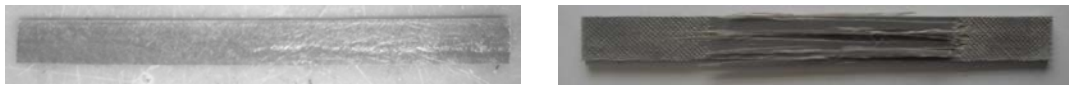
Şekil 3.5. GFRP çekme deney numune boyutları

Hazırlanan bu numunelerin deneyleri Bölüm 3.3.2’de özellikleri belirtilen aksenal çekme cihazında yapılmıştır (Şekil 3.6).



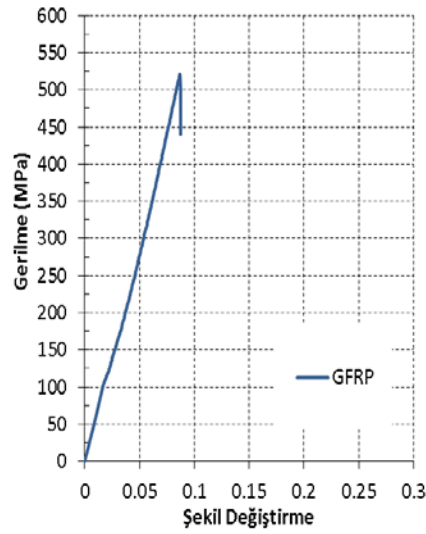
Şekil 3.6. GFRP çekme deneyi

GFRP numunelerinden bir tanesine ait deney öncesi ve sonrası fotoğrafı Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. GFRP çekme deney numuneleri

GFRP numuneler için çizilen gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 3.8’te verilmiştir. Grafik üç adet deney numunesinin ortalaması alınarak hazırlanmıştır.



Şekil 3.8. GFRP numulere ait gerilme-şekil değişirme grafiği

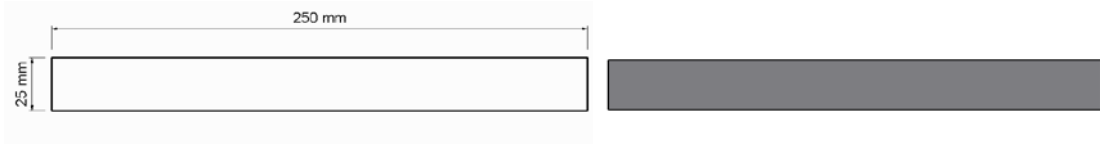
GFRP plakalar için elde edilen mekanik özellikler Tablo 3.2’de sunulmuştur.

Tablo 3.2. GFRP numunelerin mekanik özellikleri

	GFRP
Elastisite Modülü (GPa)	29,3
Çekme Dayanımı (MPa)	520

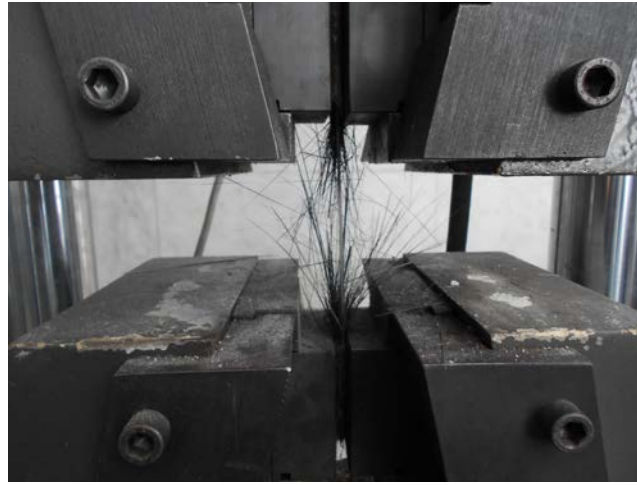
3.1.3. CFRP

Deneylerde kullanılan CFRP plakalar, ülkemizde faaliyet gösteren Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.’nin üretimidir. Firma yapısal güçlendirme işleri için karbon lifli plakalar üretmektedir. Bu plakalar, korozyon riski olmayan, çok yüksek dayanıma sahip, hafif, her boyda imal edilebilen ve bu sayede ek yapılmasına ihtiyaç duyulmayan, kolay taşınan, mükemmel yorulma dayanımına sahip, katmanlar halinde uygulanabilen özelliklere sahiptir. Deneylerde kullanılan CFRP plakalar 25 mm genişliğinde, 1,2 mm kalınlığında ve 250 mm uzunluğundadır. Bu plakaların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla, Şekil 3.9’da belirtilen boyutlarda hazırlanan üç adet numune çekme deneyine tabi tutulmuştur. Numune boyutları ilgili standartlara [44-46] ve deney şartlarına uygun şekilde hazırlanmıştır.



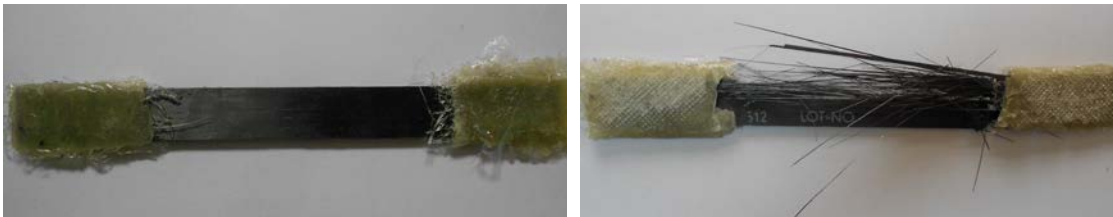
Şekil 3.9. CFRP çekme deney numune boyutları

Hazırlanan bu numunelerin deneyleri Bölüm 3.3.2’de özellikleri belirtilen aksenal çekme cihazında yapılmıştır (Şekil 3.10).



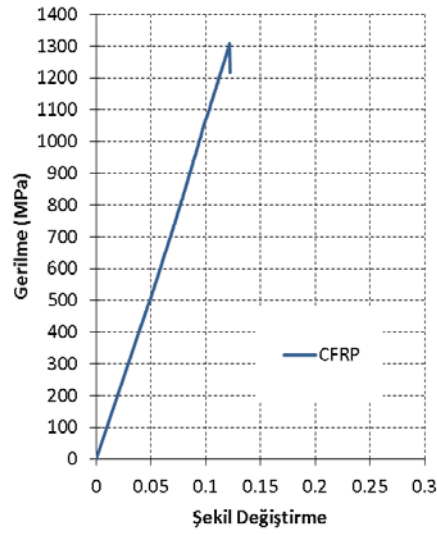
Şekil 3.10. CFRP çekme deneyi

CFRP numunelerinden bir tanesine ait deney öncesi ve sonrası fotoğrafları Şekil 3.11’de gösterilmektedir.



Şekil 3.11. CFRP çekme deney numuneleri

CFRP numuneler için çizilen gerilme-şekil değişirme grafiği Şekil 3.12’ de verilmiştir. Grafik üç adet deney numunesinin ortalaması alınarak hazırlanmıştır.



Şekil 3.12. CFRP numulere ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

CFRP plakalar için elde edilen mekanik özellikler Tablo 3.3'te sunulmuştur.

Tablo 3.3. CFRP numunelerin mekanik özellikleri

	CFRP
Elastisite Modülü (GPa)	165
Çekme Dayanımı (MPa)	1300

3.1.4. Epoksi

Deneyleerde çelik ve GFRP, çelik ve CFRP arasında hangi tür yapıştırıcının daha etkili bir yapışma yüzeyi vereceğini belirlemek amacıyla üç farklı Epoksi çeşidi kullanılmıştır. Kullanılan bu epoksiler, 1. Epoksi, 2. Epoksi ve 3. Epoksi olarak adlandırılmıştır.

1. Epoksi: Spabond 345 isimli bu epoksi yapıştırıcı ve sertleştirici olmak üzere iki bileşenden oluşmuştur ve İngiltere'den temin edilmiştir. Şekil 3.13'de 1.epoksi bileşenleri gösterilmektedir. Bileşenler üretici firmanın belirttiği miktarlarda homojen olarak (1/2 oranında ve 3 dakika) karıştırılmıştır. Yapıştırıcının kuruma süresi iki haftadır.



Şekil 3.13. 1.Epoxinin bileşenleri

2. Epoksi: Köster ChemiFix-100 isimli bu epoksi yapıştırıcı ve sertleştirici olmak üzere iki bileşenlidir. Hazır tüp şeklinde satıldığı için zamandan ve işçilikten tasarruf sağlama, çok hızlı sertleşme ve kürlenme, düşük sıcaklıklarda dahi uygulanabilme, mekanik mukavemet sahip olma ve 1 saatlik bir sürede kuruma özelliklerine sahiptir. Şekil 3.14'te 2. Epoxinin resim ve uygulaması görülmektedir.



Şekil 3.14. 2.Epoxinin uygulaması

3. Epoksi: Huntsman Araldite AW-106 isimli yüksek mukavemet ve tokluğa sahip olan bu epoksi yapıştırıcı ve sertleştirici olmak üzere iki bileşenlidir. Şekil 3.15'te 3.Epoxinin bileşenleri gösterilmektedir. Bileşenler üretici firmanın belirttiği miktarlarda (1/1 oranında) homojen olarak karıştırılmıştır. Yapıştırıcının kuruma süresi iki gündür.



Şekil 3.15. 3.Epoksinin bileşenleri

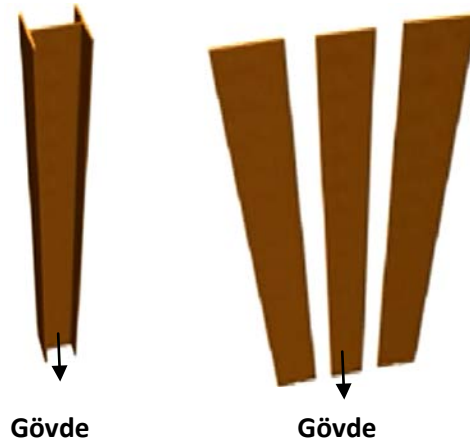
Epoksilere ait özellikler üretici firmalardan elde edilmiştir ve bu değerler Tablo 3.4.'te verilmiştir [47-49].

Tablo 3.4. Epoksi özellikleri

	Elastisite Modülü (MPa)	Yoğunluk (gr/cm ³)
1. Epoksi	2900	1.15
2. Epoksi	3000	1.60
3. Epoksi	1900	1.13

3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Çelik yapı elemanlarında kullanılan profillerin kesitlerine bakıldığında, bu kesitlerin plakaların birleştirilmesi sonucunda oluştuğu söylenebilir. Örneğin, I profilinde gövde plakası her iki ucu mesnetli bir plaka gibi düşünülebilir. Başlık plakasının yarısı ise tek tarafından mesnetli plaka ile temsil edilebilir (Şekil 3.16). Bu tip plakaların burkulma davranışları ayrı ayrı incelendiğinde, profilin de yerel burkulma davranışı incelenmiş olacaktır. Bu amaçla yapılan deneylerde profiller yerine plakaların kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 3.16. Çelik plakaların birleştirilmesi ile oluşturulmuş profil örneği

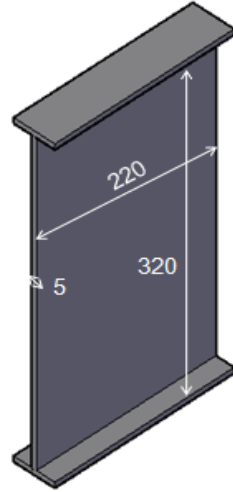
3.2.1. Çelik plakaların hazırlanması

Yapılan çalışmanın amacı, ısı işlemlili plakalarda gözlenen rijitlik ve dayanım kayıplarını azaltabilmek için çelik plakalara FRP elemanlar yapıştırarak kalıcı bir onarımın gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. Ancak FRP elemanlar, çekme dayanımları daha yüksek olduğu için, genel olarak çekme gerilmelerine maruz kalan yerlerde kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada plakaların aksel basınç yüklerine maruz kalacakları göz önüne alındığında öncelikle uygulanacak onarımlarda FRP elemanlarını kullanmanın uygun olup olmayacağını araştırılması gerekmektedir. Bu amaçla deneylerde ilk olarak rijitleştirilmemiş çelik plakalar kullanılmıştır. Aksel basınç yükü altında çelik plakalara FRP eleman eklendiğinde dayanım ve rijitlik artışının meydana geldiği tespit edildikten sonra ikinci olarak rijitleştirilmiş plakalar kullanılmıştır (Şekil 3.17).

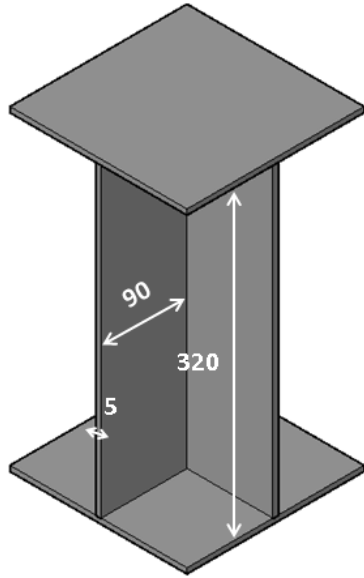
Deneylerde kullanılacak olan çelik plakaların yüksekliği ve genişliği deney cihazında kullanılacak maksimum değerler seçilmiştir.

Rijitleştirilmemiş plakalar için kalınlığı (t) 5mm, genişliği (b) 220 mm kesit alanına sahip, yüksekliği (L) 320 mm, b/t : 44, L/b : 1,45 olan numuneler, Rijitleştirilmiş plakalar için kalınlığı (t) 5mm, genişliği (b) 90 mm kesit alanına sahip, yüksekliği (L) 320 mm, b/t : 18, L/b : 3,56 olan numuneler hazırlanmıştır. Ayrıca çelik plakalara yüklemenin eşit olarak yapılabilmesi ve deney düzeneğinde dengede durabilmeleri

amacı ile alt ve üst bölgelerinden başlıklar kaynaklanarak eklenmiştir (Şekil 3.17). Rijitleştirilmiş plakalar kararlı burkulma hali elde edebilmek amacı ile 4 adet plakanın birleştirilmesiyle artı kesitli olarak hazırlanmıştır.



a



b

Şekil 3.17. a-Rijitleştirilmemiş çelik plakalar b- Rijitleştirilmiş çelik plakalar

Hazırlanan her iki tipteki çelik plakalar “Referans” olarak adlandırılarak aksenal basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonunda burkulan numunelerin ısıtılma ve presleme işlemi uygulanarak eski geometrisini alması sağlanmıştır. Son olarak

numunelerin yüzeylerine yapıştırıcılar kullanılarak FRP elemanlar yapıştırılmış ve yeniden aksel basınç testine tabi tutulmuştur.

3.2.2. Isıl işlem ve düzeltme

Eksenel basınç deneyinde burkulan plaka ve artı kesitli kolonlar ısıl işlem ve presleme işlemi uygulanarak eski şekillerini alması sağlanmıştır. Isıl işlem oksî-gaz alevi ile verilmiştir. Bu esnada çelik plakanın A1 dönüşüm sıcaklığı olan 550~650 C°' ye ulaşmaması için düzenli olarak thermocouple ile ölçümler alınmıştır (Şekil 3.18). Daha sonra presleme işlemi yapılmıştır.



a. Isıl işlem ve thermocouple ile ölçüm alınması

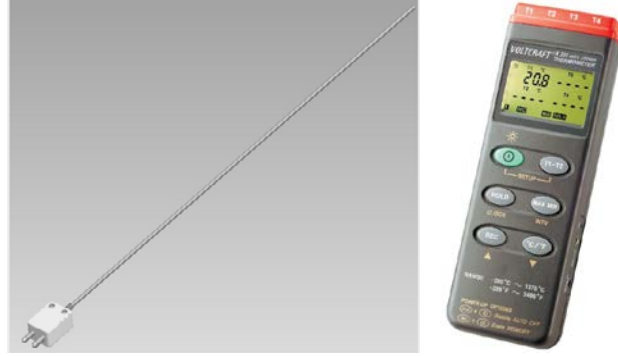
b. Isıl işlem sonrası elemanın preslenerek düzeltilmesi

Şekil 3.18. Rijitleştirilmemiş ve rijitleştirilmiş plakalara ısıl işlem ve presleme işlemi uygulama adımları

3.2.2.1. Isıl işlem sıcaklık ölçüm cihazı

Isıl işlem uygulama esnasında sıcaklığın ölçülmesi için thermocouple cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.19). Bu cihaz -200 ile +1370 °C aralığında ölçüm yapabilecek kapasitededir. Alınan veriler 16000 adet veriyi kaydedebilen veri toplayıcı cihaz ve

özel yazılımı ile bilgisayara aktarabilmektedir. 4 ayrı kanaldan aynı anda ölçümler alabilmektedir.



Şekil 3.19. Thermocouple ve veri toplama cihazı

Bu cihaz sayesinde çelik elemana ısıtma işlemi uygulanması sırasında A1 dönüşüm sıcaklığına ulaşıp ulaşılmadığı kontrol edilmiştir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20. Thermocouple cihazı ile ölçüm yapılması

3.2.2.2. Presleme makinası

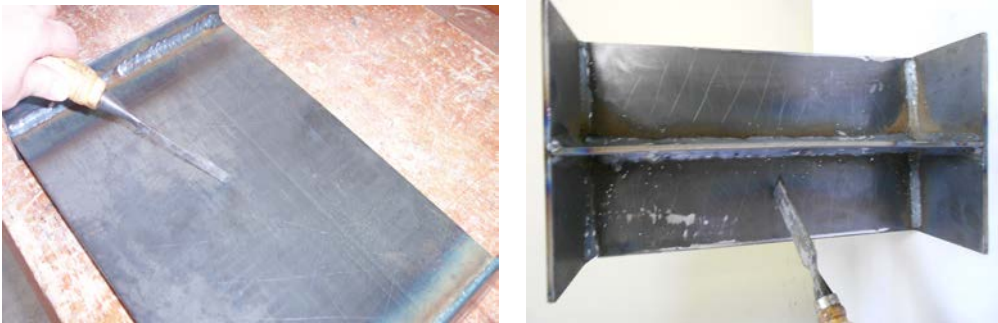
Isıl işlem gören çelik plakaların preslenerek düzeltilmesi işleminde pres makinası kullanılmıştır (Şekil 3.21). Makine 200 ton kapasitelidir. Otomatik olarak yükleme yapmaktadır.



Şekil 3.21. Pres makinası

3.2.3. Yüzey pürüzlülüğünün artırılması

GFRP ve CFRP uygulamasının yapılacağı çelik yüzeyler kirden, yağdan ve varsa pastan arındırılmıştır. Bu işlem tel fırça ve zımpara kullanılarak kolayca uygulanmıştır. Epoksi yapıştırılacak olan çelik yüzeye aderansı artırmak amacıyla çizme işlemi uygulanmıştır (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. Çelik yüzeyin çizilmesi

Yüzey pürüzlülüğündeki artışın etkisini araştırmak amacı ile, çelik plakaların yüzeylerine taşlama işlemi uygulanmıştır (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. Yüzey taşlama işlemi

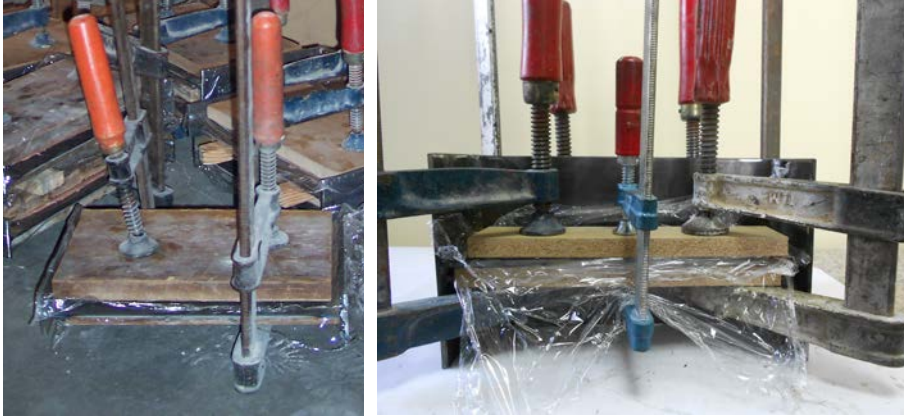
3.2.4. GFRP ve CFRP yapıştırılması

Kullanılacak olan epoksi üretici firmanın belirttiği oranlarda ve oda sıcaklığında mikser kullanılarak homojen olacak şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan epoksi GFRP ve CFRP yüzeylerine homojen bir şekilde mümkün olduğunca aynı kalınlıkta sürülmüştür (Şekil 3.24).



Şekil 3.24. Epoksi uygulaması

Epoksi sürülen GFRP ve CFRP elemanlar hazırlanan çelik yüzeye yapıştırılmıştır. Epoksinin homojen dağılması amacıyla işkence aletleri ile sıkıştırma işlemi uygulanmıştır (Şekil 3.25).



Şekil 3.25 Sıkıştırma işlemi

Çelik yüzeye yapıştırılan GFRP ve CFRP' ler üretici firmanın epoksi için belirttiği sertleşme süresi doluncaya kadar işkence aletleri ile sıkıştırılmıştır. Bu süre dolduğunda işkence aletleri sökülmüş ve numuneler deney yapılmaya hazır hale gelmiştir (Şekil 3.26).



Şekil 3.26. Deney için hazır olan numunelerden birer örnek

3.3. Deney Düzenekleri

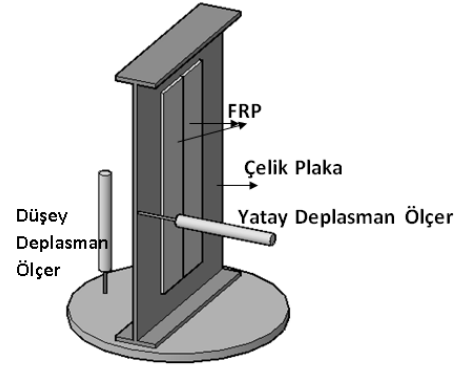
Bu bölümde aksenal basınç ve çekme deneylerinin gerçekleştirildiği deney düzenekleri hakkında bilgi verilmektedir.

3.3.1. Eksenel basınç deneyi

Eksenel basınç deneyinde 3000 kN kapasiteli basınç makinasına bağlı 8 kanallı veri toplama cihazı ile okumalar alınmıştır. Deney esnasında yükün yanı sıra yatay ve düşey yer değiştirmeler de kaydedilmiştir. Deney düzeneğinin ve ölçüm cihazlarının yerleşimi ile ilgili görüntüler Şekil 3.27'de verilmiştir. Yatay yer değiştirme ölçümleri, çelik plakaların yükseklik doğrultusundaki orta noktasında alınmıştır. Düşey yer değiştirmeler ise alt mesnet referans alınarak ölçülmüştür.



a) Deney düzeneği

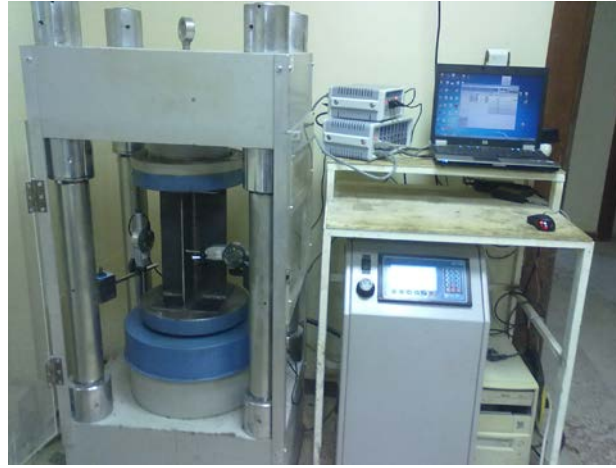


b) Ölçüm cihazlarının yerleşimi

Şekil 3.27. Eksenel basınç deney düzeneği ve ölçüm cihazları

3.3.1.1. Eksenel basınç makinası

Burkulma deneylerinde eksenel yük verilmesi için 3000 kN kapasiteli eksenel basınç makinası kullanılmıştır (Şekil 3.28). Makina ile hem manuel hem de otomatik olarak yük uygulanabilmektedir. Deneylerde yükler otomatik olarak uygulanmıştır. Yükleme hızı 3 kN/saniye dir. Saniyede 8 veri kaydedebilen veri toplama cihazına bağlanmıştır.



Şekil 3.28. Eksenel basınç makinası

3.3.1.2. Yer değiştirme ölçüm cihazı

Eksenel basınç deneylerinde yatay ve düşey yer değiştirmeleri ölçmek amacıyla iki adet yer değiştirme ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihazlar dijital olarak yer değiştirmeleri göstermektedir (Şekil 3.29). 0-50 mm aralığında ölçüm yapabilen, 0.01 mm hassasiyete sahiptir ve yerdeğiştirme verilerini veri toplama cihazına aktarabilmektedir.



Şekil 3.29. Dijital yer değiştirme ölçüm cihazı

3.3.1.3. Veri toplama cihazı

Deney düzeneğinde veri toplama amacıyla veri toplama cihazları kullanılmıştır. Cihazların bir tanesi 8 kanallı ve analog girişlidir. Diğeri 4 kanallı ve dijital girişlidir. Cihazların ikisi de ± 10 V aralığında ölçüm yapabilmektedir. Aynı zamanda cihazlar saniyede 8 veri kaydedebilen özelliğe sahiptirler (Şekil 3.30 a). Analog girişe eksenel

basınç makinası, dijital girişe yatay ve düşey yer değiştirme ölçme cihazları yerleştirilmiştir. Veri toplama cihazları özel bir yazılım ile bilgisayara aktarılmıştır (Şekil 3.30 b).



a



b

Şekil 3.30. a-Veri toplama Cihazı b- Verilerin aktarılması

3.3.2. Eksenel çekme deneyi

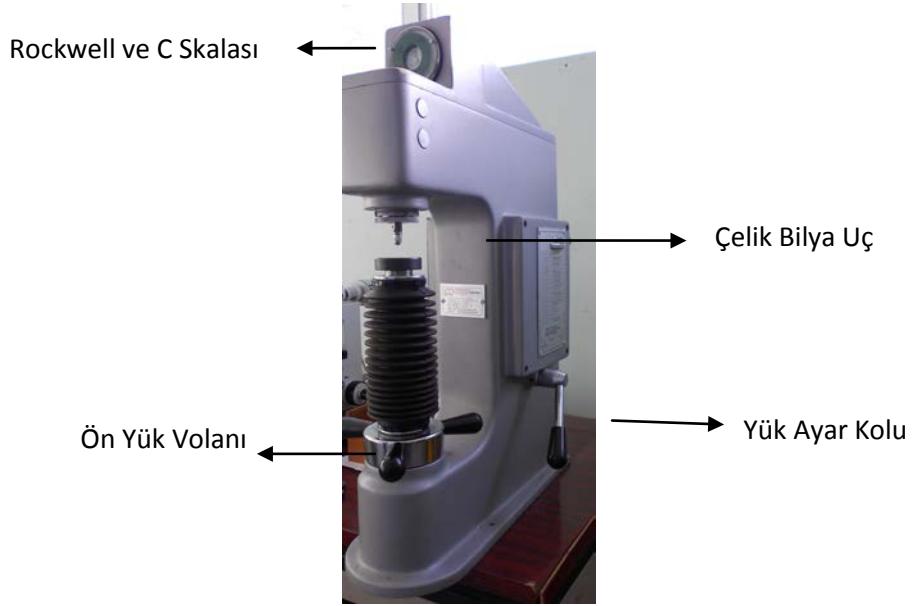
Deneylerde kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla her bir malzeme için çekme deneyi yapılmıştır. Çekme deneylerinde eksenel çekme makinası kullanılmıştır. Bu makine 40 ton çekme kapasitesine sahip, hidrolik yüklemeli ve bilgisayar donanımlıdır. Deney düzeneği hem manuel hem de otomatik yüklemeli ve bilgisayar donanımlıdır. Deney grafiklerini çizebilen ve deney sonuçlarını rapor şeklinde sunabilen özelliğe sahiptir. Çekme testlerinin gerçekleştirildiği çekme makinası ve bilgisayar donanımı Şekil 3.31’de gösterilmiştir.



Şekil 3.31. Çekme makinası ve donanımı

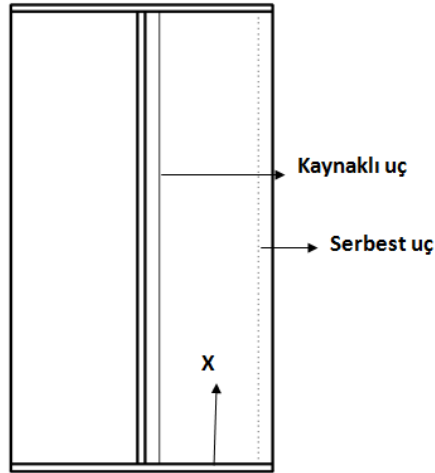
3.3.3 Brinell sertlik deneyi

Deneylerde çelik elemana uygulanan ısıl işlem sonunda çelik malzemenin fiziksel olarak herhangi bir değişim geçirip geçirmediğini gözlemlemek amacıyla Brinell sertlik deneyi yapılmıştır. Deney cihazı Şekil 3.32’de verilmiştir.



Şekil 3.32. Brinell sertlik ölçüm cihazı

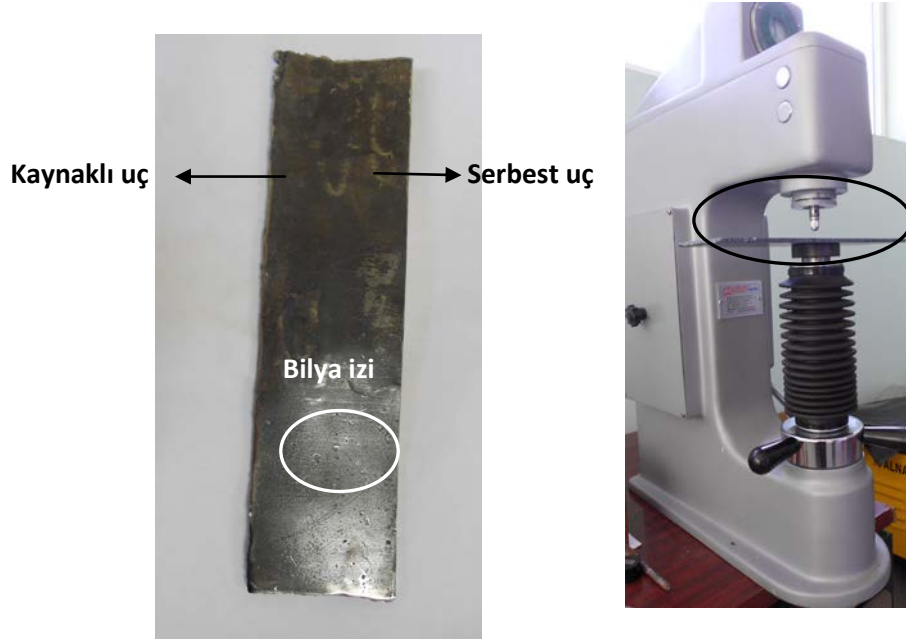
Deneylerde hem referans hem de ısıtılmış çelik numunelerden alınan örnekler kullanılmıştır. Deneyler ASTM A370-10 standartına göre yapılmıştır [43]. Numunelerin kaynağa yakın ve serbest olan uçlarından ölçümler alınmıştır (Şekil 3.33).



Şekil 3.33. Deney numunesinin kaynaklı ve serbest uçları

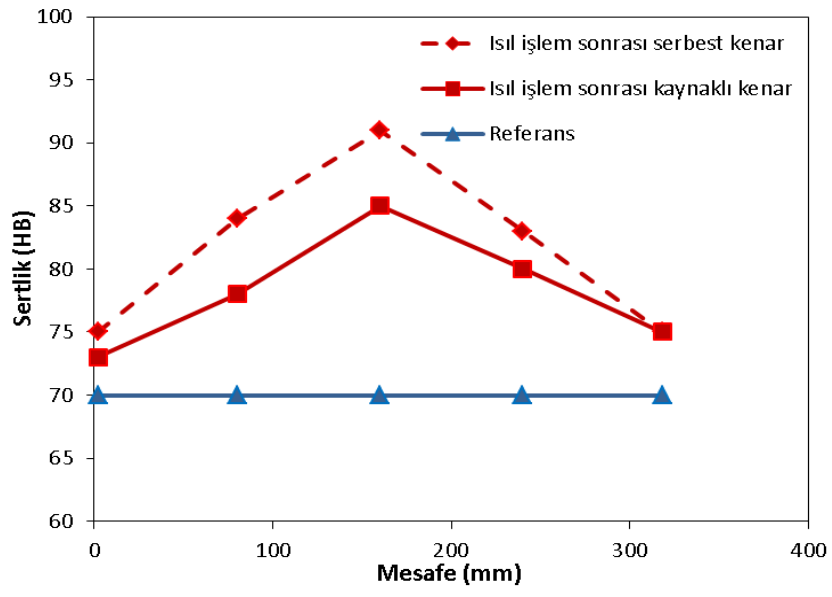
Çelik malzemenin kalınlığının 5 mm olmasından dolayı 2,5 mm çapındaki sert bilya çelik malzeme yüzeyine 187.5 kg yük uygulanarak 30 sn süre ile bastırılmıştır. Uygulanan bu yükün, meydana gelen iz alanına bölünmesiyle Brinell sertlik değeri

(BSD) hesaplanmıştır. Şekil 3.34'te Brinell sertlik deneyi uygulanmış bir deney numunesi ve deneyin yapılışı görülmektedir.



Şekil 3.34. Brinell sertlik deneyi

Deney sonucunda elde edilen veriler Şekil 3.35'teki grafikte gösterilmiştir. Bu verilere göre referans elemanın sertlik değeri her bölgede aynıdır. Isıl işlem uygulanan elemanlarda ise burkulmanın olduğu ve daha yoğun ısıl işlem uygulanan bölgede sertlik değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca daha fazla yer değiştirmenin olduğu serbest ucun sertlik değeri yine daha yoğun ısıl işlem uygulanmasından dolayı kaynaklı uca göre daha fazladır.



Şekil 3.35. Brinell sertik deney sonuçları

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

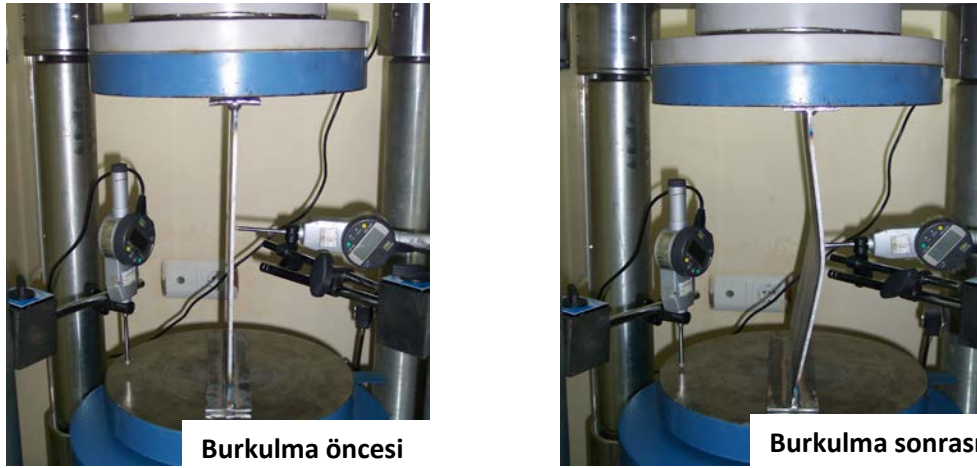
Tezin ilk aşamasını oluşturan deneysel çalışmalarda, çalışmanın amacına yönelik özel olarak aksenal basınç deney düzeneği hazırlanmış ve ısıl işlem uygulanarak düzeltilmiş çelik plakalara farklı yerleşimlerde FRP (Fiber Reinforce Polymer) elemanlar yapıştırılarak basınç davranışları incelenmiştir. Bu şekilde çelik elemanın ısıl işlem öncesi dayanımı ve rijitliği elde edilmeye çalışılmıştır.

Çalışma kapsamında farklı mesnet koşullarına sahip plakaların nasıl bir davranış ve dayanım sergileyeceğini gözlemleyebilmek amacıyla rijitleştirilmemiş ve rijitleştirilmiş çelik plakalar kullanılmıştır. Onarım ve güçlendirme işlemi görmemiş plakalar aksenal basınç testine tabi tutulmuşlardır. Burkulan numuneler daha sonra ısıl işlem ile yumuşatılmış ve hemen ardından preslenmek suretiyle eski geometrilerini kazanmaları sağlanmıştır. Onarım gören bu numuneler aksenal basınç testine yeniden tabi tutularak, davranışları referans numunelerin davranışları ile kıyaslanmıştır. Ortaya çıkan farklar güçlendirme yapılarak giderilmeye çalışılacaktır.

Deney numuneleri, rijitleştirilmemiş (iki tarafından mesnetli) plakalar “S2”, rijitleştirilmiş (üç tarafından mesnetli) plakalar “S3”, ısıl işlem görmeyen plakalar “R”, ısıl işlem gören plakalar “HT”, GFRP ile güçlendirme yapılan plakalar “G”, CFRP ile güçlendirilen plakalar “C”, ver yerleşim düzeni C1, C2, C3,...olacak şekilde isimlendirilmiştir.

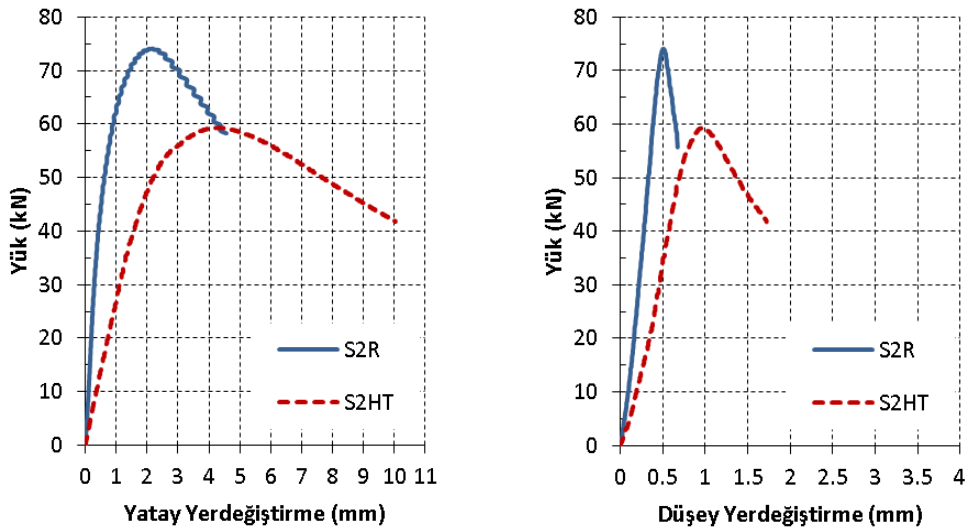
4.1. Rijitleştirilmemiş Plakalar

Bölüm 3.2’de boyutları ve Bölüm 3.3’de deney düzeneği verilen rijitleştirilmemiş üç adet plaka aksenal basınç yükü altında burkulmuştur. Plakaların burkulma öncesi ve sonrası görünüşleri Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Rijitleştirilmemiş çelik plakaların burkulması

Deney sırasında numunelere uygulanan yük ile numunenin yaptığı yatay ve düşey yer değiştirme değerleri kaydedilmiş ve grafiklenmiştir. Grafikler üç adet numunenin ortalaması alınarak grafikler çizilmiştir (Şekil 4.2). Deney verileri S2R (referans) ve S2HT (ısıl işlem gören) plakalar arasında hem rijitlik hem de yük taşıma kapasitesi açısından farklılıklar olduğunu göstermektedir. Isıl işlem gören plakaların yük taşıma kapasitelerinin referans plakalara göre % 20 daha az olduğu görülmüştür. Rijitlikler kıyaslandığında düşeyde % 51'lik rijitlik azalması olduğu görülmektedir.



Şekil 4.2. Rijitleştirilmemiş referans ve ısıl plaka grafiği

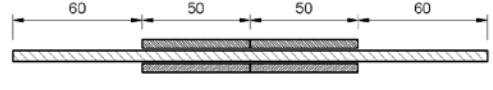
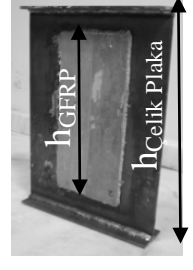

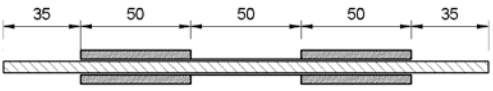
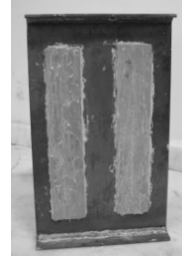

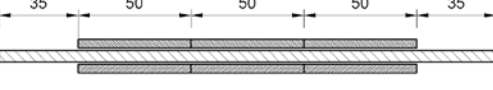


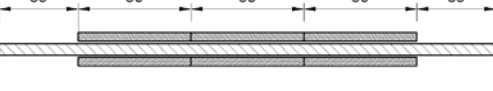


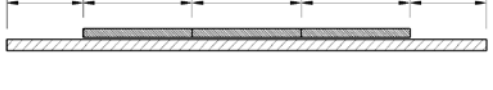


4.1.1. Kılavuz plaka deneyleri

Bölüm 3.2.1’de bahsedilen FRP elemanların aksenal basınç dayanımını artırıp artırmadığını görebilmek amacı ile öncelikle çalışmaya kılavuz olabilecek deneyler yapılmasına karar verilmiştir. Hiçbir ısı işlem uygulanmamış plakalara Bölüm 3.1.4’te özellikleri belirtilen Epoksi 1 kullanılarak, 5 farklı grupta GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) elemanlar yapıştırılarak deney numuneleri oluşturulmuştur.

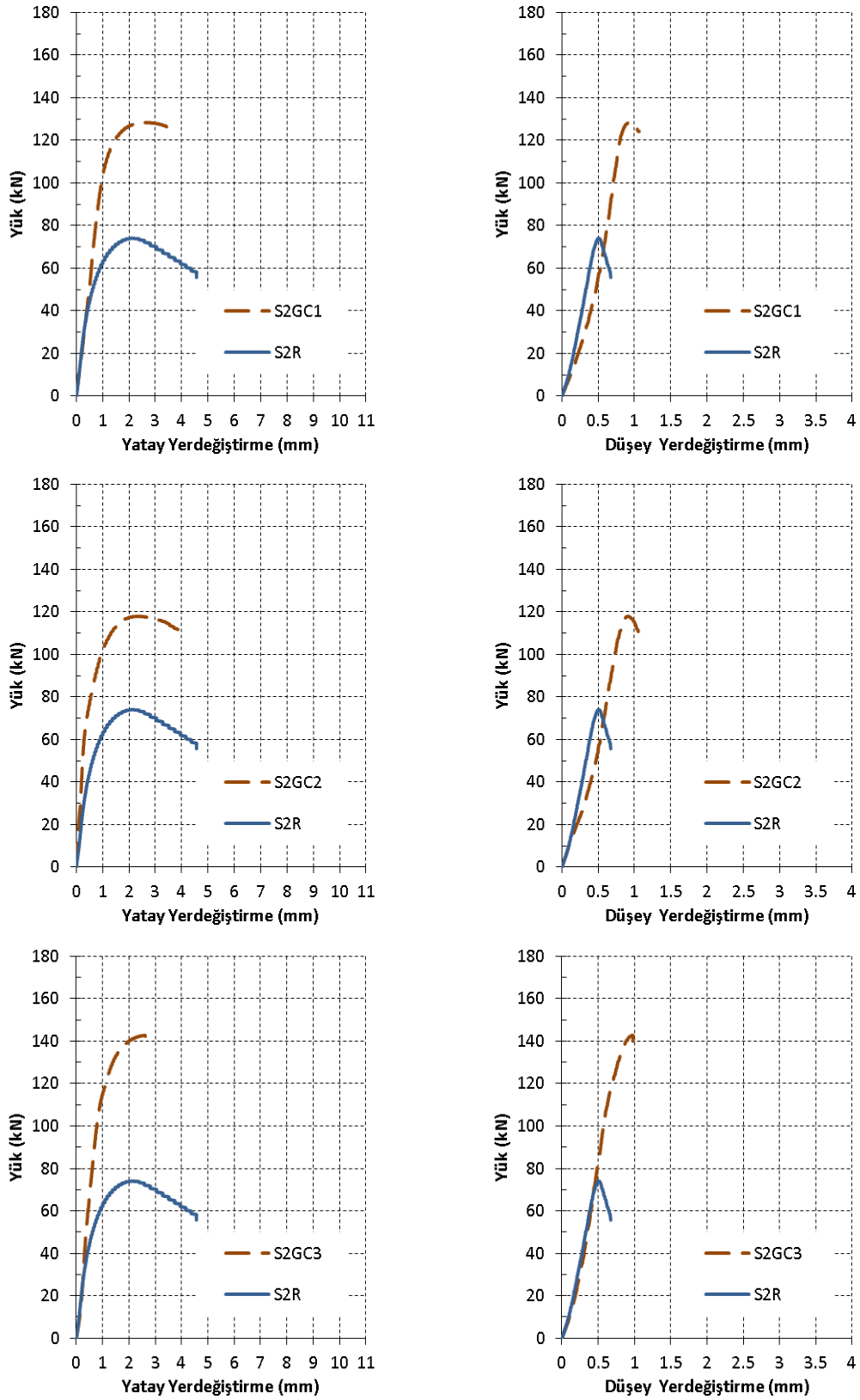
GFRP’lerin plaka serbest uçlarına olan mesafelerinin ve arada boşluk bırakılarak yerleştirilmelerinin etkisini gözlemek için S2GC1 ve S2GC2, GFRP miktarının etkisini gözlemek için S2GC3, çelik plaka yüzeyine taşlama işlemi ile pürüzlülük verilerek aderansın etkisini gözlemek amacıyla S2GC4, GFRP nin daha ekonomik kullanımını ve simetri oluşturmadan kullanıldığında etkisini gözlemek amacı ile S2GC5 yerleşim düzenlerinde deney numuneleri hazırlanmıştır. Her bir grup numuneden ikişer adet hazırlanmış ve grafikler bu numunelerin ortalamaları alınarak çizilmiştir. GFRP yapıştırma düzenleri, deney numunelerinin kesit ve görünüşleri ile deney sonrası görünümleri Tablo 4.1.’de verilmiştir.

Numunelerin deney sonrası çekilen fotoğraflarına bakıldığında GFRP elemanların çelik plakadan sıyrıldığı ve herhangi bir deformasyona uğramadan göçmenin olduğu gözlenmiştir.

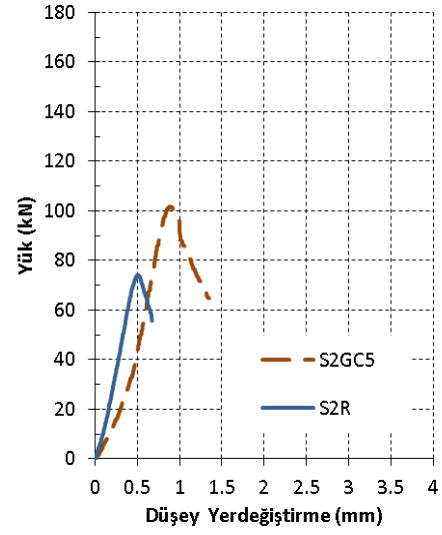
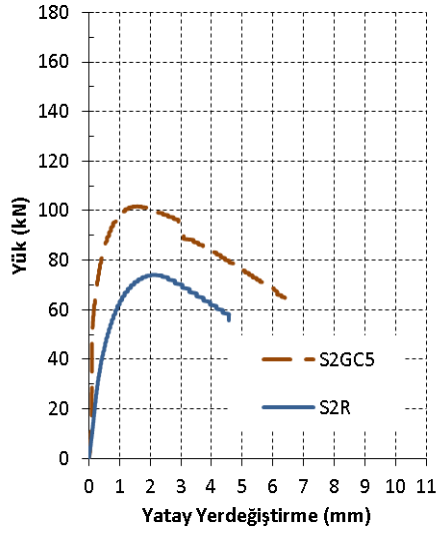
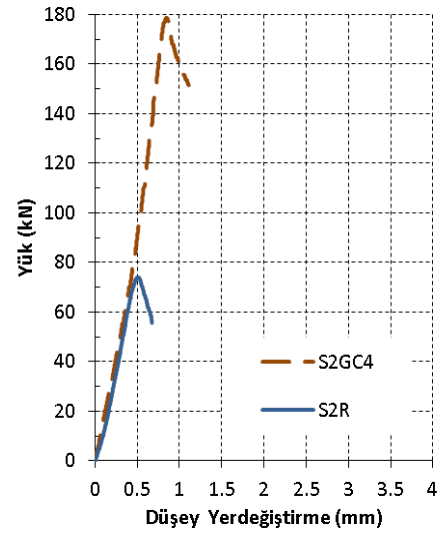
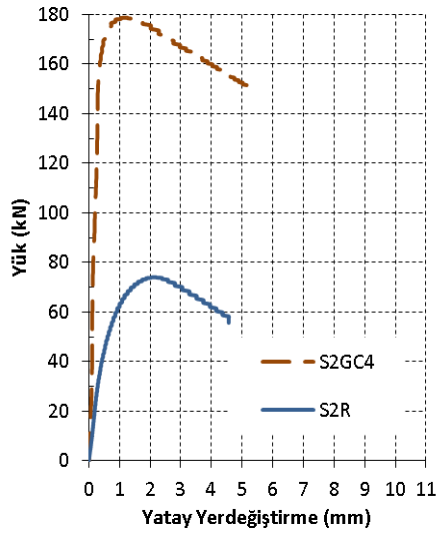
Tablo 4.1. Çelik plakalara GFRP yerleşim düzenleri

	Kesit	Deney Numunesi	Deney Sonrası
S2GC1	 <p>$h_{\text{Çelik Plak}}: 320 \text{ mm}$ $h_{\text{GFRP}}: 250 \text{ mm}$</p>		
S2GC2	 <p>$h_{\text{Çelik Plak}}: 320 \text{ mm}$ $h_{\text{GFRP}}: 250 \text{ mm}$</p>		
S2GC3	 <p>$h_{\text{Çelik Plak}}: 320 \text{ mm}$ $h_{\text{GFRP}}: 250 \text{ mm}$</p>		
S2GC4 (Taşlanmış)	 <p>$h_{\text{Çelik Plak}}: 320 \text{ mm}$ $h_{\text{GFRP}}: 250 \text{ mm}$</p>		
S2GC5	 <p>$h_{\text{Çelik Plak}}: 320 \text{ mm}$ $h_{\text{GFRP}}: 250 \text{ mm}$</p>		

Deney sonucunda elde edilen yük- yatay yer değiştirme, yük-düşey yer değiştirme grafikleri, her bir grup için ayrı ayrı verilmiştir (Şekil 4.3).

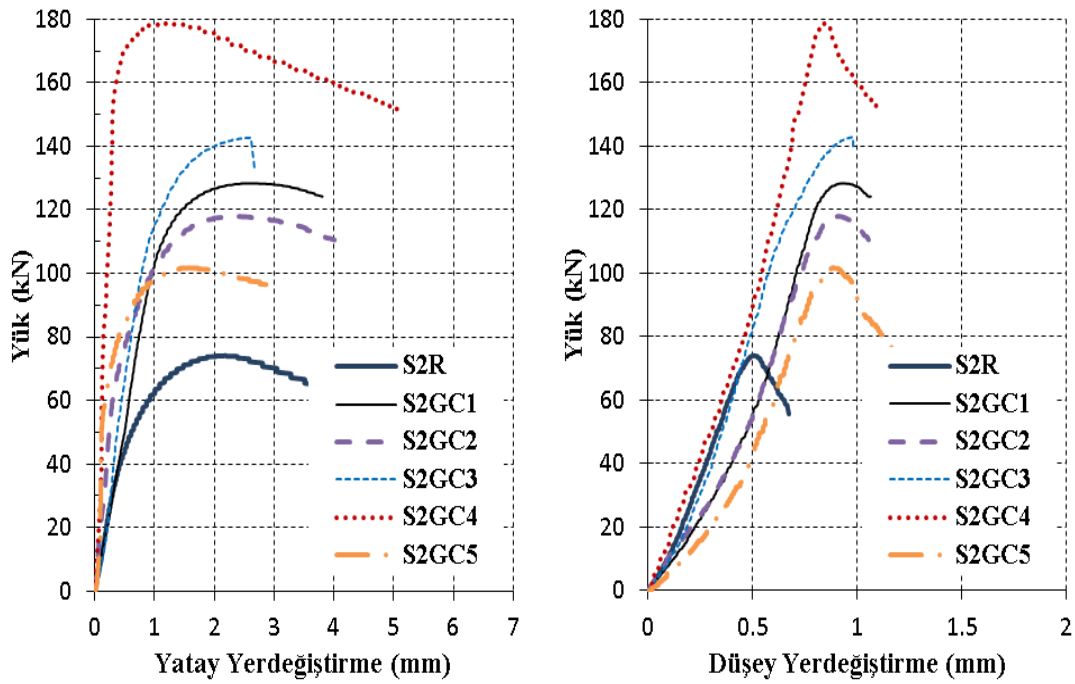


Şekil 4.3. GFRP ile güçlendirilen kılavuz rijitleştirilmemiş plakaların deney grafikleri



Şekil 4.3'ün devamı

Şekil 4.4'te karşılaştırılmalı olarak deney gruplarının hepsi bir arada sunulmuştur.



Şekil 4.4. Rijitleştirilmemiş kılavuz plaka gruplarına ait karşılaştırma grafiği

Elde edilen verilere bakıldığında her bir grup için referans numuneye göre % değerleri hesaplanmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlar en yüksek değerden en küçük değere göre sıralanarak Tablo 4.2’de gösterilmiştir. Ayrıca tabloda bütün GFRP yerleşimleri için hazırlanan ikişer adet deney numunelerinin de dayanımları ayrı ayrı verilmiştir.

Tablo 4.2. Rijitleştirilmemiş çelik plakların GFRP uygulanması ile meydana gelen maksimum yük taşıma kapasiteleri

GFRP Yerleşimi	Numune1 (kN)	Numune 2 (kN)	Maksimum (Ortalama) Yük (kN)	% Artış (Referansa göre)
S2GC4	178.68	178.64	178.66	% 141
S2GC3	145.55	139.97	142.76	% 93
S2GC1	129.21	127.43	128.32	% 73
S2GC2	112.30	123.54	117.92	% 59
S2GC5	101.71	93.79	97.75	% 32
S2R (Referans)	---	---	74.06	---

Bu değerlere göre en fazla dayanım artışını % 141 ile sağlayan S2GC4 isimli deney numunelerinin olduğu görülmüştür. Hemen ardından % 93 ile S2GC3 gelmektedir.

S2GC3 ve S2GC4 numunelerinin arasındaki farkın sadece taşlama işlemi olduğu düşünüldüğünde, sadece bu işlem uygulandığında bile % 48'lik bir dayanım artışı sağlanabileceği gösterilmiştir. Minimum artış geometrisi simetrik olmayan, en az sayıda GFRP yapıştırılan ve % 32'lik maksimum taşıma kapasitesi ile S2GC5' te gözlenmiştir.

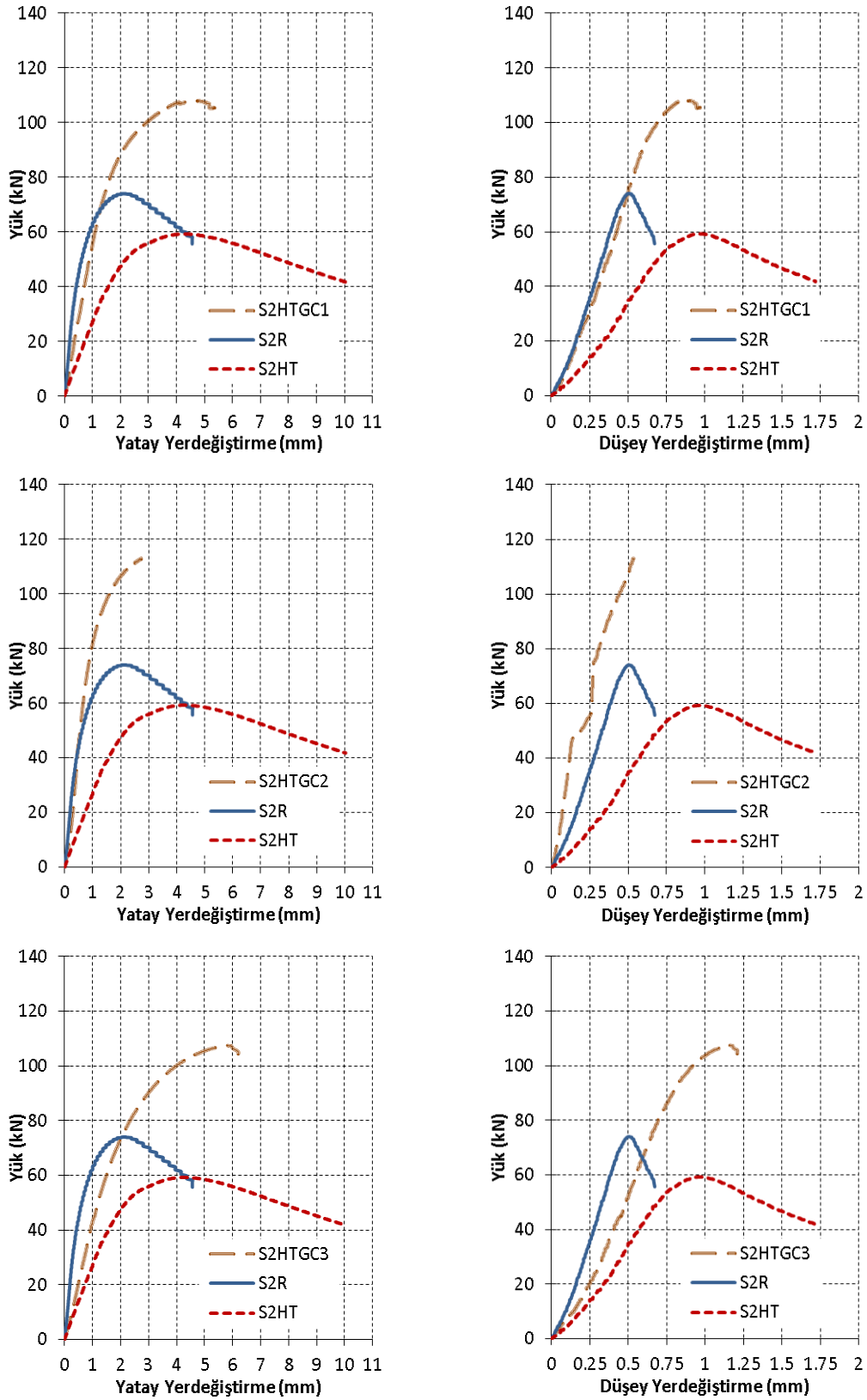
Kılavuz deneyleri GFRP elemanların çelik plakaların basınç yükü altında da dayanımını artırabildiğini açıkça göstermiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünün artırılması ile epoksinin plakalardan sıyrılması geciktirilmiş, böylece dayanımda önemli miktarda artış elde edilmiştir.

4.1.2. GFRP ile güçlendirilmiş ısı işlem görmüş plaka deneyleri

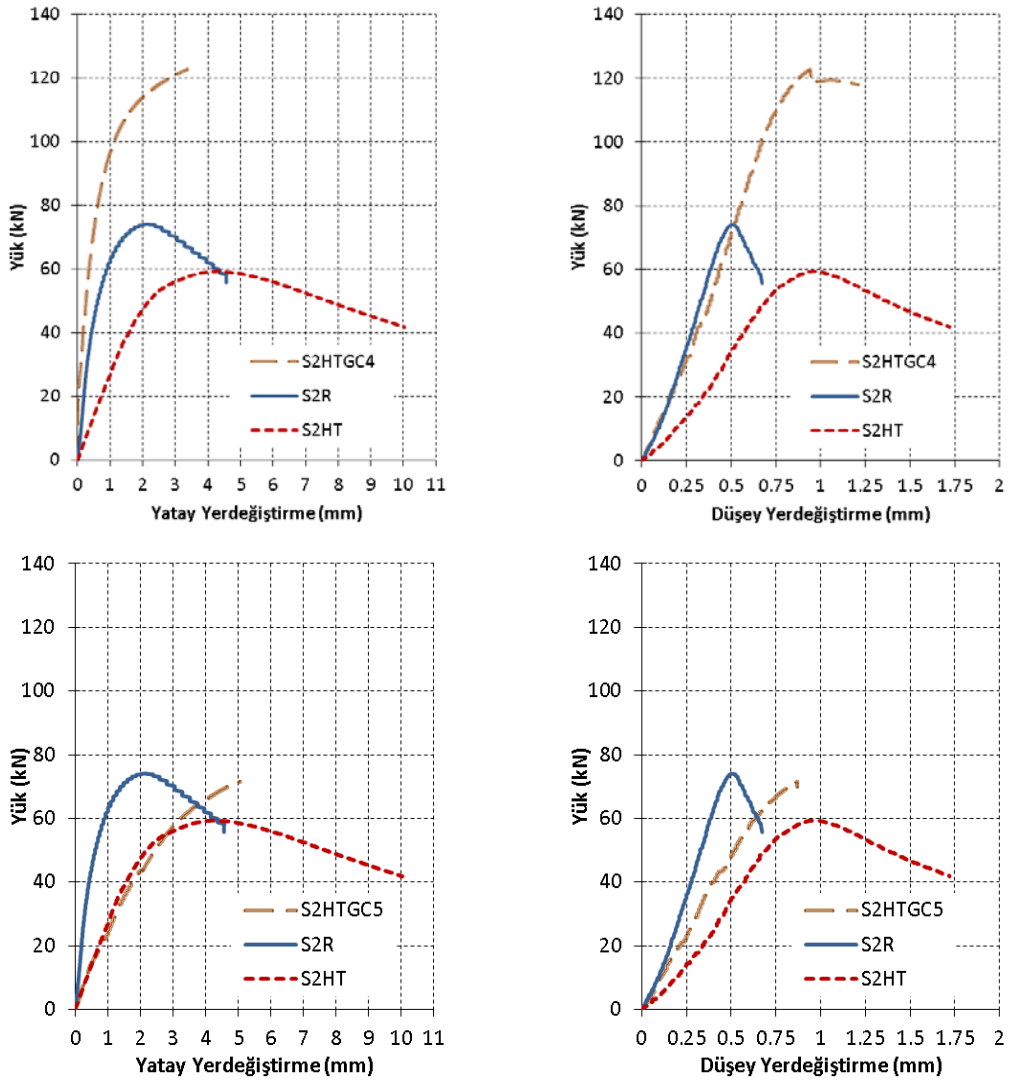
Kılavuz plaka deneyleri sonucunda GFRP yapıştırılan plakaların maksimum yük taşıma kapasitelerinde belirgin bir artış olduğu gözlenmiştir. Bu artışın ısı işlem uygulanan çelik plakalarda meydana gelen zayıflıkların giderilmesinde kullanılıp kullanılmayacağı, onarılan numunelerin GFRP plakalar yapıştırarak burkulma öncesi referans numunelerin rijitlik ve dayanımına ulaşip ulaşamayacağının belirlenmesine karar verilmiştir. Bu amaçla ısı ve düzeltme işlemi uygulanan çelik plakalara, kılavuz deneylerde olduğu gibi Tablo 4.1'de gösterilen düzenlerde GFRP plakalar Epoksi 1 yapıştırıcısı ile yapıştırılarak yeni numuneler hazırlanmıştır. Numuneler her bir grup için ikişer adet hazırlanarak, grafikler ortalamalar alınarak çizilmiştir.

Kılavuz deneylerde olduğu gibi, bu deneylerde de sıyrılma epoksidede meydana gelmiştir. GFRP plakalarda herhangi bir kırılma veya kalıcı şekil değiştirme gözlenmemiştir.

Deney sonucunda elde edilen yük- yatay yer değiştirme, yük-düşey yer değiştirme grafikleri, her bir grup için ayrı ayrı olarak Şekil 4.5'te verilmiştir.

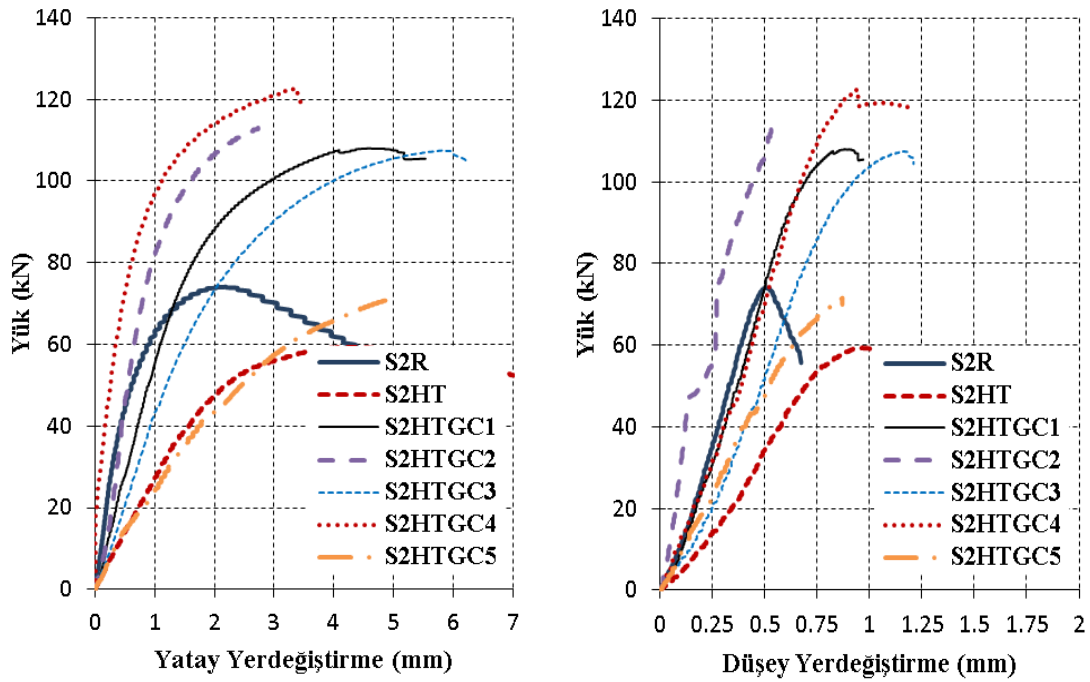


Şekil 4.5. Isıl işlem görmüş GFRP ile güçlendirilmiş rijitleştirilmemiş plaka deney grafikleri



Şekil 4.5'in devamı

Şekil 4.6'da karşılaştırılmalı olarak deney gruplarının hepsi bir arada sunulmuştur.



Şekil 4.6. Isıl işlem görmüş GFRP ile güçlendirilmiş rijitleştirilmemiş plaka gruplarına ait karşılaştırma grafiği

Elde edilen verilere bakıldığında her bir grup için referans numuneye göre % değerleri hesaplanmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlar en yüksek değerden en küçük değere göre sıralanarak Tablo 4.3'te gösterilmiştir. Ayrıca tabloda bütün GFRP yerleşimleri için hazırlanan ikişer adet deney numunelerinin de dayanımları ayrı ayrı verilmiştir.

Tablo 4.3. Rijitleştirilmemiş çelik plakların ısıl işlem sonrası GFRP uygulanması ile meydana gelen maksimum yük taşıma kapasiteleri

GFRP Yerleşimi	Numune1 (kN)	Numune 2 (kN)	Maksimum (Ortalama) Yük (kN)	% Artış (Isıla göre)	% Artış (Referansa göre)
S2HTGC4	125.32	120.36	122.84	107	66
S2HTGC2	113.06	113.08	113.07	91	53
S2HTGC1	112.64	103.44	108.04	82	46
S2HTGC3	112.43	102.55	107.49	81	45
S2HTGC5	63.55	79.55	71.55	21	3
S2R (Referans)	---	---	74.06	---	---
S2HT (Isı)	---	---	59.31	---	---

GFRP'lerin plaka serbest uçlarına olan mesafelerinin sonuçlara etkisini gözlemlemek için oluşturulan S2HTGC1 ve S2HTGC2'ye ait sonuçlar incelendiğinde burkulma yüklerinde çok belirgin bir fark bulunmamakla birlikte düşey yer değiştirme grafiğine bakılarak S2HTGC1'in rijitliğinin daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun kenarlara yakın konulan GFRP' nin çelik plakayı dört kenarı mesnetli bir plaka gibi rijit bir davranışa yönlendirmesi nedeni ile oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca göçme modları incelendiğinde S2HTGC1'de oluşan bir kırılma çizgisi tüm epoksi katmanında yayıldığından birleşik iki plaka aynı anda ayrılmıştır. Oysa S2HTGC2'de plakalar arasında boşluk bırakılarak bir levhada oluşan kopma çizgisinin diğerine geçmesi engellendiğinden levhalar ayrı ayrı zamanlarda ayrılmıştır. Bu yüzden S2HTGC2, gerek S2HTGC1 ile gerekse kendisinden daha fazla GFRP alanına sahip S2HTGC3 ile kıyaslandığında daha rijit davranmaktadır.

GFRP miktarının etkisini gözlemlemek adına oluşturulan S2HTGC1 ve S2HTGC3 kıyaslandığında daha az GFRP plakaya sahip olan S2HTGC1'in daha rijit davrandığı gözlemlenmiştir. Maksimum basınç kuvvetlerinde ise %1'lik bir fark görülmektedir. Bir önceki paragrafta belirtildiği üzere bunun sebebi göçme modunun epokside kaynaklanmasıdır. Epoksidede meydana gelen kırılma hatları birbirine sürekli yapışık üç GFRP plakasını aynı anda çelik plakadan ayırmaktadır.

Epoksi uygulama yüzeyinin sonuçlara etkisini görmek için hazırlanan S2HTGC4'ün sonuçları ile aynı GFRP kompozisyonuna sahip S2HTGC3'e ait sonuçlar karşılaştırıldığında gerek maksimum basınç yükünde gerekse rijitlikte önemli farklar ortaya çıkmaktadır. Tüm deney elemanlarında göçme modu epokside sıyrılmaya olduğu için epoksinin çelik elemana tutulmasının artırıldığı S2HTGC4 deney numunesinde maksimum basınç kuvvetine ulaşılmıştır.

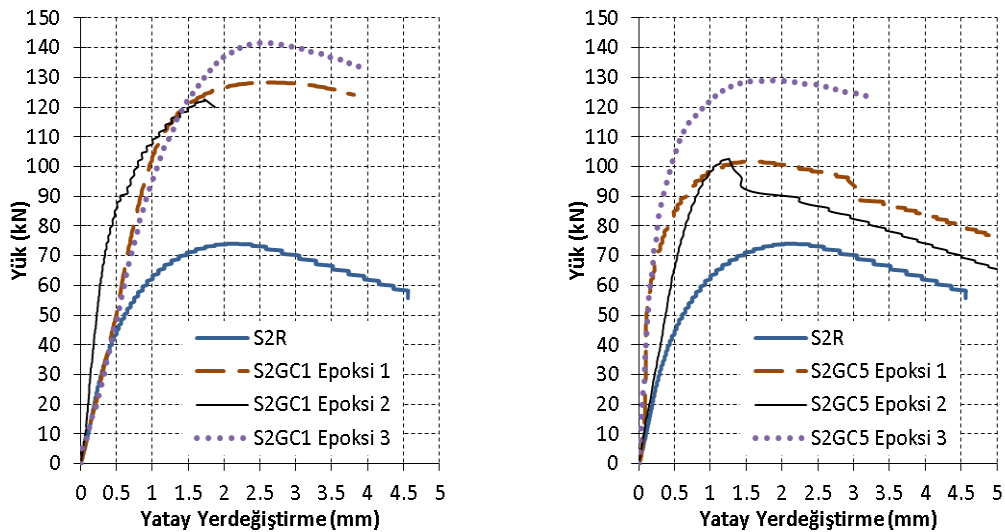
4.1.3. Epoksi belirleme deneyleri

Yapılan deneylerde göçmenin epoksinin çelik numunesinden sıyrılmaya ile gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu yüzden epoksi seçiminin doğru yapılması önem arz etmektedir. Farklı bir epoksi kullanılması durumunda deney sonuçlarında nelerin

değişeceğini gözlemek amacı ile farklı tür epoksiler kullanılarak deneyler tekrarlanmıştır.

Bu amaçla mekanik özellikleri Bölüm 3'te verilen Epoksi 1'in dışında Epoksi 2 ve Epoksi 3 kullanılmıştır. Deneylerde ısı işlem uygulanmayan rijitleştirilmemiş çelik plakalar kullanılmıştır. GFRP yerleşimlerinden 2 adet grup (S2GC1 ve S2GC5) seçilmiştir. Bu gruplar uygulaması kolay, daha az GFRP yerleşimi gerektiren numuneler seçilerek belirlenmiştir. Seçilen numunelerin kesit ve görünüşleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Her bir kompozisyon için elde edilen yük-yatay yer değiştirme grafikleri aşağıdaki Şekil 4.7'de verilmiştir.

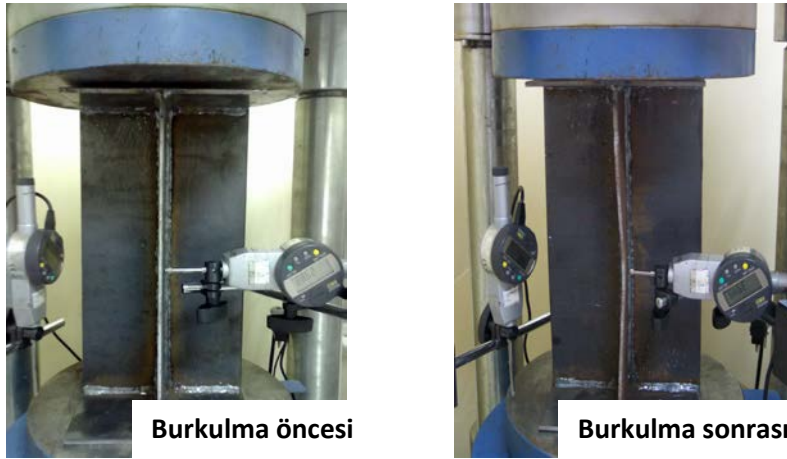


Şekil 4.7. Deneylerde kullanılan üç farklı epoksinin karşılaştırılması

Elde edilen sonuçlara bakıldığında, kullanılan her epoksi dayanımda artış sağlamıştır. Şekil 4.7'den anlaşılacağı gibi Epoksi 3'ün davranışı incelenen üç epoksi arasında en iyisidir. Bu yüzden bundan sonra yapılacak olan rijitleştirilmiş plaka deneylerinde Epoksi 3'ün kullanılmasına karar verilmiştir.

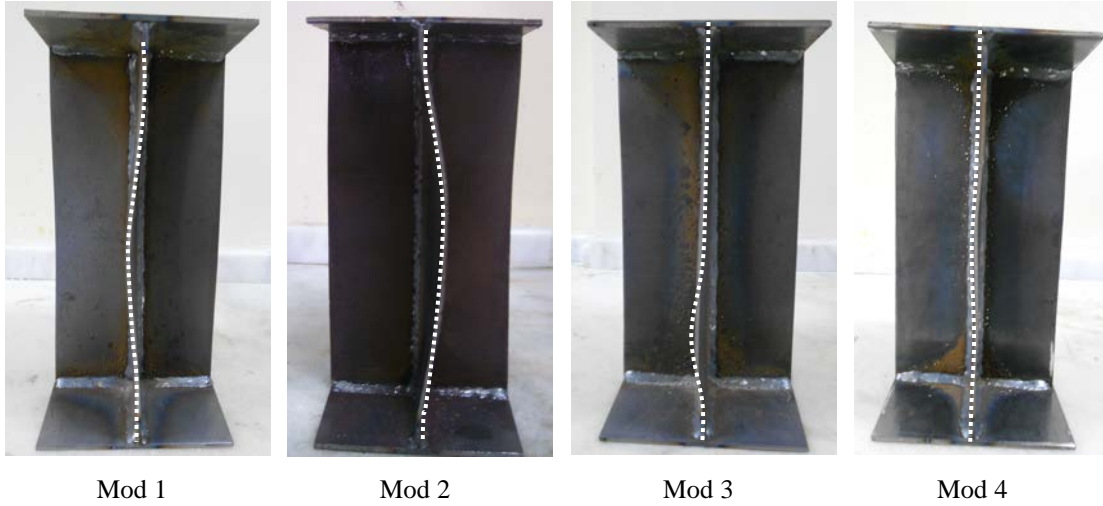
4.2. Rijitleştirilmiş Plakalar

Rijitleştirilmiş plaklar üç tarafından mesnetli, dört adet çelik plakanın birleştirilerek artı şeklinde kesiti oluşturulan plakalardır. Plakaların kesit özellikleri ve hazırlanması Bölüm 3.2.1’de anlatılmaktadır. Plakalar hem simetri sağlaması hem de kararlı denge halinde burkulma olması açısından artı kesitli olarak hazırlanmıştır. Kesitler plakaların birbirlerine kaynatılması ile oluşturulmuştur. Yine Bölüm 3.3’te belirtilen deney düzeneğinde ilk olarak ısıtılmış S3R (Referans) ve ısıtılmış görmüş S3HT (Isıl) numunelerin deneyleri yapılmıştır. Numuneler üç adet hazırlanmış ve grafiklerde bu üç numunenin ortalaması alınmıştır. Deney öncesi ve sonrasında plakaların resimleri Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



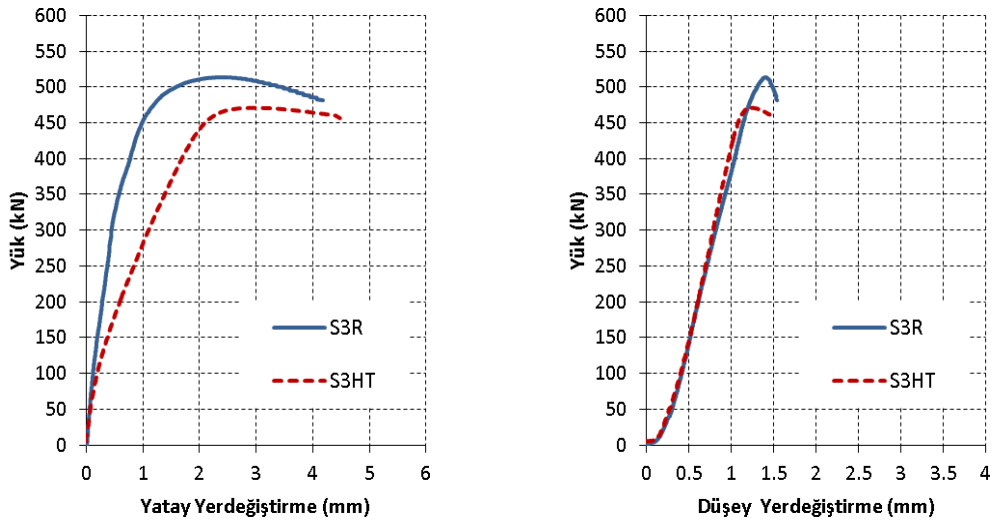
Şekil 4.8. Rijitleştirilmiş çelik plakaların burkulması

Burkulan plakalarda 4 tip mod meydana gelmiştir. Plakalara ait burkulma modları Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Rijitleştirilmiş çelik plakalara ait burkulma mod şekilleri

Deney sonucunda elde edilen verilere göre yük-yatay yer değiştirme ve yük-düşey yer değiştirme grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10. Rijitleştirilmiş referans ve ısı plaka grafiği

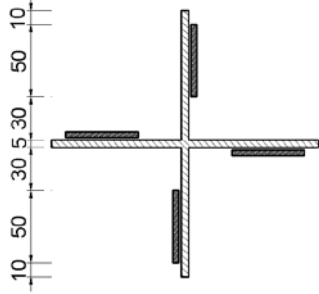


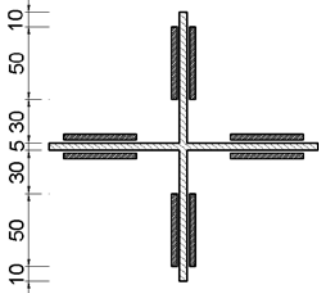


Rijitlendirilmiş çelik plakalarda ısı işlem uygulandıktan sonra yük taşıma kapasitesi % 8 kadar azalmaktadır. Bu durum iki tarafından mesnetli plakalarda % 20 olarak hesaplanmıştır. Mesnet sayısının artması ile ısı işlem uygulanan plakaların dayanımındaki düşüşün azaldığı belirlenmiştir. Isıl işlem görmüş rijitleştirilmiş plakalarda da gözlenen dayanım azalması fiber elemanlarla güçlendirilerek giderilmeye çalışılmıştır.

4.2.1. Rijitleştirilmiş çelik plakaların GFRP elemanlar ile onarımı

Rijitleştirilmiş plakaların GFRP elemanlar ile güçlendirilmesi için Tablo 4.4'te kesiti, kompozisyonları, deney öncesi ve sonrası resimleri verilen numuneler hazırlanmıştır. Her bir numune grubundan ikişer adet hazırlanmış ve grafiklerde ortalamaları alınmıştır. Deney numunelerinin hepsine ısıl-presleme işlemi uygulanıp, GFRP plakalar yapıştırılmıştır. GFRP kalınlıkları 3 mm'dir. 7 farklı deney numunesi hazırlanmıştır. Numunelerin hazırlanma aşamaları Bölüm 3.2'de ayrıntılı bir şekilde anlatılmaktadır.

GFRP'nin daha ekonomik ve simetri oluşturmadan kullanıldığında etkisini gözlemlemek amacıyla S3HTGC1, GFRP genişliğinin etkisini görebilmek amacıyla S3HTGC2 ve S3HTGC3, GFRP kalınlığının artırılmasının etkisini incelemek amacıyla S3HTGC4, çelik plakanın tamamının GFRP ile kaplanmasının araştırmak amacıyla S3HTGC5, epoksi kırılma çizgisinin engellenmesinin sonuçlara etkisini araştırmak amacıyla S3HTGC6, yüzey pürüzlülüğünün etkisini gözlemlemek amacıyla S3HTGC7 yerleşimlerinde deney numuneleri hazırlanmıştır.

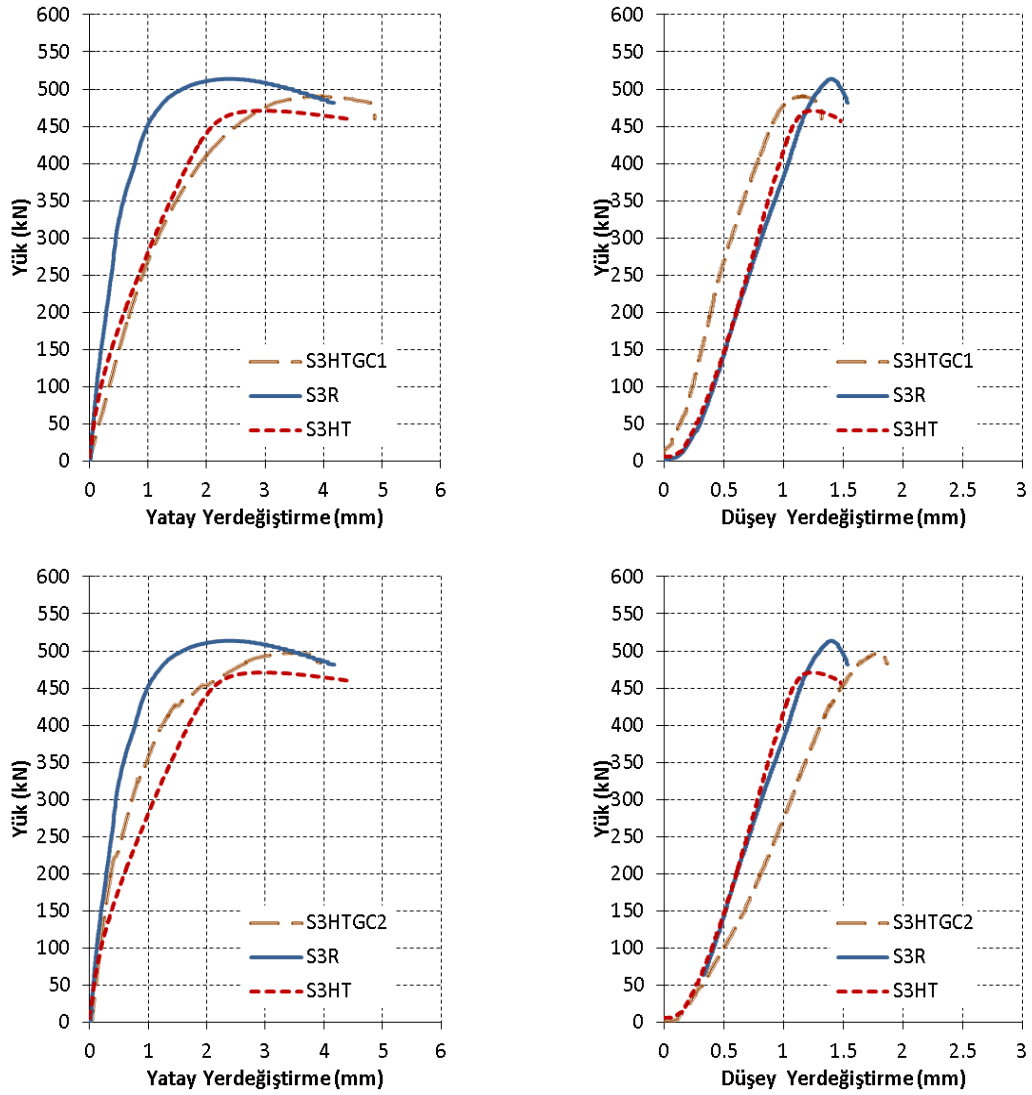
Tablo 4.4. Isıl işlem görmüş rijitleştirilmiş çelik plakalara uygulanan GFRP yerleşimi

	Kesit	Deney Numunesi	Deney Sonrası
S3HTGC1			
S3HTGC2			

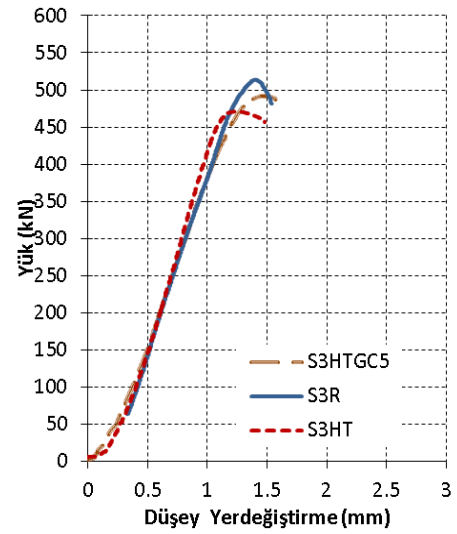
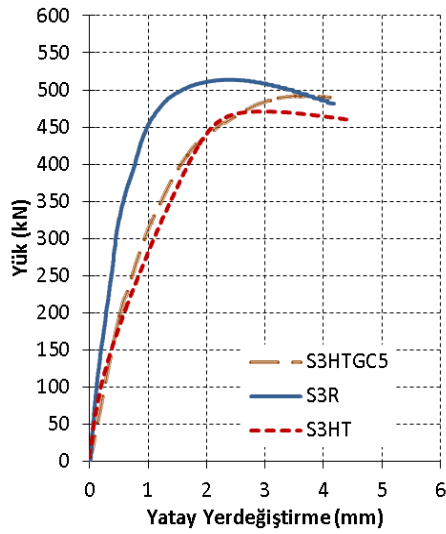
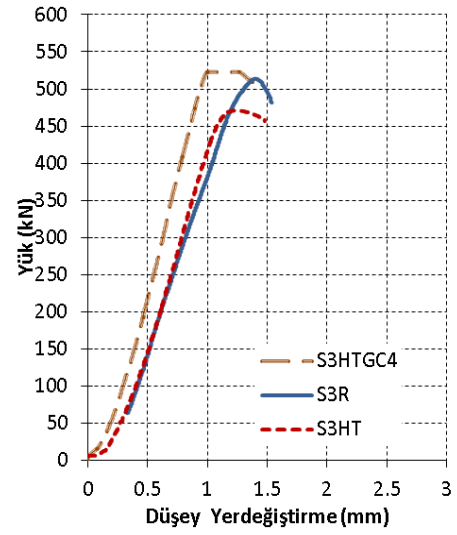
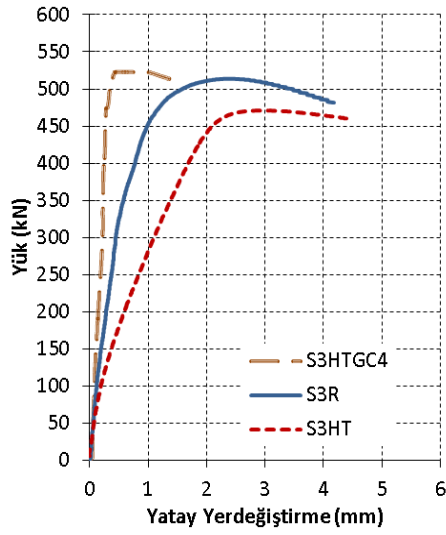
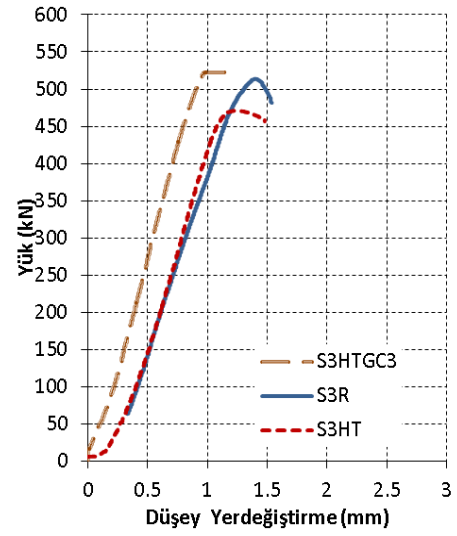
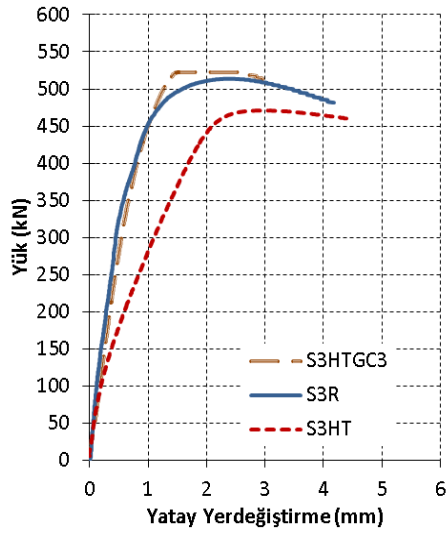
Tablo 4.4'ün devamı

S3HTGC3			
S3HTGC4			
S3HTGC5			
S3HTGC6			
S3HTGC7 (Taşlanmış)			

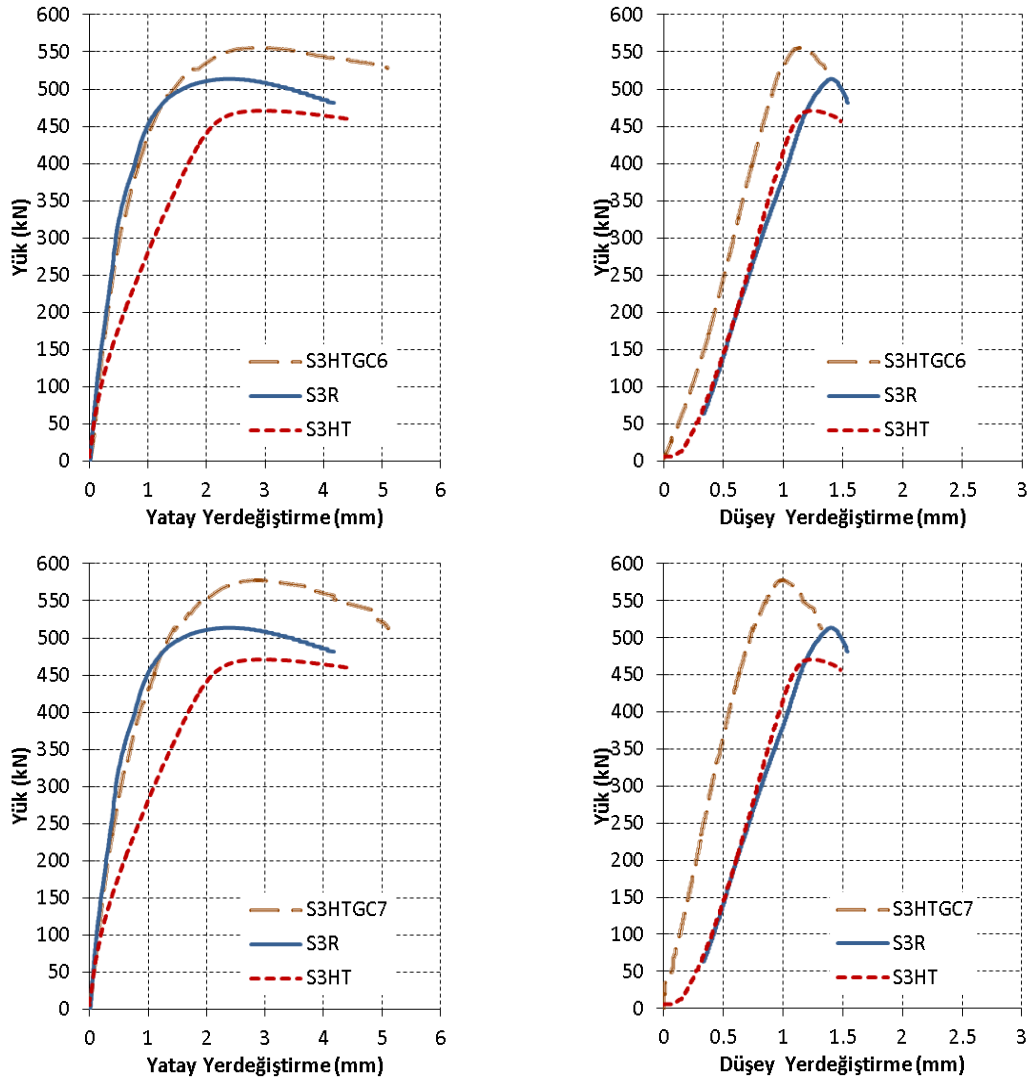
Deneyler sonucunda elde edilen veriler ile her bir grup için ayrı ayrı yük yer değiştirme grafikleri çizilmiştir (Şekil 4.11). Deney sonrası resimlere bakıldığında göçmenin yine epoksideki sıyrılma nedeni ile olduğu görülmektedir.



Şekil 4.11. Isıl işlem görmüş rijitleştirilmiş çelik plakaların GFRP ile onarım grafikleri

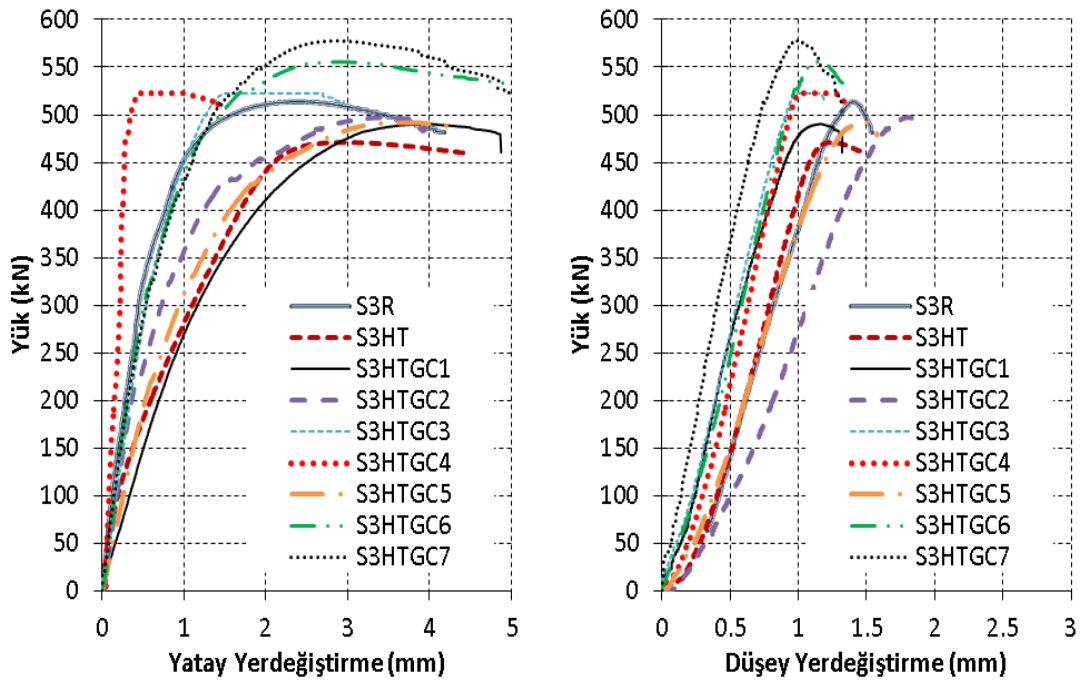


Şekil 4.11'in devamı



Şekil 4.11'in devamı

Şekil 4.12' de karşılaştırılmalı olarak deney gruplarının hepsi bir arada sunulmuştur.



Şekil 4.12. Isıl işlem görmüş GFRP ile güçlendirilmiş rijitleştirilmiş plaka gruplarına ait karşılaştırma grafiği

Grafikler incelendiğinde herbir gruba ait maksimum yük taşıma kapasitesi ve ısıl elemana göre hazırlanan %'lik artış değerleri en yüksek değerden en küçük değere doğru sıralanmış ve Tablo 4.5'te gösterilmiştir. Ayrıca tabloda bütün GFRP yerleşimleri için hazırlanan ikişer adet deney numunelerinin de dayanımları ayrı ayrı verilmiştir.

Tablo 4.5. Isıl işlem görmüş GFRP ile onarılan rijitleştirilmiş plakalara ait dayanım değerleri

GFRP Yerleşimi	Numune1 (kN)	Numune2 (kN)	Maksimum (Ortalama) Yük (kN)	% artış (Isıla göre)	% artış (Referansa göre)
S3HTGC7	560.77	594.77	577.77	22.6	12
S3HTGC6	566.20	545.04	555.62	18	8
S3HTGC4	525.03	520.45	522.74	11	2
S3HTGC3	522.68	522.78	522.73	11	2
S3HTGC2	503.57	490.93	497.25	5	-3
S3HTGC5	502.35	491.11	496.73	5	-3
S3HTGC1	484.62	496.08	490.35	4	-5
S3R (Referans)	---	---	513.71	--	---
S3HT (Isıl)	---	---	470.92	---	---

GFRP miktarının etkisini gözlemleyebilmek amacı ile oluşturulan S3HTGC1 ve S3HTGC2 kıyaslandığında her iki grubun da S3R (referans) numunesinin dayanımına ulaşamadığı, ancak S3HT (ısıl) numunesine göre yük taşıma kapasitelerinde artış görülmektedir.

GFRP genişliğinin etkisini görebilmek için oluşturulan S3HTGC2 ve S3HTGC3 yerleşimleri incelendiğinde daha az genişlikte GFRP plaka yapıştırılan S3HTGC3'ün daha fazla rijitlik- yük taşıma kapasitesine sahip olduğu ve ayrıca referans numunelerin rijitlik-yük taşıma kapasitesini sağladığı görülmüştür. Göçme modlarında sıyrılmaların hep epoksiden kaynaklandığı düşünüldüğünde bunun nedeni daha fazla epoksi yüzeyine sahip olan S3HTGC2'de oluşan bir kırılma çizgisinin tüm epoksi katmanına yayılmasıdır.

GFRP kalınlığının artırılmasının etkisini incelemek üzere S3HTGC3 ve S3HTGC4 oluşturulmuştur. S3HTGC4'te çift kat plaka yapıştırılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde, her iki grubun da referans numunenin rijitliğine eriştiği gözlenmiştir.

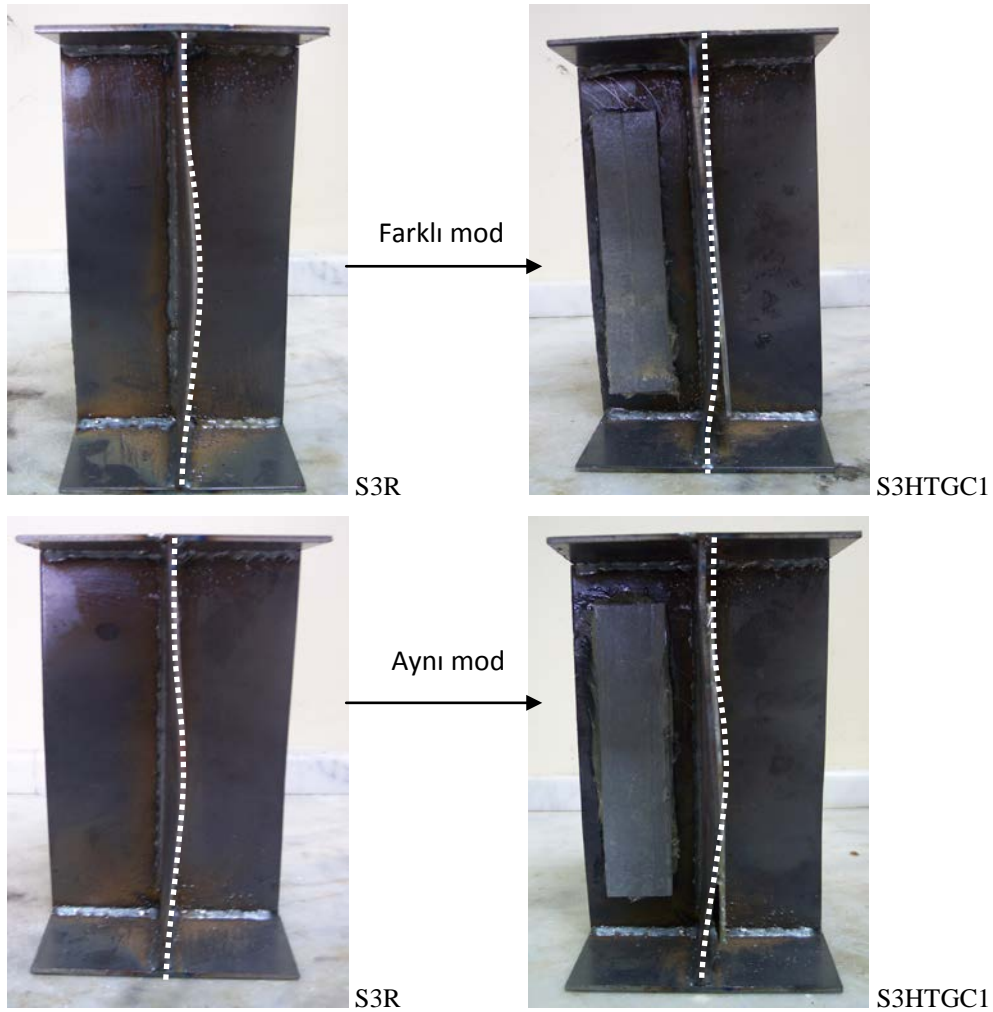
Çelik plakanın tamamının GFRP ile kaplanmasının etkisini araştırmak üzere oluşturulan S3HTGC5 yerleşimine bakıldığında bu kompozisyonun referans numuneye erişemediği, fakat ısıl elemanın yük taşıma kapasitesini artırdığı görülmektedir. GFRP sayısının artırıldığı düşünülerek S3HTGC3 ve S3HTGC5 kıyaslandığında, S3HTGC5'te daha fazla sayıda GFRP elemanlar yapıştırılmasına rağmen S3HTGC3'ün değerlerine ulaşamamaktadır. Bu kapsamda yine epoksi yüzeyinin etkisi görülmektedir. Bu durum daha fazla epoksi yüzeyine sahip elemanın daha fazla yayılan kırılma çizgisi hattına sahip olmasının sonucudur. Yan yana fazla sayıda GFRP eleman yapıştırmanın çelik plakaların dayanımını artıracığı sonucuna varılmaması gerektiği görülmüştür.

Epoksi kırılma çizgisinin engellenmesinin sonuçlara etkisini araştırmak üzere S3HTGC6 kompozisyonu hazırlanmıştır. S3HTGC2'de 5 cm ve S3HTGC6'da $2,5+2,5=5$ cm aynı genişliğe sahip olan GFRP plakalar yapıştırılmıştır. Grafiklere bakıldığında S3HTGC6'nın referans numuneye ulaşabildiği ancak S3HTGC2'nin

ulaşamadığı görülmüştür. Bu durum yine epoksi kırılma çizgisinin engellendiğinde dayanımın daha yüksek olacağını kanıtlamaktadır.

Yüzey pürüzlülüğünün etkisini araştırmak üzere S3HTGC7 kompozisyonu hazırlanmış ve S3HTGC6 ile kıyaslanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde yüzey pürüzlülüğünün epoksinin yapışma alanını artırdığı ve dolayısıyla da dayanımı artırdığı görülmüştür.

Ayrıca burkulma modları incelendiğinde ısıtma işlemi ve GFRP yapıştırılarak onarılan çelik plakaların aynı doğrultuda burkulduğu ancak mod şekillerinin değişebileceği gözlenmiştir. Şekil 4.13’de mod şeklinin aynı ve farklı olduğu durumlardan örnekler gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Isıtma ve GFRP ile onarılan çelik plakaların burkulma modları

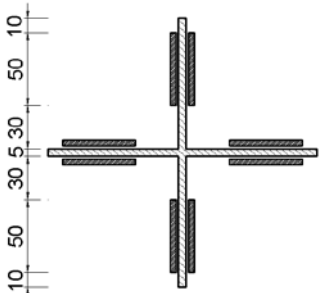


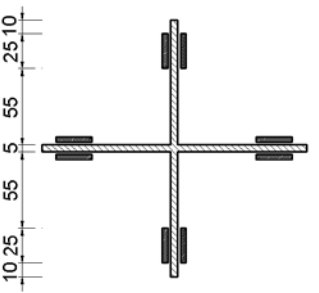


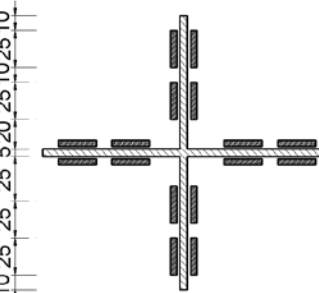


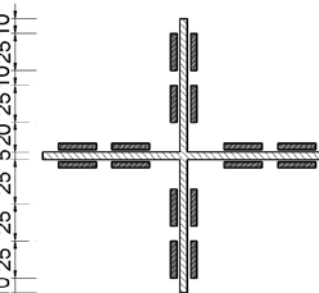


4.2.2. Rijitleştirilmiş çelik plakaların CFRP elemanlar ile onarımı

Rijitleştirilmiş plakaların GFRP ile onarımının değerlendirilmesi yapıldıktan sonra güçlendirme elemanının değiştirilmesinin sonuçlara etkisi gözlemlenmek gerektiği düşünülmüştür. Bu amaçla güçlendirme elemanları olarak CFRP plakalar seçilmiştir. GFRP ile onarımda olduğu gibi aynı genişlik ve uzunluğa sahip CFRP'ler hazırlanıp yine aynı epoksi kullanılarak yapıştırma işlemi uygulanmıştır (Tablo 4.6).

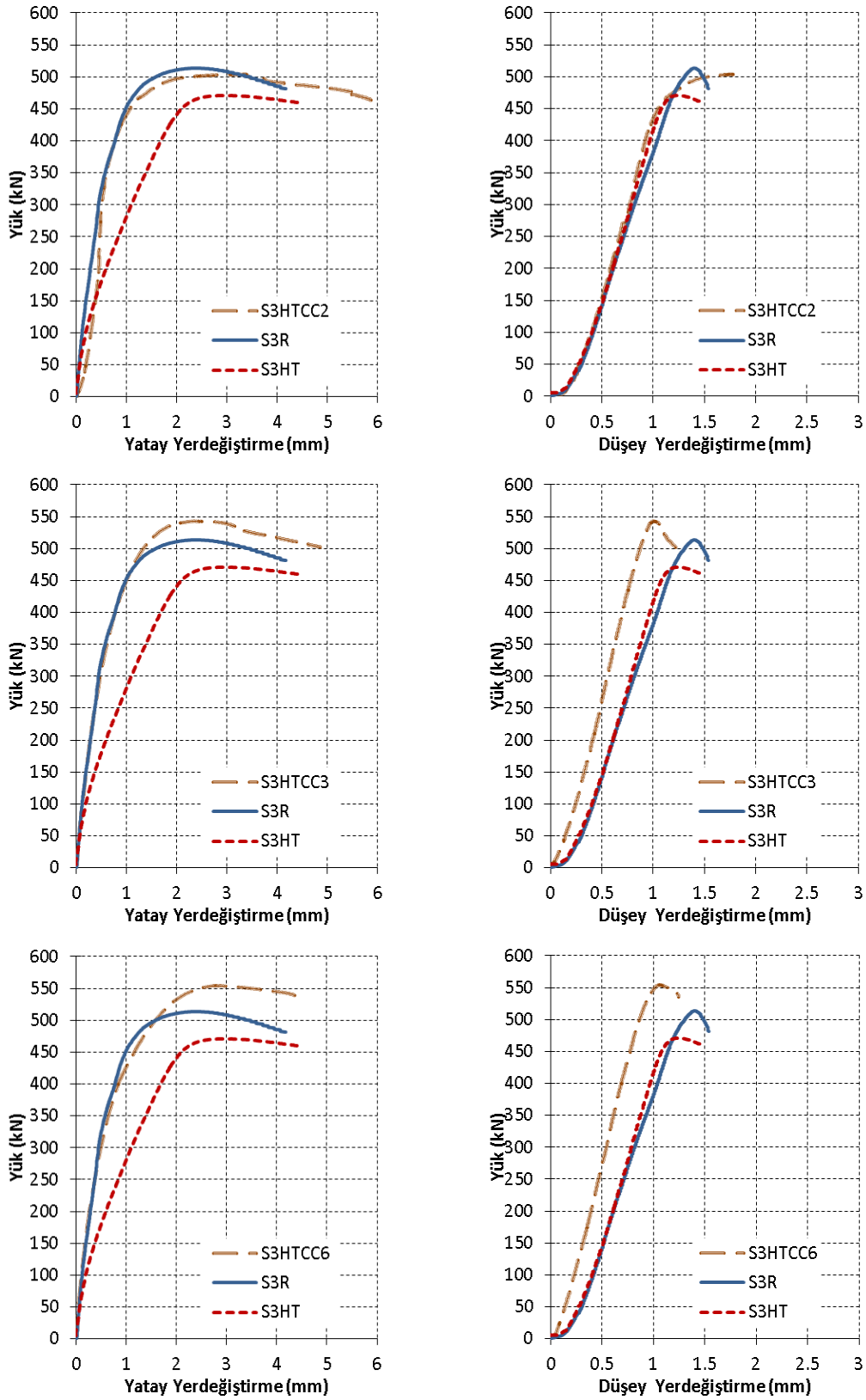
Deney numunelerinin hepsine ısıl-presleme işlemi uygulanıp, CFRP plakalar yapıştırılmıştır. CFRP kalınlıkları 1,2 mm'dir. CFRP plakaların fiyatları GFRP plakalara oranla yüksek olduğu için deneylerde dört farklı deney numunesi hazırlanarak karşılaştırma yapılmıştır. Her bir numune grubundan ikişer adet hazırlanmış ve grafiklerde ortalamaları alınmıştır. Numunelerin hazırlanma aşamaları Bölüm 3.2'de ayrıntılı bir şekilde anlatılmaktadır.

Tablo 4.6'daki deney sonrası fotoğraflara bakıldığında sıyrılmamanın yine epoksiden olduğu görülmektedir.

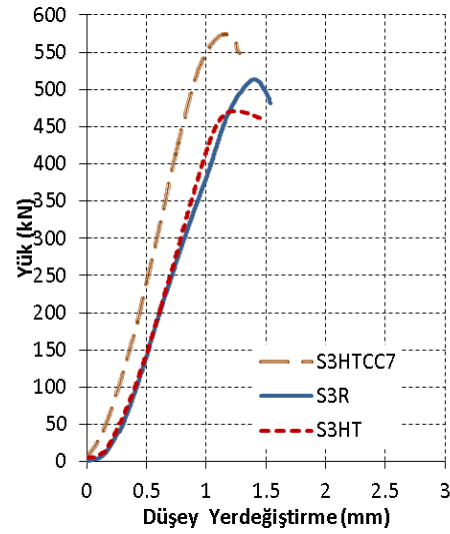
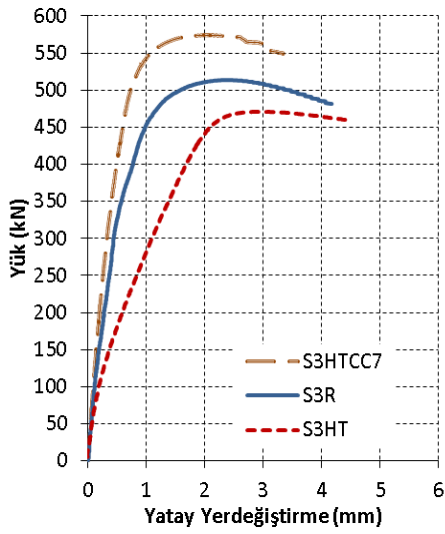
Tablo 4.6. Isıl işlem görmüş rijitleştirilmiş çelik plakalara uygulanan CFRP yerleşim düzeni

	Kesit	Deney Numunesi	Deney Sonrası
S3HTCC2			
S3HTCC3			
S3HTCC6			
S3HTCC7 (Taşlanmış)			

Deneylerde elde edilen veriler sonucunda yük yer değiştirme grafikleri herbir grup için ayrı ayrı çizilmiştir (Şekil 4.14).

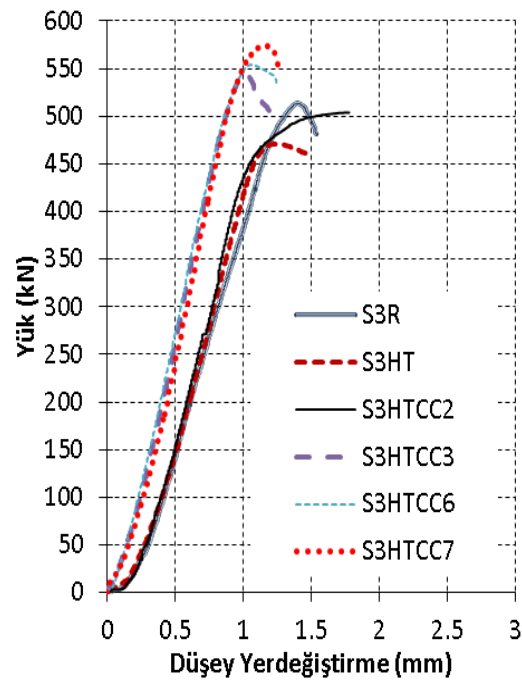
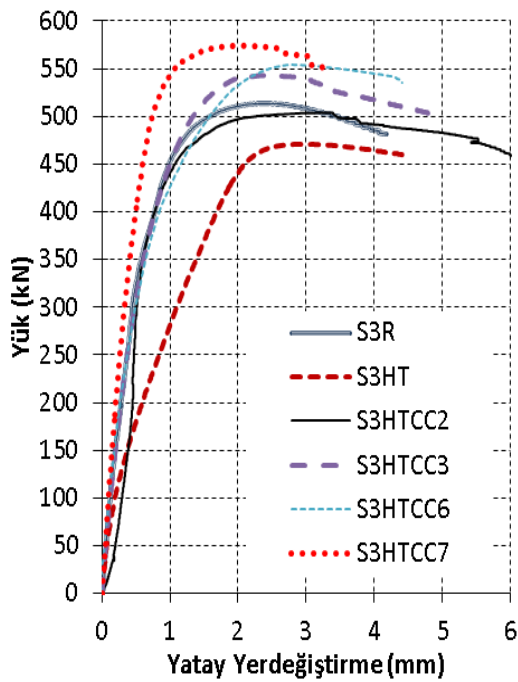


Şekil 4.14. Isıl işlem görmüş rijitleştirilmiş çelik plakaların CFRP ile onarım grafikleri



Şekil 4.14'ün devamı

Şekil 4.15'te karşılaştırılmalı olarak deney gruplarının hepsi bir arada sunulmuştur.



Şekil 4.15. Isıl işlem görmüş CFRP ile güçlendirilmiş rijitleştirilmiş plaka gruplarına ait karşılaştırma grafiği

Grafikler incelendiğinde her bir gruba ait maksimum yük taşıma kapasitesi ve ısıtılma elemana göre hazırlanan yüzdellik artış değerleri en yüksek değerden en küçük değere doğru sıralanmış ve Tablo 4.7'de gösterilmiştir. Ayrıca tabloda bütün CFRP

yerleşimleri için hazırlanan ikişer adet deney numunelerinin de dayanımları ayrı ayrı verilmiştir.

Tablo 4.7. Isıl işlem görmüş CFRP ile onarılan rijitleştirilmiş plakalara ait dayanım değerleri

CFRP Yerleşimi	Numune1 (kN)	Numune2 (kN)	Maksimum (Ortalama) Yük (kN)	% artış (Isıla göre)	% artış (Referansa göre)
S3HTCC7	588.42	560.08	574.25	21.9	12
S3HTCC6	556.40	542.30	554.35	17.7	8
S3HTCC3	548.64	537.72	543.18	15.3	6
S3HTCC2	515.45	492.33	503.89	7	2
S3R (Referans)	---	---	513.71	--	---
S3HT (Isıl)	---	---	470.92	---	---

CFRP genişliğinin etkisini görebilmek için 5cm genişliğinde ve 2,5 cm genişliğinde plakalar yapıştırılan S3HTCC2 ve S3HTCC3 yerleşimleri oluşturulmuştur. Her iki yerleşimde S3R (referans) numunesinin dayanımına ulaşılmıştır. Grupların rijitlikleri birbirlerine yakın olup S3HTCC3'ün rijitliğinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

Yüzey pürüzlülüğünün etkisini araştırmak üzere hazırlanan S3HTCC7 yerleşimi ile S3HTCC6 kıyaslanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde yüzey pürüzlülüğünün epoksinin yapışma alanını arttırdığı ve dolayısıyla da dayanım ve rijitliği arttırdığı görülmüştür.

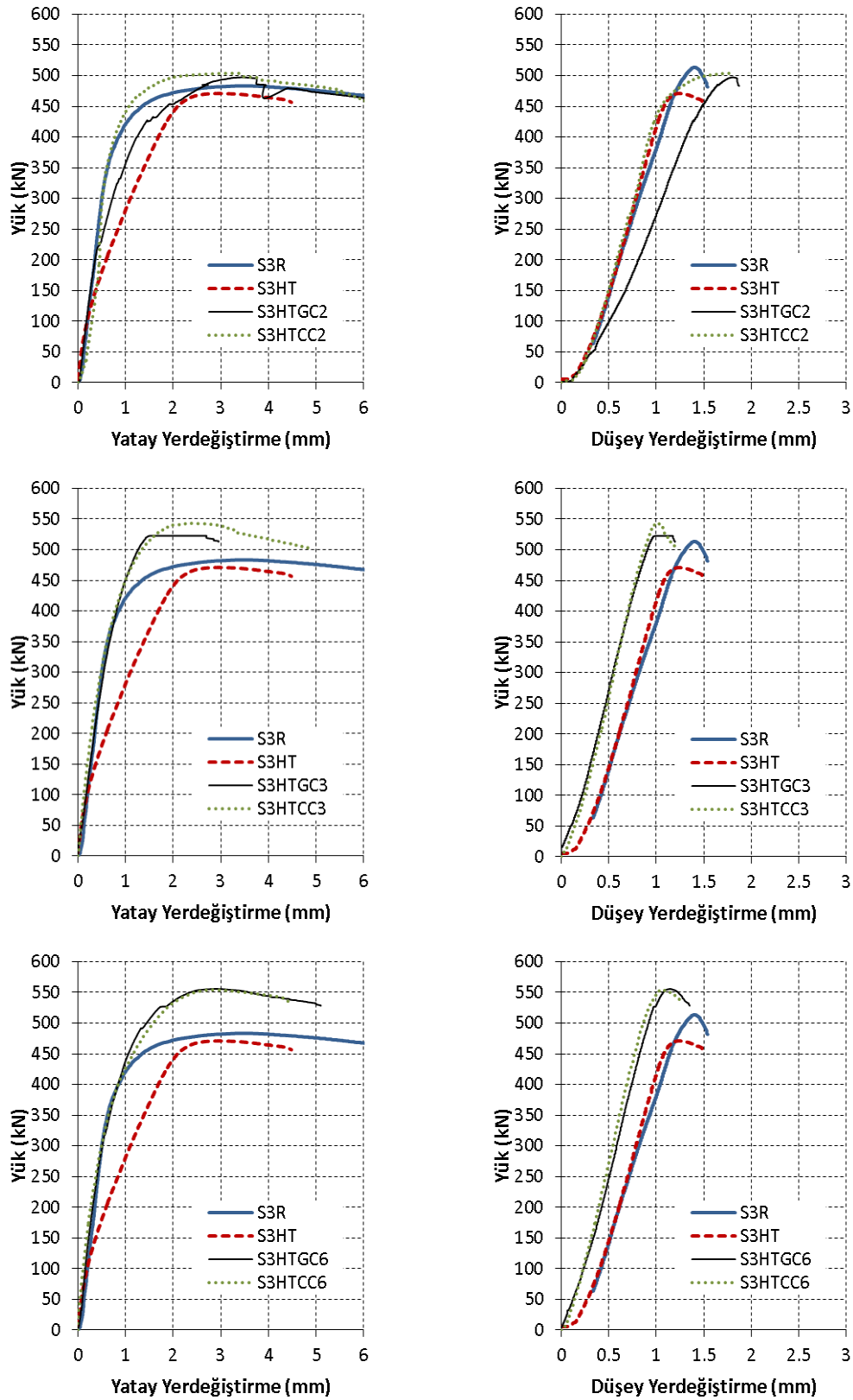
4.3. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Bu bölümde deneylerden elde edilen sonuçlar, GFRP ve CFRP ile onarılan deney numunelerinin karşılaştırılması ve maliyet analizi çıkarılarak kıyaslama yapılmıştır.

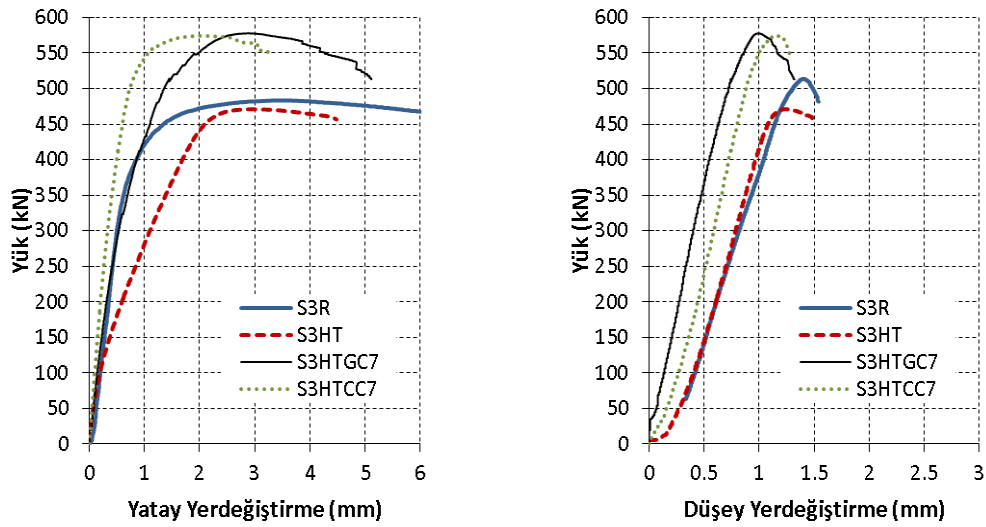
4.3.1. Isıl işlem gören rijitleştirilmiş çelik plaklara uygulanan GFRP ve CFRP sonuçlarının karşılaştırılması

Deneylerde kullanılan GFRP ve CFRP plakalardan hangisinin daha iyi sonuçlar verdiğini karşılaştırabilmek amacıyla Şekil 4.16'da verilen grafikler hazırlanmıştır. Bu grafiklerde ısıl işlem gören rijitleştirilmiş plakalardan GFRP kullanılarak onarılan S3HTGC2, S3HTGC3, S3HTGC6, S3HTGC7 deney numuneleri ile CFRP

kullanılarak onarılan S3HTCC2, S3HTCC3, S3HTCC6, S3HTCC7 deney numunelerinin, yük-yatay ve düşey yer değiştirmeleri kıyaslanmıştır.



Şekil 4.16. GFRP ve CFRP ile güçlendirilen çelik plakaların karşılaştırılması



Şekil 4.16'nın devamı

Grafikler incelendiğinde her iki plakanın da maksimum yük taşıma kapasitelerinin ve rijitliklerinin birbirlerine yakın oldukları görülmektedir (Tablo 4.8). Bunun nedeni ise yapıştırıcı elemanın sıyrıldığı anda burkulmanın başlaması ve FRP elemanların etkisinin azalması şeklinde yorumlanmıştır.

Tablo 4.8. Isıl işlem görmüş rijitleştirilmiş çelik plakaların CFRP ve GFRP uygulandığında maksimum yük taşıma kapasitelerinin karşılaştırması

GFRP Yerleşimi	Maksimum Yük (kN)	% Artış (Isıla göre)	% Artış (Referansa göre)	CFRP Yerleşimi	Maksimum Yük (kN)	% Artış (Isıla göre)	% Artış (Referansa göre)
S3HTGC7	577.77	22.6	12	S3HTCC7	574.25	21.9	12
S3HTGC6	555.62	18	8	S3HTCC6	554.35	17.7	8
S3HTGC3	522.73	11	2	S3HTCC3	543.18	15.3	6
S3HTGC2	497.25	5	-3	S3HTCC2	503.89	7	2
S3R	513.71	--	---	S3R	513.71	--	---
S3HT	470.92	---	---	S3HT	470.92	---	---

Bu değerlendirmeye göre her iki plakanın güçlendirme işlemi için uygun olduğu ve birbirlerinin yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

4.3.2. Maliyet analizi

Çelik plakalara uygulanan ısı-presleme işlemi sonrasında FRP yapıştırması ile hasar gören çelik plakanın yenisi ile değiştirilmesi arasında karşılaştırma yapabilmek için maliyet analizi yapılmıştır. Malzemelerin güncel piyasa fiyatları üretici firmalardan temin edilmiştir [50, 51]. Tablo 4.9’da onarım işlemi için maliyetler, Tablo 4.10’da çeliğin değiştirilmesi durumundaki malzeme fiyatları verilmiştir.

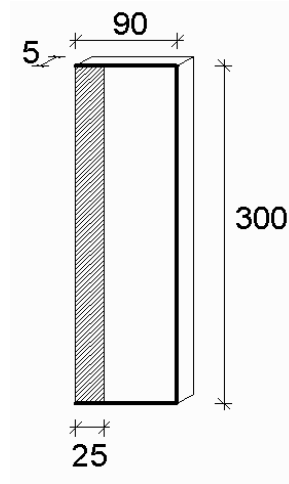
Tablo 4.9. Isıl işlem sonra FRP ile onarım işlemi için malzeme maliyeti

Malzeme	Maliyet	Birim
GFRP	4,5	€/kg
CFRP	30	€/kg
Yapıştırıcı	40	€/kg
Asetilen tüp	9,7	€/kg
Oksijen gaz	6,5	€/m ³

Tablo 4.10. Çelik malzeme maliyeti

Malzeme	Maliyet	Birim
Çelik	0,75	€/kg

Elde edilen malzeme fiyatlarına göre 1 kg’lık çeliğin onarım ve değiştirme işlemlerinin maliyeti hesaplanmıştır. Bunun içinde 90x5x300 mm ölçülerinde çelik plakanın 1 kg olduğundan yola çıkılarak (Şekil 4.17), deneysel çalışmalardan rijitleştirilmiş plakalardaki S3HTGC3 yerleşimindeki numunenin maliyeti hesaplanmıştır (Tablo 4.11). Bu numunelerin seçilmesinin nedeni, S3HT (ısı) plakalarının dayanım ve rijitliğini artırmaları, diğer deney numunelerine oranla uygulamalarının kolay olması, daha az epoksi yüzeyine sahip olmaları, FRP kesit alanlarının az olması nedeniyle ekonomik olmalarıdır.



Şekil 4.17. Maliyet analizi yapılan çelik plaka ve FRP boyutları

Aşağıdaki tabloya bakılarak GFRP elemanlar ile yapılan onarımın çelik plakanın yenisi ile değiştirilmesi durumundan daha ekonomik olduğu görülmektedir. GFRP ile CFRP onarımları arasında 7 kat maliyet farkı oluşmaktadır. Ayrıca FRP elemanlar ile yapılan onarım dayanıma göre maliyeti incelendiğinde GFRP için 47 MPa/€, CFRP için ise 9.3 MPa/€ maliyetleri elde edilmiştir.

Tablo 4.11. Maliyet karşılaştırması

	Onarım (GFRP ile)	Onarım (CFRP ile)	Değiştirme
Birim Maliyet (€/kg)	0,61	4,35	0,75
Eksenel Basınç Dayanımı (MPa/€)	47	9.3	-

BÖLÜM 5. SONLU ELEMAN MODELİ VE MODELİN DOĞRULANMASI

Bir stabilite problemi olan burkulma, basınç etkisi altında bulunan ince cidarlı çelik elemanlarda gerilme probleminden daha önemli bir problemidir. Elemanların burkulma davranışı, zor olan aksenal basınç yükleme deneyi ile belirlenmeye çalışılır. Sonlu eleman analizinde ise burkulma davranışı ancak malzeme ve geometri bakımından doğrusal olmayan analiz ile elde edilebilir.

Yapı elemanlarının davranışlarını incelerken deneysel yöntemler en doğru yaklaşım yöntemidir. Ancak deney parametrelerinin artması ile gereken deney sayılarının artacak olması hem maddi açıdan hem de zaman açısından ekonomik olmamaktadır. Bu güçlük doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri yapılarak giderilebilir. Ancak bu analizler için üretilen modeller, deneysel veriler ile doğrulandıktan sonra parametrik çalışmalarda kullanılmalıdır.

İnce cidarlı çelik yapı elemanlarının sonlu eleman modellemesinde doğrusal olmayan geometrik analiz yapılması gerçek davranışının yakalanması açısından önemlidir. Doğrusal olmayan geometrik analiz yapılmadan önce elemana ilkel kusurlar verilerek burkulmasına yardımcı olmak gerekmektedir [52].

Bu bölümde rijitleştirilmiş (üç kenarından mesnetli) çelik plaka elemanlarına geometrik kusur tanımlanarak doğrusal olmayan analiz yapılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel verilerle kıyaslanarak doğrulanmıştır. Analiz için ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır.

5.1. Malzeme Modelleri

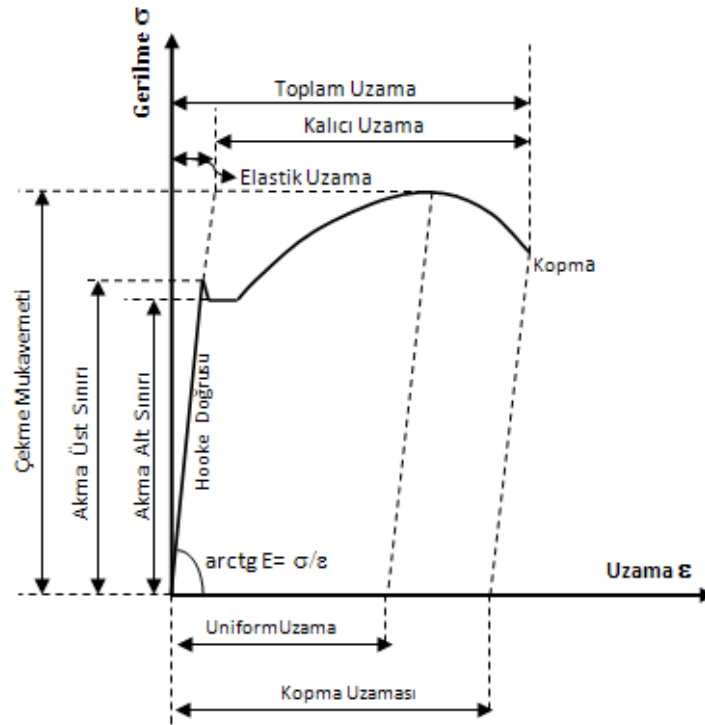
Sonlu elemanlar modeli kurulurken en önemli adım kullanılacak malzemelerin matematik modellerinin gerçek davranışı yansıtacak şekilde seçilmesidir. Bu

bölümde sırasıyla çelik, epoksi ve fiber malzemeler için kullanılan matematik modeller anlatılmıştır.

5.1.1. Çelik malzeme modeli

Yapısal çeliklerin statik yükler ve çekme kuvvetleri altındaki dayanımını tanımlamak için, malzeme çekme deneyinden elde edilen elastisite modülü, akma gerilmesi ve Poisson oranı kullanılır.

Yapı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



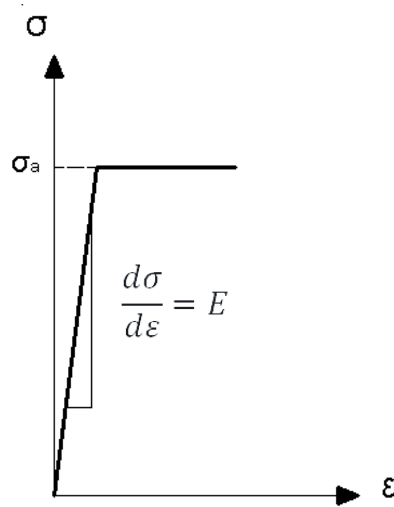
Şekil 5.1. Çeliğin gerilme-şekil değiştirme eğrisi [53]

Bu çalışmada numerik modellemede çelik malzeme, ideal elasto-plastik malzeme davranışına göre tanımlanmıştır. İdeal elasto-plastik malzeme gerilme-şekil değiştirme diyagramı,

$$0 < \varepsilon < \varepsilon_e \quad \text{için} \quad \sigma = E \cdot \varepsilon$$

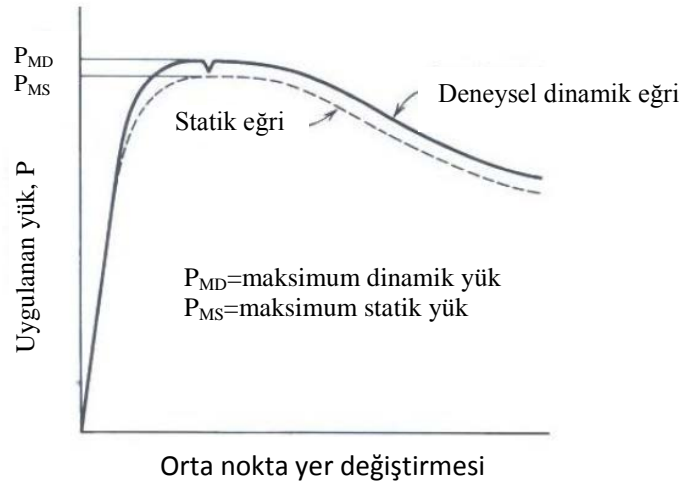
$$\varepsilon_e < \varepsilon < \infty \quad \text{için} \quad \sigma = \sigma_a$$

olarak iki doğru parçasından oluşmuştur (Şekil 5.2). Burada ε_e elastik birim şekil değiştirmeyi, E elastisite modülünü, σ_a ise akma değerini göstermektedir Basınç ve çekme yüklemeleri altında malzemenin aynı davranışı gösterdiği kabul edilmektedir.



Şekil 5.2. İdeal elasto-plastik malzeme diyagramı [54].

Literatürde [55], statik ve dinamik deney sonuçları arasındaki farkı temsilen 27.56 MPa azaltma yapılmasını önermektedir. Statik koşullar altında yapılan aksenal çekme deney sonuçları literatürde belirtildiği gibi statik değerlere çevrilmiş hali. Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Analizlerde kullanılan çelik malzemesine ait gerilme şekil değiştirme diyagramı çekme deneyinden elde edilerek Bölüm 3 Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Literatürde belirtilen bu nedenle ısı işlem sonrası çelik malzemesinin akma dayanımı azaltılmıştır. Analizlerde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Dinamik yükleme ve statik yükleme arasındaki fark [56]

Tablo 5.1. Sonlu eleman modelinde kullanılan çelik malzemesine ait malzeme özellikleri

Eleman	E (GPa)	μ (Poisson oranı)	σ_a (MPa)	Yoğunluk(t/mm^3)
Çelik	210	0.3	290	1.13 E-10

5.1.2. Yapıştırıcı malzeme modeli

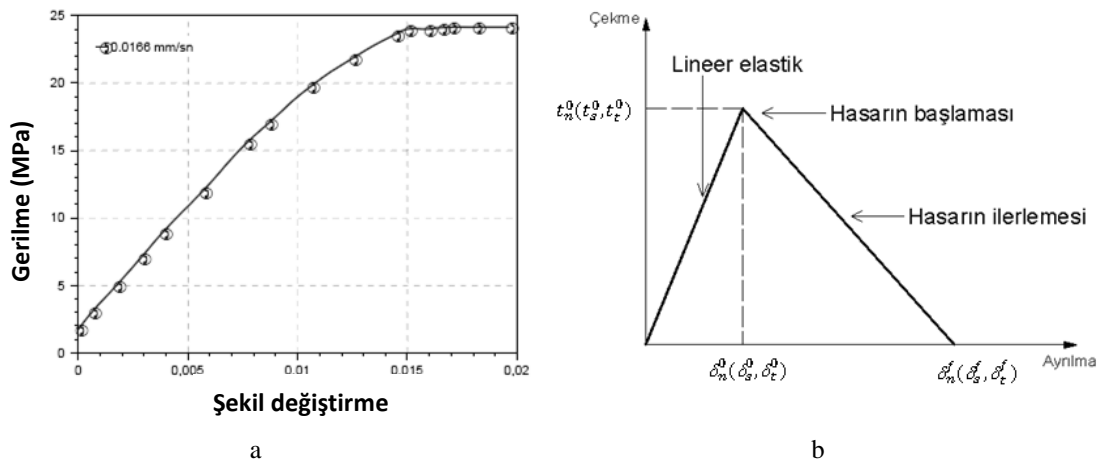
Deneylerde çelik ve FRP elemanı birlikte yapıştırıcıdan sıyrılarak birbirlerinden ayrılmaktadırlar. Aynı davranışın sonlu eleman modelinde de oluşturulması istenmiştir. Bunu sağlayabilmek için sonlu elemanlar modelinde kullanılan yapıştırıcı malzeme modeli, FRP ile çelik plakaların birlikte çalışmasını sağlayacak ve gerilmeleri aktaracak şekilde seçilmiştir.

Çekme-ayrılma modellemesinde, başlangıç kısmı lineer elastik davranıştır ve elastik rijitlik matrisi ile tanımlanır. Elastik rijitlik matrisi, arayüz boyunca nominal gerilme-şekil değiştirmeleri ilişkilendirmektedir. Aşağıdaki matriste t_n (t_s , t_t) normal ve kayma yönlerinde oluşan gerilmeleri, K_{nn} (K_{ss} , K_{tt}) elastik rijitlik matrisinin normal ve kayma yönlerindeki değerlerini, ϵ_n (ϵ_s , ϵ_t) normal ve kayma yönlerindeki şekil değiştirmeleri göstermektedir (5.1).

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & & \\ & K_{ss} & \\ & & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_n \\ \epsilon_s \\ \epsilon_t \end{Bmatrix} \quad (5.1)$$

Normal gerilmeler, kuvvet bileşenin her bir integrasyon noktasında orijinal alana bölünmesi ile elde edilir. Nominal şekil değiştirmeler ise, ayrılma uzunluğunun her bir integrasyon noktasında orijinal kalınlığa bölünmesi ile bulunur. Elemanın başlangıç kalınlığı $t_c=1$ olarak kabul edilir, ancak eleman kalınlığı farklı ise elastik modüller bu kalınlığa bölünmelidir. Eleman kalınlığı model oluşturulurken çizilecek ise başlangıç kalınlığı 1 kabul edilir.

Yapıştırıcı modellemesinde yapıştırıcı kalınlığı 0.1 birim olarak girilmiştir. Şekil 5.4'te elde edilen gerilme değerleri yukarıda anlatılan prensip gereği 0.1'e bölünmüştür [57].



Şekil 5.4. a-Yapıştırıcıya ait gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı [58], b- Sonlu eleman programının önerdiği model [59]

Literatürden elde edilen verilere göre yapıştırıcıya ait malzeme özellikleri Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Epoksi 3 yapıştırıcısına ait malzeme özellikleri

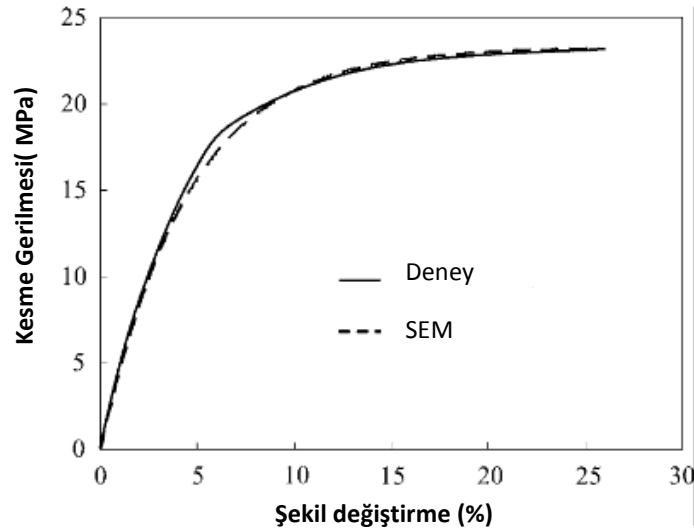
Eleman	E (MPa)	G1(MPa)	G2(MPa)	Yoğunluk(t/mm ³)
Epoksi 3	19000	6333	6333	1.13 E-10

Malzeme davranışının tanımlanmasında lineer elastik kısım tamamlandıktan sonra, malzeme yapısında olan liflerin arasındaki bağın kopmaya başladığı noktanın

tanımlanması gerekir. Malzeme modellemesinde bu kısım (Criterion=QUADS) olarak tanımlanır. Kuadratik etkileşim fonksiyonu 1 değerine ulaştığında hasarın başladığı kabul edilir.

$$\left\{\frac{t_n}{t_n^0}\right\}^2 + \left\{\frac{t_s}{t_s^0}\right\}^2 + \left\{\frac{t_t}{t_t^0}\right\}^2 = 1 \quad (5.2)$$

Burada t_n , elemanın normali yönündeki gerilmeyi, t_s ve t_t ise kayma yönlerinde oluşacak gerilmeleri, t_n^0 , t_s^0 , t_t^0 ise normal veya kesme yönlerinde hasarın başladığında oluşan gerilmeleri göstermektedir (5.2) [57].



Şekil 5.5. Yapıştırıcının kesme etkisindeki gerilme-birim şekil değiştirme grafiği [60]

Şekil 5.5'teki kayma gerilmesinin maksimum olduğu değer, yapıştırıcı malzemenin yapısındaki bağların kopmaya başladığı değer olarak, yani hasar başlama noktası olarak alınmıştır.

5.1.3. FRP malzeme modeli

Deneylerde çelik ve FRP elemanı yapıştırıcıdan sıyrılarak birbirlerinden ayrılmaktadırlar. Bu ayrılmada FRP plakalarda herhangi bir hasar oluşmamaktadır. Aynı davranış sonlu eleman modelinde de görülmek istenmiştir. Bu nedenle sonlu eleman modelinde kullanılan FRP elemanlar lineer elastik malzeme olarak

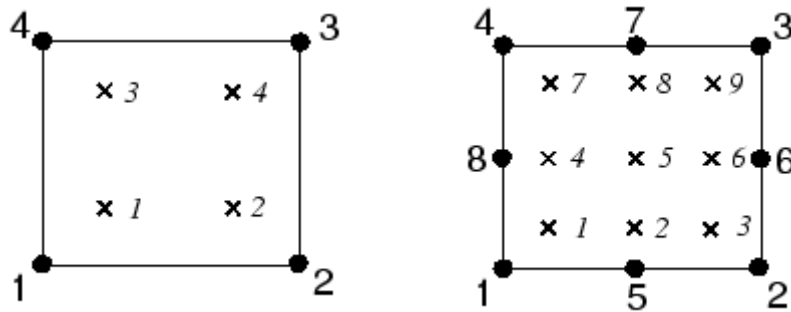
modellenmiştir. GFRP ve CFRP elemanlar için modelde kullanılan malzeme özellikleri Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3.FRP sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özellikleri

Eleman	E (MPa)	Yoğunluk (t/mm ³)
GFRP	29333	1.82 E-9
CFRP	165000	1.62 E-9

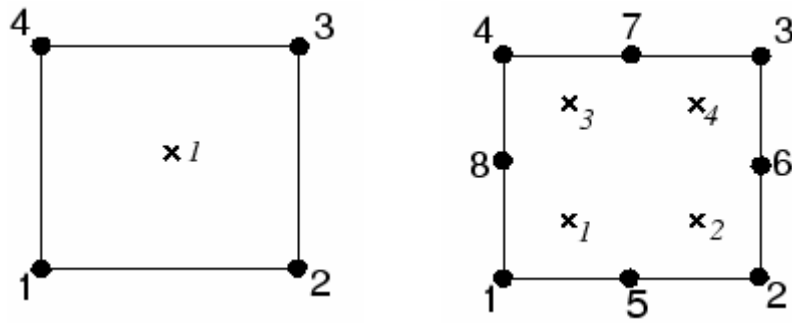
5.2. Sonlu Elemanlar Modelinde Kullanılan Eleman Tipleri

Sonlu eleman programında düğüm noktalarındaki yerdeğiştirmeyi hesaplamak için lineer veya kuadratik enterpolasyon formülasyona sahip elemanlar kullanılmaktadır. ABAQUS rijitlik matrislerinin polinom terimlerinin integrasyonunda tam ve azaltılmış integrasyon özelliği mevcuttur. Tam integrasyonlu lineer ve kuadratik elemanlar her bir yönde 2 ve 3 integrasyon noktası kullanılırlar (Şekil 5.6). Bu ise çözümü hem zorlaştırmakta hem de çözüm zamanını arttırmaktadır.



Şekil 5.6. Lineer ve kuadratik eleman integrasyon noktaları [61].

Azaltılmış integrasyon elemanları tam integrasyonlu elemanlara göre her bir yönde daha az integrasyon noktası kullanarak çözüm yapmaktadır. Analizlerde şekil değiştirmelerini gösterebilmesi ve plastisite yöntemindeki başarısı nedeniyle 1. derece azaltılmış integrasyon elemanları kullanılmıştır (Şekil 5.7).



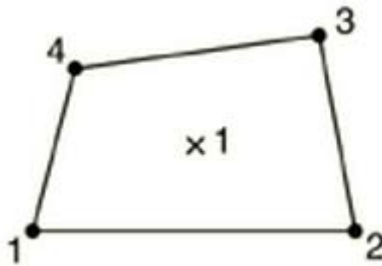
Şekil 5.7. Azaltılmış integrasyonlu lineer ve kuadratik eleman

Sonlu elemanların modellenmesinde çok farklı eleman türleri kullanılabilir. Bu çalışmada ABAQUS eleman kütüphanesinden çelik plakalar ve FRP elemanlar için 2 boyutlu sürekli kabuk (shell) eleman S4R, yapıştırıcı için 3 boyutlu cohesive COH3D8 eleman tipi kullanılmıştır (Şekil 5.8 ve Şekil 5.9).

5.2.1. S4R eleman tipi

Kabuklar, düzlemi içinde ve düzlemine dik yükler altında plak ve eğilme davranışı yapan elemanlardır. Çelik plakalar ve FRP elemanlar S4R eleman tipi kullanılarak modellenmiştir. Bu eleman kullanılarak çelik elemanlar için yapılan çalışmalarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

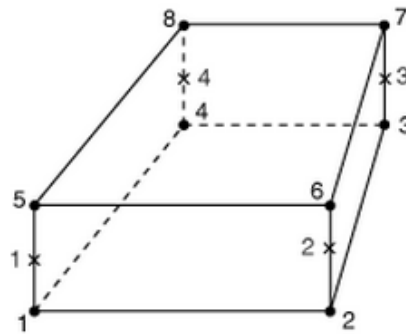
S4R eleman tipi, 4 düğüm noktalıdır ve her düğüm noktasında 6 serbestlik derecesi (üç doğrultuda yerdeğiştirme ve bu doğrultuların etrafında dönme) vardır. Ancak azaltılmış integrasyon kullanılarak integrasyon nokta sayısı 1'e indirilmiştir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. S4R eleman tipi

5.2.2. COH3D8 eleman tipi

Yapıştırıcı için COH3D8 eleman tipi kullanılmıştır. 8 düğüm noktası ve 4 integrasyon noktası vardır (Şekil 5.9). Yapıştırıcı elemanı için aktif serbestlik dereceleri; normal yönde öteleme serbestliği bileşeni ve iki yönde kayma serbestliği bileşenleridir [57].

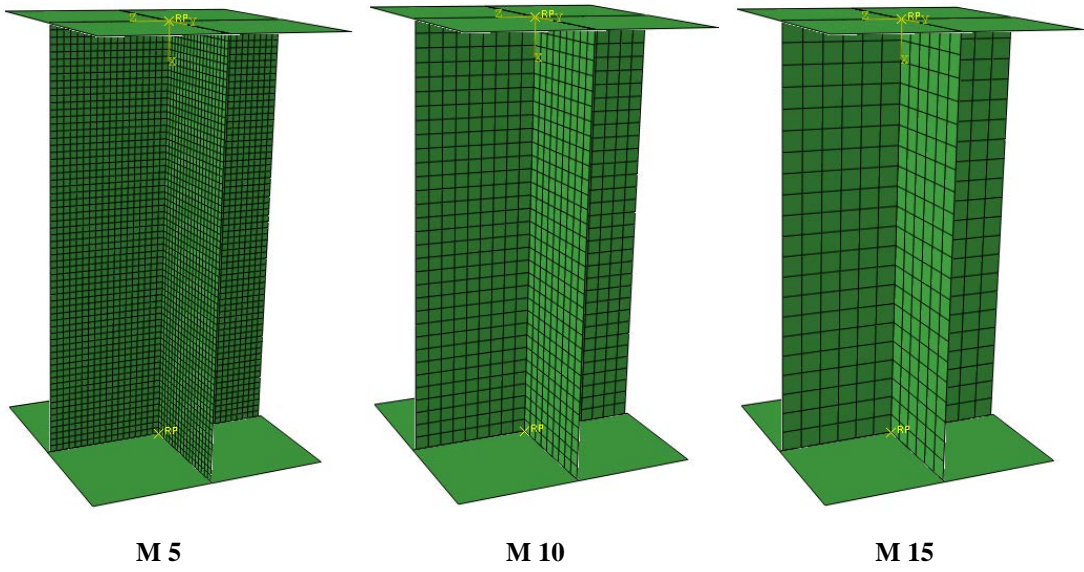


Şekil 5.9. COH3D8 eleman tipi [59].

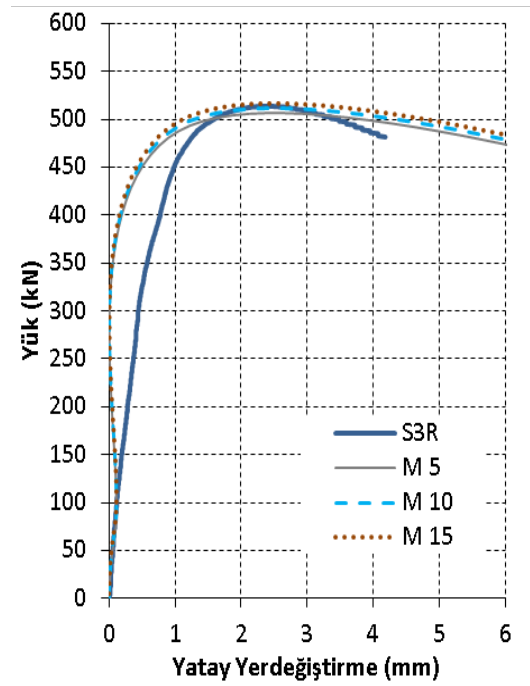
5.3. Çözüm Ağı

Sonlu elemanlar metodunda ilk basamak, yapıyı veya çözüm bölgesini alt bölümlere yani sonlu elemanlara ayırmaktır. Kullanılacak eleman sayısı ve yoğunluğu sonuçları değiştirecektir. Çok yoğun bir çözüm ağına sahip modelin analizini yapmak çok zaman alacağından optimum çözüm ağını elde etmek gerekir. Çok yoğun çözüm ağı daha doğru sonuçlar verir önermesi her zaman doğru değildir. Bazı modeller çözüm ağı hassasiyetine sahiptir. Önemli olan çözüm ağı oluşturulurken, her bir sonlu elemanın boyutları arasındaki orandır [54].

Modellerde kullanılacak çözüm ağı sıklığının etkisinin belirlenmesi amacıyla 5x5 (M5), 10x10 (M10), 15x15 (M15) boyutlarında üç farklı aralık seçilmiştir (Şekil 5.10). her bir çözüm ağından elde edilen sonuçlar deney sonucu ile kıyaslanmıştır (Şekil 5.11).



Şekil 5.10. Çözüm ağı sıklığı



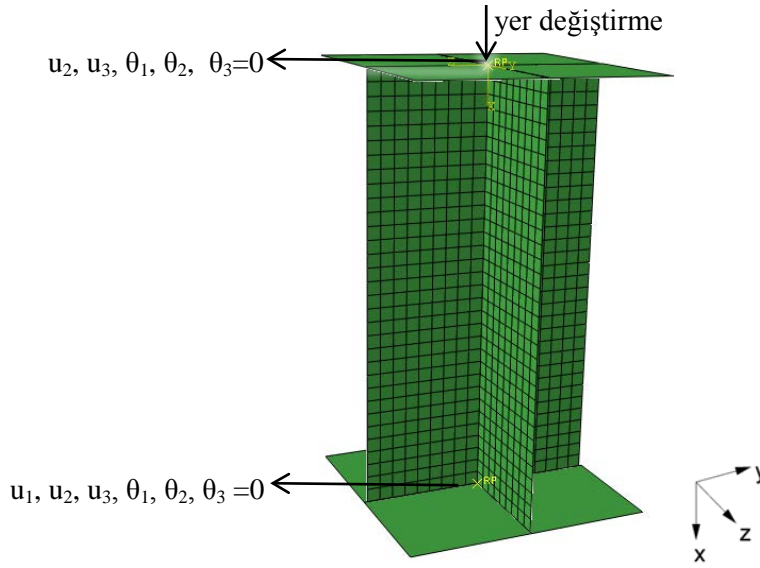
Şekil 5.11. Rijitleştirilmiş referans çelik plakada çözüm ağı sıklığının etkisi

Grafik sonuçlarına ve analizlerin yapılacağı bilgisayarın kapasite sınırlarına bakılarak M 10 çözüm ağı sıklığı seçilmiş ve çalışmaya bu şekilde devam edilmiştir.

5.4. Sınır Koşulları ve Yer Değiştirme Uygulaması

Deney elemanı sınır koşulu olarak alt başlıktan ankastre ($u_1, u_2, u_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3 = 0$), üst başlıkta ise x doğrultusunda yer değiştirmesi (u_1) serbest, diğerleri ise ($u_2, u_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3 = 0$) tutulu olarak mesnetlenmiştir.

SEM' de modele üst başlıktan x yönü doğrultusunda ağırlık merkezine gelen yerdeğiştirme verilerek yüklenmiştir (Şekil 5.12).



Şekil 5.12. Çelik plakaya uygulanan sınır koşulu ve yerdeğiştirme uygulaması.

5.5. Geomerik Kusur

Doğrusal olmayan geometrik analizde denge denklemleri şekil değiştirmiş geometri referans alınarak oluşturulur. Şekil değiştirmeler, hesaplanabilmelerine rağmen, yapı statığı teorisinde hareket ve denge denklemleri yazılırken ihmal edilirler. Özellikle burkulma sonrası davranışın takip edilebilmesi, ikinci mertbe etkilerinden dolayı oluşan kuvvetlerin hesaplanması için denge denklemlerinin deforme olmuş geometriye göre yazılmaları gerekmektedir.

İnce cidarlı geometrilerinden dolayı çelik profiller yerel ve global burkulmaya açık yapı elemanlarıdır. Özellikle yerel burkulmaların etkilerinin izlenebilmesi için doğrusal olmayan geometrik analiz yapılmalıdır. Bundan dolayı sonlu eleman

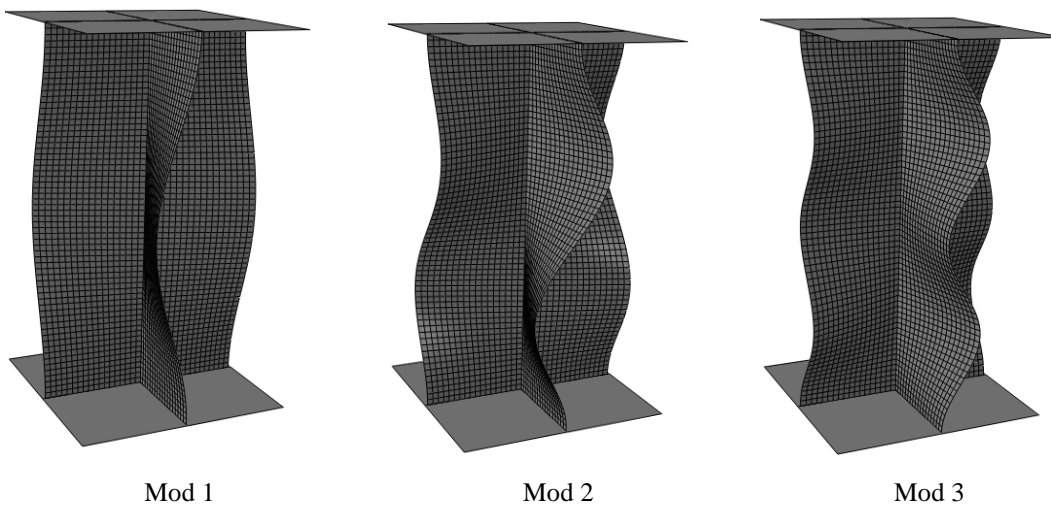
modellerine gerçekteki gibi burkulmasına yardımcı olmak amacıyla başlangıçta ilkel kusurlar eklenmelidir. Aslında bu ilkel kusurların eklenmesi gerçekte hiçbir elemanın kusursuz olmadığı gerçeği ile de örtüşmektedir. İlkel kusurların sonlu eleman modeline entegre edilmesinde iki yöntem önerilir.

1. Yöntem: Var olan kusurun sinüs dalgası formülasyonu ile idealize edilmesi, [62]
2. Yöntem: Kusursuz sistemin lineer burkulma analizi yapılarak birinci burkulma modunun ölçeklendirilerek kusurlu sistemmiş gibi kabul edilmesi, [63], [52]

Yapılan çalışmada ikinci yöntem kullanılarak geometrik kusurların değişiminin etkisi incelenecektir. Sonlu eleman analizi iki aşamada yürütülmüştür.

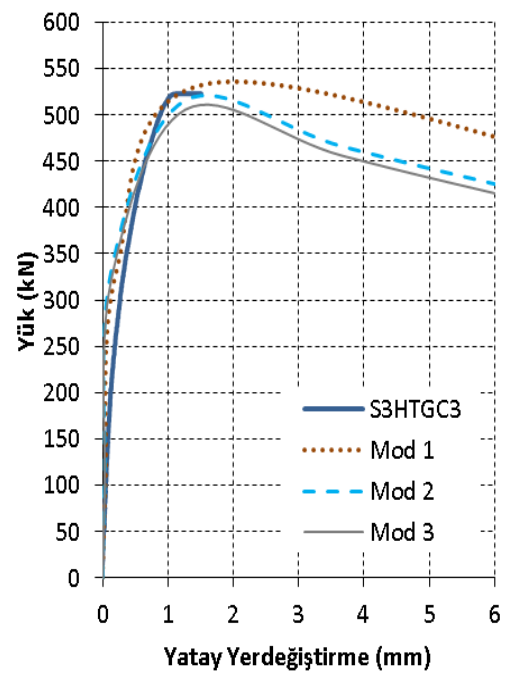
Birinci aşamada yapı elemanı önce kusursuz bir şekilde modellenmiş ve lineer burkulma analizi yaptırılarak burkulma modları elde edilmiştir. Elde edilen burkulma modlarının en küçüğü bir sayı ile ölçeklendirilerek kusurlu sistemin geometrisiymiş gibi sayısal modele aktarılmıştır.

İkinci aşamada ise bu kusurlu model yüklenip analizlere devam edilmiştir.



Şekil 5.13. Kusursuz elemana ait burkulma mod şekilleri

Kusurlu çözüm ağında kullanılacak en etkili mod Őeklini bulmak için analizler yapılmıştır. Kusursuz elemana burkulma analizi yapılarak ilk u moda ait burkulma Şekilleri Şekil 5.13' te verilmiştir. Bu u mod ayrı ayrı kullanılarak elde edilen yük yer değiştirme grafikleri Şekil 5.14' te gösterilmiştir. Grafikteki kıyaslamada Bölüm 6'daki parametrik çalışmada da seçilen N3HTGC3 deney numunesi kullanılmıŐ ve maksimum yük değerine en yakın sonucu Mod 1' in verdiği gözlenmiştir. Bu yüzden de çalışmanın devamında Mod 1 kullanılmıştır.



Şekil 5.14. Deneysel sonuçların doğrulanması için kullanılan modellemede modların etkisi

5.6. DeneYlerin Nümerik Modelleme İle Doğrulanması

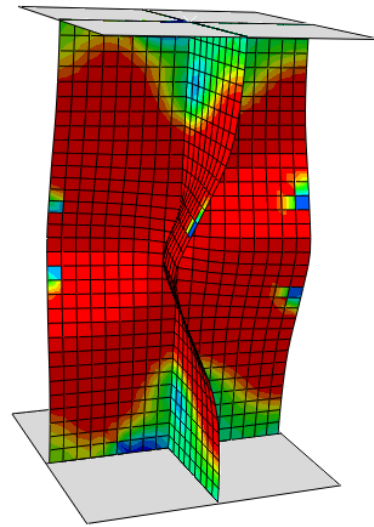
Önceki bölümlerde anlatılan nümerik modelleme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilen analizlerin sonuçları ile deneylerden elde edilen yük-yerdeğiştirme sonuçları kıyaslanarak, modelleme aŐamalarının doğruluğu ispat edilmeye çalışılmıştır. Hem yük-yerdeğiştirme değerleri hem de deneylerde gözlemlenen davranıŐlar kıyaslanarak modelleme doğrulanmıştır.

5.6.1. Referans ve ısıtılmış çelik plakaların nümerik modeli

İlk olarak Bölüm 3’ te malzeme özellikleri ve Bölüm 4’te deney sonuçları verilen S3R (referans) ve S3HT (ısıtılmış) çelik plakaların nümerik modelleri oluşturulmuştur (Şekil 5.15). Referans plakaya en yakın sonucu veren L/300, ısıtılmış plakaya L/160 ölçeğinde kusur (Bölüm 5.5’ te bahsedilen 2. yöntem) verilerek Abaqus/Explicit çözümü yapılmıştır. Deney ve SEM sonuçları karşılaştırılarak, yeterli yakınlıkta sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 5.16).

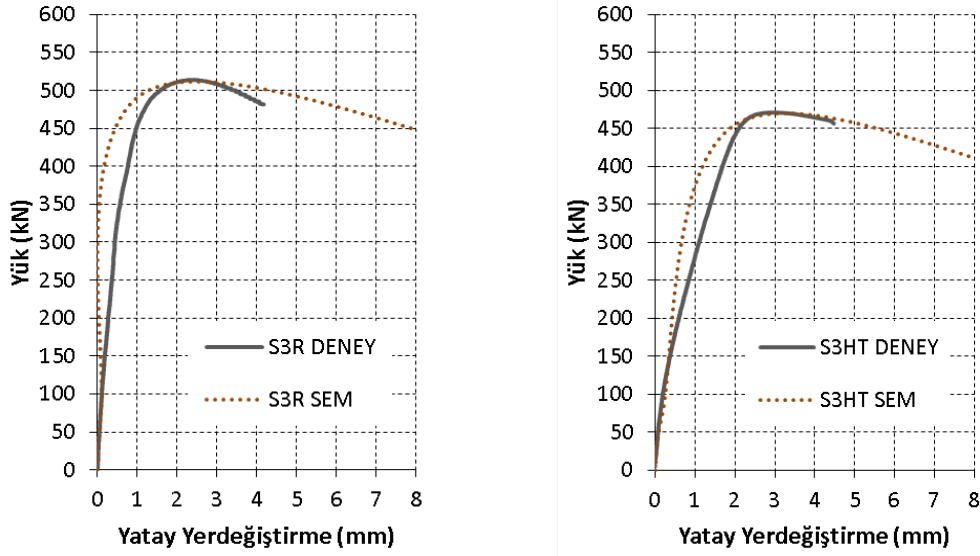


Deney



SEM

Şekil 5.15. Referans ve ısıtılmış çelik plakaların nümerik modeli



Şekil 5.16. Rijitleştirilmiş referans ve ısıtılmış çelik plakaların deney ve SEM sonuçlarının karşılaştırılması.

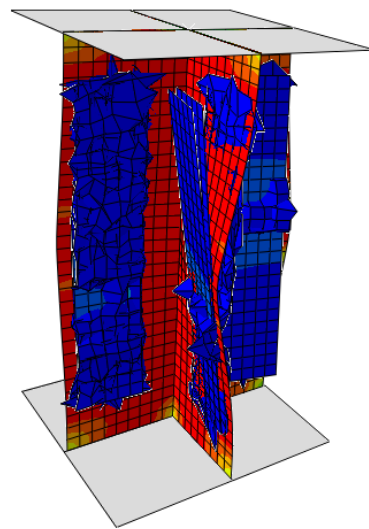
5.6.2. FRP ile güçlendirilen çelik plakaların nümerik modeli

Bölüm 4' te deneysel çalışması anlatılan GFRP ve CFRP gruplarının nümerik doğrulanması yapılmıştır.

Yapılan nümerik analizlerde yapıştırıcının çelik plakadan sıyrıldığı görülmektedir (Şekil 5.17). Bu durum deney sırasındaki gözlemlerle uyumaktadır.



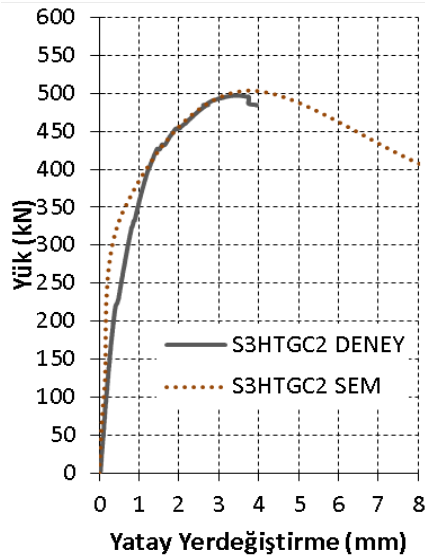
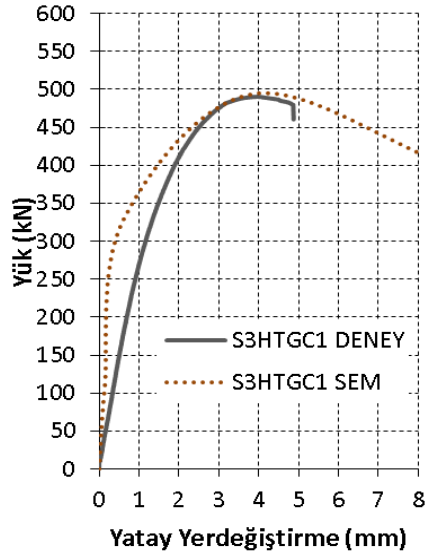
Deney



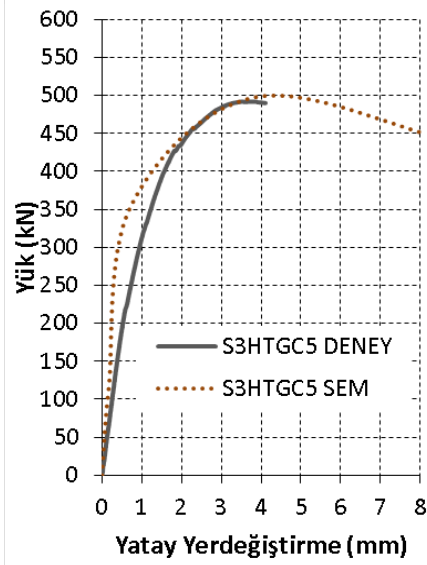
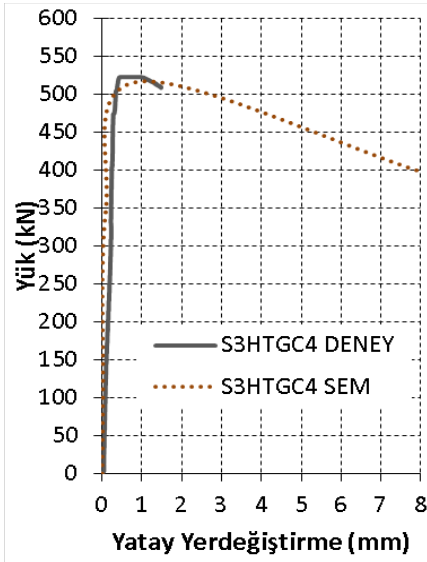
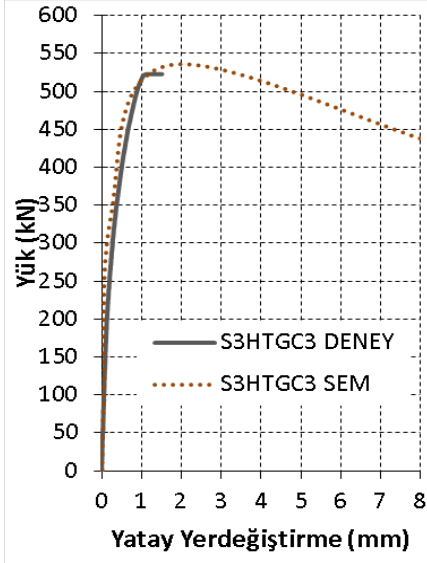
SEM

Şekil 5.17. Yapıştırıcının çelik plakadan sıyrılması

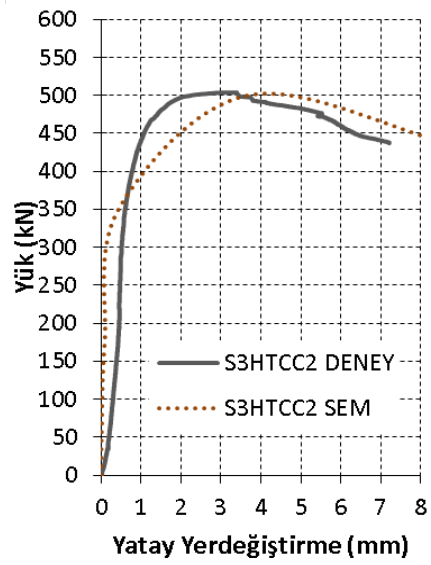
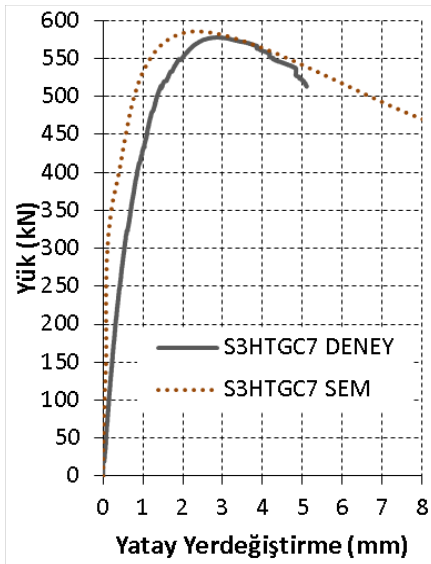
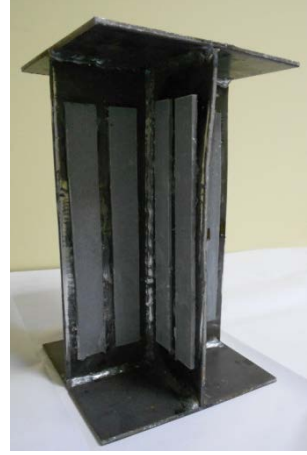
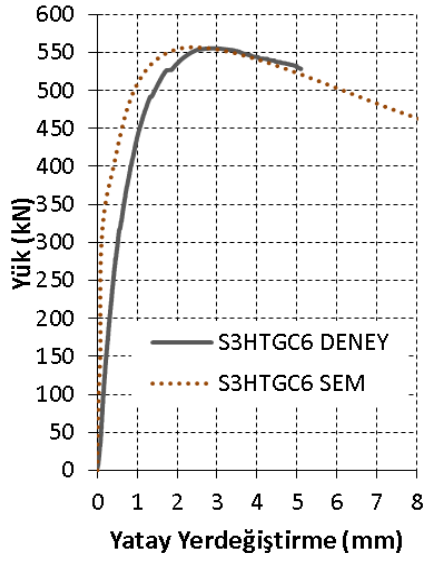
Kusur oranları olarak GFRP gruplarında; S3HTGC1 L/300, S3HTGC2 L/300, S3HTGC3 L/900, S3HTGC4 L/2000, S3HTGC5 L/225, S3HTGC6 L/600, S3HTGC7 L/600, CFRP gruplarında; S3HTCC2 L/300, S3HTCC3 L/900, S3HTCC6 L/600, S3HTCC7 L/600 kullanılmıştır. Elde edilen grafikler Şekil 5.18’ de verilmiştir.



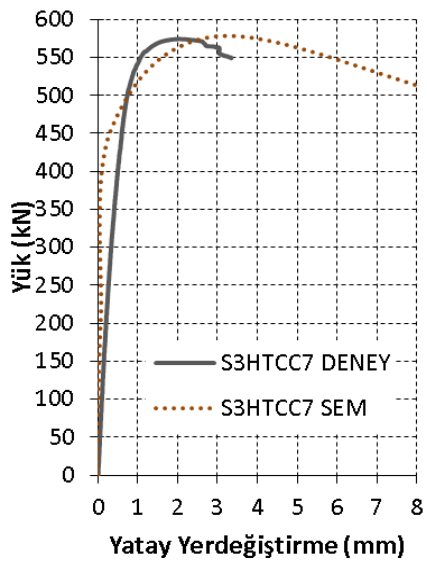
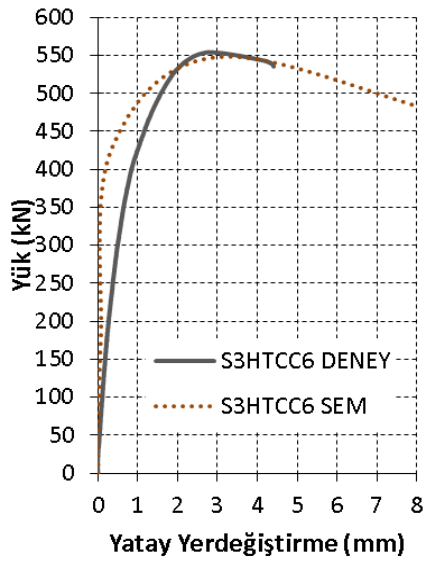
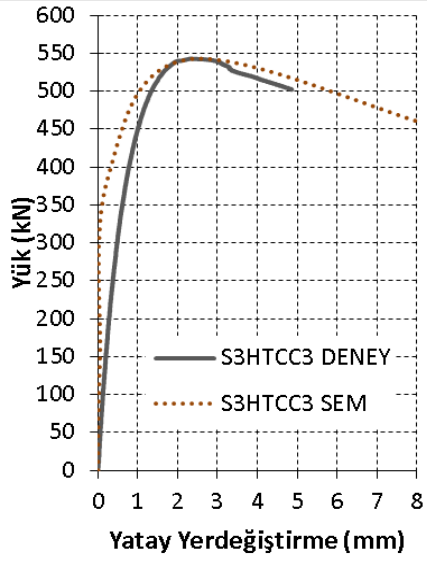
Şekil 5.18. GFRP ve CFRP ile güçlendirilen çelik plakaların deney ve SEM sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 5.18'in devamı



Şekil 5.18'in devamı



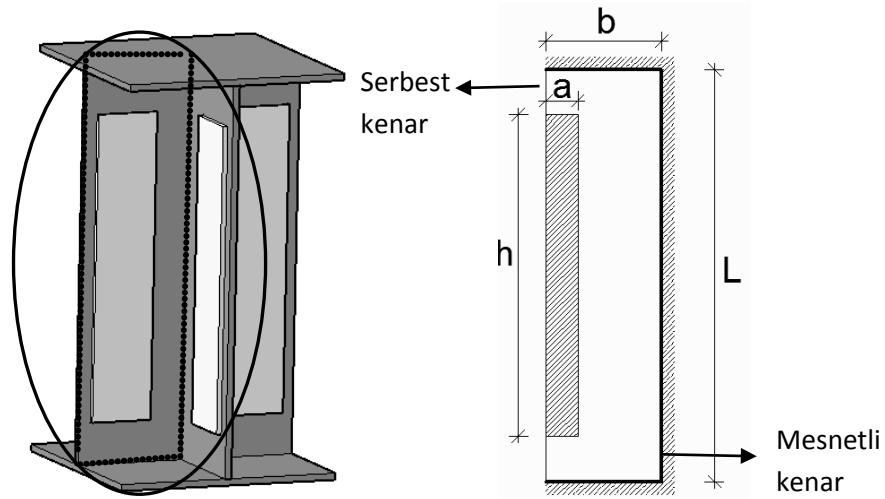
Şekil 5.18'in devamı

BÖLÜM 6. PARAMETRİK ÇALIŞMA

Bu bölümde, ısıtılma işlem görmüş rijitleştirilmiş çelik plakaların FRP plakalar ile güçlendirilmesinde azalan dayanım ve rijitliği artırmak için gerekli olan FRP plakaların boyu ve uygulanması gereken yerleşimlerin tespit edilmesinde belirlenen boyutlardaki çelik plakalara nümerik modeller yapılmıştır. Çalışmada gerçek laboratuvar deneyleriyle doğrulanmış olan sonlu eleman modeli kullanılmıştır. FRP malzemelerin uzunlukları ve uygulama yerlerindeki değişimlerin kapasiteyi ne kadar etkilediği araştırılmıştır. Çalışmada oluşturulan 200 adet sayısal numune üzerinden GFRP ile güçlendirilen ısıtılma işlem görmüş rijitleştirilmiş çelik plakalar b/t oranına bağlı k (burkulma katsayısı) formülü elde edilmiştir.

Yapılan parametrik çalışmada CFRP plakalarla yapılan onarımın GFRP ile yapılanlara göre yedi kat pahalı olması nedeniyle, GFRP plakalar üzerinde yoğunlaşmıştır. Bölüm 4 Tablo 4.4'te gösterilen yerleşim düzenlerinden S3HTGC1 ve S3HTGC2 referans numunenin dayanımını yakalayamaması, S3HTGC4 çift kat GFRP uygulanmasının zorluğu, S3HTGC5 yine referans numunenin dayanımına ulaşamaması ve epoksi yüzeyinin fazlalığı, S3HTGC6 ve S3HTGC7 uygulama zorluğundan dolayı elenerek, parametrik çalışma için hem uygulaması kolay hem ekonomik hemde referans numunenin dayanımını sağlayan S3HTGC3 isimli deney numunesi seçilmiştir.

Çalışmada kullanılacak olan parametrelere ait değerlerin harflendirilmiş hali Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Buna göre a ve h GFRP plakalarının genişlik ve yüksekliklerini, b ve L çelik plakaların genişlik ve yüksekliklerini temsil etmektedir. Bütün boyutlar a değerine bağlı olarak belirlenmiştir. Ayrıca b genişliğine bağlı olarak 0 ila 7 arasında değişen yerleşim düzenleri kullanılmıştır.

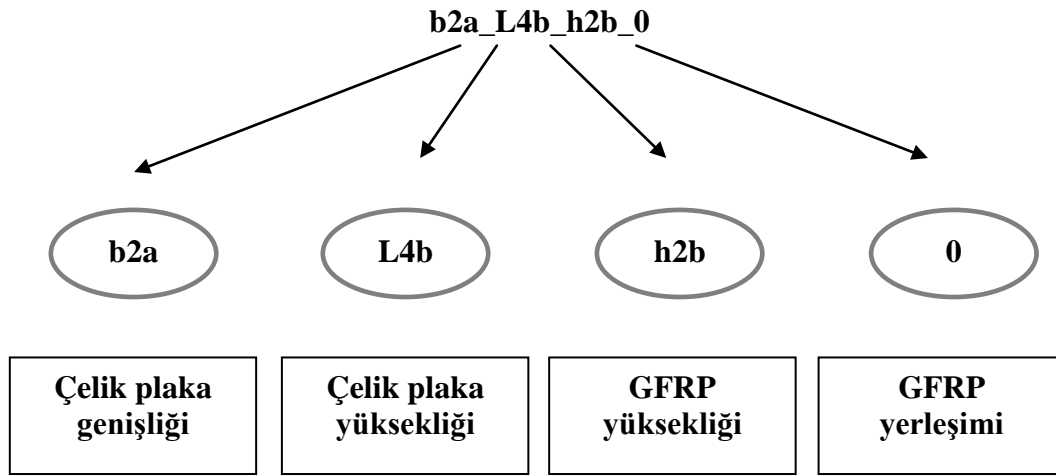


Şekil 6.1. Parametrik çalışmada kullanılan değişkenler

6.1. GFRP Yerleşimi

Parametrik çalışmada, GFRP elemanın yerini değiştirdiğimizde sonuçlara nasıl bir etki yapacağını görebilmek için yerleşim düzeninin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla b genişliğine bağlı olarak, $b=2a$ için 0 ve 1, $b=4a$ için 0, 1, 2 ve 3, $b=6a$ için 0, 1, 2, 3, 4 ve 5, $b=8a$ için 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 ve 7 yerleşim düzenleri seçilmiştir.

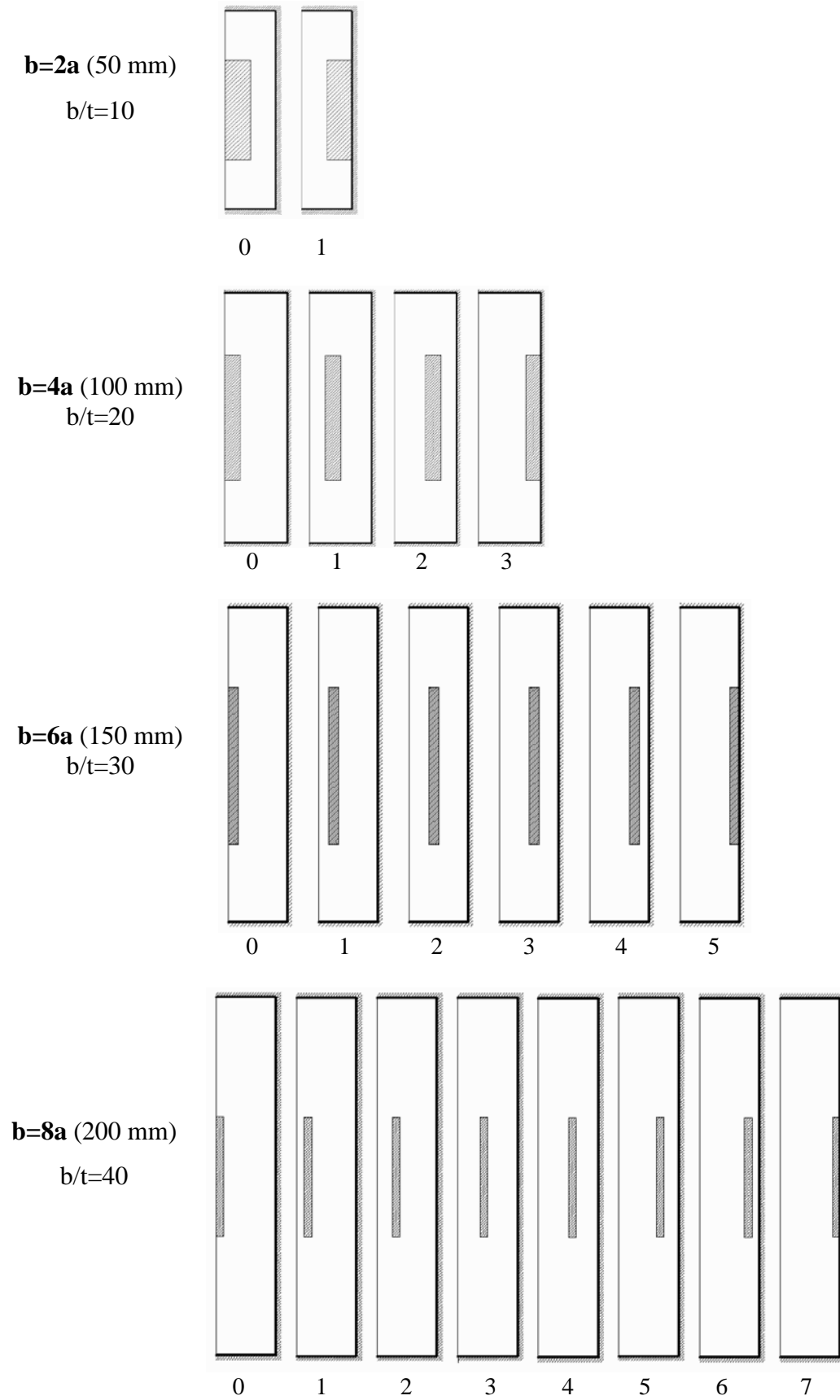
Yapılan çalışmada numunelere kısa isimler tanımlanmıştır. İlk önce b , çelik plaka genişliği ikinci olarak L , çelik plaka yüksekliği üçüncü sırada h , GFRP plaka yüksekliği) ve son olarakta 0,..,7 GFRP yerleşim düzeni numarası yazılmıştır. Bu tanıma göre örnek bir ifade Şekil 6.2’de gösterilmektedir.



Şekil 6.2. Parametrik çalışmadaki numunelerin isimlendirme örneği




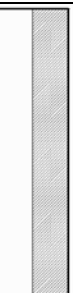














Yerleşim düzeninin yerini ve tüm parametrik değerlerin temelini oluşturan a , GFRP genişliği değeri çalışmada model olarak seçilen S3HTGC3' te kullanıldığı gibi 25 mm olarak seçilmiştir (Şekil 6.3).

Parametrik çalışmada kullanılan numunelerin boyut ve isimlendirilmesi Tablo 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.3. Parametrik çalışmada kullanılan GFRP yerleşim düzeni

Tablo 6.1. Parametrik çalışmadaki numunelerin isimlendirmesi

b	L	h	Yer Dz.	Numune isimleri			
2a=50 mm							
4b=200 mm							
		2b=100 mm	0	b2a_L4b_h2b_0		b2a_L4b_h2b_1	
		4b=200 mm	0	b2a_L4b_h4b_0		b2a_L4b_h4b_1	
		2b=100 mm	0	b2a_L6b_h2b_0		b2a_L6b_h2b_1	
		4b=200 mm	0	b2a_L6b_h4b_0		b2a_L6b_h4b_1	
		6b=300 mm	0	b2a_L6b_h6b_0		b2a_L6b_h6b_1	
		4b=200 mm	1	b2a_L4b_h4b_0		b2a_L4b_h4b_1	
		2b=100 mm	1	b2a_L6b_h2b_0		b2a_L6b_h2b_1	
		4b=200 mm	1	b2a_L6b_h4b_0		b2a_L6b_h4b_1	
		6b=300 mm	1	b2a_L6b_h6b_0		b2a_L6b_h6b_1	

Tablo 6.1' in devamı

b	L	h	Yer Dz.	Numune isimleri	
2a=50 mm					
10b=500 mm					
		2b=100 mm	0		
			1	b2a_L10b_h2b_0	b2a_L10b_h2b_1
		4b=200 mm	0		
			1	b2a_L10b_h4b_0	b2a_L10b_h4b_1
		6b=600 mm	0		
			1	b2a_L10b_h6b_0	b2a_L10b_h6b_1
		8b=800 mm	0		
			1	b2a_L10b_h8b_0	b2a_L10b_h8b_1
		10b=1000 mm	0		
			1	b2a_L10b_h10b_0	b2a_L10b_h10b_1

Tablo 6.1' in devamı

b	L	h	Yer Dz.	Numune isimleri							
4a=100 mm	4b=400 mm	2b=200 mm	0								
			1	b4a_L4b_h2b_0		b4a_L4b_h2b_1		b4a_L4b_h2b_2		b4a_L4b_h2b_3	
			2								
			3								
		4b=400 mm	0								
			1	b4a_L4b_h4b_0		b4a_L4b_h4b_1		b4a_L4b_h4b_2		b4a_L4b_h4b_3	
	6b=1600 mm	2b=200 mm	0								
			1	b4a_L6b_h2b_0		b4a_L6b_h2b_1		b4a_L6b_h2b_2		b4a_L6b_h2b_3	
			2								
			3								
		4b=400 mm	0								
			1	b4a_L6b_h4b_0		b4a_L6b_h4b_1		b4a_L6b_h4b_2		b4a_L6b_h4b_3	
	6b=600 mm	0									
		1	b4a_L6b_h6b_0		b4a_L6b_h6b_1		b4a_L6b_h6b_2		b4a_L6b_h6b_3		
		2									
		3									

Tablo 6.1' in devamı

b				L				h				Yer Dz.															
4a=100 mm												L10b= 1000 mm															
L10b= 1000 mm												6b=600 mm				8b=800 mm				10b=1000 mm							
2b=200 mm												4b=400 mm				6b=600 mm				8b=800 mm				10b=1000 mm			
0												0				0				0				0			
1												1				1				1				1			
2												2				2				2				2			
3												3				3				3				3			
b4a_L10b_h2b_0												b4a_L10b_h4b_0				b4a_L10b_h6b_0				b4a_L10b_h8b_0				b4a_L10b_h10b_0			
b4a_L10b_h2b_1												b4a_L10b_h4b_1				b4a_L10b_h6b_1				b4a_L10b_h8b_1				b4a_L10b_h10b_1			
b4a_L10b_h2b_2												b4a_L10b_h4b_2				b4a_L10b_h6b_2				b4a_L10b_h8b_2				b4a_L10b_h10b_2			
b4a_L10b_h2b_3												b4a_L10b_h4b_3				b4a_L10b_h6b_3				b4a_L10b_h8b_3				b4a_L10b_h10b_3			

Tablo 6.1' in devamı

b	L	h	Y. D.	Numune isimleri																																																																																																																																																																			
				6a=150 mm						6b=900 mm						4b=600 mm						2b=300 mm																																																																																																																																																	
6b=900 mm	6b=900 mm	0	1	2	3	4	5	b6a_L6b_h6b_0		b6a_L6b_h6b_1		b6a_L6b_h6b_2		b6a_L6b_h6b_3		b6a_L6b_h6b_4		b6a_L6b_h6b_5		b6a_L6b_h2b_0		b6a_L6b_h2b_1		b6a_L6b_h2b_2		b6a_L6b_h2b_3		b6a_L6b_h2b_4		b6a_L6b_h2b_5		b6a_L4b_h4b_0		b6a_L4b_h4b_1		b6a_L4b_h4b_2		b6a_L4b_h4b_3		b6a_L4b_h4b_4		b6a_L4b_h4b_5		b6a_L4b_h2b_0		b6a_L4b_h2b_1		b6a_L4b_h2b_2		b6a_L4b_h2b_3		b6a_L4b_h2b_4		b6a_L4b_h2b_5																																																																																																																	
																																																								4b=600 mm	0	1	2	3	4	5	b6a_L6b_h4b_0		b6a_L6b_h4b_1		b6a_L6b_h4b_2		b6a_L6b_h4b_3		b6a_L6b_h4b_4		b6a_L6b_h4b_5		b6a_L4b_h4b_0		b6a_L4b_h4b_1		b6a_L4b_h4b_2		b6a_L4b_h4b_3		b6a_L4b_h4b_4		b6a_L4b_h4b_5																																																																																		
																																																																																							2b=300 mm	0	1	2	3	4	5	b6a_L6b_h2b_0		b6a_L6b_h2b_1		b6a_L6b_h2b_2		b6a_L6b_h2b_3		b6a_L6b_h2b_4		b6a_L6b_h2b_5		b6a_L4b_h2b_0		b6a_L4b_h2b_1		b6a_L4b_h2b_2		b6a_L4b_h2b_3		b6a_L4b_h2b_4		b6a_L4b_h2b_5																																																			
																																																																																																																						4b=600 mm	0	1	2	3	4	5	b6a_L4b_h4b_0		b6a_L4b_h4b_1		b6a_L4b_h4b_2		b6a_L4b_h4b_3		b6a_L4b_h4b_4		b6a_L4b_h4b_5		b6a_L4b_h2b_0		b6a_L4b_h2b_1		b6a_L4b_h2b_2		b6a_L4b_h2b_3		b6a_L4b_h2b_4		b6a_L4b_h2b_5																				
																																																																																																																																																					2b=300 mm	0	1	2	3	4	5	b6a_L4b_h2b_0		b6a_L4b_h2b_1		b6a_L4b_h2b_2		b6a_L4b_h2b_3		b6a_L4b_h2b_4		b6a_L4b_h2b_5	

Tablo 6.1' in devamı

b	L	h	Y. D.	Numune isimleri																								
				6a=150 mm					10b=1500 mm					6a=900 mm					8b=1200 mm					10b=1500 mm				
				2b=300 mm					4b=600 mm					6b=900 mm					8b=1200 mm					10b=1500 mm				
		0		b6a_L10b_h2b_0					b6a_L10b_h4b_0					b6a_L10b_h6b_0					b6a_L10b_h8b_0					b6a_L10b_h10b_0				
		1		b6a_L10b_h2b_1					b6a_L10b_h4b_1					b6a_L10b_h6b_1					b6a_L10b_h8b_1					b6a_L10b_h10b_1				
		2		b6a_L10b_h2b_2					b6a_L10b_h4b_2					b6a_L10b_h6b_2					b6a_L10b_h8b_2					b6a_L10b_h10b_2				
		3		b6a_L10b_h2b_3					b6a_L10b_h4b_3					b6a_L10b_h6b_3					b6a_L10b_h8b_3					b6a_L10b_h10b_3				
		4		b6a_L10b_h2b_4					b6a_L10b_h4b_4					b6a_L10b_h6b_4					b6a_L10b_h8b_4					b6a_L10b_h10b_4				
		5		b6a_L10b_h2b_5					b6a_L10b_h4b_5					b6a_L10b_h26_5					b6a_L10b_h8b_5					b6a_L10b_h10b_5				

Tablo 6.1' in devamı

b	8a=200 mm														Y.D.																		
	6b=1200				2b=400 mm				4b=800 mm				4b=800 mm																				
L	6b=1200 mm		4b=800 mm		2b=400 mm		4b=800 mm		4b=800 mm		4b=800 mm		2b=400 mm		L																		
h	6b=1200 mm		4b=800 mm		2b=400 mm		4b=800 mm		4b=800 mm		4b=800 mm		2b=400 mm		h																		
	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	7	
	b8a_L6b_h6b_0	b8a_L6b_h6b_1	b8a_L6b_h6b_2	b8a_L6b_h6b_3	b8a_L6b_h6b_4	b8a_L6b_h6b_5	b8a_L6b_h6b_6	b8a_L6b_h6b_7	b8a_L6b_h4b_0	b8a_L6b_h4b_1	b8a_L6b_h4b_2	b8a_L6b_h4b_3	b8a_L6b_h4b_4	b8a_L6b_h4b_5	b8a_L6b_h4b_6	b8a_L6b_h4b_7	b8a_L4b_h2b_0	b8a_L4b_h2b_1	b8a_L4b_h2b_2	b8a_L4b_h2b_3	b8a_L4b_h2b_4	b8a_L4b_h2b_5	b8a_L4b_h2b_6	b8a_L4b_h2b_7									

Numune isimleri

Tablo 6.1' in devamı

b		L		h		Y.D.		Numune isimleri	
8a=200 mm									
10b=2000 mm									
0	1	2	3	4	5	6	7	0	1
10b=2000 mm		8b=1600 mm		6b=1200 mm		4b=800 mm		2b=400 mm	
b8a_L10b_h10b_0	b8a_L10b_h10b_1	b8a_L10b_h10b_2	b8a_L10b_h10b_3	b8a_L10b_h10b_4	b8a_L10b_h10b_5	b8a_L10b_h10b_6	b8a_L10b_h10b_7	b8a_L10b_h4b_0	b8a_L10b_h4b_1
b8a_L10b_h10b_0	b8a_L10b_h10b_1	b8a_L10b_h10b_2	b8a_L10b_h10b_3	b8a_L10b_h10b_4	b8a_L10b_h10b_5	b8a_L10b_h10b_6	b8a_L10b_h10b_7	b8a_L10b_h4b_2	b8a_L10b_h4b_3
b8a_L10b_h10b_0	b8a_L10b_h10b_1	b8a_L10b_h10b_2	b8a_L10b_h10b_3	b8a_L10b_h10b_4	b8a_L10b_h10b_5	b8a_L10b_h10b_6	b8a_L10b_h10b_7	b8a_L10b_h4b_4	b8a_L10b_h4b_5
b8a_L10b_h10b_0	b8a_L10b_h10b_1	b8a_L10b_h10b_2	b8a_L10b_h10b_3	b8a_L10b_h10b_4	b8a_L10b_h10b_5	b8a_L10b_h10b_6	b8a_L10b_h10b_7	b8a_L10b_h4b_6	b8a_L10b_h4b_7
b8a_L10b_h10b_0	b8a_L10b_h10b_1	b8a_L10b_h10b_2	b8a_L10b_h10b_3	b8a_L10b_h10b_4	b8a_L10b_h10b_5	b8a_L10b_h10b_6	b8a_L10b_h10b_7	B10a_L6b_h6b_4	B10a_L6b_h6b_5
b8a_L10b_h10b_0	b8a_L10b_h10b_1	b8a_L10b_h10b_2	b8a_L10b_h10b_3	b8a_L10b_h10b_4	b8a_L10b_h10b_5	b8a_L10b_h10b_6	b8a_L10b_h10b_7	b8a_L10b_h6b_6	b8a_L10b_h6b_7
b8a_L10b_h10b_0	b8a_L10b_h10b_1	b8a_L10b_h10b_2	b8a_L10b_h10b_3	b8a_L10b_h10b_4	b8a_L10b_h10b_5	b8a_L10b_h10b_6	b8a_L10b_h10b_7	b8a_L10b_h2b_6	b8a_L10b_h2b_7

6.2. Çelik Kesitleri

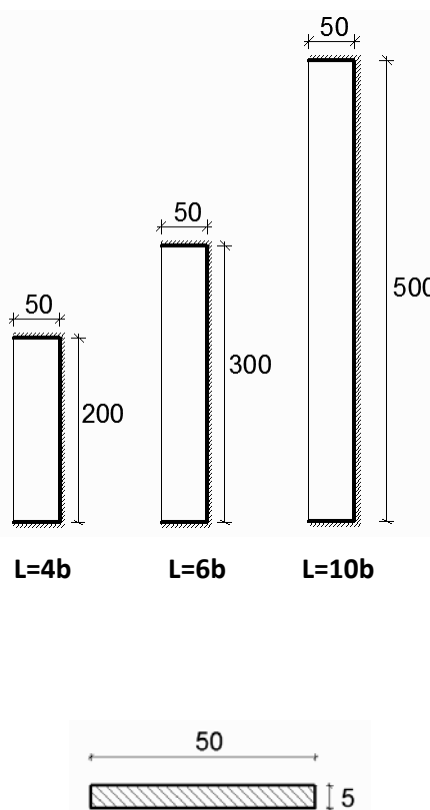
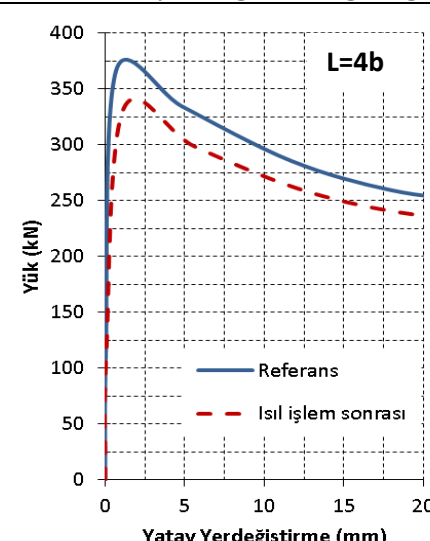
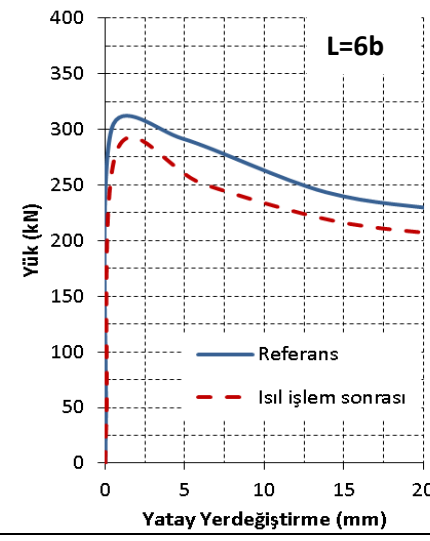
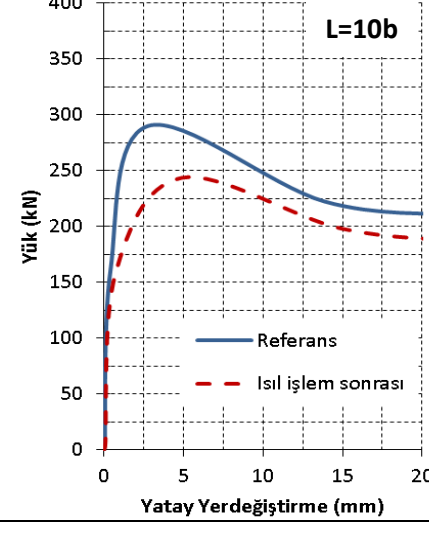
Parametrik çalışmada kullanılan çelik plakalarda $b=2a$, $b=4a$, $b=6a$ ve $b=8a$ olmak üzere dört farklı genişlikte ve oniki farklı uzunlukta çelik plaka seçilmiştir (Tablo 6.2). b/t oranları 10, 20, 30 ve 40, L/b oranları 4, 6 ve 10'dur. Bu plakalar referans ve ısıtılmış işleme uygulanan şekilleriyle eksenel basınç yüküne tabi tutulmuşlardır.

Çelik plakaların kesit ve görünüşleri, elde edilen grafikler ve % değerleri Tablo 6.3'te ($b=2a$, $b=4a$, $b=6a$ ve $b=8a$) herbiri için ayrı ayrı verilmiştir.

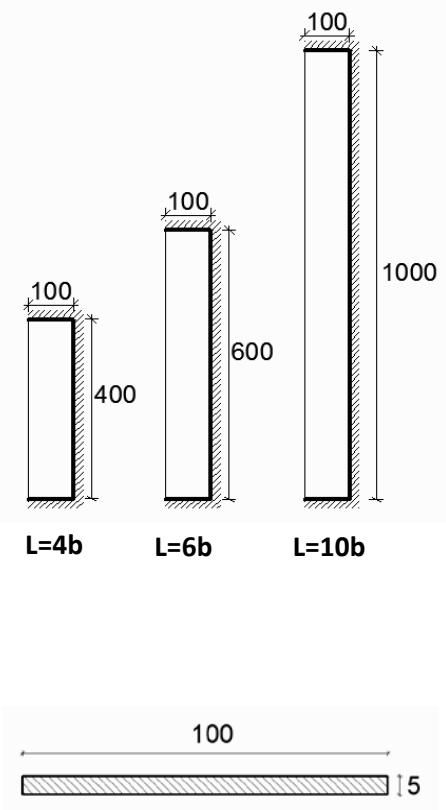
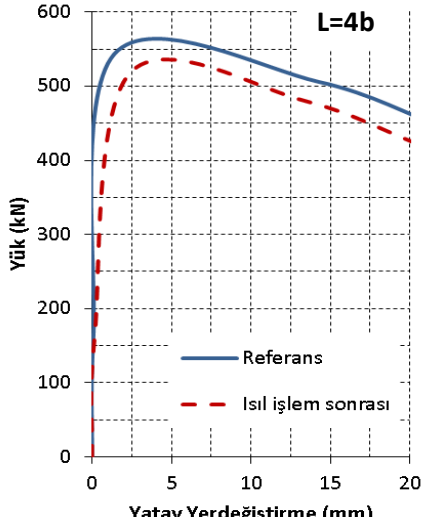
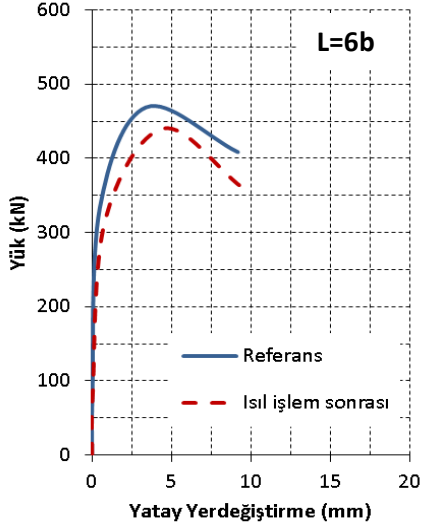
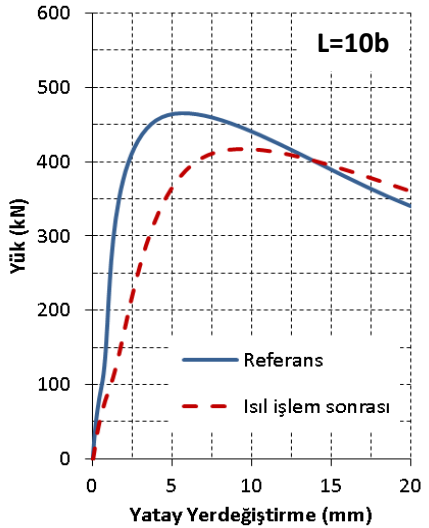
Tablo 6.2. Parametrik çalışmada kullanılan çelik plaka boyutları

	b (genişlik)	t (kalınlık)	b/t	L (yükseklik)	L/b
b2a	50	5	10	200	4
				300	6
				500	10
b4a	100	5	20	400	4
				600	6
				1000	10
b6a	150	5	30	600	4
				900	6
				1500	10
b8a	200	5	40	800	4
				1200	6
				2000	10

Tablo 6.3. Çelik plakalara ait kesit görünüş ve grafikler,

	Çelik plaka kesit ve görünüş	Yük-yatay yer değiştirme grafiği	% azalma
b2a	 <p>50 200 50 300 50 500 50 5</p> <p>L=4b L=6b L=10b</p>	 <p>L=4b</p> <p>Yük (kN)</p> <p>Yatay Yerdeğiştirme (mm)</p> <p>Referans Isıl işlem sonrası</p>	-9.65
	 <p>L=6b</p> <p>Yük (kN)</p> <p>Yatay Yerdeğiştirme (mm)</p> <p>Referans Isıl işlem sonrası</p>	-6.30	
	 <p>L=10b</p> <p>Yük (kN)</p> <p>Yatay Yerdeğiştirme (mm)</p> <p>Referans Isıl işlem sonrası</p>	-16.00	

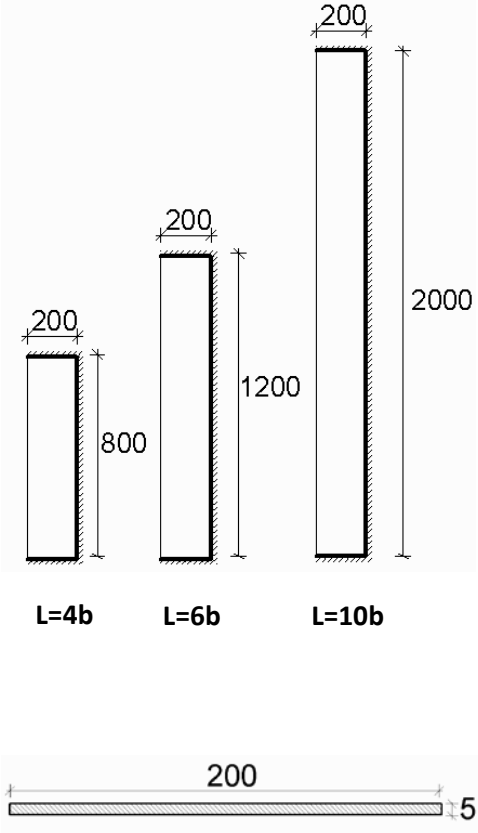
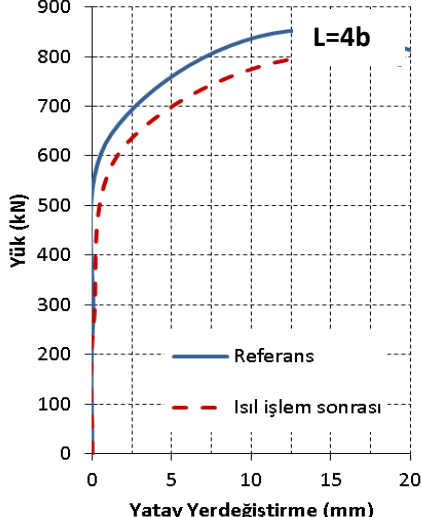
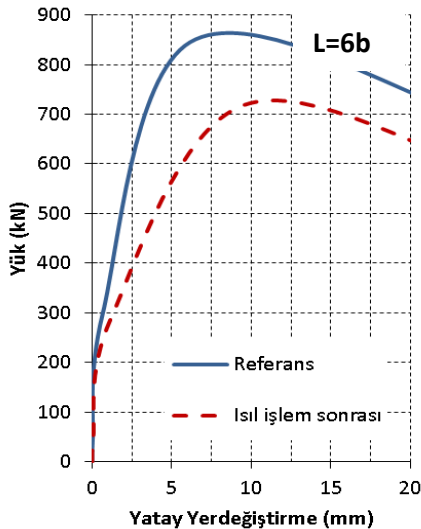
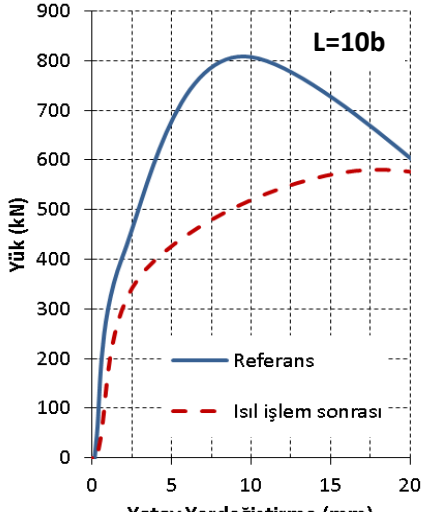
Tablo 6.3' ün devamı

	Çelik plaka kesit ve görünüş	Yük-yatay yer değiştirme grafiği	% azalma
b4a	 <p>Diagram showing three vertical steel plate cross-sections with lengths $L=4b$, $L=6b$, and $L=10b$, and a horizontal plate with length 100 and thickness 5. The vertical plates have widths of 100 mm and heights of 400 mm, 600 mm, and 1000 mm respectively.</p>	 <p>Graph for $L=4b$ showing load (kN) vs. horizontal displacement (mm). The solid blue line (Referans) peaks at approximately 550 kN at 5 mm displacement. The dashed red line (Isıl işlem sonrası) peaks at approximately 530 kN at 5 mm displacement.</p>	-4.82
		 <p>Graph for $L=6b$ showing load (kN) vs. horizontal displacement (mm). The solid blue line (Referans) peaks at approximately 470 kN at 5 mm displacement. The dashed red line (Isıl işlem sonrası) peaks at approximately 440 kN at 5 mm displacement.</p>	-6.11
		 <p>Graph for $L=10b$ showing load (kN) vs. horizontal displacement (mm). The solid blue line (Referans) peaks at approximately 460 kN at 5 mm displacement. The dashed red line (Isıl işlem sonrası) peaks at approximately 410 kN at 5 mm displacement.</p>	-11.08

Tablo 6.3' ün devamı

	Çelik plaka kesit ve görünüş	Yük-yatay yer değiştirme grafiği	% azalma
b6a	<p>150 600 L=4b 150 900 L=6b 150 1500 L=10b 150 5</p>	<p>L=4b Yük (kN) 900 800 700 600 500 400 300 200 100 0 0 5 10 15 20 Yatay Yerdeğiştirme (mm) Referans Isıl işlem sonrası</p>	-4.55
		<p>L=6b Yük (kN) 900 800 700 600 500 400 300 200 100 0 0 5 10 15 20 Yatay Yerdeğiştirme (mm) Referans Isıl işlem sonrası</p>	-13.66
		<p>L=10b Yük (kN) 900 800 700 600 500 400 300 200 100 0 0 5 10 15 20 Yatay Yerdeğiştirme (mm) Referans Isıl işlem sonrası</p>	-7.87

Tablo 6.3' ün devamı

	Çelik plaka kesit ve görünüş	Yük-yatay yer değiştirme grafiği	% azalma
b8a	 <p>Technical drawing showing three steel plate cross-sections with lengths $L=4b$, $L=6b$, and $L=10b$. The width of each plate is 200 mm. The height of the $L=4b$ section is 800 mm, $L=6b$ is 1200 mm, and $L=10b$ is 2000 mm. A detail of the plate thickness is shown as 5 mm.</p>	 <p>Load-lateral displacement graph for $L=4b$. The y-axis is Load (kN) from 0 to 900. The x-axis is Lateral Displacement (mm) from 0 to 20. A solid blue line represents the reference (Referans) and a dashed red line represents the state after heat treatment (Isıl işlem sonrası). The reference curve reaches a peak load of approximately 850 kN at 15 mm displacement. The heat-treated curve reaches a peak load of approximately 800 kN at 15 mm displacement.</p>	-7.71
	 <p>Load-lateral displacement graph for $L=6b$. The y-axis is Load (kN) from 0 to 900. The x-axis is Lateral Displacement (mm) from 0 to 20. A solid blue line represents the reference (Referans) and a dashed red line represents the state after heat treatment (Isıl işlem sonrası). The reference curve reaches a peak load of approximately 850 kN at 10 mm displacement. The heat-treated curve reaches a peak load of approximately 720 kN at 15 mm displacement.</p>	-14.97	
	 <p>Load-lateral displacement graph for $L=10b$. The y-axis is Load (kN) from 0 to 900. The x-axis is Lateral Displacement (mm) from 0 to 20. A solid blue line represents the reference (Referans) and a dashed red line represents the state after heat treatment (Isıl işlem sonrası). The reference curve reaches a peak load of approximately 800 kN at 10 mm displacement. The heat-treated curve reaches a peak load of approximately 580 kN at 20 mm displacement.</p>	-24.03	

6.3. Parametrik Çalışma Sonuçları

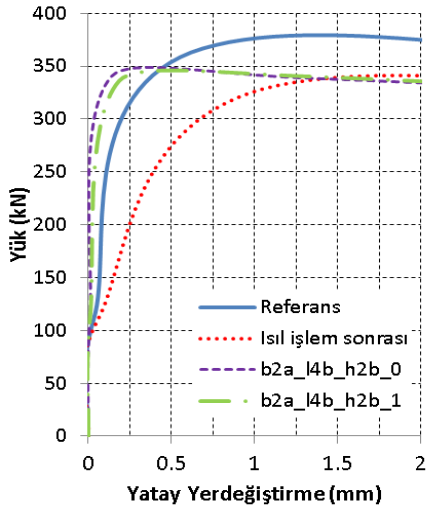
Oluşturulan dört farklı genişlik için yapılan parametrik çalışmalar boyutlar, maksimum yük kapasiteleri % artışlar ve grafikleri ayrı ayrı verilmiştir.

6.3.1. b2a çelik plakaları

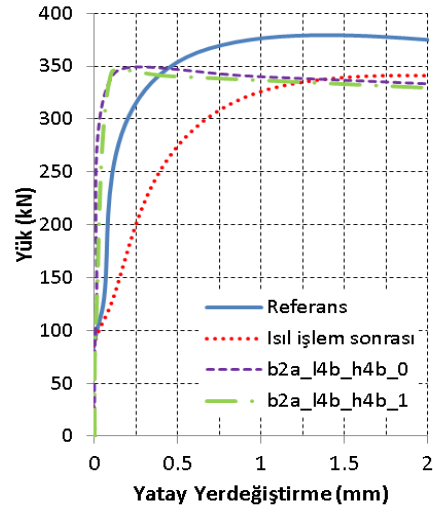
b2a genişliğine sahip çelik plakalara ait yük taşıma kapasiteleri % artış değerleri Tablo 6.4'te ve grafikler ise Şekil 6.4'te gösterilmiştir.

Tablo 6.4. b2a çelik plakalarının yük taşıma kapasiteleri ve % artış değerleri

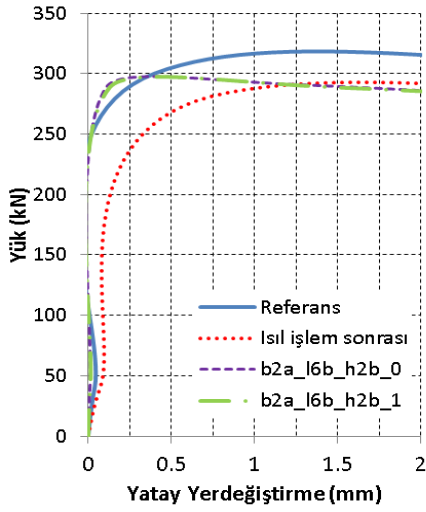
b(mm)	L(mm)	h(mm)	Yerleşim Düzeni	İsim	Burkulma Yüğü (kN)	Isıl İşlem Sonrası (kN)	% Artış		
2a=50	4b=200	2b=100	0	b2a_L4b_h2b_0	340.58	331.42	2.76		
			1	b2a_L4b_h2b_1	340.42		2.72		
		4b=200	0	b2a_L4b_h4b_0	342.74		3.42		
			1	b2a_L4b_h4b_1	343.95		3.78		
	6b=300	2b=100	0	b2a_L6b_h2b_0	290.83	281.4	3.35		
			1	b2a_L6b_h2b_1	288.76		2.62		
		4b=200	0	b2a_L6b_h4b_0	296.81		5.48		
			1	b2a_L6b_h4b_1	293.24		4.21		
		6b=300	0	b2a_L6b_h6b_0	309.91		10.13		
			1	b2a_L6b_h6b_1	310.01		10.16		
		10b=500	2b=100	0	b2a_L10b_h2b_0		269.42	243.54	10.63
				1	b2a_L10b_h2b_1		269.38		10.61
	4b=200		0	b2a_L10b_h4b_0	269.8	10.78			
			1	b2a_L10b_h4b_1	269.54	10.68			
	6b=300		0	b2a_L10b_h6b_0	270.33	11.00			
			1	b2a_L10b_h6b_1	270.67	11.14			
	8b=400		0	b2a_L10b_h8b_0	270.99	11.27			
			1	b2a_L10b_h8b_1	269.8	10.78			
	10b=500		0	b2a_L10b_h10b_0	270.55	11.09			
			1	b2a_L10b_h10b_1	271.69	11.56			



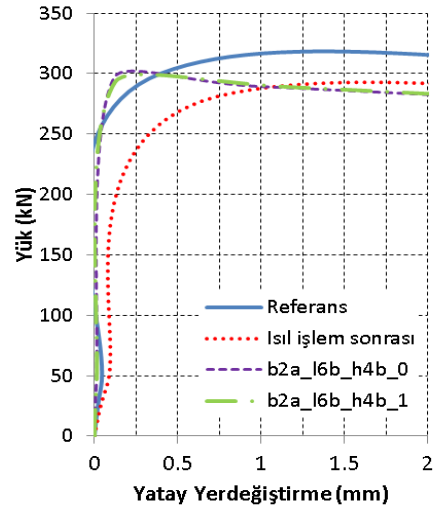
b2a_L4b_h2b_(0, 1)



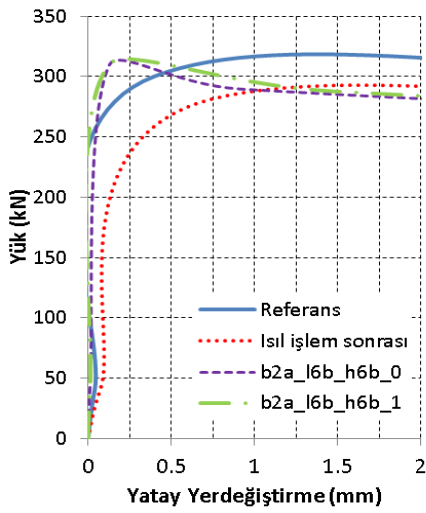
b2a_L4b_h4b_(0, 1)



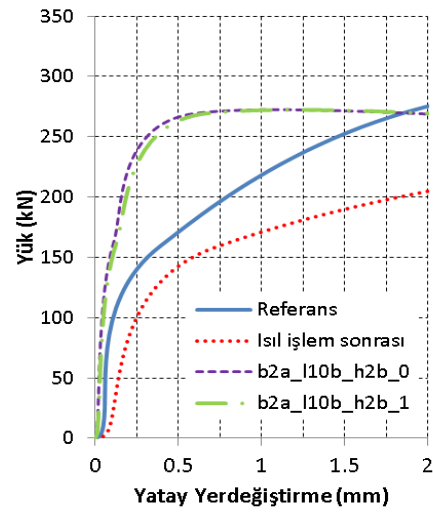
b2a_L6b_h2b_(0, 1)



b2a_L6b_h4b_(0, 1)

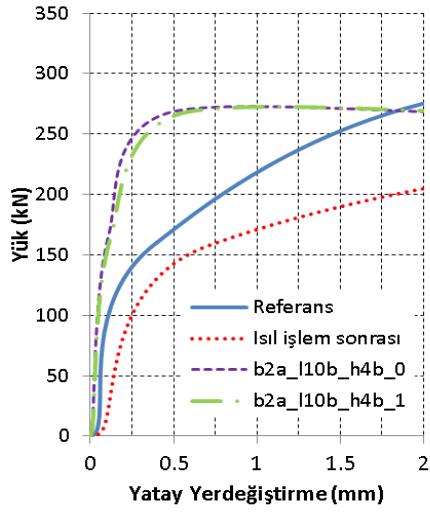


b2a_L6b_h6b_(0, 1)

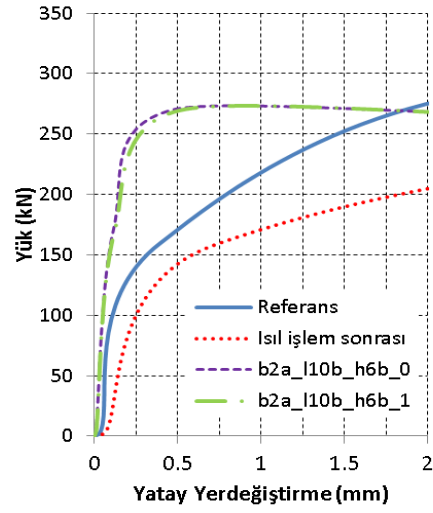


b2a_L10b_h2b_(0, 1)

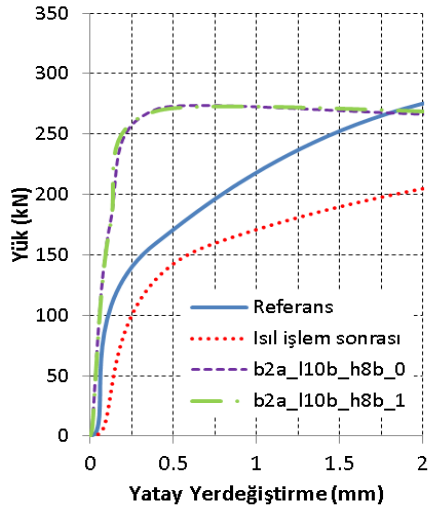
Şekil 6.4. b2a genişliğine sahip çelik plakaların parametrik çalışma grafikleri



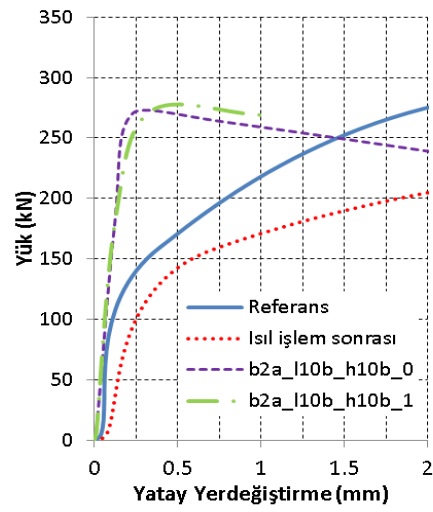
b2a_L10b_h4b_(0, 1)



b2a_L10b_h6b_(0, 1)



b2a_L10b_h8b_(0, 1)



b2a_L10b_h10b_(0, 1)

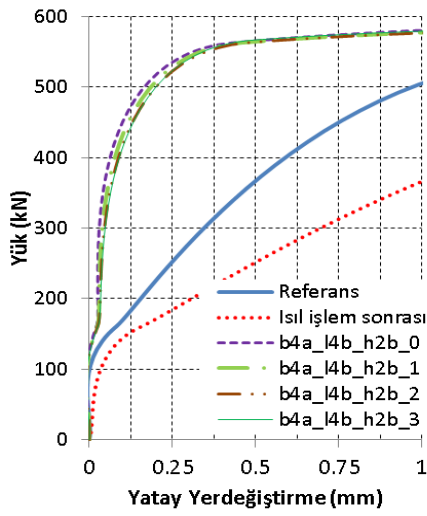
Şekil 6.4'ün devamı

6.3.2. b4a çelik plakaları

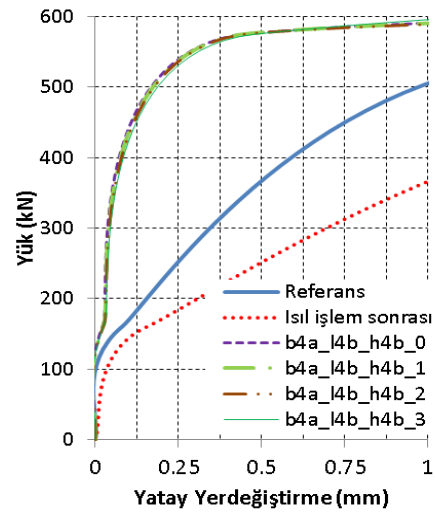
b4a genişliğine sahip çelik plakalara ait yük taşıma kapasiteleri % artış değerleri Tablo 6.5'te ve grafikler ise Şekil 6.5'te gösterilmiştir.

Tablo 6.5. b4a çelik plakalarının yük taşıma kapasiteleri ve % artış değerleri

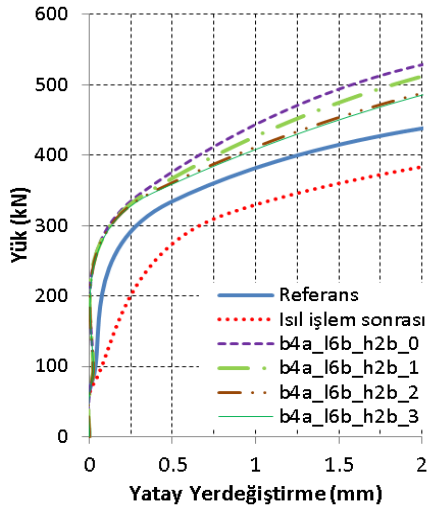
b(mm)	L(mm)	h(mm)	Yerleşim Düzeni	İsim	Burkulma Yüğü (kN)	Isıl İşlem Sonrası (kN)	% Artış
4a=100	4b=400	2b=200	0	b4a_L4b_h2b_0	562.63	517.07	8.81
			1	b4a_L4b_h2b_1	562.59		8.80
			2	b4a_L4b_h2b_2	562.75		8.83
			3	b4a_L4b_h2b_3	566.07		9.48
		4b=400	0	b4a_L4b_h4b_0	575.67		11.33
			1	b4a_L4b_h4b_1	576.27		11.45
			2	b4a_L4b_h4b_2	576.27		11.45
			3	b4a_L4b_h4b_3	631.9		22.21
	6b=600	2b=200	0	b4a_L6b_h2b_0	554.15	440.17	25.89
			1	b4a_L6b_h2b_1	562.91		27.88
			2	b4a_L6b_h2b_2	557.46		26.65
			3	b4a_L6b_h2b_3	570.33		29.57
		4b=400	0	b4a_L6b_h4b_0	582.41		32.31
			1	b4a_L6b_h4b_1	576.25		30.92
			2	b4a_L6b_h4b_2	585.15		32.94
			3	b4a_L6b_h4b_3	590.00		34.04
		6b=600	0	b4a_L6b_h6b_0	576.28		30.92
			1	b4a_L6b_h6b_1	587.49		33.47
			2	b4a_L6b_h6b_2	543.78		23.54
			3	b4a_L6b_h6b_3	631.08		43.37
	10b=1000	2b=200	0	b4a_L10b_h2b_0	482.14	408.99	17.89
			1	b4a_L10b_h2b_1	482.74		18.03
			2	b4a_L10b_h2b_2	482.74		18.03
			3	b4a_L10b_h2b_3	482.33		17.93
4b=400		0	b4a_L10b_h4b_0	486.74	19.01		
		1	b4a_L10b_h4b_1	488.25	19.38		
		2	b4a_L10b_h4b_2	487.81	19.27		
		3	b4a_L10b_h4b_3	488.41	19.42		
6b=600		0	b4a_L10b_h6b_0	489.07	19.58		
		1	b4a_L10b_h6b_1	491.88	20.27		
		2	b4a_L10b_h6b_2	490.22	19.86		
		3	b4a_L10b_h6b_3	492.87	20.51		
8b=800		0	b4a_L10b_h8b_0	493.76	20.73		
		1	b4a_L10b_h8b_1	498.48	21.88		
		2	b4a_L10b_h8b_2	495.57	21.17		
		3	b4a_L10b_h8b_3	500.36	22.34		
10b=1000		0	b4a_L10b_h10b_0	507.52	24.09		
		1	b4a_L10b_h10b_1	509.11	24.48		
		2	b4a_L10b_h10b_2	509.22	24.51		
		3	b4a_L10b_h10b_3	509.23	24.51		



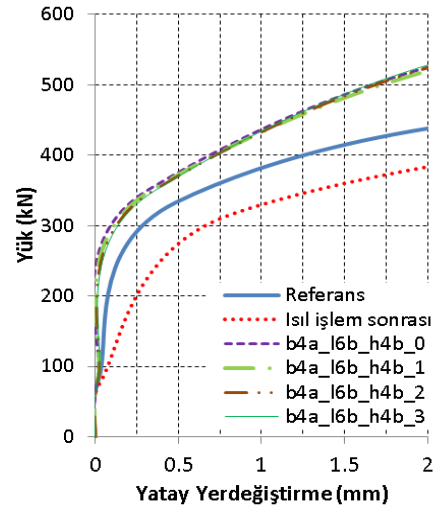
b4a_L4b_h2b_(0, 1, 2, 3)



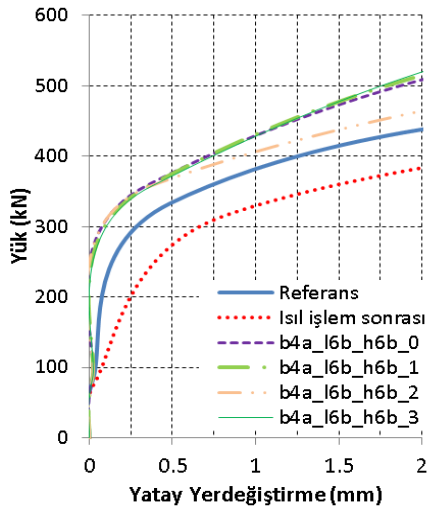
b4a_L4b_h4b_(0, 1, 2, 3)



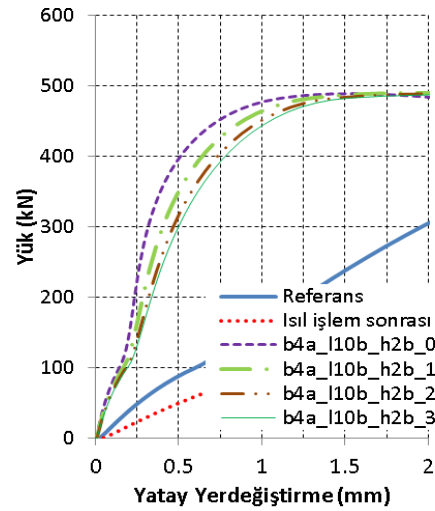
b4a_L6b_h2b_(0, 1, 2, 3)



b4a_L6b_h4b_(0, 1, 2, 3)

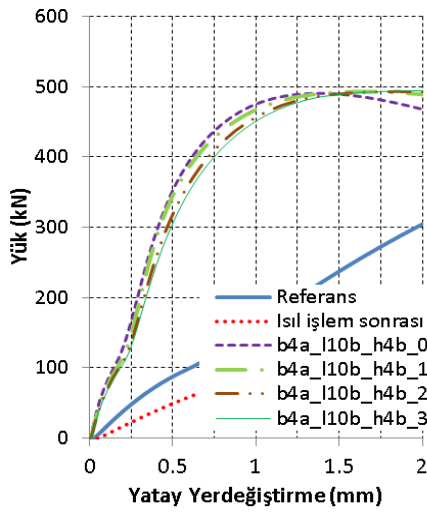


b4a_L6b_h6b_(0, 1, 2, 3)

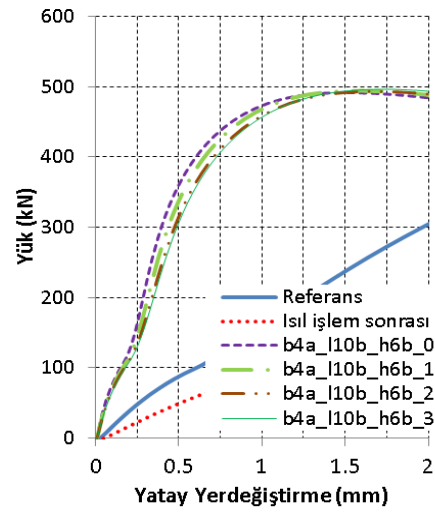


b4a_L10b_h2b_(0, 1, 2, 3)

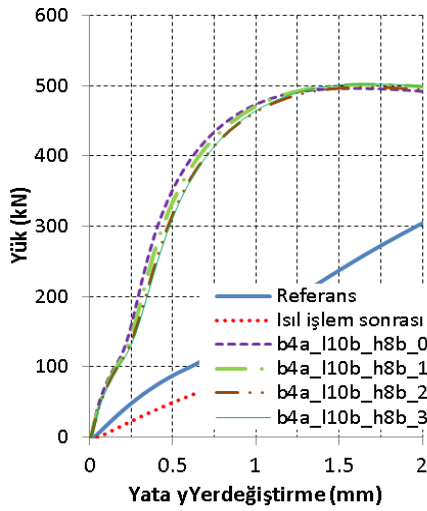
Şekil 6.5. b4a genişliğine sahip çelik plakaların parametrik çalışma grafikleri



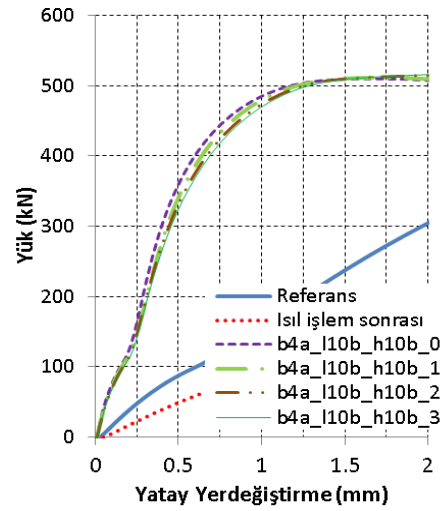
b4a_L10b_h4b_(0, 1, 2, 3)



b4a_L10b_h6b_(0, 1, 2, 3)



b4a_L10b_h8b_(0, 1, 2, 3)



b4a_L10b_h10b_(0, 1, 2, 3)

Şekil 6.5'in devamı

6.3.3. b6a çelik plakaları

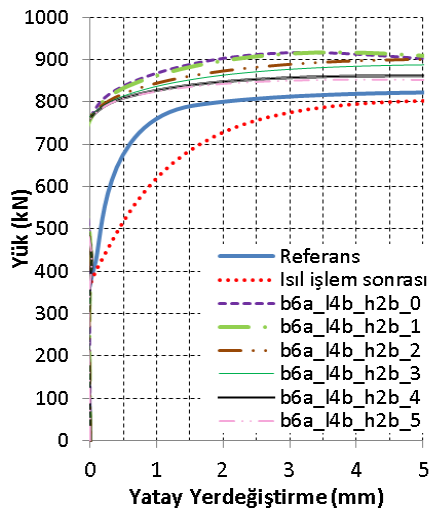
b6a genişliğine sahip çelik plakalara ait yük taşıma kapasiteleri % artış değerleri Tablo 6.6'da ve grafikler ise Şekil 6.6' da gösterilmiştir.

Tablo 6.6. b6a çelik plakalarının yük taşıma kapasiteleri ve % artış değerleri

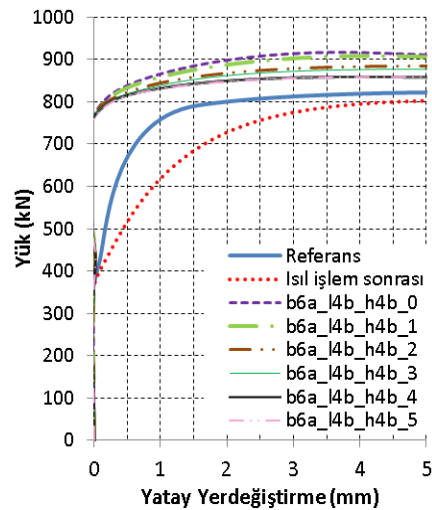
b(mm)	L(mm)	h(mm)	Yerleşim Düzeni	İsim	Burkulma Yüğü (kN)	Isıl İşlem Sonrası (kN)	% Artış
6a=150	4b=600	2b=300	0	b6a_L4b_h2b_0	916.25	792.398	15.63
			1	b6a_L4b_h2b_1	916.38		15.65
			2	b6a_L4b_h2b_2	899.08		13.46
			3	b6a_L4b_h2b_3	885.77		11.78
			4	b6a_L4b_h2b_4	849.93		7.26
		5	b6a_L4b_h2b_5	834.46	5.31		
		4b=600	0	b6a_L4b_h4b_0	916.93		15.21
			1	b6a_L4b_h4b_1	908.02		14.59
			2	b6a_L4b_h4b_2	881.80		11.28
			3	b6a_L4b_h4b_3	870.88		9.90
	4		b6a_L4b_h4b_4	842.98	6.38		
	5	b6a_L4b_h4b_5	844.70	6.60			
	6b=900	2b=300	0	b6a_L6b_h2b_0	860.65	597.53	44.04
			1	b6a_L6b_h2b_1	858.22		43.63
			2	b6a_L6b_h2b_2	854.52		43.01
			3	b6a_L6b_h2b_3	850.57		42.35
			4	b6a_L6b_h2b_4	845.54		41.51
		5	b6a_L6b_h2b_5	842.89	41.06		
		4b=600	0	b6a_L6b_h4b_0	869.58		45.53
			1	b6a_L6b_h4b_1	867.78		45.23
2			b6a_L6b_h4b_2	865.09	44.78		
3			b6a_L6b_h4b_3	862.47	44.34		
4			b6a_L6b_h4b_4	858.36	43.65		
5		b6a_L6b_h4b_5	856.00	43.26			
6b=900		0	b6a_L6b_h6b_0	881.22	47.48		
		1	b6a_L6b_h6b_1	876.73	46.73		
		2	b6a_L6b_h6b_2	870.59	45.70		
	3	b6a_L6b_h6b_3	878.95	47.10			
	4	b6a_L6b_h6b_4	876.69	46.72			
5	b6a_L6b_h6b_5	874.85	46.41				
10b=1500	2b=300	0	b6a_L10b_h2b_0	582.49	442.398	31.67	
		1	b6a_L10b_h2b_1	561.28		26.87	
		2	b6a_L10b_h2b_2	561.21		26.86	
		3	b6a_L10b_h2b_3	560.74		26.75	
		4	b6a_L10b_h2b_4	576.41		30.29	
	5	b6a_L10b_h2b_5	544.54	23.09			
	4b=600	0	b6a_L10b_h4b_0	566.03		27.95	
		1	b6a_L10b_h4b_1	565.09		27.73	
		2	b6a_L10b_h4b_2	565.54		27.84	

Tablo 6.6' nin devamı

6a=150	10b=1500	4b=600	3	b6a_L10b_h4b_3	549.25	24.15
			4	b6a_L10b_h4b_4	565.04	27.72
			5	b6a_L10b_h4b_5	565.46	27.82
		6b=900	0	b6a_L10b_h6b_0	592.63	33.96
			1	b6a_L10b_h6b_1	575.33	30.05
			2	b6a_L10b_h6b_2	569.48	28.72
			3	b6a_L10b_h6b_3	570.18	28.88
			4	b6a_L10b_h6b_4	567.65	28.31
			5	b6a_L10b_h6b_5	569.34	28.69
	8b=1200	0	b6a_L10b_h8b_0	763.74	72.64	
		1	b6a_L10b_h8b_1	698.27	57.84	
		2	b6a_L10b_h8b_2	709.69	60.42	
		3	b6a_L10b_h8b_3	693.86	56.84	
		4	b6a_L10b_h8b_4	678.92	53.46	
		5	b6a_L10b_h8b_5	595.38	34.58	
	10b=1500	0	b6a_L10b_h10b_0	749.93	69.51	
		1	b6a_L10b_h10b_1	665.88	50.51	
		2	b6a_L10b_h10b_2	702.98	58.90	
		3	b6a_L10b_h10b_3	723.92	63.63	
		4	b6a_L10b_h10b_4	730.51	65.12	
		5	b6a_L10b_h10b_5	709.31	60.33	

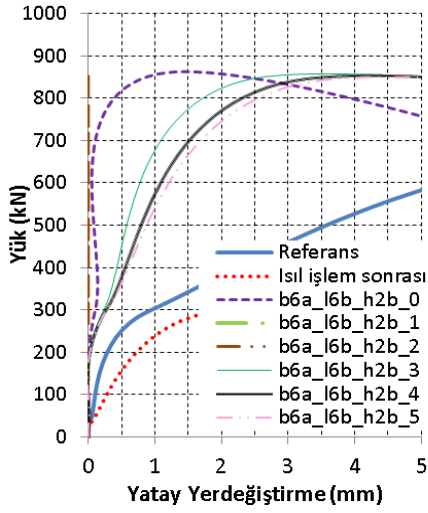


b6a_L4b_h2b_(0, 1, 2, 3, 4, 5)

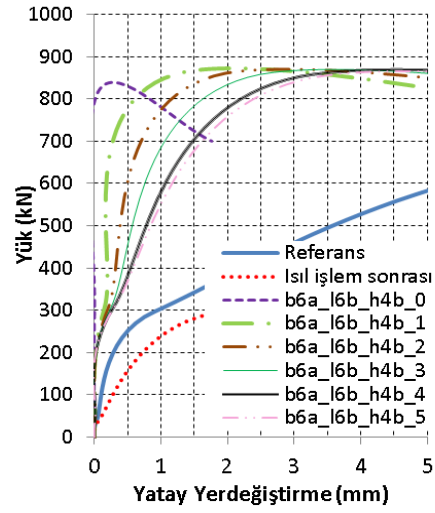


b6a_L4b_h4b_(0, 1, 2, 3, 4, 5)

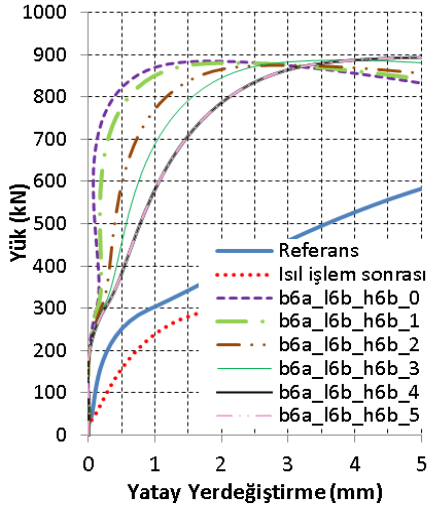
Şekil 6.6. b6a genişliğine sahip çelik plakaların parametrik çalışma grafikleri



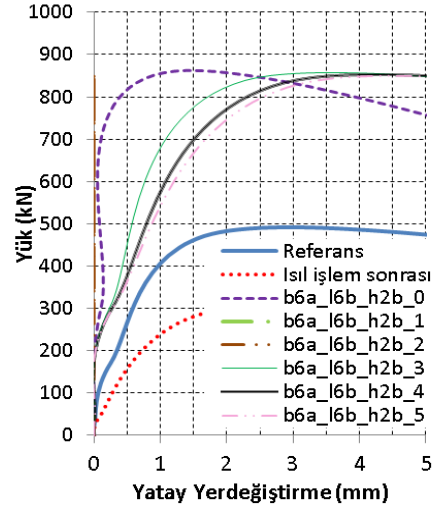
b6a_L6b_h2b_(0, 1, 2, 3, 4, 5)



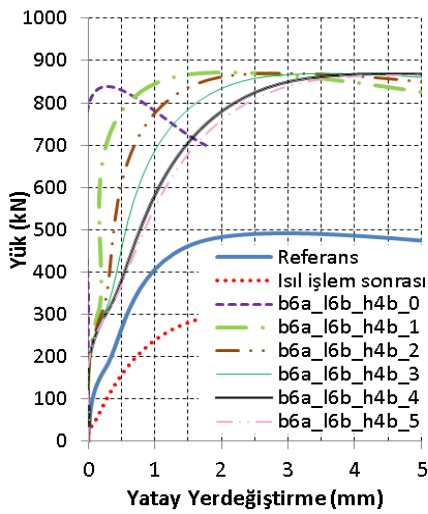
b6a_L6b_h4b_(0, 1, 2, 3, 4, 5)



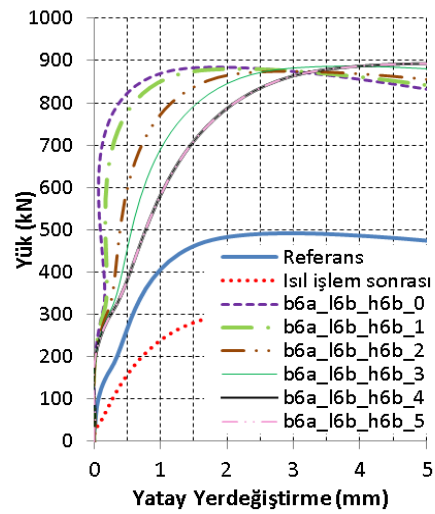
b6a_L6b_h6b_(0, 1, 2, 3, 4, 5)



b6a_L10b_h2b_(0, 1, 2, 3, 4, 5)

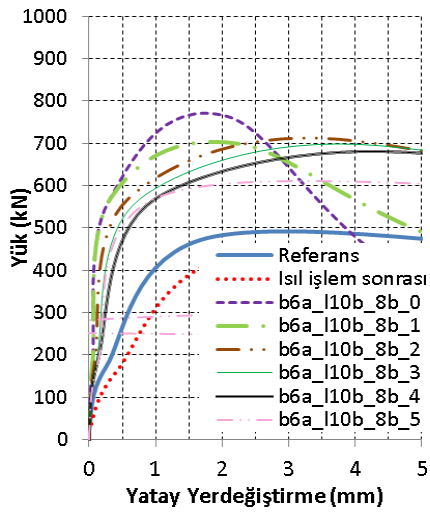


b6a_L10b_h4b_(0, 1, 2, 3, 4, 5)

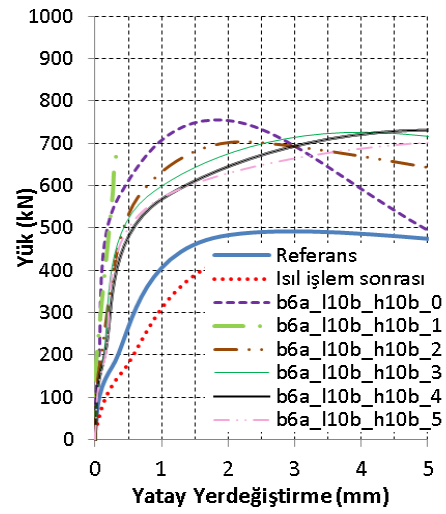


b6a_L10b_h6b_(0, 1, 2, 3, 4, 5)

Şekil 6.6'nın devamı



b6a_L10b_h8b_(0, 1, 2, 3, 4, 5)



b6a_L10b_h10b_(0, 1, 2, 3, 4, 5)

Şekil 6.6'nın devamı

6.3.4. b8a çelik plakaları

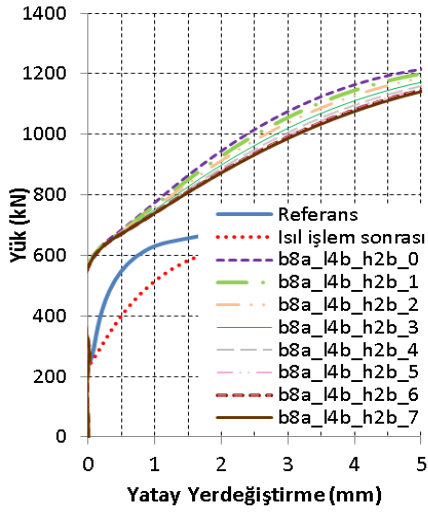
b8a genişliğine sahip çelik plakalara ait yük taşıma kapasiteleri % artış değerleri Tablo 6.7'de ve grafikler ise Şekil 6.7' de gösterilmiştir.

Tablo 6.7. b8a çelik plakalarının yük taşıma kapasiteleri ve % artış değerleri

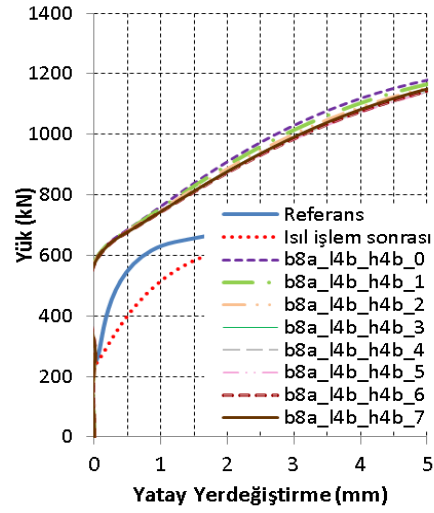
b(mm)	L(mm)	h(mm)	Yerleşim Düzeni	İsim	Burkulma Yüğü (kN)	Isıl Sonrası (kN)	% Artış
8a=200	4b=800	2b=400	0	b8a_L4b_h2b_0	1235.10	803.4	53.73
			1	b8a_L4b_h2b_1	1227.72		52.82
			2	b8a_L4b_h2b_2	1221.56		52.05
			3	b8a_L4b_h2b_3	1215.42		51.28
			4	b8a_L4b_h2b_4	1210.65		50.69
			5	b8a_L4b_h2b_5	1208.51		50.42
			6	b8a_L4b_h2b_6	1208.42		50.41
		7	b8a_L4b_h2b_7	1206.91	50.23		
		4b=800	0	b8a_L4b_h4b_0	1225.33		52.52
			1	b8a_L4b_h4b_1	1221.28		52.01
			2	b8a_L4b_h4b_2	1217.75		51.57
			3	b8a_L4b_h4b_3	1216.05		51.36
			4	b8a_L4b_h4b_4	1215.29		51.27
			5	b8a_L4b_h4b_5	1215.62		51.31
	6		b8a_L4b_h4b_6	1216.57	51.43		
	6b=1200	2b=400	0	b8a_L6b_h2b_0	937.35	718.95	30.38
			1	b8a_L6b_h2b_1	936.76		30.30
			2	b8a_L6b_h2b_2	936.08		30.20
			3	b8a_L6b_h2b_3	935.44		30.11
			4	b8a_L6b_h2b_4	934.78		30.02
			5	b8a_L6b_h2b_5	934.30		29.95
			6	b8a_L6b_h2b_6	933.90		29.90
		7	b8a_L6b_h2b_7	933.68	29.87		
		4b=800	0	b8a_L6b_h4b_0	943.77		31.27
			1	b8a_L6b_h4b_1	943.63		31.25
			2	b8a_L6b_h4b_2	943.53		31.24
			3	b8a_L6b_h4b_3	943.44		31.22
			4	b8a_L6b_h4b_4	943.36		31.21
5			b8a_L6b_h4b_5	943.27	31.20		
6	b8a_L6b_h4b_6		943.19	31.19			
7	b8a_L6b_h4b_7	943.07	31.17				
6b=1200	0	b8a_L6b_h6b_0	952.59	32.50			
	1	b8a_L6b_h6b_1	952.42	32.47			
	2	b8a_L6b_h6b_2	952.39	32.47			
	3	b8a_L6b_h6b_3	952.35	32.46			
	4	b8a_L6b_h6b_4	952.10	32.43			
	5	b8a_L6b_h6b_5	951.98	32.41			
	6	b8a_L6b_h6b_6	951.83	32.39			
7	b8a_L6b_h6b_7	951.47	32.34				

Tablo 6.7' nin devamı

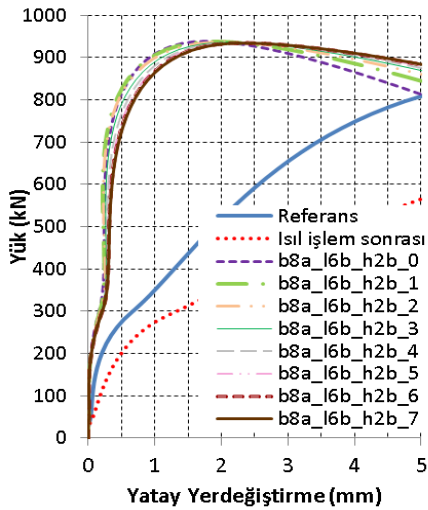
	10b=2000	2b=400	0	b8a_L10b_h2b_0	961.98	578.36	66.33
			1	b8a_L10b_h2b_1	931.93		61.13
			2	b8a_L10b_h2b_2	946.31		63.62
			3	b8a_L10b_h2b_3	955.31		65.18
			4	b8a_L10b_h2b_4	959.79		65.95
			5	b8a_L10b_h2b_5	961.87		66.31
			6	b8a_L10b_h2b_6	962.35		66.39
			7	b8a_L10b_h2b_7	908.27		57.04
		4b=800	0	b8a_L10b_h4b_0	930.00		60.80
			1	b8a_L10b_h4b_1	914.24		58.07
			2	b8a_L10b_h4b_2	928.74		60.58
			3	b8a_L10b_h4b_3	940.28		62.58
			4	b8a_L10b_h4b_4	948.64		64.02
			5	b8a_L10b_h4b_5	954.28		65.00
			6	b8a_L10b_h4b_6	957.39		65.54
			7	b8a_L10b_h4b_7	897.59		55.20
		6b=1200	0	b8a_L10b_h6b_0	988.93		70.99
			1	b8a_L10b_h6b_1	985.64		70.42
			2	b8a_L10b_h6b_2	981.33		69.67
			3	b8a_L10b_h6b_3	976.05		68.76
			4	b8a_L10b_h6b_4	971.97		68.06
			5	b8a_L10b_h6b_5	968.29		67.42
			6	b8a_L10b_h6b_6	965.53		66.94
			7	b8a_L10b_h6b_7	963.95		66.67
		8b=1600	0	b8a_L10b_h8b_0	989.35		71.06
			1	b8a_L10b_h8b_1	988.92		70.99
			2	b8a_L10b_h8b_2	987.25		70.70
			3	b8a_L10b_h8b_3	986.04		70.49
4	b8a_L10b_h8b_4		985.39	70.38			
5	b8a_L10b_h8b_5		984.28	70.18			
6	b8a_L10b_h8b_6		982.02	69.79			
7	b8a_L10b_h8b_7		979.52	69.36			
10b=2000	0	b8a_L10b_h10b_0	1002.17	73.28			
	1	b8a_L10b_h10b_1	998.70	72.68			
	2	b8a_L10b_h10b_2	1001.14	73.10			
	3	b8a_L10b_h10b_3	1000.92	73.06			
	4	b8a_L10b_h10b_4	1001.24	73.12			
	5	b8a_L10b_h10b_5	1001.50	73.16			
	6	b8a_L10b_h10b_6	1001.82	73.22			
	7	b8a_L10b_h10b_7	997.13	72.41			



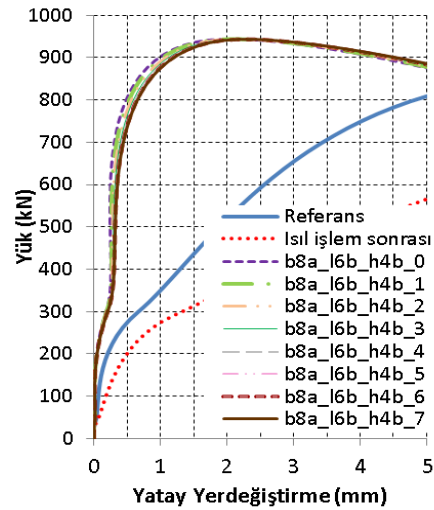
b8a_L4b_h2b_(0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)



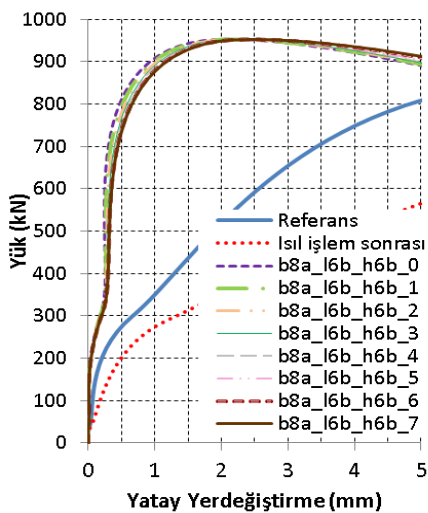
b8a_L4b_h4b_(0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)



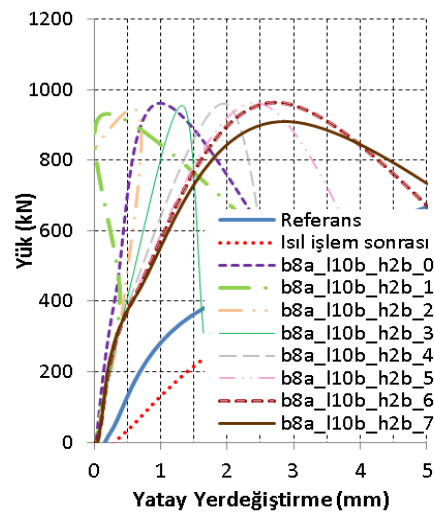
b8a_L6b_h2b_(0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)



b8a_L6b_h4b_(0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)

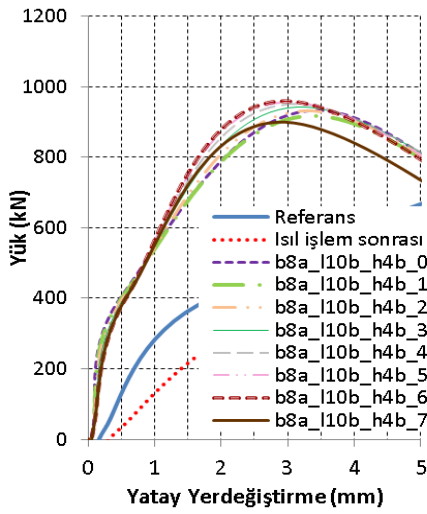


b8a_L6b_h6b_(0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)

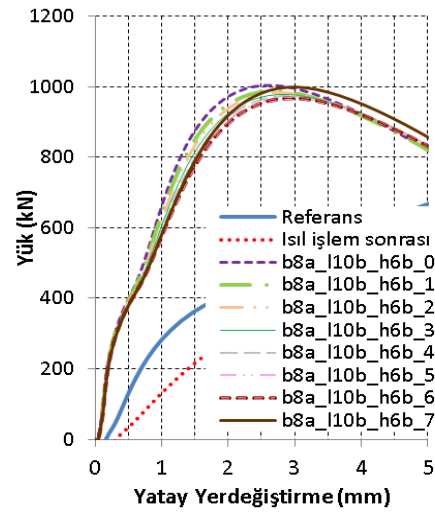


b8a_L10b_h2b_(0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)

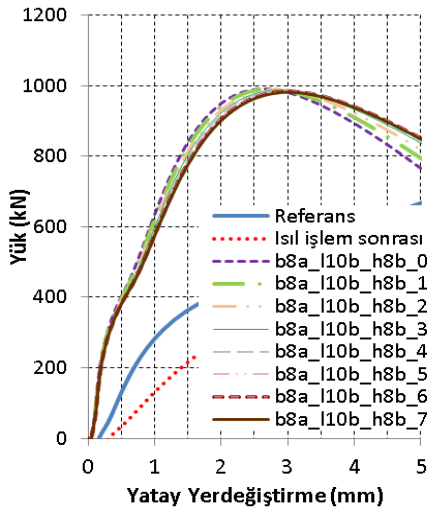
Şekil 6.7. b8a genişliğine sahip çelik plakaların parametrik çalışma grafikleri



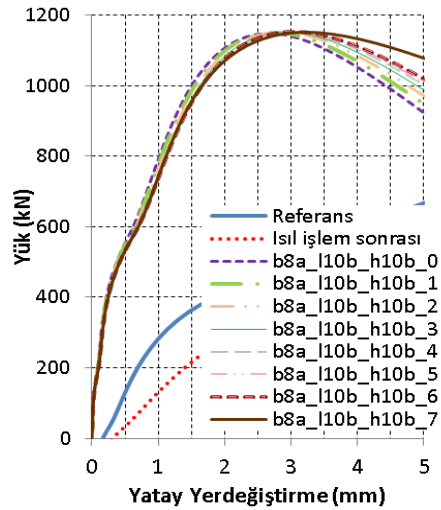
b8a_L10b_h4b_(0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)



b8a_L10b_h6b_(0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)



b8a_L10b_h8b_(0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)



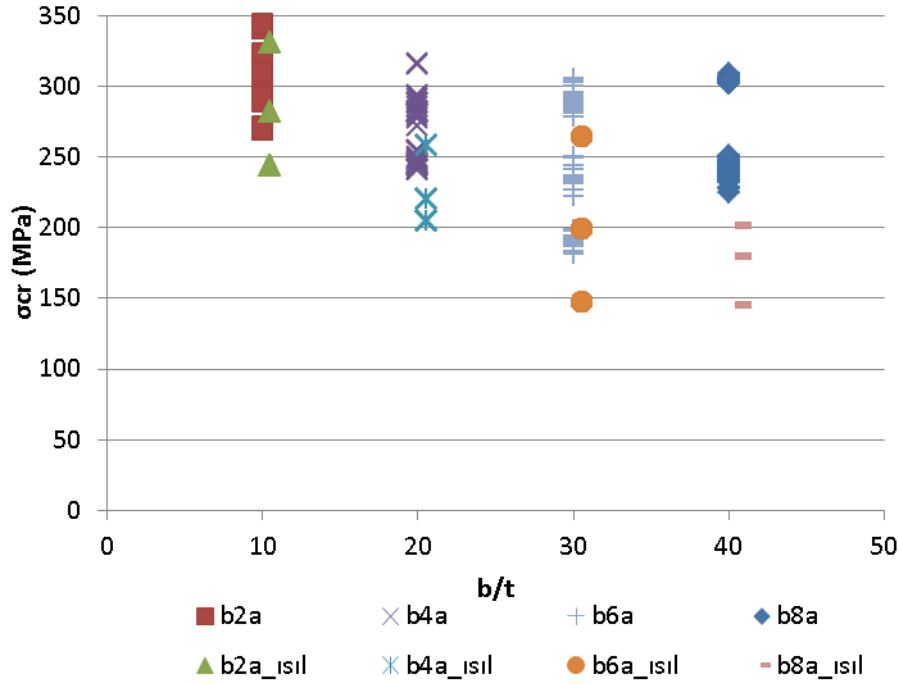
b8a_L10b_h10b_(0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)

Şekil 6.7'nin devamı

Yukarıdaki grafikler incelendiğinde bütün deney grupları için Isıl işlem sonrası yapılan GFRP ile güçlendirme işleminde dayanımın arttığı görülmüştür.

6.4. Parametrik Çalışma Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Parametrik çalışmada FRP ile güçlendirilen ve ısıl işlem görmüş iki yüz adet numune için elde edilen burkulma yükleri, ait oldukları çelik plakaların kesit alanlarına bölünerek elde edilen gerilme (σ_{cr}) değerleri ile b/t oranlarına ait grafik çizilmiştir (Şekil 6.8). Bu grafiğe bakıldığında ısıl numunelerin, güçlendirme işlemi sonrasında dayanımlarındaki artış görülmektedir.



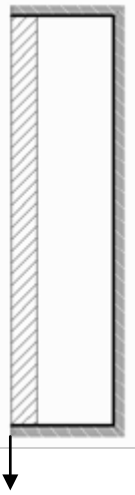
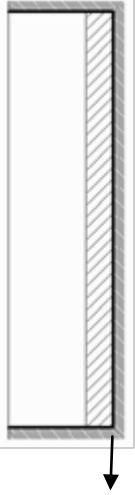
Şekil 6.8. Parametrik çalışma sonuçlarının b/t oranına göre değerleri

Parametrik çalışma sonuçları yerleşim etkisi, GFRP boy etkisi, narinlik etkisi başlıkları altında incelenmiştir.

6.4.1 GFRP yerleşim düzeninin etkisi

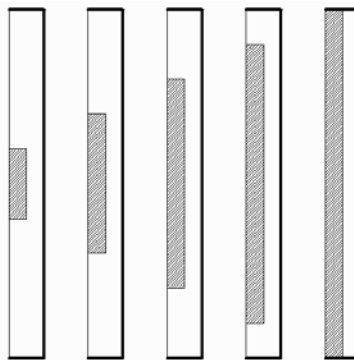
Güçlendirme işleminde FRP malzemenin serbest kenara ve mesnet kenarına olan uzaklığının sonuçlara etkisini gözlemlemek amacıyla FRP malzemeye farklı yerleşimler uygulanmıştır. Bu amaçla grafikler incelenmiş ve maksimum değeri veren yerleşim düzenleri seçilmiştir. Sonuçlar bir tablo haline getirilmiştir (Tablo 6.8). Bu sonuçlara bakıldığında b/t narinlik oranının 10 ve 20 olduğu değerlerde mesnetli kenar tarafına yapılan yerleşimin etkin olduğu, narinlik oranının 30 ve 40 olduğu değerlerde ise serbest kenara yapılan yerleşimin maksimum değeri verdiği görülmektedir. Bu durum için narinlik oranı arttığında FRP güçlendirme işleminin serbest kenar kısmına yakın yapılması gerektiği sonucuna varılabilir.

Tablo 6.8. Parametrik çalışma maksimum sonucu veren yerleşim düzeni sonuçları

		b/t	Serbest kenar	Mesnetli kenar		
b2a	L4b	10		■		
	L6b					
	L0b					
b4a	L4b	20		■		
	L6b					
	L0b					
b6a	L4b	30	■			
	L6b					
	L0b					
b8a	L4b	40				
	L6b					
	L10b					

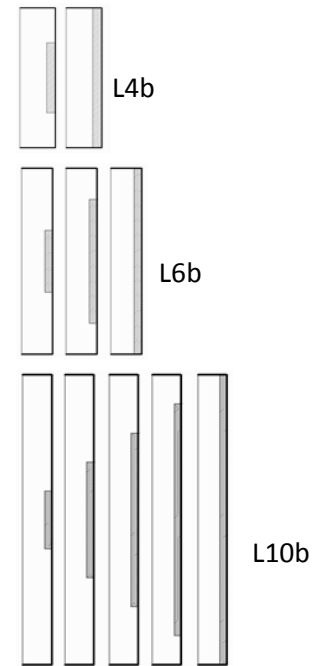
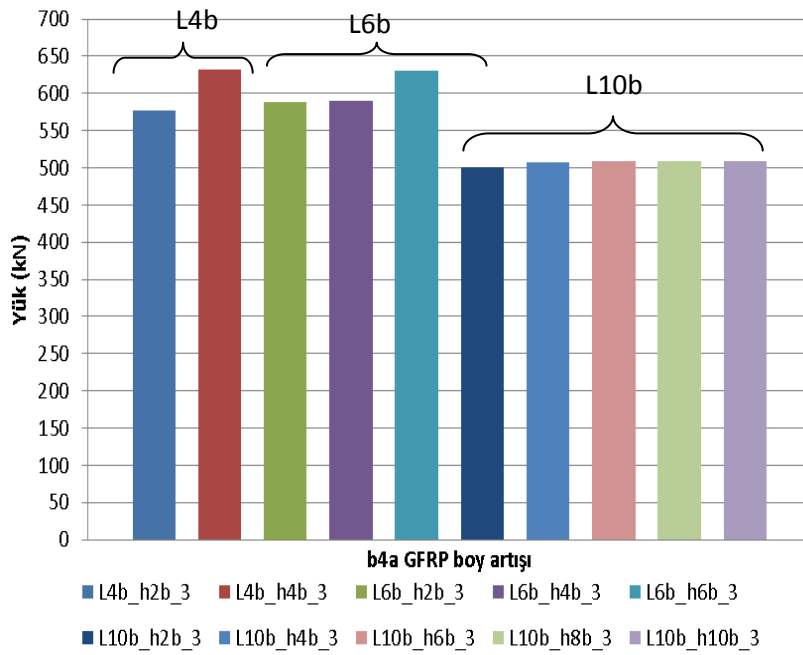
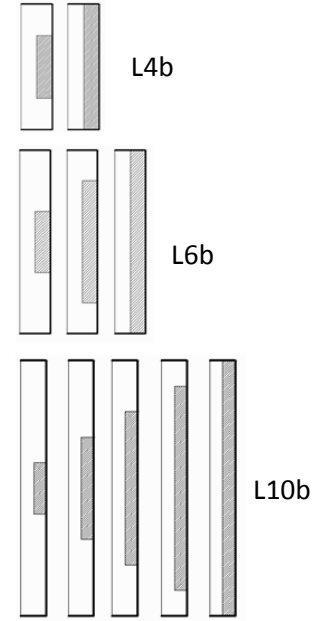
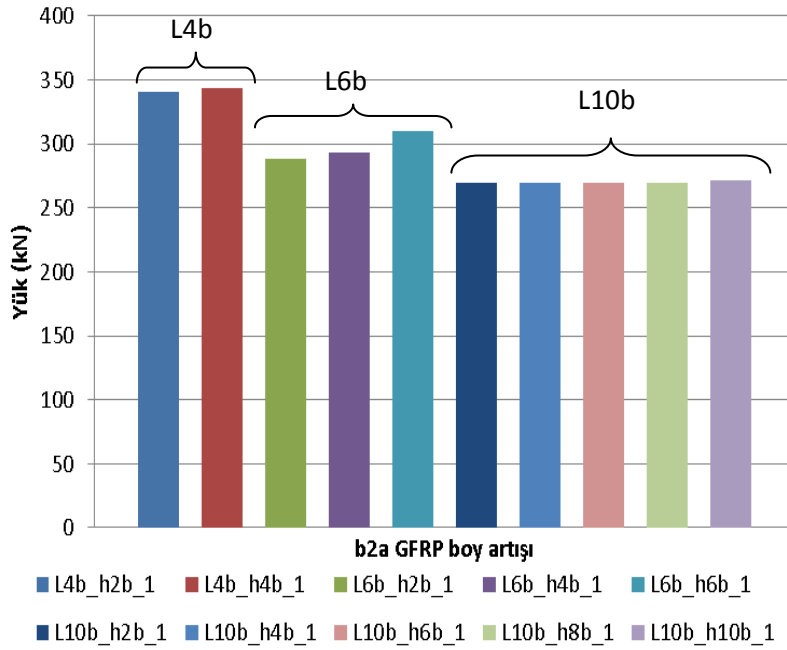
6.4.2. GFRP boyunun etkisi

Güçlendirme işlemi için kullanılacak olan FRP malzemesinin boyunun elemanın malzeme boyuna oranının davranışa etkisini incelemek için numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler şematik olarak Şekil 6.9’da gösterilmiştir. Bu amaçla GFRP yerleşim etkisinin maksimum olduğu veriler göz önüne alınarak b2a, b4a, b6a ve b8a için sadece GFRP boyunun değişimini gösteren grafikler hazırlanmıştır.

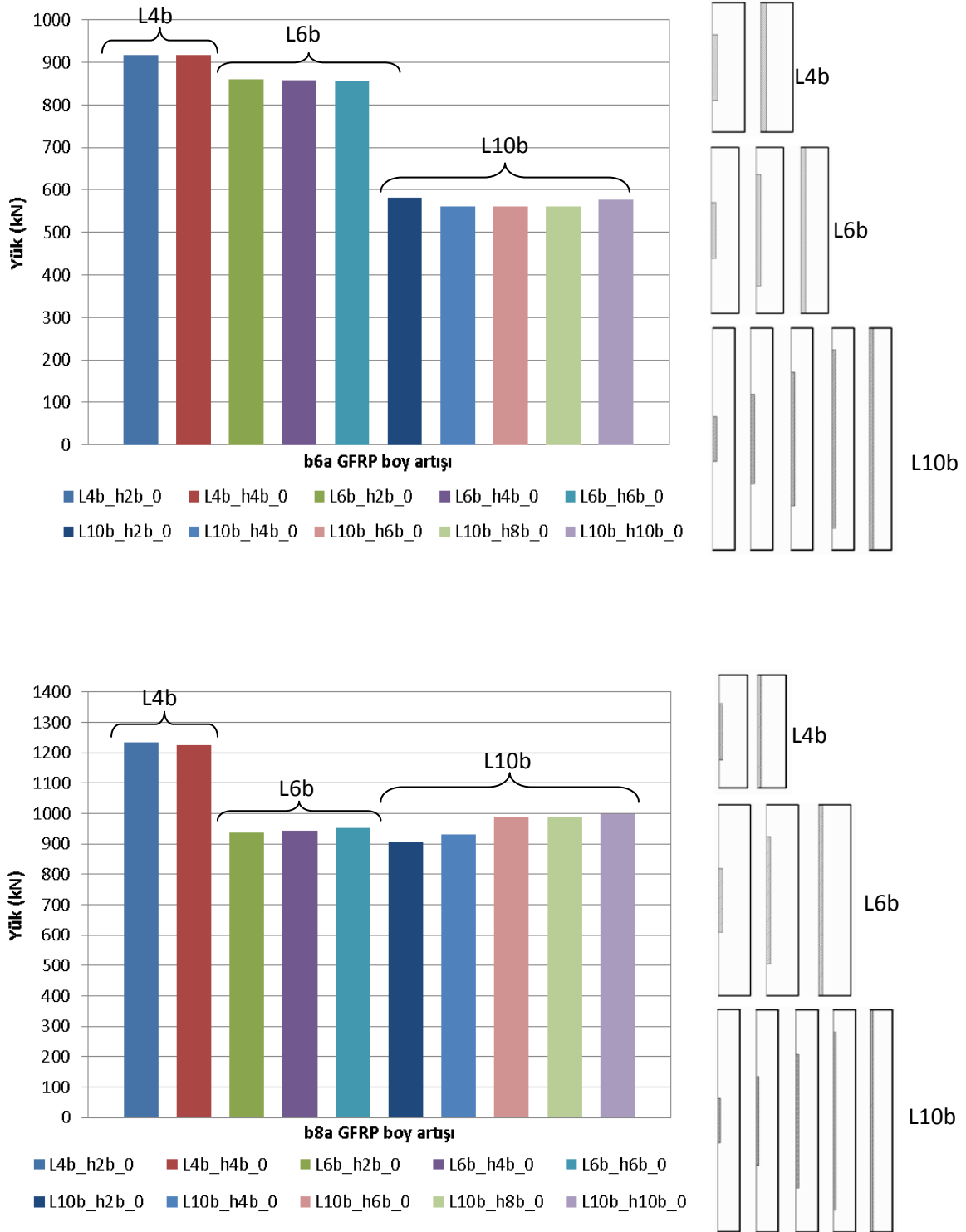


Şekil 6.9. GFRP boyunun uzamasına örnek bir gösterim

Şekil 6.10’daki grafikler incelendiğinde GFRP boyunun uzaması ile maksimum değerlerin değiştiği ancak çok büyük farklar oluşmadığı görülmektedir.



Şekil 6.10. Parametrik çalışmada maksimum sonucu veren yerleşim düzenlerinde GFRP boyunun değişiminin etkisi



Şekil 6.10'un devamı

Yukarıdaki grafikler incelendiğinde GFRP plakaların boyu arttığında maksimum yük taşıma kapasitesinde önemli bir artış olmadığı ancak ısıtım işlem sonrasında GFRP yapıştırıldığında burkulma modunun değişebileceği göz önüne alındığında FRP eleman boyunun çelik plaka boyunca uygulanması gerektiği söylenebilir.

6.4.3. Narinlik etkisi

Çelik plakaların elastik burkulma teorisine göre hesaplanan kritik burkulma kuvvetlerine bakılarak önerilen güçlendirme metodunun etkileri ayrıca incelenebilir.

Plakalardaki elastik burkulma teorisine göre elastik burkulma gerilmesi denklem 6.1' de gösterilen bağıntı ile hesaplanabilir [64]. Bu bağıntıda; σ_{cr} kritik burkulma gerilmesini, k plağın geometrik olarak uzunluk/genişlik oranına ve kenar mesnet şartlarına bağlı burkulma katsayısını, E elastisite modülünü, μ poisson oranını, b plak genişliğini, t plak kalınlığını tanımlamaktadır. Parametrik çalışmada; b değeri b_{2a} genişliğinde: 50mm, b_{4a} genişliğinde: 100 mm ve b_{6a} genişliğinde: 150 mm, t :5 mm, μ : 0.3, E : $2,1 \times 10^5$ N/mm² olarak alınmıştır.

$$\sigma_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)(b/t)^2} \quad (6.1)$$

Parametrik çalışma sonucu bulunan burkulma kuvvetleri kesit alanına bölünerek elde edilen σ_{cr} burkulma gerilmelerinin tamamı Tablo 6.9, 6.10, 6.11 ve 6.12' de verilmiştir. Denklem 6.1' de bulunan k değerleri, hesaplanan σ_{cr} ' ler için ayrı ayrı bulunarak yine aynı tablolarda verilmiştir.

Tablo 6.9. b2a için yapılan parametrik çalışmadan elde edilen σ_{cr} ve k değerleri

b	L	h	Yer. Düz.	Numune ismi	σ_{cr} (MPa)	b/t	k
2a	4b	2b	0	b2a_14b_h2b_0	340.58	10	0.1794
			1	b2a_14b_h2b_1	340.42		0.1794
		4b	0	b2a_14b_h4b_0	342.74		0.1806
			1	b2a_14b_h4b_1	343.95		0.1812
	6b	2b	0	b2a_16b_h2b_0	290.83	10	0.1532
			1	b2a_16b_h2b_1	288.76		0.1521
		4b	0	b2a_16b_h4b_0	296.81		0.1564
			1	b2a_16b_h4b_1	293.24		0.1545
		6b	0	b2a_16b_h6b_0	309.91		0.1633
			1	b2a_16b_h6b_1	310.00		0.1633
	10b	2b	0	b2a_110b_h2b_0	269.42	10	0.1419
			1	b2a_110b_h2b_1	269.38		0.1419
		4b	0	b2a_110b_h4b_0	269.80		0.1421
			1	b2a_110b_h4b_1	269.54		0.1420
		6b	0	b2a_110b_h6b_0	270.33		0.1431
			1	b2a_110b_h6b_1	270.67		0.1426
		8b	0	b2a_110b_h8b_0	270.99		0.1428
			1	b2a_110b_h8b_1	269.80		0.1421
		10b	0	b2a_110b_h10b_0	270.55		0.1425
			1	b2a_110b_h10b_1	271.69		0.1424

Tablo 6.10. b4a için yapılan parametrik çalışmadan elde edilen σ_{cr} ve k değerleri

b	L	h	Yer. Düz.	Numune ismi	σ_{cr} (MPa)	b/t	k
4a	4b	2b	0	b4a_14b_h2b_0	281.32	20	0.5929
			1	b4a_14b_h2b_1	281.30		0.5928
			2	b4a_14b_h2b_2	281.38		0.5930
			3	b4a_14b_h2b_3	283.04		0.5965
		4b	0	b4a_14b_h4b_0	287.84		0.6066
			1	b4a_14b_h4b_1	288.14		0.6072
			2	b4a_14b_h4b_2	288.14		0.6072
			3	b4a_14b_h4b_3	315.95		0.6659
	6b	2b	0	b4a_16b_h2b_0	277.08	20	0.5839
			1	b4a_16b_h2b_1	281.46		0.5932
			2	b4a_16b_h2b_2	278.73		0.5874
			3	b4a_16b_h2b_3	285.17		0.6010
		4b	0	b4a_16b_h4b_0	291.21		0.6137
			1	b4a_16b_h4b_1	288.13		0.6072
			2	b4a_16b_h4b_2	292.58		0.6166
			3	b4a_16b_h4b_3	295.00		0.6217
		6b	0	b4a_16b_h6b_0	288.14		0.6072
			1	b4a_16b_h6b_1	293.75		0.6191
			2	b4a_16b_h6b_2	271.89		0.5730
			3	b4a_16b_h6b_3	315.54		0.6650
	10b	2b	0	b4a_110b_h2b_0	241.07	20	0.5081
			1	b4a_110b_h2b_1	241.37		0.5087
			2	b4a_110b_h2b_2	241.37		0.5087
			3	b4a_110b_h2b_3	241.17		0.5083
		4b	0	b4a_110b_h4b_0	243.37		0.5129
			1	b4a_110b_h4b_1	244.13		0.5145
			2	b4a_110b_h4b_2	243.91		0.5140
			3	b4a_110b_h4b_3	244.21		0.5147
		6b	0	b4a_110b_h6b_0	244.54		0.5154
			1	b4a_110b_h6b_1	245.94		0.5183
			2	b4a_110b_h6b_2	245.11		0.5166
			3	b4a_110b_h6b_3	246.44		0.5194
		8b	0	b4a_110b_h8b_0	246.88		0.5203
			1	b4a_110b_h8b_1	249.24		0.5253
			2	b4a_110b_h8b_2	247.79		0.5222
			3	b4a_110b_h8b_3	250.18		0.5272
10b		0	b4a_110b_h10b_0	253.76	0.5348		
		1	b4a_110b_h10b_1	254.56	0.5365		
		2	b4a_110b_h10b_2	254.61	0.5366		
		3	b4a_110b_h10b_3	254.62	0.5366		

Tablo 6.11. b6a için yapılan parametrik çalışmadan elde edilen σ_{cr} ve k değerleri

b	L	h	Yer. Düz.	Numune ismi	σ_{cr} (MPa)	b/t	k
6a	4b	2b	0	b6a_14b_h2b_0	305.418	30	1.4482
			1	b6a_14b_h2b_1	305.458		1.4484
			2	b6a_14b_h2b_2	299.693		1.4211
			3	b6a_14b_h2b_3	295.256		1.4001
			4	b6a_14b_h2b_4	283.310		1.3434
		5	b6a_14b_h2b_5	278.152	1.3190		
		4b	0	b6a_14b_h4b_0	304.309		1.4430
			1	b6a_14b_h4b_1	302.674		1.4352
			2	b6a_14b_h4b_2	293.933		1.3938
			3	b6a_14b_h4b_3	290.292		1.3765
	4		b6a_14b_h4b_4	280.993	1.3324		
	5	b6a_14b_h4b_5	281.565	1.3351			
	6b	2b	0	b6a_16b_h2b_0	286.885	30	1.3604
			1	b6a_16b_h2b_1	286.072		1.3565
			2	b6a_16b_h2b_2	284.840		1.3507
			3	b6a_16b_h2b_3	283.523		1.3444
			4	b6a_16b_h2b_4	281.845		1.3365
		5	b6a_16b_h2b_5	280.962	1.3323		
		4b	0	b6a_16b_h4b_0	289.859		1.3745
			1	b6a_16b_h4b_1	289.259		1.3716
			2	b6a_16b_h4b_2	288.364		1.3674
			3	b6a_16b_h4b_3	287.491		1.3632
			4	b6a_16b_h4b_4	286.121		1.3567
		5	b6a_16b_h4b_5	285.335	1.3530		
		6b	0	b6a_16b_h6b_0	293.739		1.3929
			1	b6a_16b_h6b_1	292.244		1.3858
			2	b6a_16b_h6b_2	290.197		1.3761
	3		b6a_16b_h6b_3	292.982	1.3893		
	4		b6a_16b_h6b_4	292.229	1.3857		
	5	b6a_16b_h6b_5	291.616	1.3828			
10b	2b	0	b6a_110b_h2b_0	194.164	30	0.9207	
		1	b6a_110b_h2b_1	187.093		0.8872	
		2	b6a_110b_h2b_2	187.069		0.8871	
		3	b6a_110b_h2b_3	186.913		0.8863	
		4	b6a_110b_h2b_4	192.137		0.9111	
	5	b6a_110b_h2b_5	181.513	0.8607			
	4b	0	b6a_110b_h4b_0	188.678		0.8947	
		1	b6a_110b_h4b_1	188.362		0.8932	
		2	b6a_110b_h4b_2	188.513		0.8939	
		3	b6a_110b_h4b_3	183.083		0.8681	
4		b6a_110b_h4b_4	188.346	0.8931			
5	b6a_110b_h4b_5	188.487	0.8938				

Tablo 6.11'in devamı

		6b	0	b6a_110b_h6b_0	197.542	30	0.9367
			1	b6a_110b_h6b_1	191.778		0.9094
			2	b6a_110b_h6b_2	189.825		0.9001
			3	b6a_110b_h6b_3	190.059		0.9012
			4	b6a_110b_h6b_4	189.217		0.8972
			5	b6a_110b_h6b_5	189.778		0.8999
		8b	0	b6a_110b_h8b_0	254.579	30	1.2072
			1	b6a_110b_h8b_1	232.756		1.1037
			2	b6a_110b_h8b_2	236.564		1.1217
			3	b6a_110b_h8b_3	231.285		1.0967
			4	b6a_110b_h8b_4	226.307		1.0731
			5	b6a_110b_h8b_5	198.461		0.9411
		10b	0	b6a_110b_h10b_0	249.977	30	1.1853
			1	b6a_110b_h10b_1	221.958		1.0525
			2	b6a_110b_h10b_2	234.326		1.1111
			3	b6a_110b_h10b_3	241.305		1.1442
			4	b6a_110b_h10b_4	243.502		1.1546
			5	b6a_110b_h10b_5	236.437		1.1211

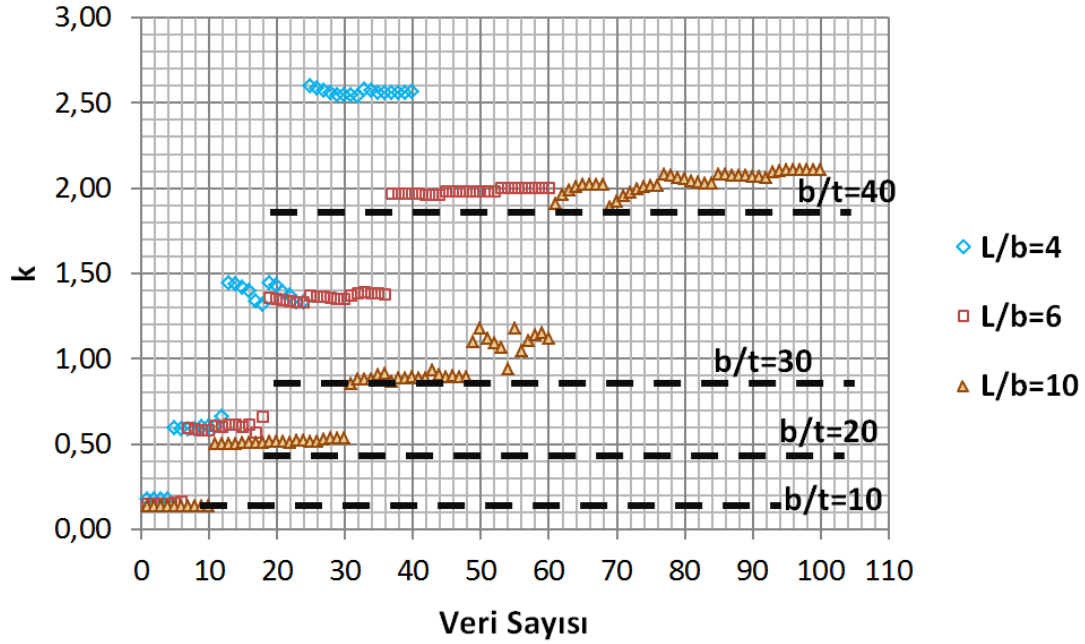
Tablo 6.12. b8a için yapılan parametrik çalışmadan elde edilen σ_{cr} ve k değerleri

b	L	h	Yer. Düz.	Numune ismi	σ_{cr} (MPa)	b/t	k
8a	4b	2b	0	b8a_14b_h2b_0	308.775	40	2.6029
			1	b8a_14b_h2b_1	306.930		2.5874
			2	b8a_14b_h2b_2	305.390		2.5744
			3	b8a_14b_h2b_3	303.855		2.5615
			4	b8a_14b_h2b_4	302.663		2.5514
			5	b8a_14b_h2b_5	302.128		2.5469
			6	b8a_14b_h2b_6	302.105		2.5467
			7	b8a_14b_h2b_7	301.728		2.5435
		4b	0	b8a_14b_h4b_0	306.333	40	2.5824
			1	b8a_14b_h4b_1	305.320		2.5738
			2	b8a_14b_h4b_2	304.438		2.5664
			3	b8a_14b_h4b_3	304.013		2.5628
			4	b8a_14b_h4b_4	303.823		2.5612
			5	b8a_14b_h4b_5	303.905		2.5619
	6b	2b	0	b8a_16b_h2b_0	234.338	40	1.9754
			1	b8a_16b_h2b_1	234.190		1.9742
			2	b8a_16b_h2b_2	234.020		1.9728
			3	b8a_16b_h2b_3	233.860		1.9714
			4	b8a_16b_h2b_4	233.695		1.9700
			5	b8a_16b_h2b_5	233.575		1.9690
			6	b8a_16b_h2b_6	233.475		1.9682
		7	b8a_16b_h2b_7	233.420	1.9677		
		4b	0	b8a_16b_h4b_0	235.943	40	1.9890
			1	b8a_16b_h4b_1	235.908		1.9887
			2	b8a_16b_h4b_2	235.883		1.9885
			3	b8a_16b_h4b_3	235.860		1.9883
			4	b8a_16b_h4b_4	235.840		1.9881
			5	b8a_16b_h4b_5	235.818		1.9879
6	b8a_16b_h4b_6		235.798	1.9878			
7	b8a_16b_h4b_7	235.768	1.9875				
6b	0	b8a_16b_h6b_0	238.105	40	2.0072		
	1	b8a_16b_h6b_1	238.148		2.0076		
	2	b8a_16b_h6b_2	238.098		2.0071		
	3	b8a_16b_h6b_3	238.088		2.0071		
	4	b8a_16b_h6b_4	238.025		2.0065		
	5	b8a_16b_h6b_5	237.995		2.0063		
	6	b8a_16b_h6b_6	237.958		2.0060		
7	b8a_16b_h6b_7	237.868	2.0052				

Tablo 6.12'nin devamı

8a	10b	2b	0	b8a_110b_h2b_0	227.068	40	1.9142
			1	b8a_110b_h2b_1	232.983		1.9640
			2	b8a_110b_h2b_2	236.578		1.9943
			3	b8a_110b_h2b_3	238.828		2.0133
			4	b8a_110b_h2b_4	239.948		2.0227
			5	b8a_110b_h2b_5	240.468		2.0271
			6	b8a_110b_h2b_6	240.588		2.0281
			7	b8a_110b_h2b_7	240.495		2.0274
		4b	0	b8a_110b_h4b_0	232.500	40	1.9600
			1	b8a_110b_h4b_1	228.560		1.9267
			2	b8a_110b_h4b_2	232.185		1.9573
			3	b8a_110b_h4b_3	235.070		1.9816
			4	b8a_110b_h4b_4	237.160		1.9992
			5	b8a_110b_h4b_5	238.570		2.0111
			6	b8a_110b_h4b_6	239.348		2.0177
			7	b8a_110b_h4b_7	239.780		2.0213
		6b	0	b8a_110b_h6b_0	247.233	40	2.0842
			1	b8a_110b_h6b_1	246.410		2.0772
			2	b8a_110b_h6b_2	245.333		2.0681
			3	b8a_110b_h6b_3	244.013		2.0570
			4	b8a_110b_h6b_4	242.993		2.0484
			5	b8a_110b_h6b_5	242.073		2.0407
			6	b8a_110b_h6b_6	241.383		2.0348
			7	b8a_110b_h6b_7	240.988		2.0315
		8b	0	b8a_110b_h8b_0	247.338	40	2.0850
			1	b8a_110b_h8b_1	247.230		2.0841
			2	b8a_110b_h8b_2	246.813		2.0806
			3	b8a_110b_h8b_3	246.510		2.0781
4	b8a_110b_h8b_4		246.348	2.0767			
5	b8a_110b_h8b_5		246.070	2.0744			
6	b8a_110b_h8b_6		245.505	2.0696			
7	b8a_110b_h8b_7		244.880	2.0643			
10b	0	b8a_110b_h10b_0	249.283	40	2.1014		
	1	b8a_110b_h10b_1	249.675		2.1047		
	2	b8a_110b_h10b_2	250.285		2.1099		
	3	b8a_110b_h10b_3	250.230		2.1094		
	4	b8a_110b_h10b_4	250.310		2.1101		
	5	b8a_110b_h10b_5	250.375		2.1106		
	6	b8a_110b_h10b_6	250.455		2.1113		
	7	b8a_110b_h10b_7	250.543		2.1121		

Hesaplanan k değerlerindeki değişim L/b ve veri sayısına göre grafikte gösterilmiştir (Şekil 6.11). Grafik incelendiğinde k değerlerinin, dört bölgede yığıldığı görülmektedir. Veriler incelendiğinde bu bölgelerin b/t oranları olduğu anlaşılmıştır. Her bir b/t grubu için güvenli tarafta kalacak şekilde en küçük k değeri, grafikte gösterilen siyah sınır değeri ile belirlenmiştir.



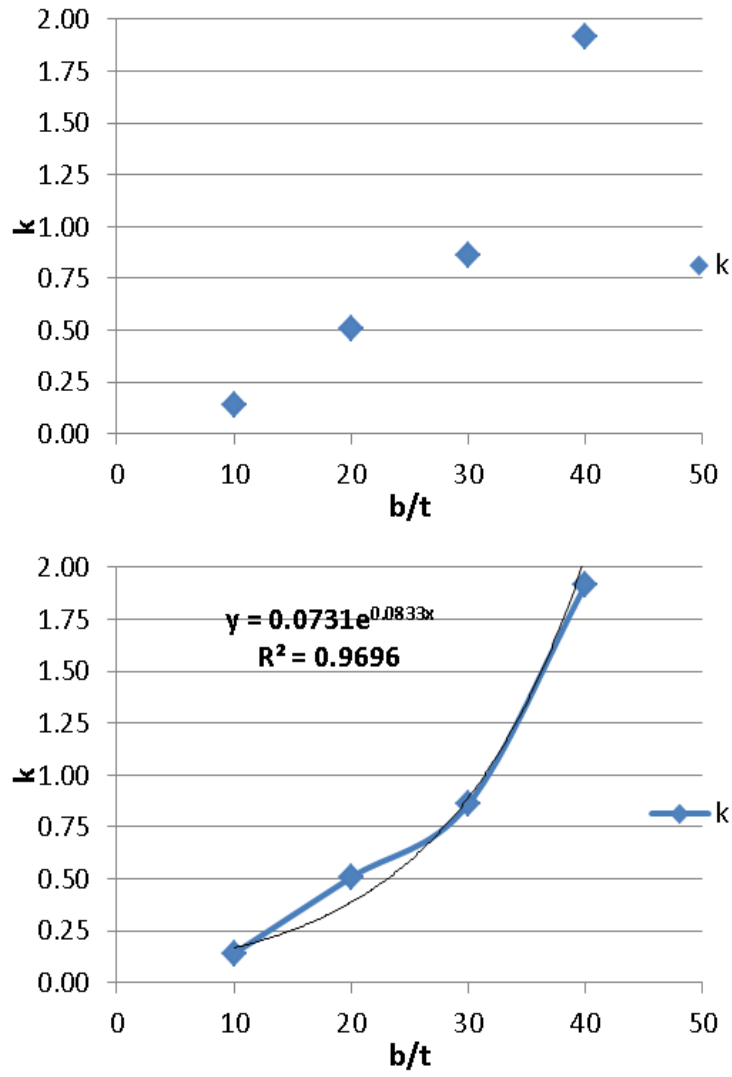
Şekil 6.11. k değerleri değişimi

Elde edilen bu dört nokta Tablo 13' te verilmiştir.

Tablo 6.13. b/t için seçilen k değerleri

b/t	k
10	0.1419
20	0.5081
30	0.8607
40	1.9142

Bu değerler grafiklendiğinde üstel bir değişimin olduğu anlaşılmaktadır. Bu grafiklere üstel eğri uydurulduğunda Şekil 6.12' deki gibi bir eğri elde edilir.



Şekil 6.12. k burkulma katsayısı grafiği

Bu eğrinin denklemi 6.2. gibidir. Elde edilen denklemin regresyon katsayısı 0.96 olup yeterli doğrulukta sonuçlar vereceğinin işaret etmektedir.

$$k = 0.0731e^{0.0833 b/t} \quad (6.2)$$

Bu denklem kullanılarak her hangi bir b/t değeri için k burkulma katsayısı hesaplanarak kritik burkulma gerilmesi hesaplanabilir.

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Deneysel çalışmada hasar görmüş bir çelik elemana ısı işlem uygulandığında dayanım ve rijitliğinde azalma olduğu görülmüştür. Bu azalma çelik yüzeyine yapıştırılan FRP plakalar ile giderilmiştir. FRP elemanın çelik plakalara hangi yerleşim düzeninde yapıştırıldığında daha iyi sonuç vereceğinin incelenmesi amacı ile farklı gruplarda FRP'ler hazırlanmıştır. Deneysel, geniş bir yüzeyde devam ettirilen yapıştırma şeklinin epoksi çatlağının ilerlemesi nedeni ile iyi bir sonuç vermediği, FRP plakaların aralıklı olarak yapıştırılması ile daha yüksek dayanım ve rijitlik değerlerinin elde edildiği gözlenmiştir.

Deneysel numuneleri incelendiğinde, GFRP genişliği 25 mm olan ve serbest kenara yerleştirilen S3HTGC3 isimli yerleşim düzeni, uygulama kolaylığı, en az epoksi yapışma yüzeyi, en ekonomik GFRP miktarının yanında dayanım ve rijitlik artışında sağlaması nedeniyle en etkili sonucu vermiştir. Burkulma modları incelendiğinde, ısı işlem sonrası referans çelik plakaların burkulma modlarının değişebildiği gözlenmiştir.

Yüzey pürüzlülüğünün etkisini görebilmek amacıyla çelik yüzeyine yapılan taşlama işleminin iki tarafından mesnetli plakalarda % 107, üç tarafından mesnetli plakalarda % 20'lere varan seviyede dayanım artışı sağladığı gözlenmiştir. Dolayısıyla yüzey pürüzleme işleminin dayanım ve rijitlik artışında önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

CFRP ve GFRP kullanılarak yapılan deney sonuçları incelendiğinde, dayanım açısından ikisinde birbirlerine yakın sonuçlar verdiği, bu durumda da meydana gelen sıyrılmada asıl etkin olanın epoksi olduğu sonucuna varılmıştır.

Ekonomik açıdan bakıldığında; GFRP onarım birim maliyeti 0.61 €/kg, CFRP onarım maliyeti birim 4.35 €/kg' dır. Yani aralarında 7 katlık bir maliyet farkı bulunmaktadır. Ayrıca ısı ve güçlendirme işlemi yapılmadan çelik elemanın yenisi ile değiştirilmesi durumunda ise, çeliğin birim maliyetinin 0.75 €/kg olduğu düşünüldüğünde GFRP onarımının daha ekonomik olduğu söylenebilir.

Parametrik çalışma sonuçlarına bakıldığında, b/t oranı arttıkça GFRP yerleşiminin serbest kenar kısmında yapılmasının daha yüksek dayanım sağladığı, bunun nedeni ise serbest kenara yapıştırılan GFRP ile bir mesnet oluşturulmasıdır.

Isıl işlem sonrası GFRP ile onarılan çelik plakalarda 200 adet sayısal deney numunesi üzerinden b/t oranına bağlı bir k (burkulma katsayısı) formülü üretilmiştir.

Çalışmada öne çıkan en önemli ayrıntı güçlendirmenin yapıştırıcının sıyırılmasına bağlı olduğu gerçeğidir. Yapıştırıcının sıyırılmasını mekanik olarak güçlendirecek tedbirler alınması yönünde araştırmalar yapılması gerekmektedir. Ayrıca bu çalışma ile önerilen formülün doğruluğunu test etmek için daha fazla deneyler yapılmalıdır. Isıl işlem sonrası soğutma işleminin etkisi de ayrıca test edilmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] MAZZOLANI, F.M., TREMBLAY, R., Behaviour of steel structures in seismic areas, Taylor & Francis US, January 2000.
- [2] KWON, Y.B., KIM N.G., HANCOCK, G.J., Compression tests of welded section columns undergoing buckling interaction, Journal of Constructional Steel Research 63, 1590–1602, 2007.
- [3] BECQUE, J., KIM J.R. RASMUSSEN, K.J.R., A numerical investigation of local/overall interaction buckling of stainless steel lipped channel columns, Journal of Constructional Steel Research 65, 1685-1693, 2009.
- [4] RANAWAKA, T., MAHENDRA, M., Distortional buckling tests of cold-formed steel compression members at elevated temperatures, Journal of Constructional Steel Research, 249-259, 2009.
- [5] ZHANG, Y., WANG, C., ZHANG, Z., Tests and finite element analysis of pin-ended channel columns with inclined simple edge stiffeners, Journal of Constructional Steel Research 63, 383–395, 2007.
- [6] HIROHATA, M., KIM, Y.C., KAWAZU, H., Safety evaluation of cruciform columns corrected by heating, Trans. JWRI 33 (1), 53-58, 2004.
- [7] HIROHATA, M., KIM, Y.C., Dominant factors deciding compressive behavior of cruciformcolumn projection panel corrected by heating, Steel Structures 7, 193-199, 2007.
- [8] HIROHATA, M., KIM, Y.C., Generality verification for factors dominating mechanical behavior under compressive loads of steel structural members corrected by heating/pressing, Steel Structures 8, 83-90, 2008.
- [9] TAVAKKOLIZADEH, M., SAADATMANESH, H., Fatigue strength of steel girders strengthened with carbon fiber reinforced polymer patch, Journal of Structural Engineering, ASCE 2003; 129(2), 186–96, 2003.
- [10] HOLLAWAY, L.C., HEAD, P.R., Advanced polymer composites and polymers in the civil infrastructure. Oxford (UK): Elsevier; 2001.
- [11] TUMIALAN, G., NANNI, A., IBELL, T., FUKUYAMA, H., FRP composites for strengthening civil infrastructure around the world. SAMPE Journal 2002; 38(5), 9–15, 2002.

- [12] BAKIS, C.E., BANK, L.C., BROWN, V.L., COSENZA, E., DAVALOS, J.F., LESKO, J.J., et al., Fibre-reinforced polymer composites for construction: State-of-the art review. *Journal of Composites Construction*, ASCE 2002;6(2), 73–87, 2002.
- [13] ALSAYED, S.H., AL-SALLOUM, Y.A., ALMUSALLAM, T.H., Fibre-reinforced polymer repair materials-some facts. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, *Civil Engineering* 2000;138(3), 131–4, 2000.
- [14] MOY, S., *ICE Design and Practice Guides-FRP composites life extension and strengthening of metallic structures*. London (UK): Thomas Telford Publishing, 2001.
- [15] TENG, J.G., CHEN, J.F., SMITH, S.T., LAM, L., *FRP-strengthened RC structures*, West Sussex (UK): John Wiley and Sons Ltd, 2002.
- [16] TAVAKKOLIZADEH, M., SAADATMANESH, H., Strengthening of steel–concrete composite girders using carbon fibre reinforced polymer sheets, *Journal of Structural Engineering*, ASCE 2003;129(1), 30–40, 2003.
- [17] JONES, S.C., CIVJAN, S.A., Application of fibre reinforced polymer overlays to extend steel fatigue life, *Journal of Composites for Construction*, ASCE 2003;7(4), 331–338, 2003.
- [18] SCHNERCH, D., STANFORD, K., LANIER, B., RIZKALLA, S., Use of high modulus carbon fibre reinforced polymer (CFRP) for strengthening steel structures, In: *2nd Int. Workshop On Structural Composites For Infrastructure Applications*, 2003.
- [19] CHACON, A., CHAJES, M., SWINEHART, M., RICHARDSON, D., WENCZEL, G., Application of advanced composites to steel bridges: A case study on the Ashland bridge (Delaware-USA), *Advanced Composite Materials In Bridges And Structures*, 2004.
- [20] MOSALLAM, A.S., *Composites: Construction materials for the new era*, *Advanced Polymer Composites For Structural Applications In Construction*, 45–58, 2004.
- [21] NIKOUKA, F., LEE, M., MOY, S., Strengthening of metallic structures using carbon fibre composites, *IABSE (International Association For Bridge And Structural Engineering) Symposium 2002*, 2002.
- [22] HOLLAWAY, L.C., CADEI, J., Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites, *Progress in Structural Engineering and Materials* 2002;4(2), 131–148, 2002.

- [23] CADEI ,J.M.C., STRATFORD, T.J., HOLLAWAY, L.C., DUCKETT, W.G., C595-Strengthening metallic structures using externally bonded fibre-reinforced composites, London: CIRIA, 2004.
- [24] LUKE, S., CANNING, L., Strengthening highway and railway bridge structures with FRP composites-Case studies, *Advanced Polymer Composites For Structural Applications In Construction*,. 747–754, 2004.
- [25] SUZUKI, H., First application of carbon Fiber reinforced polymer strips to an existing steel bridge in Japan, *Advanced materials for construction of bridges, buildings and other structures*, 2005.
- [26] BASSETTI, A., NUSSBAUMER, A., HIRT, M.A., Crack repair and fatigue extension of riveted bridge members using composite materials, *Bridge engineering conference, ESE-IABSE-FIB*, 227–238, 2000.
- [27] GÜVEN, C. A., Experimental study on improving local buckling behavior of steel plates strengthened with glass fiber reinforced polymers, *Yüksek Lisans Tezi, İzmir İleri teknoloji Enstitüsü*, 2009.
- [28] HARRIES, K.A., PECK, A.J., ABRAHAM, E.J., Enhancing stability of structural steel sections using FRP, *Thin-Walled Structures*, 2008.
- [29] SHAAT, A., FAM, A., Axial loading tests on CFRP-retrofitted short and long HSS steel columns, *Canadian Journal of Civil Engineering* 2006;33(4), 458–470, 2006.
- [30] EKİZ, E., EL-TAWIL, S., Inhibiting steel brace buckling using CFRP wraps, *Proceedings of The Eighth National Conference On EQ Engineering*, San Francisco, 2006.
- [31] SHAAT, A., FAM, A., Modeling of axially loaded HSS slender steel columns strengthened with CFRP sheets, *International conference on advances in engineering structures, mechanics & construction*, 2006.
- [32] TENG, J.B., HU, Y.M., Behaviour of FRP-jacketed circular steel tubes and cylindrical shells under axial compression, *Construction and Building Materials* 21, 827-838, 2007.
- [33] PATNAIK, A.K., BAUER, C.L., Strengthening of steel beams with carbon FRP laminates, *Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, Calgary, July 2004.
- [34] SAYED-AHMED, E.Y., Strengthening of thin-walled steel I-section beams using CFRP strips, *Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, Calgary, July 2004.

- [35] MILLER, T.C., CHAJES, M.J., MERTZ, D.R., HASTINGS, J.N., Strengthening of a steel bridge girder using CFRP plates, *Journal of Bridge Engineering*, November/December, 514-522, 2001.
- [36] ACCORD, N. B., EARLS, C. J., Use of fiber reinforced polymer composite elements to enhance structural steel member ductility, *Journal of Composites for Construction ASCE* 10.4, 337-344, 2006.
- [37] SCHNERCH, D., STANFORD, K., SUMNER, E., RIZKALLA, S., Bond behavior of CFRP strengthened steel bridges and structures, *Proceedings of International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005)*, 2005.
- [38] CHIEW, S.P., LIE, S.T., LEE, C.K., YU, Y., Debonding failure model for FRP retrofitted steel beams, *Advances in Steel Structures* 1, 579 -586, 2005.
- [39] SEN, R., LIBY, L., MULLINS, G., Strengthening steel bridge sections using CFRP laminates, *Composites Part B*. 32, 309-322, 2001.
- [40] EL DAMATY, A.A., ABUSHAGUR, M., YOUSSEF, M.A., Rehabilitation of composite steel bridges using GFRP plates, *Applied Composite Materials* 12, 309 – 325, 2005.
- [41] PHOTIOU, N.K., HOLLAWAY, L.C., CHRYSSANTHOPOULOS, M.K., Strengthening of an artificially degraded steel beam utilizing a carbon/glass composite system, *Construction and Building Materials*. 20, 11-21, 2006.
- [42] COLOMBI, P., POGGI, C., An experimental, analytical and numerical study of the static behavior of steel beams reinforced by pultruded CFRP strips, *Composites: Part B* 37, 64–73, 2006.
- [43] ASTM A370-10, Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products, ASTM (American Society for Testing and Materials), 2010.
- [44] ASTM D 3039 M-08, Standart test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, ASTM (American Society for Testing and Materials), 2007.
- [45] TS EN ISO 527-4 Plastikler- çekme özelliklerinin tayini- Bölüm 4: İzotropik ve ortotropik elyaf takviyeli plastik kompozitler için deney şartları, Türk Standartları Enstitüsü, 2007.
- [46] TS EN ISO 527-5 Plastikler- Çekme özelliklerinin tayini- Bölüm 5: Tek yönlü elyaf takviyeli plastik kompozitler için deney şartları, Türk Standartları Enstitüsü, 2010.
- [47] DAWOOD, M., Fundamental behavior of steel-concrete composite beams strengthened with high modulus carbon fiber reinforced polymer (CFRP) materials, University of North Carolina State, Master Thesis, 2005.

- [48] KÖSTER Yapı Kimyasalları A.Ş., 2012
- [49] Araldite Epoxy adhesive teknik kataloğu, 2012
- [50] Esa Kimya Metal Sanayi Ve Ticaret Limited Şirketi, 2012.
- [51] Sika Yapı Kimyasalları A.Ş., 2012.
- [52] DERE YAMAN, Z., MERCAN ERYILMAZ, D., AKTAS, M., ELMAS, M., Doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizinde çelik eğilme elemanlarının geometrik kusurlarının tanımlanması, Türkiye Abaqus Kullanıcıları Toplantısı, 215-222, 2010.
- [53] İNAN, M., Cisimlerin Mukavemeti, Ofset Matbaacılık Ltd. Şti., 1970.
- [54] YAMAN, Z., Zayıf ekseninde eğilen çelik U kesitli profillerin plastik tasarım koşullarının irdelenmesi, Sakarya Üniversitesi, Doktora Tezi, 2010.
- [55] GALAMBOS, T. V., RAVINDRA, M. K., Properties of steel for use in LRFD, Journal of the Structural Division, Vol. 104 , No. ST9, pp.1459-1468, 1978.
- [56] GALAMBOS, T. V., Guide to stability design criteria for metal structures, Fifth Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.
- [57] AĞCAKOCA, E., I-kesitli çelik-betonarme kompozit kirişlerin HM-CFRP ile onarım ve güçlendirilmesine yönelik metod geliştirilmesi, Sakarya Üniversitesi, Doktora Tezi, 2012.
- [58] APALAK, M. K., ANGIN, A., Elasto-plastic stress analysis of an adhesively bonded single lap joint subjected to a bending moment, The Tenth International Conference On Machine Design And Production, 4-6 September, 291-306 , 2002.
- [59] ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.9. Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc, Pawtucket, RI, 2008.
- [60] HWANG, H.Y., KIM, B. J., CHIN, W.S., KIM, H.S., LEE, D. G., Prediction of crack length and crack growth rate of adhesive joints by a piezoelectric method, J. Adhesion Sci. Technol., 19-12, 1081–1111, 2005.
- [61] SÜMER, Y., FRP elemanlarla güçlendirilmiş hasarlı betonarme kirişlerin doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle analizi, Sakarya Üniversitesi, Doktora Tezi, 2010.
- [62] AKTAS, M., Minor axis flexure and combined loading response of I-shaped steel members, Pittsburgh Üniversitesi, Doktora tezi, 2004.

- [63] THOMAS, S., EARLS, C. J., Cross sectional compactness and bracing requirements for HPS483W girders, J Struct. Eng., ASCE, 129 (12), 1569-1583, 2003.
- [64] SALMON, C.G., JOHNSON, J.E., Steel structures design and behaviour, fourth edition, Harper Collins College Publishers, 1996.

ÖZGEÇMİŞ

Emine AYDIN, 20 Eylül 1978 yılında Adapazarı' nda doğdu. İlk orta ve lise öğrenimini Sakarya'da tamamladı. 1997 yılında Sakarya Üniversitesi Sakarya Meslek Yüksek Okulundan mezun oldu. 1998 yılında Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümünü kazandı. 2002 yılında fakülte birincisi olarak mezun oldu. Aynı yıl Yapı Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2006 yılında Yüksek Lisans eğitimini tamamlayarak Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümünde doktora eğitimine başladı. Evli olan Emine AYDIN, halen Sakarya Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.