

**T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**GFRP DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN YÜKSEK
SICAKLIK ETKİLERİ ALTINDA YAPISAL DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

Mehmet POLAT

Danışman: Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**ERZİNCAN
2019
Her Hakkı Saklıdır.**

Kabul ve Onay Sayfası

Doç.Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL danışmanlığında, Mehmet POLAT tarafından hazırlanan bu çalışma 03/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Dr.Öğr.Üyesi Arif Emre SAĞSÖZ

İmza:

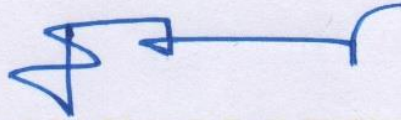
Üye : Doç.Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

İmza:

Üye : Dr.Öğr.Üyesi Burak Kaan ÇIRPICI

İmza:

Yukarıdaki sonuç Enstitü Yönetim Kurulunun 19 / 07 / 2019 tarih ve 28 / 11 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Prof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etiğe Uygunluk Sayfası

“GFRP Donatılı Betonarme Kirişlerin Yüksek Sıcaklık Etkileri Altında Yapısal Davranışlarının İncelenmesi” isimli “Yüksek Lisans” tezim tarafımca intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiğı gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 03./07./2019

(İmza)

Mehmet POLAT

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GFRP DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN YÜKSEK SICAKLIK ETKİLERİ ALTINDA YAPISAL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Mehmet POLAT

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

Bu çalışmada, GFRP (Cam Fiber Lif Katkılı Polimer) donatıların betonarme kirişlerde kullanılarak yüksek sıcaklık etkileri altındaki eğilme davranışları incelenmiştir. Bu amaçla GFRP donatı ile üretilen kirişler ve malzeme olarak GFRP donatılar, küp beton numuneler ve çekip çıkarma deneyi numuneleri seramik fırında aşamalı olarak 100°C'den 800°C'ye kadar yüksek sıcaklığa maruz bırakılıp havada soğutulularak deneye tabi tutulmuştur. Küp beton numuneler 600°C'de basınç dayanımlarının %55'ini kaybederken 800°C'de %82 dayanım kaybına uğramışlardır. GFRP donatı numuneleri malzeme olarak 400°C'de kopma dayanımlarının %65'ini, 500°C'de %90'ını kaybetmiş, sonraki sıcaklıklarda ise mekanik özelliklerini tamamen yitirmişlerdir. Malzeme aderans dayanımlarına bakıldığında, çekip çıkarma deneylerinde GFRP donatılar 500°C'de %55'in üzerinde sıyrılma dayanım kaybına uğrayıp, 800°C'de ise dayanımını tamamen kaybetmiştir. GFRP donatılı kiriş numunelerdeki taşıma gücü kayıpları ise 500°C'de %48, 600 °C'de ise %85 olmuştur. Malzemelerin aderans ve taşıma gücü kayıplarına bakıldığında betonun yüksek sıcaklık altındaki rolünün önemli olduğu ve betonarme bir elemanı oluşturan tüm malzemelerin sistematik olarak bu duruma doğrudan etki ettiği görülmüştür.

2019, 102 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Aderans, beton, betonarme, betonarme kiriş, gfrp donatı, yüksek sıcaklık.

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF GFRP-REINFORCED CONCRETE BEAMS EXPOSED TO ELEVATED TEMPERATURES

Mehmet POLAT

Erzincan Binali Yıldırım University
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

This study presents an investigation aimed at understanding the behaviour of the glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars under elevated temperatures. For this purpose, reinforced concrete beams with GFRP reinforced bar, and GFRP, steel, and concrete cube specimens gradually heated from 100°C to 800°C, and cooled at room temperature, then subjected to loading tests. The results show that, concrete cubes lost 55% of the compressive strength under 600°C, and 82% at 800°C; GFRP bars lost 65% of the tensile strength at 400°C, %90 at 500°C, and at higher temperatures, they lost all mechanical properties; steel rebars lost 30% of the yield strength at 800°C. Examinations of the material bond strengths in pull-out tests showed that GFRP bars lost 55% of their slip strength at 500°C, and lost entire slip strength at 800°C; steel rebar specimens lost 42% of their slip strength at 600°C, and the loss increased up to 88% at 800°C. For GFRP reinforced concrete beam specimens, they lost 48% of their load-bearing capacity at 500°C, and this loss became 85% when temperature increased to 600°C. At the bottom line, it was observed that concrete and reinforced concrete systematically affected by elevated temperatures with respect to the bonding of the materials, and bearing capacity, thus, they have significant role under these circumstances.

2019, 102 pages

Keywords: Bonding, concrete, elevated temperatures, gfrp bar, reinforced concrete beam, steel rebar

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve bilimsel araştırmalarımnda her konuda yardımcı olan ve beni mühendislik konusunda sürekli besleyen sayın hocamız Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL’a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmaları ve tez yazım sürecimde sürekli destek sağlayan Özgü POLAT, Muhammed Orhan ÖZTÜRK ve Mahmud YAĞAN’a ayrıca teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımız için gerekli olan malzemelerin temini için yardımcı olan Avrupa Kompozit’e, Çorluhazoğlu firması yetkilisi Halil Ertane’ye ve Sika Yapı Kimyasalları Bölge Müdürü Hüseyin Tuncer’e ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Tüm yaşamım boyunca şahsıma emekleri büyük olan ve varlıklarıyla bana değer katan çok kıymetli annem, babam, kardeşlerim, eşim ve oğluma şükranlarımı sunarım.

Mehmet POLAT

Temmuz, 2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1. Yüksek Sıcaklık Etkileri Altında Beton, Çelik Donatılar, FRP ve Betonarme Yapı Elemanları	4
2.2. Yüksek Sıcaklık Etkileri Altında GFRP Donatılar	13
3. KURAMSAL TEMELLER.....	17
3.1. Betonarme Kirişlerde Kesme Etkisi	17
3.2. Betonarme Kirişlerde Eğilme Etkisi.....	20
3.3. Sargılı Beton Davranışı.....	25
3.4. Betonarme Kiriş Tasarımı İçin TS500 (2000) Hükümleri.....	27
3.4.1. Malzeme Karakteristik Özellikleri ve Kabulleri	27
3.4.2. Eğilme elemanlarının boyutları ve donatılar ile ilgili hükümler.....	28
3.4.3. Kesme kuvveti hesabı hükümleri	29
3.5. Beton - Donatı Aderansı	30
3.5. Moment-Eğrilik ve Yük-Deplasman İlişkileri	31
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	33
4.1. Malzeme Özellikleri	33
4.1.1. Beton	33
4.1.2. Çelik donatılar.....	36
4.1.3. FRP donatı.....	38

4.2. Yüksek Sıcaklık Etkileri Altında GFRP ve Çelik Donatı Eksenel Çekme Dayanımı Deneyleri	42
4.3. Yüksek Sıcaklık Etkileri Altında Çelik ve GFRP Donatılar İçin Çekip Çıkarma Deneyleri.....	47
4.4. Kiriş Deney Numunelerinin Tasarım detayları.....	50
4.4.1. Eğilme numunelerinin tasarımı	51
4.4.2. Deney numunelerinin adlandırılması	53
4.5. Deney Düzeneği ve Yükleme Programı	54
4.5.1. Ölçüm ve veri toplama sistemi.....	55
4.5.2. Ölçümlerin değerlendirilmesi.....	57
4.6. Eğrilik Hesabının Yapılması.....	58
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	59
5.1. Çelik Donatılı Eğilme Grubu Kiriş Numune Deneyleri	59
5.1.1. SS000FL kirişi deneyleri	59
5.2. GFRP Donatılı Eğilme Grubu Kiriş Numune Deneyleri	62
5.2.1. FS000FL kirişi deneyleri	62
5.2.2. FS100FL kirişi deneyleri	65
5.2.3. FS150FL kirişi deneyleri	68
5.2.4. FS200FL kirişi deneyleri	71
5.2.5. FS250FL kirişi deneyleri	74
5.2.6. FS300FL kirişi deneyleri	77
5.2.7. FS400FL kirişi deneyleri	80
5.2.8. FS500FL kirişi deneyleri	83
5.2.9. FS600FL kirişi deneyleri	86
5.2.10. FS800FL kirişi deneyleri	89
6. SONUÇLAR	91
KAYNAKLAR	98
EKLER.....	101
ÖZGEÇMİŞ	103

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Kiriş eksenine dik asal gerilmelerin değişimi (Arslan, 2005; Celeb ve Kumbasar, 2005)	18
Şekil 3.2. Kesit tesirleri diyagramı (Arslan, 2005)	19
Şekil 3.3. Betonarme kirişte şekil değiştirme ve iç kuvvet dağılımı.	21
Şekil 3.4. Betonarme kirişte eğilme etkisi altında çatlak oluşumu.	22
Şekil 3.5. Beton ve çeliğe ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi (V.K. Özhan, 2012).....	23
Şekil 3.6. Üç eksenli gerilme altında betondaki davranış	26
Şekil 3.7. k_1 parametre eğrisi (Saatçioğlu ve Ravzi, 1992)	27
Şekil 3.8. Kiriş kesit boyutları	28
Şekil 4.1. Beton basınç dayanımı test cihazı.	34
Şekil 4.2. Beton küp numunelerin hedef sıcaklıklara göre basınç dayanımı değişimi ...	36
Şekil 4.3. Betonda ısı genleşmenin sıcaklıkla değişimi.....	37
Şekil 4.4. Çelikte ısı genleşmenin sıcaklıkla değişimi.....	38
Şekil 4.5. FRP donatılara ait örnekler (Yavuz 2011).....	39
Şekil 4.6. FRP ve çelik donatıların gerilme şekil değiştirme ilişkisi (Abdalla 2002).....	42
Şekil 4.7. 1200°C rejimli seramik fırını.....	43
Şekil 4.8. Çelik ve GFRP donatılar için gerçekleştirilen eksenel çekme deneyi	44
Şekil 4.9. GFRP donatıların her bir sıcaklık değerindeki görünüşleri	45
Şekil 4.10. Çelik ve GFRP donatıların hedef sıcaklıklara göre dayanım değişimleri	46
Şekil 4.11. GFRP ve çelik donatı gerilme-şekil değiştirme grafiği	46
Şekil 4.12. FRP çubuklar için ilgili standartlarda tanımlanan çekip çıkarma deneyi şeması	47
Şekil 4.13. Yangın sıvası ile kaplanmış çekip çıkarma numunesi ve oluşturulan deney düzeneği	48
Şekil 4.14. Çelik ve GFRP donatıların hedef sıcaklıklara göre aderans gerilmesi değişimleri.....	50
Şekil 4.15. Eğilme davranışına göre kiriş tasarımları	51
Şekil 4.16 Eğilme davranışına göre tasarlanmış çelik ve gfrp donatılı kirişler	52
Şekil 4.17 Eğilme grubu kirişlerinin adlandırılması	53
Şekil 4.18. Kiriş numuneleri için deney düzeneği	55

Şekil 4.19. Kiriş numunelerinin arka kısmına yerleştirilen deplasman ölçerler	56
Şekil 4.20. Kiriş numunelerinin ön kısmına yerleştirilen deplasman ölçerler	56
Şekil 5.1. Deney Düzenegindeki SS000FL Numunesi	59
Şekil 5.2. Deney Sonunda SS000FL Kiriş Numunesi	60
Şekil 5.3. SS000FL için yük- sehim grafiği.....	61
Şekil 5.4. SS000FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği	61
Şekil 5.5. Deney Düzenegindeki FS000FL Numunesi	62
Şekil 5.6. Deney Sonunda FS000FL Kiriş Numunesi	63
Şekil 5.7. FS000FL için yük- sehim grafiği.....	64
Şekil 5.8. FS000FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği	64
Şekil 5.9. Deney Düzenegindeki FS100FL Numunesi	65
Şekil 5.10. Deney Sonunda FS100FL Kiriş Numunesi.	66
Şekil 5.11. FS100FL için yük- sehim grafiği.....	67
Şekil 5.12. FS100FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği	67
Şekil 5.13. Deney Düzenegindeki FS150FL Numunesi	68
Şekil 5.14. Deney Sonunda FS150FL Kiriş Numunesi	69
Şekil 5.15. FS150FL için yük- sehim grafiği.....	70
Şekil 5.16. FS150FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği	70
Şekil 5.17. Deney Düzenegindeki FS200FL Numunesi	71
Şekil 5.18. Deney Sonunda FS200FL Kiriş Numunesi	72
Şekil 5.19. FS200FL için yük- sehim grafiği.....	73
Şekil 5.20. FS200FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği	73
Şekil 5.21. Deney Düzenegindeki FS250FL Numunesi	74
Şekil 5.22. Deney Sonunda FS250FL Kiriş Numunesi	75
Şekil 5.23. FS250FL için yük- sehim grafiği.....	76
Şekil 5.24. FS250FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği	76
Şekil 5.25. Deney Düzenegindeki FS300FL Numunesi	78
Şekil 5.26. Deney Sonunda FS300FL Kiriş Numunesi	78
Şekil 5.27. FS300FL için yük- sehim grafiği.....	79
Şekil 5.28. FS300FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği	79
Şekil 5.29. Deney Düzenegindeki FS400FL Numunesi	80
Şekil 5.30. Deney Sonunda FS400FL Kiriş Numunesi	81

Şekil 5.31. FS400FL için yük- sehim grafiği.....	82
Şekil 5.32. FS400FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği.....	82
Şekil 5.33. Deney Düzenegindeki FS500FL Numunesi	83
Şekil 5.34. Deney Sonunda FS500FL Kiriş Numunesi	84
Şekil 5.35. FS500FL için yük- sehim grafiği.....	85
Şekil 5.36. FS500FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği.....	85
Şekil 5.37. Deney Düzenegindeki FS600FL Numunesi	86
Şekil 5.38. Deney Sonunda FS600FL Kiriş Numunesi	87
Şekil 5.39. FS600FL için yük- sehim grafiği.....	88
Şekil 5.40. FS600FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği.....	88
Şekil 5.41. Deney Düzenegindeki FS800FL Numunesi	89
Şekil 5.42. Deney Sonunda FS800FL Kiriş Numunesi	90
Şekil 6.1. Yüksek sıcaklık etkileri altında donatı kopma dayanımları, beton basınç dayanımları ve donatı aderans değişimi	93
Şekil 6.2. Yüksek sıcaklık etkileri altında kiriş numunelerinin taşıma gücü değerleri....	94

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Beton sınıflarına göre kullanılacak k_1 değerleri.....	28
Tablo 4.1. Beton küp numunelerin hedef sıcaklıklara göre basınç dayanımı değerleri .	35
Tablo 4.2. FRP donatılarının avantaj ve dezavantajları (ACI 440.1R-06-Yavuz, 2011)	41
Tablo 4.3. FRP donatı çubuklarının tipik çekme özellikleri (ACI 440.1R-06, 2006)....	42
Tablo 4.4. Çelik ve GFRP donatının mekanik özellikleri	44
Tablo 4.5. Yüksek sıcaklık etkileri altında çelik ve grfp donatılar için eksenel çekme deneyi sonuçları.....	45
Tablo 4.6. Yüksek Sıcaklık Etkileri Altında Çelik ve GFRP Donatılar için Çekip Çıkarma Deneyi Sonuçları	49
Tablo 4.7. Tüm deney numunelerinin isimleri	53
Tablo 4.8. Yükleme sisteminde kullanılan alet listesi.....	54
Tablo 4.9. Ölçüm ve veri toplama cihazları listesi.	57

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

a	Eşdeğer dikdörtgen basınç bloğu derinliği (TS500-2000)
a	Elemanın kesme kuvvetine dik eksenıyla kesme donatısının yaptığı açı (EC- 2-2014)
a_{cw}	Kasınç çubuğunun gerilme halinde dikkate alınan bir katsayı (EC-2-2014)
a_g	Maksimum agrega boyutu (CSA A.23.3-14)
a_1	Betonda basınç bloğunda ortalama basınç gerilmesi katsayısı
A	Basınç çubuğu (EC-2-2014)
A_c	Kesme gerilmesini belirlemek için kullanılan beton alanı (EC-2-2014)
A_{cc}	Eşdeğer basınç bloğu alanı
A_{ct}	Eğilmede çekme tarafındaki beton alanı (CSA A.23.3-14)
A_g	Brüt beton alanı (ACI-318-14)
$A_{s,min}$	Minimum donatı kesit alanı (EC-2-2014)
A_s	Çekme donatısı kesit alanı (ACI-318-14)
A_s	Kolon kesitinde toplam boyuna donatı alanı (CSA A.23.3-14)
A_{sp}	Fret donatısının çapı
A_{st}	Kolon boyuna donatısı toplam kesit alanı (TS500-2000)
A_{sw}	Kesme donatısı toplam kesit alanı (TS-500-2000)
$A_{v,min}$	Minimum kesme donatısı alanı (ACI-318-14)
A_v	Kesme donatısı alanı (CSA A.23.3-14)
b	Kolonun eğilme doğrultusuna dik boyutu
b_w	Kiriş gövde genişliği (TS-500-2000)
b_w	Eleman kesitinde basınç ve çekme arasındaki en küçük genişlik (EC-2-2014)
B	Bağlantı kirişleri (EC-2-2014)
c	En dış donatı ağırlık merkezinden ölçülen beton örtüsü ve Tarafsız eksen derinliği (TS-500-2000)

C	Çekme çubuğu (EC-2-2014)
d	Eğilme elemanlarında , faydalı yükseklik (TS500-2000)
d_s	Çekirdek çapı
d_v	Etkili kesme derinliği (CSA A.23.3-14)
D	Kesme donatısı (EC-2-2014)
E_c	Betonun elastisite modülü (CSA A.23.3-14)
E_s	Donatı elastisite modülü (TS-500-2000)
f_c	Betondaki basınç gerilmesi
$f_{c'}$	Tek yönlü basınç dayanımı
$f_{c'}$	Karakteristik beton basınç dayanımı (ACI-31814)
$f_{c'}$	Beton basınç dayanımı (CSA A.23.3-14)
f_{c1}	Eksenel basınç dayanımı
f_{cd}	Beton tasarım basınç dayanımı (TS-500-2000)
f_{ck}	Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_{ck}	Betonun 28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımı (EC-2-2014)
f_{ctd}	Beton tasarım eksenel çekme dayanımı (TS-5002000)
f_y	Eğilme donatısının karakteristik akma dayanımı (ACI-318-14)
f_y	Eğilme donatısının akma dayanımı (CSA A.23.3-14)
f_{yh}	Fret donatısının akma dayanımı
f_{yh}	Kesme donatısının akma dayanımı (CSA A.23.314)
f_{yd}	Boyuna donatı tasarım akma dayanımı (TS-5002000)
f_{yt}	Kesme donatısının karakteristik akma dayanımı (ACI-318-14)
f_{ywd}	Enine donatı tasarım akma dayanımı (TS-5002000)
f_{ywd}	Tasarım akma dayanımı (EC-2-2014)
h	Kolonun eğilme doğrultusundaki boyutu
F_{cd}	Boyuna çekme donatısı için tasarım yükü (EC-22014)
F_{sw}	Eğik çatlağın kestiği etriyelerdeki kesme kuvveti
F_{td}	Eleman kesitinde basınç bloğundaki tasarım yükü (EC-2-2014)
k	Katsayı (EC-2-2014)
k_1	Yanal basıncı eksenel basınç dayanımına katkısına dönüştüren katsayı
k_1	Eşdeğer dikdörtgen basınç bloku derinlik katsayısı (TS-500-2000)

k_3	Standart silindir deneyinden elde edilen beton dayanımı ile Elemanda ortaya çıkan beton dayanımı arasındaki fark katsayısı
L_n	Net açıklık (CSA A.23.3-14)
ℓ_0	Potansiyel plastik bölgenin uzunluğu (CSA A.23.3-14)
ℓ_p	Plastik mafsallık boyu M_d Tasarım momenti
M_f	Yük etkilerinde eleman kesitinde oluşan moment değeri (CSA A.23.3-14)
M_r	Kolon ve kirişlerin taşıma gücü momentleri
N_{Ed}	Tasarımda kullanılan eksenel yük miktarı (EC-22014)
N	Eksenel eksenel kuvveti
N_d	Tasarımda kullanılacak eksenel yük değeridir (TS-500-2000)
N_f	Yük etkilerinde eleman kesitinde oluşan eksenel çekme kuvveti değeri (CSA A.23.3-14)
N_r	Kolon ve kirişlerin yük kapasitesi
N_u	Yük etkisi altında eleman kesitinde ortaya çıkan eksenel kuvvet (ACI-318-14)
P_f	Yük etkilerinde eleman kesitinde oluşan eksenel basınç kuvveti değeri (CSA A.23.3-14)
$P_{nt,max}$	Elemanın maksimum nominal çekme dayanımı (ACI-318-14)
P_{nt}	Elemanın çekme dayanımı (ACI-318-14)
P_o	Sıfır eksantrisitede eksenel yük kapasitesi (ACI318-14)
$P_{r,max}$	İzin verilen maksimum eksenel yük değeri (CSA A.23.3-14)
P_{ro}	Eksantrisite olmadığında taşınabilecek maksimum eksenel yük
s	Etriye aralığı (ACI-318-14) s_{ze} Çatlak genişliği parametresi (CSA A.23.3-14)
v	Kesme kırılması gerçekleşen beton için dayanım azaltma katsayısı (EC-2-2014)
v_{cc}	Çatlamamış basınç bölgesinde taşınan kesme kuvveti
v_{cd}	Çekme donatısı tarafından taşınan kesme kuvveti
v_{ci}	Çatlak içi kesme gerilmeleri tarafından karşılanan kesme kuvveti
v_w	Kesme donatısı tarafından karşılanan kesme kuvveti
V	Kesme dayanımı

V_{Ed}	Uygulanan kesme kuvvetinin tasarım değeri (EC2-2014)
$V_{Rd,c}$	Elemanın kesme donatısı olmadan kesme dayanımı (EC-2-2014)
$V_{Rd,max}$	Maksimum tasarım kesme kuvveti değeri (EC-22014)
V_c	Betonun kesme dayanımına katkısı (ACI-318-14)
V_{cr}	Kesitin kesmede çatlama dayanımı (TS-5002000)
V_d	Tasarım kesme kuvveti (TS-500-2000)
V_f	Yük etkilerinde eleman kesitinde oluşan kesme kuvveti değeri
V_n	Nominal kesme dayanımı (ACI-318-14)
$V_{r,max}$	Mümkün olan maksimum kesme kuvveti (CSA A.23.3-14)
V_r	Kesme dayanımı (TS-500-2000)
V_s	Kesme donatısının kesme dayanımına katkısı (ACI-318-14)
V_u	Yük etkisi altında eleman kesitinde ortaya çıkan kesme kuvveti (ACI-318-14)
V_w	Kesme dayanımına kesme donatısı katkısı (TS500-2000)
y	Beton en dış basınç lifinin tarafsız eksene olan uzaklığı
z	Moment etkisindeki eleman kesitinde etkili derinlik (EC-2-2014)
x	Basınç bölgesinde tarafsız eksene kadar olan uzaklık (EC-2-2014)
x_1	Birinci sıradaki donatının ağırlık merkezine olan uzaklığı
x_c	Kuvvet uygulanan taraftaki kolon yüzünden basınç bloğu bileşkesinin uzaklık
x_i	Donatı ağırlık merkezinden kesit ağırlık merkezine olan mesafe
x_p	Ağırlık merkezi uzaklığı
β_1	Beton basınç bloğu derinliğini belirleme katsayısı (ACI-318-14)
γ_c	Beton için kısmi malzeme katsayısı (EC-2-2014)
ε_{ci}	Beton en dış basınç lifindeki birim kısalma
ε_{cu}	Beton ezilme birim kısalması (TS-500-2000)
ε_{cu2}	Basınç lifindeki maksimum birim kısalma (EC-22014)
ε_{s1}	Birinci sıradaki donatıda uzama
ε_{su}	Donatı kopma uzaması (TS-500-2000)
ε_{su}	Çeliğin maksimum izin verilen birim uzaması (ACI-318-14)
ε_x	Eleman kesitinin ortasındaki boyuna şekil değiştirme (CSA A.23.3-14)
ρ_1	Boyuna donatı oranı (EC-2-2014)

ρ_t	Kolonlarda boyuna donatı oranı
ρ_t	Kolonlarda toplam boyuna donatı oranı (TS-5002000)
ρ_w	Hacimsel sargı donatısı oranı
σ_2	2 doğrultusundaki yanal basınç gerilmesi
σ_3	3 doğrultusundaki yanal basınç gerilmesi
σ_{cp}	Eksenel yük durumunda betondaki basınç gerilmesi (EC-2-2014)
σ_s	Donatı gerilmesi (TS-500-2000)
σ_{si}	Donatıdaki gerilme
ϕ_c	Beton için dayanım azaltma katsayısı (CSA A.23.3-14)
ϕ_s	Çelik için dayanım azaltma katsayısı (CSA A.23.3-14)
Ψ	Mekanik donatı oranı
β	Çatlamış betonun kesme dayanımı hesabında kullanılan bir katsayı (CSA A.23.3-14)
γ	Çatlama dayanımına eksenel kuvvet etkisini yansıtan katsayı (TS-500-2000)
γ	Betonun yoğunluğuna bağlı bir katsayı (CSA A.23.3-14)
η	Beton basınç bloğu gerilmesini belirlemede kullanılan katsayı (EC-2-2014)
θ	Elemanın kesme kuvvetine dik eksenile kafes basınç çubuğu arasındaki açı (EC-2-2014)
θ	Diyagonal basınç çubuğunun kesme kuvvetine dik eksen ile yapmış olduğu açıdır (CSA A.23.314)
κ	Eğrilik değeri
λ	Beton basınç bloğu derinliğini belirlemede kullanılan katsayı (EC-2-2014)
ϕ	Boyuna donatı çapı (TS-500-2000)

Kısaltmalar

ACI	American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü)
BYKHY	Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik
CEB-FIB	The Comité européen du béton (European Committee for concrete) (Avrupa Beton Komitesi)- The Fédération internationale de la précontrainte (International Federation for Prestressing) (Uluslararası Öngerme Federasyonu)
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer (Karbon Fiber Takviyeli Polimer)
CSA	Canadian Standards Association (Kanada Standartları Birliği)
FRP	Fiber Reinforced Polymer (Fiber Takviyeli Polimer)
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer (Cam Fiber Takviyeli Polimer)
LP	Lifli Polimer
SFRC	Steel Fiber Reinforced Concrete (Çelik Lifli Beton)
TS	Türk Standardı

1. GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle mühendislik bilimi alanında da önemli gelişmeler yaşanmaktadır. Yeni yapı malzemelerinin üretimi, bu malzemelerin yapılarda kullanımı ile farklı tip yapısal tasarımların geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Dolayısıyla gelişen ve değişen bilim sayesinde mühendislik kendi alanındaki yönetmeliklerde eksik olan, yeterince değinilmemiş durumlar üzerinde daha detaylı çalışmalar yapma fırsatı yakalamıştır. Örnek vermek gerekirse, yapılarda yüksek sıcaklık etkisi (yangın, patlama vb. yüksek sıcaklığa sebep olabilecek afetler) hem Türk Deprem Yönetmeliği hem de Binaların Yangından Korunması Hakkındaki Yönetmelikte yeterince işlenmemiştir. Literatür incelendiğinde ise yapılan çalışmalar sadece betonarmede kullanılan malzemelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki durumlarının incelenmesi ve deneysel-kuramsal olarak ele alınmasından ibarettir.

Yüksek sıcaklık, mevcut tasarımlara bakıldığında ve betonarme yapı elemanları düşünüldüğünde önce beton sonrasında ise donatıya etki etmektedir. Betonu oluşturan her bir bileşen doğru tasarlandığında yüksek sıcaklığa karşı davranışı değiştirilebilir. Bu amaçla gerek betonarme elemanı oluşturan yapı malzemelerinin geliştirilip değiştirilmeye gerekse betonarme elemanın yüzeyinin kaplanması ile yüksek sıcaklığın etkilerinden korunmaya çalışılmaktadır. Yapı malzemelerinin yangına, yüksek sıcaklığa karşı davranışı incelendiğinde ahşap, çelik ve doğal taş ile inşa edilen yapılara oranla en dayanıklı malzemenin betonarme yapılar olduğu bilinmektedir. Bu gerçeğe rağmen betonarme elemanların yüksek sıcaklık başarımları uzun süreli etkiye durumlarında yeterli değildir. Şöyle ki depremden dolayı oluşan maddi hasar, ülkemizde yangın

etkisiyle yüksek sıcaklığa maruz kalan yapılarda oluşan hasardan daha azdır (Selamet, 2017).

Betonda yüksek sıcaklık etkisinde tasarımsal olarak malzemeye bakıldığında silis muhteva eden agregalar ve çimentolar, 573°C sıcaklıkta silis %15 hacimsel artışı göstererek betonda bu artıştan kaynaklanan parçalanmalar meydana gelmektedir. Yerleştirilme işlemi doğru yapılmamış taze beton yeterli piriz almadığı durumda serbest su içirme olasılığı yüksektir ve bu serbest su sıcaklık 100°C'de ulaştığında buharlaşarak betonun hasarına sebep olmaktadır. Ayrıca, hidratasyonu tamamlanmış betonda ise çimento hamurunda bağlı bulunan suyun 300°C sıcaklık değerinden sonra kimyasal bileşikten buharlaşıp bünyeden ayrılmasını arttırarak beton dayanımını hızla azaltmakta, böylece donatıda betonun geçirgenliğinin artması sebebiyle sıcaklık artışı artmaktadır. 530°C sıcaklıkta çimento bileşenindeki önem arz eden bir bileşik olan kalsiyum hidroksit %33 seviyelerinde hacim kaybına uğrayarak (bünyesinden su çıkışı) sönmemiş kireç oluşturmaktadır. Bu durum bir yangın esnasında müdahalede bulunulan su ile sönmemiş kireç bünyesine su alarak tekrar kalsiyum hidroksite dönüşür ve %44 oranında hacimsel bir artışa neden olmakta ve bu hacimde ani değişiklikler oluşturarak betonda çatlaklar oluşturmaktadır. İnşaat çeliği ise bu aşamalarda sıcaklık 400°C'yi geçtikten sonra artık akma mukavemetini kaybederek davranış olarak gevrek bir hal almaktadır. Tasarlanan yapı hizmet ömrünün azalmasına sebep olabilecek bu durumlar için betonarmede kullanılan yapı malzemelerinde yüksek sıcaklık etkileri iyi analiz edilerek yapılacak tasarım değişiklikleri yapıda mekanik davranış olarak da yüksek başarımlar sağlayacaktır (Yüzer, 2001).

Gelişen teknoloji ve sektörde doğan ihtiyaçlar neticesinde fiber takviyeli polimerlerin kullanımı merak konusu olmuştur. Çeliğin korozyona uğraması işçiliğinin ağır olması, nakliyesinin ve yapıyı ağırlığını arttırması gibi dezavantajlarının olması FRP donatıların tüm bu sayılan durumlarda çeliğe göre üstün olması, yüksek sıcaklıklardaki başarımının araştırmaya değer bir konu olmasını sağlamıştır. Bu çalışmada yüksek sıcaklıkların GFRP (cam lif takviyeli polimer) donatılı ve çelik etriyeli betonarme kirişlere etkileri incelenmek amacıyla laboratuvar ortamında yüksek sıcaklık sağlayan seramik fırını içerisinde 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 800°C'ye kadar ısıtılmıştır. Böylece donatı çeliği yerine ve onunla birlikte kullanılan GFRP donatıların yüksek sıcaklık etkilerinde beton ile olan mekanik uyumu ve davranışı yapısal bir eleman olan kirişler üzerinden incelenmiştir. Ayrıca malzeme mekanik özelliklerini bilmek adına GFRP ve çelik donatıların yüksek sıcaklık etkisinde mekanik özellikleri ile beton-donatı arasındaki aderans davranışları da incelenmiş ve GFRP donatıların betonarme yapılarda kullanımı üzerine değerlendirmeler yapılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Literatürde yüksek sıcaklık etkisi altında betonarme elemanlar ve onu oluşturan malzemeler üzerine birçok deneysel ve kuramsal çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar yapı malzemeleri olarak; beton, betonu oluşturan agrega ve çimento ile donatılar üzerine olduğu gibi betonarme elemanlar üzerine beton ile donatı arasındaki mekanik birleşimin ne şekilde değiştiği hakkında bilgiler verilmektedir.

2.1. Yüksek Sıcaklık Etkileri Altında Beton, Çelik Donatılar, FRP ve Betonarme Yapı Elemanları

Yüzer vd. (2001) yangına maruz kalan betonarme elemanların basınç dayanımı ve betonun aşamalı olarak yüksek sıcaklık etkisindeki renk değişimine göre suda ve havada soğutulan numuneler üzerinden basınç dayanımı-renk değişimi ilişkisini araştırmışlardır. Çalışmada betonun kimyasal yapısı üzerinde durulmuş ve yüksek sıcaklığın yapı malzemelerine etkileri deneyler ve geçmiş çalışmalarla desteklenerek açıklanmıştır.

Ünlüoğlu vd. (2007) yüksek sıcaklıklarda kalan donatıların malzeme özelliklerine pas payının etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. En uygun pas payı miktarının belirlenmesi yönünde sonuçlar sunmuş ve betonarmenin yangına karşı başarımında pas payının büyük bir önemi olduğunu vurgulamışlardır. Pas payı arttıkça donatıların mekanik özelliklerindeki değişimin azaldığı gözlemlenmiştir.

Karanfil (2007) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise yangın etkisi sonucunda betonarme donatılarında oluşabilecek hasarların belirlenebilmesi için yapılarda sıkça kullanılan dört farklı pas pay kalınlığı ile deneyler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, pas payının donatının sıcaklığın olumsuz etkilerine karşı korunmasında büyük etkisi olduğunu göstermiştir.

Bingöl ve Gül (2009) yüksek sıcaklık etkilerinin beton basınç dayanımına ve betonla çelik arasındaki aderansa etkileri konusunda bir derleme sunmuşlardır. Bu derleme, birçok çalışmanın bir arada ele alınarak genel ve tam bir değerlendirmenin yapılması adına önem arz etmektedir. Yüksek sıcaklığın beton üzerindeki etkisi, beton ile donatı arasındaki

aderansa etkilerini çeşitli literatür taramalarıyla açıklayıp kendi çalışmasıyla desteklemiştir.

Belirtilen çalışmalar ile ilgili olarak edinilen sonuçlar önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlar doğrultusunda, beton numunelerin yüksek sıcaklığa maruz kalmasından sonra mekanik dayanımlarında önemli değişiklikler olduğu gözlenmiştir. Betonun diğer malzeme türlerine göre yanmaz sınıfta olduğu ve yangın etkisinde yüksek başarım gösterdiği bilinmesine rağmen yüksek sıcaklığa maruz kaldığında karakteristik olarak basınç çekme ve eğilme mukavemetlerinde düşüşler görülmektedir. Bununla birlikte beton 200°C sıcaklığa kadar mekanik özelliklerinde azalmadan ziyade bir miktar artış olduğu betondaki iç aderansın hidrasyonunu tamamlamamış çimentonun sıcaklık artışıyla bu olayı tamamlaması olarak farklı çalışmalarda dile getirilmiştir. Daha yüksek sıcaklıklardaki dayanım kaybının sebebi ise beton bünyesinde bulunan agregaların hacimlerinin artışı, çimeto hamurundaki C-S-H jelleri arasındaki bağların zarar görmesi ile oluşan büyük ve kılcal çatlaklar olarak gösterilebilir. Yüksek sıcaklık etkisine maruz beton sınıflarında yüksek dayanımlı betonlar yapılarında hidrate olmuş bağlı suyun daha düşük dayanımlı betonlara göre daha fazla olması ve 300 °C’ de bileşik olarak ayrılması nedeniyle daha kötü bir davranış göstermektedir. Polipropilen, çelik ve iç aderansı arttıracak parça atmaları engelleyecek tipteki liflerin bu tür betonlarda kullanımı yangın başarımını arttırmaktadır. Ayrıca yüksek sıcaklık etkisine bırakılan ve soğutulma şekilleri farklı olan betonlarda da dayanım sonuçları farklı olmaktadır. Örneğin; suda soğutulan beton numuneler anlık olarak sıcaklık düşüşüne sebep olması nedeniyle hacim genişlemesi yaşayarak daha fazla hasar almıştır. Deney ortam şartları ve betonda kullanılan malzeme özellikleri ve deney düzeneklerinin tasarımı da sadece kendi içerisinde değerlendirilmeye tabi bir araştırma olarak incelenmelidir.

Bingöl ve Gül aderans üzerine derlemelerindeki literatür çalışmaları incelendiğinde; aderans etkilerinin irdelenmesinde çok farklı çalışmalara ihtiyaç duyulduğu ve betonarme bir yapıda aderansın tam olarak değerlendirilmesinin yapı performansındaki aderans gerilmelerinin tam karşılığı olarak bir çalışmanın ortaya konulamadığı sonucuna varılmıştır. Bu amaçla aderans konusunda uygulaması kolay olduğundan çok kullanılan bir deney olarak çekip çıkarma deneyi öne çıkmaktadır. Çalışmalarda aderans

kuvvetlerinin beton ve donatı özelliklerine göre değişkenlik gösterdiği de belirtilmiştir. Şöyle ki, beton basınç dayanımı arttığında çekme mukavemeti de artacağından aderans kuvveti artmış, çelik gömme boyu ve çapı arttığında da aderans kuvveti artmıştır. Donatı çapı aynı tip beton için arttığında gömme boyunun da beraberinde artmasının gerektiği donatı sıyrılmadan donatıda akma gerçekleşerek gerekli tutunmanın ancak bu şekilde sağlanacağı belirtilmektedir. Korozyona uğramış donatı için yapılan çalışmalarda ise aderans kuvvetleri donatı yüzeyine betonun tutunamamasından kaynaklı olarak azalmıştır. Betonda silis dumanı ve ucucu külün çimento ile %10-%20 seviyelerinde ikame kullanımı sonucunda ise nihai basınç dayanımı artacağından aderans kuvvetlerinde eski duruma göre artış sağlandığı belirtilmiştir.

Yüksek sıcaklık etkisindeki malzemeler olan beton ve donatının aderansına yönelik yapılan çalışmalar da yine Bingöl ve Gül tarafından derlemede yer almıştır. Birçok değişkenin önem arz ettiği bu çalışmalarda beton ile donatı arasındaki aderansa beton dayanımı deneylerin yapılma şekline, kullanılan malzemelerin karakteristik özelliklerine , en yüksek sıcaklık değerine, soğutma türlerine ve donatı gömülme boyuna bağlı olarak birden fazla etken etkimektedir. Çalışmalardan elde edilen bilgilere bakılarak aderans değerleri farklı çalışmalarda 100°C'den 400°C'ye kadar artış gösterdiği ancak genel olarak 200°C üzerindeki sıcaklıklardan sonra aderans kuvvetlerinde ise düşüşler görüldüğü belirtilmiştir. Dişli-nervürlü donatıların düz yüzeyli donatılara göre, havada soğutulan beton numunelerdeki aderansın ise suda soğutulan numunelere göre aderans kuvvetlerinin fazla olduğu belirtilmiştir. Ancak beton numunelerin soğutma türlerinin 500°C'den sonra betondaki hasarın zaten çok fazla olduğu sıcaklık değerlerinden sonra aderans kuvvetlerine etki etmediği de bildirilmektedir.

Donatı beton arası aderansa yüksek sıcaklığın etkisi, öncelikle betonun yüksek sıcaklıkta nasıl davranış gösterdiği, ardından donatı-beton arası aderansın nelerden etkilendiği ve son olarak sıcaklığın aderansa etkisi şeklinde ele alınmıştır. Beton yapısındaki agrega ve mineral katkıların deney türüne göre beton dayanımını arttırıp aderansı arttırdığı ancak sıcaklık etkisinde çalışmalardan yola çıkılarak yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanımlı betonlarda patlamaların ve hasarın fazla olup aderansı kötü etkilediği çelişkili bir durum ortaya çıkmıştır. Yani yüksek dayanımlı beton nem içeriği ve agrega ve çimento

yapısındaki kuvarz miktarı, yapısındaki boşluk oranı ve katılan mineral katkının etkisi ile aderansa yüksek sıcaklıklar altında olumsuz etki yaptığı anlaşılmıştır.

Burnaz (2010) yapmış olduğu çalışmada, yangın etkisinde kalan beton ve donatıya uygun yangın davranış modelleri geliştirmiş ve betonun kavlanması ile betonarme kesitlerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki yapısal kesit davranışlarını bilgisayar ortamında doğrusal olmayan çözümlemeleri kullanarak incelemiştir. Çalışmasında betonu oluşturan yapı malzemelerinin seçiminin yangın başarımına etkisi hakkında geçmiş çalışmalardan karşılaştırmalı örnekler vermiştir.

Çalışmada kullanılan programlar deneylerin uzunluğu göz önüne alındığında çok yarar sağlamıştır. Malzeme konusunda silisli, kalkerli ve hafif agregalardan yapılmış ayrı ayrı betonların yangın başarımları için yorumlar kimi zaman silisli agrega kimi zaman kalkerli agrega kimi zaman ise hafif agregada daha çok verim alındığı üzere yapılmış. Ancak bilinen diğer çalışmalara göre hafif agregalı betonların yangın başarımları daha yüksek beklenmektedir.

Çalışmada son olarak etriyeli betonarmelerde yapılan bir çalışmada etriye kulaklarının 135° içe bükülmediği durumlarda beton kesitte kavlanma gerçekleştiği, içe büküldüğü durumlarda ise yani kulakların kesit içine baktığı durumlarda ise kavlanma sadece pas payında gerçekleştiği ifade edilmiştir. Bu durumun etriye yapımında donatı yerine kullanılacak başka yapı elemanlarda ne gibi durumlara sebebiyet verdiği araştırılabilecek konular arasındadır.

Kaygusuz (2008) yangın hasarına uğramış betonun GFRP şeritler ve epoksi enjeksiyonu ile onarım ve güçlendirilmesi üzerine çalışmalar yapmıştır. Çalışmada FRP malzemeleriyle ilgili genel bilgi verilerek kullanım alanları ve uygulamaları anlatılmıştır.

Çalışmada yangın etkisinin betonarme elemanlarda incelenmiş ve onarım olarak FRP sargı malzemesi uygulanmıştır. FRP nin bomba ve endüstriyel kaza gibi patlamalarda, mermi etkisinde yapıyı koruduğu bilgisine yer verilmiştir ancak kaç °C sıcaklıkta dayanımını muhafaza ettiğine değinilmemiştir. Sargı uygulamasında köşe dönüşlerin keskin, küt olmasında yük aktarımı olmaması donatı yerine sargı olarak kullanıldığında göz ardı edilmemelidir. Ayrıca reçine ile iyi bir başarımlar gösteren ve performansını onunla

yaptığı aderanstan alan bu malzemenin beton ile yapacağı aderans da araştırılmalıdır. Sonuçlar bölümünde yazarın belirttiği gibi çok katlı sargı uygulamalarında FRP yangın dayanımı araştırılması gerektiği bilgisine yer verilmiştir. Ancak onarımın gerçek yangına maruz kalmış binalarda numuneler kadar dayanım kazanıp kazanmadığı (özellikle kolon kiriş birleşim yerleri) ve onarım sonrası tekrar yangına maruz kalındığında yapısındaki reçinenin nasıl bir davranış göstereceği de araştırmadan çıkarılan başka bir sonuçtur.

Yavuz (2011) ise lif takviyeli polimerlerin betonarme kirişlerde donatı olarak kullanımı hakkında detaylı çalışmalar yapmıştır. FRP donatıların detaylı ve örnekler verilerek açıklandığı bu çalışmada, bu malzemenin beton içerisinde kullanımına bakıldığında aderans durumu hakkında detaylı değerlendirmeler yapılmıştır.

FRP malzemesini detaylı ve örnekler verilerek açıklandığı bu çalışmada, bu malzemenin beton içerisinde kullanımına bakıldığında diğer çalışmalarda bahsedildiği gibi aderans durumu sıkıntı yaratmaktadır. Önceki çalışmalara ek olarak kumlama yapılarak kullanılan FRP donatıların aderans davranışı ise gevrek olmaktadır. Aderanslı çelik helezonik tel sarma ya da FRP'nin nervürlü üretilmesi gibi bu ikincil işlemler yapılması durumunda FRP yapısındaki matris (bağlayıcı reçine) aderans etkisinde mekanik bozulmaya uğrayabiliyor. Yangın durumunda da bilgi verilen bu çalışmada sorunun sadece matriste olduğuna açıklık getirmiş ve FRP nin yapısını bir arada tutan bu malzemenin sıcaklıkla bozulması FRP liflerinin çalışmasını olumsuz etkiliyor. Beton paspayı ve matris tipi (kaynaklara göre en uygun epoksi reçine, o da max 160°C sıcaklığa kadar korunabilmektedir) bu bozulmaya etki eden etkenler.

3 cm paspayı 600°C'lik 1 saatlik yangında donatı sıcaklığını 350°C ye kadar çıkardığı düşünüldüğünde pas payından başka sıvanın da önemini arz etmektedir. FRP gevrek ani kırılması burada işlenmiş ve çözümü hibrit (FRP+çelik) beton elemanlarda bulmuş. Ancak hibritler normal FRP'ye oranla daha sünek ve yüksek kırılma momentli etkisi de gösterebilir yangın etkisinde davranışları (FRP davranışı) bilinmemektedir. Etriye olarak FRP kullanılması zor çünkü daha önceki çalışmalarda ve bu çalışmada da bükülme esnasında FRP esnek olduğundan keskin bir büküm yapılamamaktadır. Bu da oval büküme rağmen o kısımlarda yük etkisinde gerilme birikmelerine neden olup gevrek

kırılmalara neden olmaktadır. Ayrıca FRP donatılı betonarmelerin yüksek dayanımlı betondan imal edilmesi FRP nin yangın başarımını arttırmaktadır.

Cullazoğlu (2014) tarafından gerçekleştirilen çalışmada da FRP donatılı betonarme kirişlerin eğilme ve kesme etkisi altındaki analizleri ele alınmıştır. FRP ve çelik donatının kullanımı ile ilgili olarak eğilme ve kesme durumlarındaki davranışları hakkında önemli bilgiler veren bu çalışmada hibrit kirişlerde çelik ve FRP'nin birlikte kullanımı ile kirişlerin hem süneklik hem de rijitlik kazanabildiği sonucu vurgulanmıştır.

Bu çalışmada adı geçen hibrit kirişlerin çelik ve FRP nin birlikte kullanımı ile kirişler hem süneklik hem de rijitlik kazanmaktadır. Tabi bu karşılaştırma sadece FRP kullanılarak yapılan kirişlere oranla böyledir. Korozyon etkisine güzel bir çözüm olan FRP'nin yangın ve diğer bahsedilen başarımlar konuları hakkında durumu geçmiş akademik çalışmalarda düşük başarımlar oranına sahiptir.

Yaz, M. (2014) betonarme kirişlerde GFRP kullanımı ve eğilme davranışı üzerine çalışmalar yapmıştır. Çalışmalarında GFRP'nin olduğu kirişlerin gevrek bir şekilde çelik ile birlikte kullanılan hibrit kirişlerde ise çelik donatının artmasına bağlı olarak bu durumun sünekleşmeye yaklaştığı bilgilerini vermiştir.

Huang, Z. (2010) betonarme yapısal elemanlarda yüksek sıcaklık etkilerinde çelik donatı ve betonun mekanik özelliklerinde sıcaklık kaynaklı bozulma sonucu yapısal dayanım azalmaları yaşadıklarını ve yüklemeler altında başarımlarının azaldığını belirtmektedir.

BYKHY (2009) (Binaların yangından korunması hakkındaki yönetmelik) yönetmeliğine göre Betonarme veya betonarme-çelik kompozit elemanların yangına karşı dayanıklı olabilmesi için, içindeki çelik profil veya donatının en dışta kalan kısımları olan pas payının, kolonlarda en az 4 cm ve döşemelerde en az 2.5 cm kalınlığında beton ile kaplanmış olması gerektiği belirtilmiştir.

Kodur vd. (2008) betonarme kiriş numunelerinin yüksek sıcaklık etkisi altında eğilme davranışları incelenmiş olup, göçme düzeyine yaklaşan davranışlarını belirleyebilen makroskopik bir sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Bu çalışmada yangın senaryoları, yük seviyesi, beton pas payı, agreganın tipi, hasar ölçütleri ve açıklık

uzunluğunu kapsayan altı değişken betonarme kiriş numunelerinin eğilme davranışları hakkında bilgi edinmekte kullanılmıştır. Bu değişkenler betonarme kirişlerin yüksek sıcaklık etkilerinde dayanım açısından değerlendirildiğinde büyük önem arz etmektedir.

Jau, W._ve_Huang, K._(2008) çalışmalarında betonarme yapıların yangın başarımlarının iyi olduğunu ve genellikle ek bir yardıma ihtiyaç duymadıklarını belirtmişlerdir. Ancak bu durumun yangının süresi ve yapı malzemelerinin bu süre zarfında ulaştıkları en yüksek sıcaklıklara bağlı olarak dayanımlarındaki azalışa değinmişlerdir.

Dwaikat vd. (2009) betonarme kiriş numuneleri üzerindeki çalışmalarında donatı ve beton üzerindeki sıcaklık artışlarını ve bunun dayanım kaybına ulaştığı maksimum noktaları belirlediklerini belirtmişleridir. Dayanımın en kritik kayıp noktaları çelik donatıda 500 °C ve betonda ise 200 °C kritik sıcaklık olarak belirtilmiştir.

Zha (2003), yüksek sıcaklığı yangın kaynaklı olarak gören çalışmada yangın etkisinde kalan kolon ve kiriş gibi taşıyıcı betonarme elemanların çeşitli yükleme durumlarında 3 boyutlu doğrusal olmayan ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapılan bir sistem geliştirmişlerdir. Bu çalışmada tek ve üç ayrı yüzeyden yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan numunelerden 3 eksenenden yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde hasar büyük olmuştur.

Uysal (2004) çalışmasında çeşitli betonarme yapı elemanları için ısı iletim durumlarını incelemiş ve bunun için de betonarme elemanların matematiksel modellemesini yapmıştır. Modellemede perde, kiriş, kolon ve döşeme elemanlar kullanılmıştır. Yüksek sıcaklık etkileri döşemede tek yüzey, kolonda dört yüzey perdede iki yüzey ve son olarak kirişlerde üç yüzeyden etki ettiği düşünülmüştür. tarafından yapılan bir çalışmada ısı iletimi durumları çeşitli betonarme yapı elemanları için incelenmiştir. İlk olarak betonarme yapı elemanlarının matematiksel modellenmesi yapılmıştır. Daha sonra uygun sınır koşulları için özel çözümler elde edilmiştir. Hesaplar için betonarme perde, kolon, döşeme ve kiriş elemanlar kullanılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinin perde elemanların iki yüzeyinden, kolon elemanların da dört yüzeyinden uygulandığı düşünülmüştür. Çalışmada sonuç olarak eleman kesitlerinin büyümesiyle sıcaklık iletimi azalacağından yangın etkisinde kesit başarımlarındaki düşüşün azaldığı tespit edilmiştir.

Şentürk (2006) Yüksek sıcaklık etkilerine ek olarak deprem etkisinin de incelendiği bu çalışmada; SAP2000 sonlu elemanlar yöntemi ile bir otel binası için sayısal analiz çalışması yapılmıştır. Yangın etkisi ile depremin aynı anda olma ihtimalinin düşük olduğu düşünülmüş ve çalışmalar analizler ayrı olarak yapılmış ve yüksek sıcaklık için yapısal deplasmanların artış gösterdiği bilgisine yer verilmiştir

Bingöl (2008), çalışmasında yüksek sıcaklıkta bekletildikten sonra olarak havada ve suda soğutulan farklı beton sınıflarına sahip numunelerde beton ile donatı arasındaki aderans kuvvetleri karşılaştırılmıştır. Havada soğuyan ve gömme boyu en fazla olan numuneler yüksek sıcaklık etkisinde suda soğuyan numunelere göre daha iyi sonuçlar vermiştir. İmal edilen numunelerin 50°C – 700°C sıcaklık seviyelerinde 13 farklı sıcaklığa tabi tutulup havada ve suda soğumaya bırakılmıştır. Numunelerde aderans kuvveti çekip-çıkarma deneyleri sayesinde belirlenmiştir. Kritik sıcaklık düzeyi 700°C olarak belirlenmiş ve bu sıcaklıktan sonra her numune için aderans kayıpları yüksek boyutlara ulaşmıştır.

Coşkun vd. (2007), çalışmalarında mineral katkılı beton ile nervürlü-dişli (Ø12) betonarme donatı arasındaki aderans kuvvetlerine sıcaklık etkilerinin (800 °C) etkisini araştırmıştır. Mineral katkılar çimeto ile ikame kullanılarak üretilen betonlarda C60 sınıfı beton elde edilmiştir. Aderans deneylerinde 100*200 mm ölçülerinde silindir kesitli numuneler basınç deneylerinde 150*150*150 mm ölçülerinde küp kesitli numuneler kullanılmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamış betonlara göre 800 °C sıcaklıkta bekletilen tüm numunelerin basınç dayanım test sonuçlarında yaklaşık %57 ile 60 oranında azalış yaşandığı görülmüştür. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamış betonlara kıyasla 800 °C sıcaklıkta bekletilen tüm numunelerin aderans kuvvetlerindeki azalış ise yaklaşık olarak %70 ile 75 olarak belirlenmiştir. Silis dumanı ikameli beton numuneler

tüm sıcaklıklarda en yüksek basınç ve aderans kuvveti sonuçlarını vermiştir. Sonuç değerleri sıralamasında uçucu kül ikameli ve katkısız beton numuneleri şeklinde devam etmiştir.

Döndüren vd. (2006), çalışmalarında betonla ile donatı arasındaki aderans kuvvetleri davranışının beton dayanımı, donatı dayanım sınıfı, enine donatı dağılımı ve gömme boyuna göre değişimlerini, bununla birlikte donatı ve beton mekanik özelliklerinin, betonarme kesit ve taşıyıcı eleman çeşidinin, beton ile donatı aderans kuvvetlerini nasıl değiştirdiği incelemiştir. Bunun amaçla, 16 adet olarak üretilen deney numunelerinin 8 adedi etriyeli, 8 adedi etriyesiz olarak üretilmiştir. Etriyelerde imal edilen donatı çapı 8 mm, numunelerin orta kısımlarından geçirilen donatıların çapı ise 12 mm olan BÇI ve BÇIII çelikleri seçilmiştir. Kiriş olarak üretilen numunelerin yükseklikleri ve genişlikleri 20 cm, uzunlukları ise beton-donatı kenetlenme boyu olan 30, 50, 60 ve 70 cm olarak belirlenmiştir. I. Grupta beton C16 sınıfı , donatı BÇI sınıfı olarak seçilmiştir. II. Grupta ise beton sınıfı C16, donatı BÇIII sınıfı olarak belirlenmiştir. III. Grupta da beton C25 sınıfı, donatı BÇI sınıfı olarak belirlenmiştir. C25 betonundan imal edilen numunelerin aderans dayanımı, C16 ile imal edilen numunelerin aderans kuvvetlerinden %64 daha iyi sonuç vermiştir. C25-BÇIII-etriyeli numunelerde donatı kopmuştur. Etriye ile hazırlanan numunedeki aderans, etriyesiz olanlara kıyasla I. II. ve III. grupta sırasıyla %34, %28 ve %41 daha fazla çıkmıştır.

2.2. Yüksek Sıcaklık Etkileri Altında GFRP Donatılar

Carvelli vd. (2012) çalışmasında GFRP donatılar çoğunlukla betonarme elemanlarda, örneğin korozyon direncini iyileştirmek için köprü taşıyıcılarında kullanılmaktadır. GFRP ile ilgili statik ile ilgili çeşitli çalışmalar yapıldıysa da yangın/ısı direnci için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Bu makale, bölgesel olarak yüksek sıcaklıklara maruz kalmış olan GFRP donatılarla güçlendirilmiş beton kirişlerin statik davranışlarını deneysel bir araştırma ile anlamayı hedeflemektedir. Bu çalışmada iki parametre değişkendir; numunelerin alt kısımlarına uygulanan en yüksek sıcaklıklar (230°C ile 550°C), ve bindirme boylarındaki yerleşimlerdir. Mekanik olarak kiriş davranışları üç noktada yükleme testi ile oda sıcaklığında ve sonrasında da belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılarak araştırılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, donatı geometrisi, numunelerin birincil rijitliğine kıyasla, nihai yük üzerinde daha ilişkili bir etkiye sahiptir. Bölgeselleştirilmiş ısıtmanın sıcaklığı, beton içinde hasar ve çökmeye neden olmaksızın GFRP donatıların matrisinde kısmi buharlaşma oluşturmuştur. Yük taşıma kapasitesinin azalışı temel olarak bindirme bölgelerindeki güçlendirme geometrisine dayanmaktadır.

Hamad vd. (2017) makalesinde, FRP çubukların ve FRP çubuklar ile beton arasındaki aderansın mekanik nitelikleri üzerine yapılan yüksek sıcaklıkların deneysel çalışmaların sonuçlarını sunmaktadır. 4 tip donatı kullanılmıştır, BFRP (Bazalt Fiber Takviyeli Polimer), CFRP, GFRP, ve 10 mm çaplı çelik çubuklardır. Sonuçlara göre, 450°C 'ye kadar olan yüksek sıcaklıklara maruz kalan FRP çubukların mekanik niteliklerinde ciddi düşüşler olduğu, GFRP ve BFRP lerin ise eriyip toplam gerilimsel dayanım kapasitelerini kaybettiği görülmüştür. 325°C 'lik kritik sıcaklıkta, FRP çubuklar %55'lik gerilimsel dayanımlarını, ve elastisite modüllerinde %30'luk kayıp yaşamışlardır. Bu mekanik niteliklerdeki ve aderanstaki yüzdesel azalış, çelik çubuklardakine nazaran FRP çubuklu numunelerde yüksek sıcaklıklarda daha belirgindir. Beton ve FRP çubuklar arasındaki aderansın oluşan yüzdesel azalışlar, 325°C sıcaklıklara maruz kalındıktan sonra %81,5'lere kadar ulaşmıştır. Deneysel sonuçlara dayanarak, FRP çubuk ve onu saran beton arasındaki ısıtma öncesi ve sonrası arasında sıyrılma- aderans ilişkisini tahmin eden ampirik bir model kurulmuştur, ve bu analitik model bu çalışmada iyi bir tahmin edilebilirlik olduğunu göstermiştir.

Ashrafi vd. (2017) deneysel çalışmasında, çeşitli FRP çubukların artırılmış sıcaklıklar altındaki fiziksel ve termal niteliklerinin performansları araştırılmıştır. Donatıların parametreleri için şunlar göz önüne alınmıştır: çap, fiber tipi, reçine tipi, fiberin matris oranı, ve ısıl/termal nitelikler. Sonuçlar göstermiştir ki, fiberin matrise olan oranı etkinsiz bir etkindir. Ayrıca, FRP çubukların 450°C gibi uç sıcaklıklara maruz kalması durumunda nihai gerilimsel dayanımlarının ciddi azaldığını, ve (sonucunda) yaklaşık %50-70 civarında referans numunelerine göre gerilimsel dayanımlarını kaybettikleri tespit edilmiştir. Ek olarak da, büyük çaplı donatılar yüksek sıcaklıklarda daha iyi gerilimsel performans göstermiştir.

Robert vd. (2010) çalışmasında, çelik donatılı betonarme elamanlardaki korozyon sorunu, betonarme yapılarda donatı olarak kullanılan FRP'ler üzerine araştırma yapmaya teşvik etmiştir. Uç sıcaklıklara bağlı olarak GFRP ile güçlendirilmiş donatıların davranışı Kuzey Amerika ve özellikle Kanada'daki uygulamalar için çok kritiktir. Bu makale, düşük sıcaklıklara (0-100°C aralığı) ve yüksek sıcaklıklara (23-315°C aralığı) bağlı olarak kum kaplanmış/kumlama yapılmış GFRP donatı çubukların mekanik niteliklerinin çeşitliliğini değerlendirmektedir. Sıcaklıktaki büyük değişimlere bağlı olarak, GFRP çubukların mekanik niteliklerinin ısıl stabiliteleri hakkında bir genel değerlendirme yapmak amacıyla, gerilimsel, kesme ve bükülme özellikleri araştırılmıştır. Polimer matrisin çok yüksek sıcaklıklarda mekanik nitelikleri, özellikle de sertliği/rijitliği ve bileşimlerin dayanımları ciddi biçimde azalmıştır. GFRP çubukların mekanik nitelikleri (gerilim, kesme ve bükülme dayanımları), ve bükülme elastikiyet katsayıları sıcaklık düştükçe artmıştır. Bu olay, biçimsiz polimer matrisin düşük sıcaklıklar yüzünden rijitliğinin artışı nedeniyle gerçekleşmiştir. Dahası, eğer malzeme yüksek seviye nem içeriyorsa, suyun donma yaşadığı sırada hacim artışı nedeniyle mikro çatlaklar oluşacak, ve matrisin rijitliğindeki artışa karşıt olarak/ mekanik nitelikler azalacaktır. Fakat, doymuş/doygun GFRP numunelerin düşük sıcaklıklara bağlı olarak (0 ile -60°C arası) kesilme ve bükülme dayanımlarına etki etmediği gözlemlenmiştir. Kanada'nın kuzey bölgeleri gibi -40, -50°C arasında değişen düşük sıcaklıklarda gerilimsel dayanım ve elastikiyetin bükülme katsayısının stabil olduğu, bunun da GFRP çubukların mekanik davranışının bu aralıktaki sıcaklıklardan etkilenmediğini ifade ettiği söylenebilir. 120°C gibi yüksek sıcaklıklarda, mekanik dayanım ve bükülme katsayısı, polimerin durumundaki değişim ve bozulma

reaksiyonu nedeniyle düşmüştür. 350°C gibi çok daha yüksek sıcaklıklarda, polimer matrisin ısıl bozulması nedeniyle, polimer içi mikro çatlaklar gözlenmiş, ve bunların gerilim dayanımı ile bükülme katsayıları üzerinde azalışa neden olduğu bulunmuştur. 350°C civarında polimer matrisinde önemli bir bozulma olayı meydana gelmiştir. Ölçülen ağırlık kaybı %18 olarak kaydedilmiş, ve GFRP örneklerinin 350°C’de 2 saat kalmasının ardından, Tg(sıvılaşma geçiş sıcaklığı) 113°C’den 67°C’ye düşmüştür. Son olarak, bu koşullandırma sıcaklıklarının gerçek koşullara göre daha sert olmasının nedeni, test edilen GFRP çubuk örneklerinin doğrudan hava ile temas etmesidir. Esasında, betona gömülmüş çubukların ayrışması reaksiyonu, polimer matrisinde oksidasyon reaksiyonunun yokluğu nedeniyle daha yavaş olacaktır.

Katz vd. (1999) Oda sıcaklığından (20°C) yüksek sıcaklıklara (250°C’ye kadar) kadar çıkan FRP donatı çubukların aderans nitelikleri incelenmiştir. Test sonuçları göstermiştir ki, sıcaklık 20°C’den 250°C’ye çıktığında, aderans dayanımı %80 ile %90 arasında azalışa uğramaktadır. Karşılaştırmak için bakıldığında, sıradan deforme olmuş çelik donatılar aynı sıcaklık aralığında yalnızca %38’lik azalış göstermektedir. Ek olarak, sıcaklık arttığında, bağ rijitliğinde azalış olduğu görülmüştür. FRP donatıların yüksek sıcaklıklara karşı daha büyük hassasiyeti olduğu, bu bağın ise temel olarak çubuğun yüzeyine yapılan polimer uygulamaya dayalı olduğu görülmüştür.

Ya-nan vd. (2011) sıcaklık artışıyla beraber, yüksek sıcaklık GFRP donatı testleri camlaşma, karbonlaşma,ve ayrışma durumları kötüleşmiş, ve mekanik nitelikleri bozulmuştur. Aynı zamanda, sınırlı gerilim dayanımı ve nihai gerilim elastikiyet katsayısı farklı sıcaklıklarda azalmıştır. 350°C’de GFRP yüzeyinin karbon temeli tamamen siyahlaşmıştır. Eğer sıcaklık 350°C’den fazla ise, gerilim dayanımı %20 veya daha fazla azalmıştır.

Kashwani vd. (2014) makalesinde, iki farklı grup GFRP kullanmış, tüm numunelere üç farklı hız oranında gerilim testi, 350°C’lik kritik sıcaklık için uygulamıştır. Sonuçlara göre, yüksek sıcaklığa maruz kalma nedeniyle gerilimsel dayanımda %32’lik düşüş olduğu, ve süneklikte/esneklikte artış olduğu ortaya çıkmıştır.

Masmoudi vd. (2010) makalesinde betona gömülü 80 adet çekip çıkarma numunesi olan GFRP çubuklar üzerindeki ısı etkileri araştırmıştır. Çekip çıkarma testi numuneleri 40°C, 60°C, ve 80°C sıcaklıklarına sekiz aylık sürekli bir dönem boyunca tabi olmuştur. Referans olarak oda sıcaklığı numuneleriyle karşılaştırıldığında, 60°C'ye kadar bağ dayanımı sıcaklık nedeniyle önemsiz olduğu, 80°C'de ise bağ dayanımındaki azalışın %14 olarak gözlemlenmiştir.

Abbasi vd. (2005) makalesinde su ve alkalin ortamın beton ile donatı arasındaki aderansı, ve GFRP donatıların 20°C ile 120°C arasındaki sıcaklıklardaki dayanımı ve rijitliğini incelemektedir. GFRP çubuklar alkalin çözeltide, 60°C'de üç farklı sürede (30, 120, ve 240 gün) maruz bırakılmıştır. Cam fiber-beton ara yüzü 20°C ile 120°C arasında artan sıcaklıkta bozulmaya uğramıştır. Ara yüz bağ dayanımı zamanla beraber oda sıcaklığında, bu belirtilen test koşulları altında artış göstermiştir. Alkali ortama maruz kalan malzemenin cam fiber dayanımı ve katsayısı yüksek sıcaklıklarda test edildiğinde düşüş göstermiştir. Ayrıca, bu test ortamına maruz kalan (alkali ve yüksek sıcaklık) donatının dayanımı ve rijitliğindeki bozulmanın büyüklüğü, bileşimin içerisindeki fiber ve matrisin stres/gerginlik transferi etkinliğine bağlıdır.

3. KURAMSAL TEMELLER

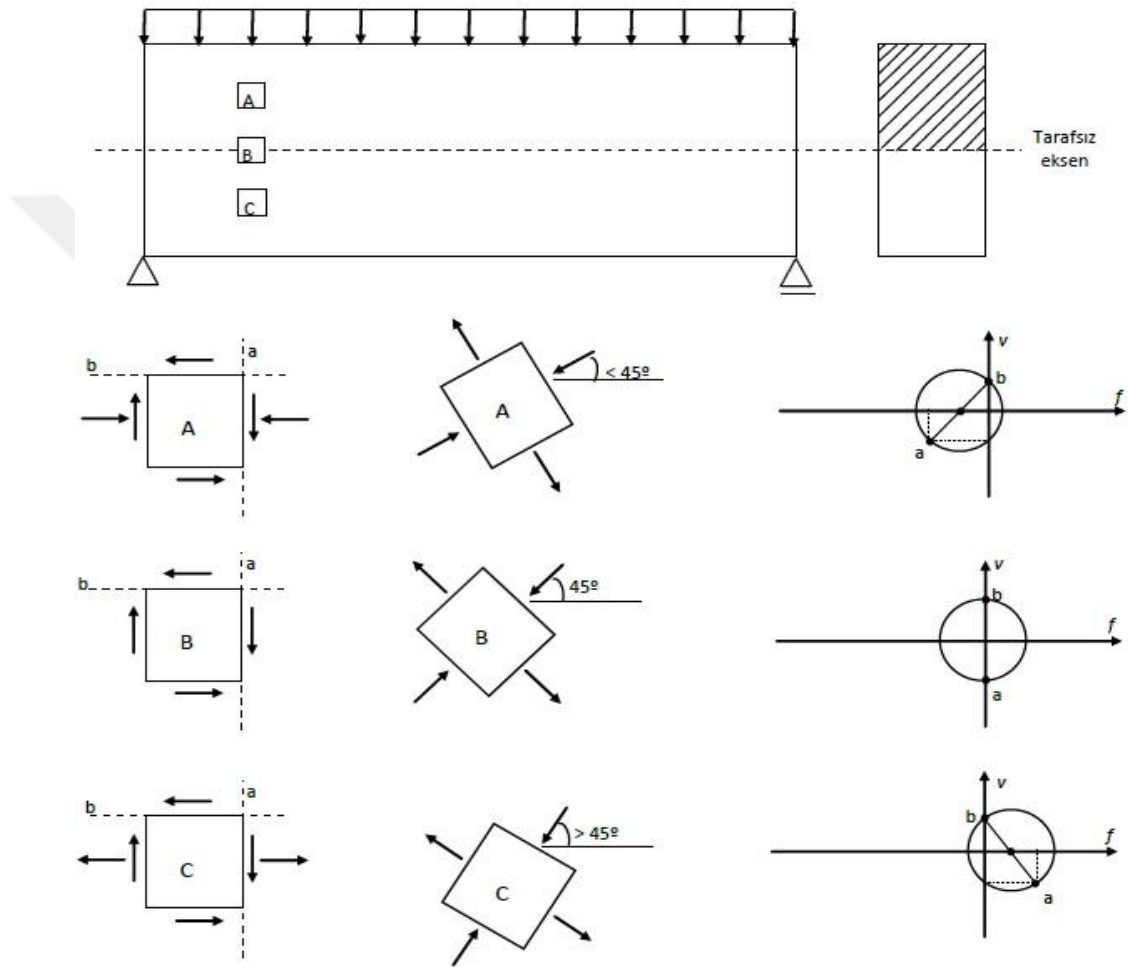
Çalışmanın bu bölümünde 15 cm en, 20 cm yükseklik ve 90 cm uzunluk olacak şekilde kesitleri tasarlanan kiriş numunelerin kiriş serbest açıklık ortasındaki tekil yük etkisinde eğilmeden dolayı göçmesinin sağlanabilmesi için tasarım kriterleri anlatılmaktadır. Bu amaçla kesme kuvveti etkisinde güçlü tasarlanarak eğilmeden göçebilmesi sağlanacak ve bu durumda çelik donatı yerine kullanılan GFRP donatının betonarme kirişteki eğilme davranışı incelenecektir. Aynı zamanda elde edilen Yük-Deplasman ve Moment-Eğrilik grafikleri ile kesitin eğilme altındaki tam davranışı tespit edilerek enerji yutma kapasiteleri de irdelenerek kesitin sönümleyebildiği enerji görülebilmektedir. Yüksek sıcaklık etkilerinin bu hesaplamalara nasıl etki ettiği de diğer kısımlarda detaylı olarak işlenecektir.

3.1. Betonarme Kirişlerde Kesme Etkisi

ASCE-ACI 426 (1973) 'ya göre kesmeden dolayı oluşacak göçme durumu; kirişlerde, kolonlarda, perdelerde, döşemelerde ve diğer betonarme yapı elemanlarında dikkate alınır. Kesme kuvveti aktarımı mesnetlenme ve açıklık boyutuna göre değişiklik gösterse de genelde her yapı elemanı için benzer şekildedir ancak göçme ve çatlak oluşumu durumları her yapı elemanında farklılık göstermektedir. Betonarme kirişler için göçme biçimini belirleyen en önemli parametre (a/d) kesme açıklığının kiriş faydalı yüksekliğine oranıdır. Bu oran aynı zamanda M/V_d terimleri ile de ifade edilmektedir. $M/V_d=2-6$ arasında olan, betonarme kirişlerde kayma ve eğilme gerilmelerine bağlı olarak eğik çatlaklar oluşur. Bu eğik çatlaklar yaklaşık olarak yatayla $30^\circ - 60^\circ$ açı oluşturmaktadır. Kirişlerde kesme göçmesinin çok farklı tipleri oluşur ki; bunlardan en sık karşılaşılanı, eğik çatlağın üzerinde bulunan basınç bölümünün kayması ya da ezilmesi ile oluşan ve çekme donatısı boyunca kesitsel ayrılmaların meydana gelmesi ile beliren göçme biçimidir.

Eğilme momenti ile kesme kuvvetinin birlikte olduğu betonarme bir elemanda iki eksenli gerilme durumu ortaya çıkar. Kesme donatısının yetersiz olduğu durumda bir kiriş, artan yükleme altında eğilme mukavemetine ulaşmadan, mesnetlere yakın bölgelerde yatayla yaklaşık 45° eğimli çatlakların sebep olduğu göçme durumuna gelebilir.

Eğik çatlak oluşmasının nedeni, eğik çekme gerilmelerinin varlığıdır. Şekil 3.1’de mesnede yakın düşey bir kesit üzerinde alınan üç noktada sonsuz küçük elemanlar üzerinde gerilme hâlleri işaret edilmiştir. A noktasındaki eksene dik düzlemde kayma gerilmesi ile basınç gerilmesi, B noktasındaki eksene dik düzlemde sadece kayma gerilmeleri ve C noktasındaki eksene dik düzlemde ise kayma gerilmesi ile çekme gerilmesi meydana gelir (Celep ve Kumbasar, 2005).

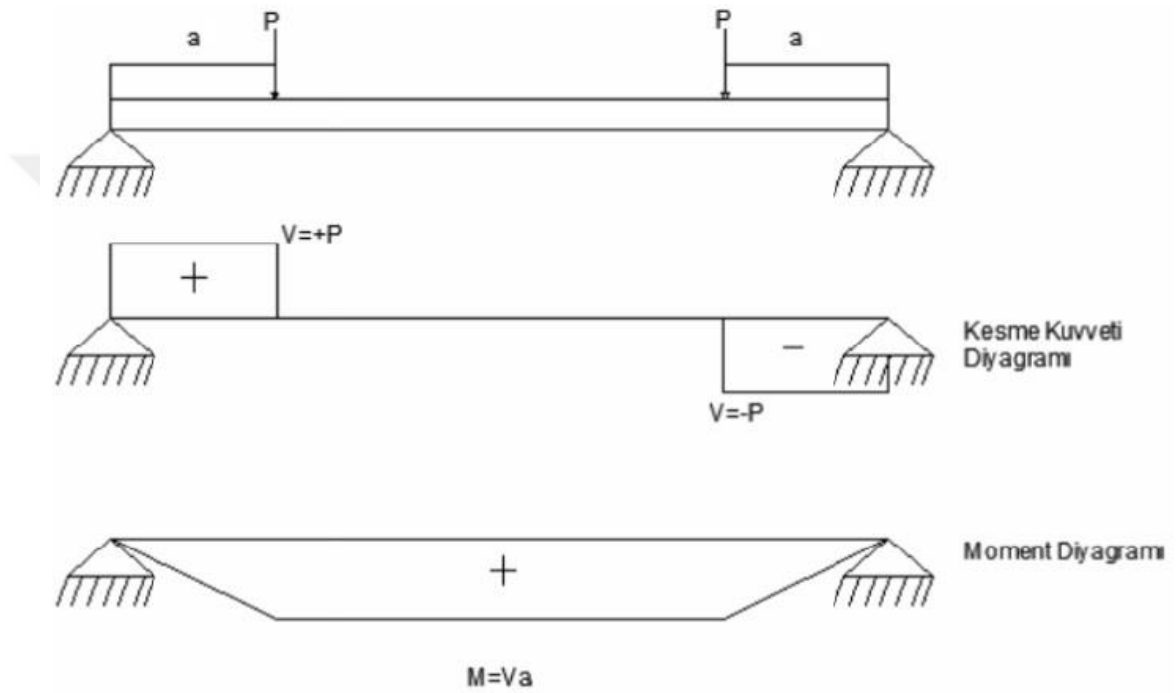


Şekil 3.1. Kiriş eksenine dik asal gerilmelerin değişimi (Arslan, 2005; Celep ve Kumbasar, 2005)

Betonarme yapı tasarımına ait yönetmeliklerde kirişlerin enine donatısız olarak tasarlanmasına uygun görülmemektedir. Ancak kirişin davranışı anlayabilmek veya açıklayabilmek için bu tür çalışmaların yapılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Dolayısıyla bahis konusu olan bu kirişlerde açıklıkları doğrultusunda sadece boyuna donatı vardır.

Yapılan birçok deneysel araştırma bu göçme biçiminin “ a/d ” ile gösterilen “kesme açıklığı/faydalı yükseklik” oranına bağlı olarak değiştiğini ifade edilmektedir.

Enine donatısız kirişlerde, kirişin davranışını anlayabilmek için Şekil 3.2’deki kesit etkileri incelenmektedir. Genellikle enine donatısız kirişlerin incelenmesinde Şekil 3.2’deki gibi simetrik iki tekil yük, inceleme yapıldığı gibi açıklığın ortasında yapılan bir tekil yük ile yükleme yapılarak da inceleme yapılabilmektedir.



Şekil 3.2. Kesit tesirleri diyagramı (Arslan, 2005)

$(a/d) > 7$ ise; düşey yükler altında eğilme göçmesi oluşur. Eğilme çatlaklarının büyümesi ve çekme donatısının akması sonucunda çekme kırılmasına ulaşılır. Göçme üzerinde, kesme kuvvetinin etkisi sınırlıdır ve eğik çatlaklar önemli büyüklüklere ulaşamazlar. $2,5 < (a/d) < 7$ ise; 7’ye yakınsa kesme-çekme göçmesi, 2,5’a yakınsa göçme mesnet üzerinde aderansın yetersiz kalmasıyla oluşur. Çatlamanın başlamasıyla kırılma anındaki kesme kuvveti arasında fark çok azdır. Eğer “ a/d ” oranı büyük ise (7’ye yakınsa) çatlak hızla ilerleyip gelişerek göçmeye yol açar. Bu göçme ani ve gevrekli. Eğer “ a/d ” oranı küçükse (2,5’a yakınsa) yükün oluşturduğu yerel basınç gerilmeleri çatlakın fazlalaşmasını engeller. Bu nedenle, eğik çatlakların mesnet bölgesinde aderans çatlakları

olarak gelişmesiyle göçme gerçekleşir. Bu tür kırılma, gerçek eğik çekme kırılması olarak tanımlanır. Kesit eğilme dayanımına erişmeden göçer. Kirişte öncelikle eğilme çatlakları ortaya çıkar. Yükün artmasıyla, eğik çekme gerilmeleri artar ve gövdede çatlak oluşumu başlar. Ortaya çıkan bu çatlakların bazıları eğikleşerek yüke doğru gelişir.

$1.0 < (a/d) < 2.5$ durumunda ise; basınç bölgesindeki basınç gerilmeleri, çatlağın ilerlemesini engel olur. Göçme, yük altındaki basınç bölgesindeki betonun ezilmesi veya mesnette donatı sıyrılmasıyla gerçekleşebilir. Gelişen eğik çatlaklar, “ a/d ” oranının küçülmesi ile daha dik duruma gelmeye başlayacaktır. Bu durum, asal beton basınç gerilmelerinin dikleşmesine ve kemerleme etkisinin ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Yük aktarımı, yükün mesnede yakın olmasından dolayı, eğilmenin yanı sıra kemerleme etkisi olarak tanımlanan eğik çatlaklar arasında oluşan beton basınç çubukları ile de aktarılır. Göçme, üst bölgedeki yüksek gerilmelerin etkisiyle, yük altındaki basınç bölgesindeki betonun ezilmesi ile olur.

$(a/d) < 1.0$ durumunda ise; çatlak, yükleme noktasından mesnede doğru aktarılan basınç kuvvetinin hasar verici etkisiyle oluşur. İlk çatlak altta donatıdan $d/3$ mesafesinde oluşmaktadır. Çatlak, önce yükleme noktasına doğru ve sonra da mesnete doğru gelişmektedir.

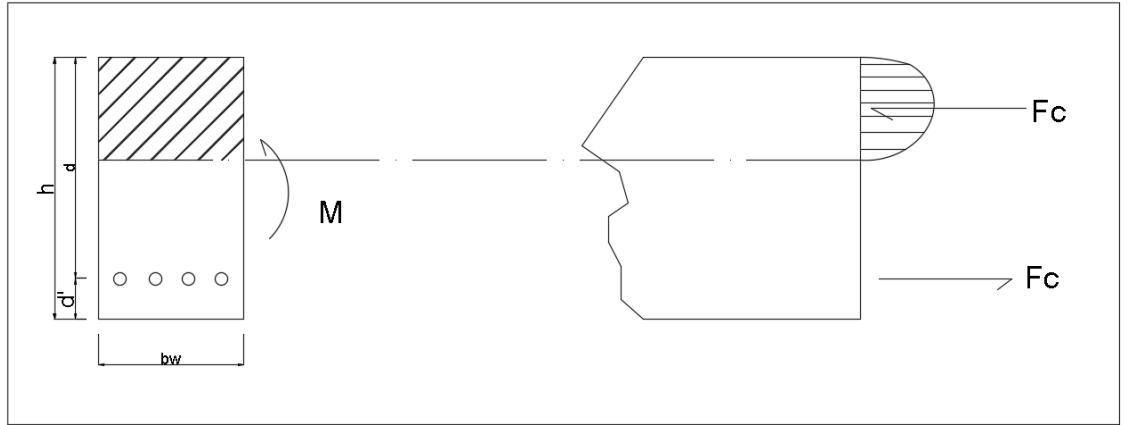
3.2. Betonarme Kirişlerde Eğilme Etkisi

Betonarme yapılarda genelde yatay olarak tasarlanan kiriş elemanlar düşey ve yatay yükler etkisinde eğilmeye çalışırlar. Kirişlerde bu eğilme etkisine ek olarak değişik yüklenme durumlarında kesme etkisi burulma momenti ve eksenel kuvvet de etki edebilmektedir. Eksenel yükler ve burulmaya neden olabilecek iç kuvvetler eğilme etkisine nazaran küçük etki oluşturduğundan tasarım eğilme etkisine göre yapılmaktadır. Eksenel kuvvet parametresi TS500’de $Nd=0,1.A_c.f_{ck}$ olarak kabul edilmektedir. Kesme kuvveti hesaplamaları ise farklı gerilmelerden kaynaklandığı için ayrı bir durum olarak ele alınmaktadır.

Betonun çekme dayanımının çok düşük olması nedeni ile eğilmeye çalışan kirişlerde çekme bölgesine yerleştirilen çelik donatılar, basınç bölgesindeki betonun tam

performans ile çalışmasına katkı sağlamaktadır. Çelik donatıların temel görevi, kirişin çekme gerilmelerinin olduğu bölümlerinde çekme gerilmelerini karşılamak olduğuna göre, bu çubukların çekme bölgesi derinliğinde en dış cidara yakın olarak yerleştirilmesi, moment kol uzaklığını artırır ve donatının tam kapasitede çalışmasını sağlar. Çekme bölgesindeki beton dış lifi ile donatı çubuğu arasındaki beton pas payı tabakası bulunmaktadır. Bu örtü tabakası kenetlenmenin ve aderansın tam olarak sağlanması ve donatının pastan ve yangından korunması amacıyla önem arz etmektedir (Ersoy ve Özcebe, 2001).

Eğilme altındaki bir betonarme elemanda gerilmeler düşük seviyede ise, çekme bölgesindeki betonda çatlak oluşmayabilir. Bu durumda çekme bölgesindeki donatı ile beton, kesitteki çekme gerilmelerini birlikte taşır. Eğilme etkisinde olan betonarme kirişlerde beton çatlama eğilimi gösterir ancak az olan çekme mukavemeti ile bu gerilmeleri az bir miktar olsa karşılar. Bu yardım çok az olduğundan çatlamanın olduğu kesitte çekme tamamen donatı ile karşılanıyor kabul edilerek ihmal edilir. Donatı çatlak oluşumunu en aza indirebilmek ve çekme gerilmelerini karşılamak için görevlendirilmiştir (Ersoy ve Özcebe, 2001).



Şekil 3.3. Betonarme kirişte şekil değiştirme ve iç kuvvet dağılımı.

Dış yükler etkisindeki betonarme kirişlerde eğilme ile ilk oluşan çatlaklar, en dış çekme lifindeki birim uzama miktarının, betonun çekme gerilmelerindeki birim deformasyon sınırına ulaşması nedeniyle oluşur. Deformasyonla hesap pratik olmadığından, çatlak oluşumu, en dış cidardaki lifin betonun eğilmede çekme dayanım sınırını aşması olarak

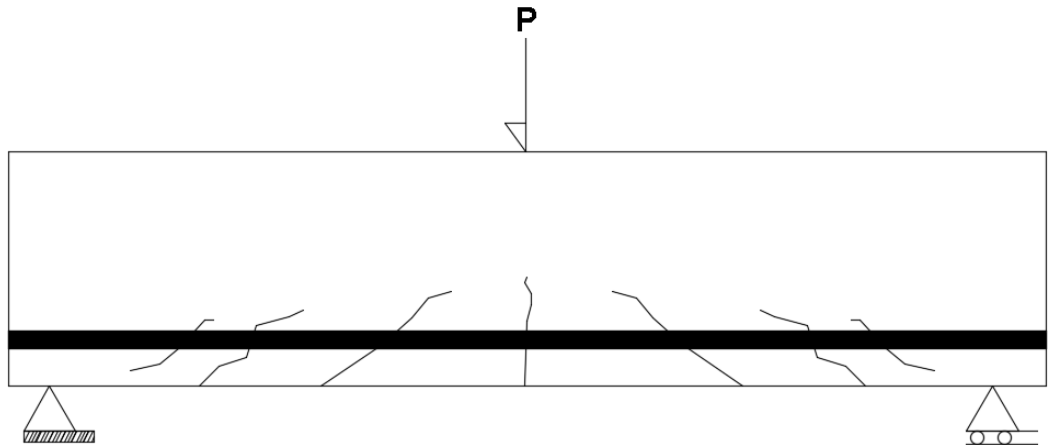
belirtilir. Bu sınır değeri olarak tabir edilen ve çatlamaya sebep olan moment, donatısız bir kirişte kırılma momentine eşdeğerdir. (Ersoy ve Özcebe, 2001).

$$M_{cr} = \frac{f_{ct} I}{y} \quad (3.1.)$$

Kesit dikdörtgen olduğu durumda I/y için en yüksek değeri mukavemet momenti olarak tabir edilen $W = bh^2/6$ olur. Betonun eğilmedeki çekme dayanımı (f_{ct}) ise aksel çekme dayanımının (f_{ctk}) iki misli olarak alınır. Bu durumda (3.1.) ifadesi aşağıdaki son halini alır.

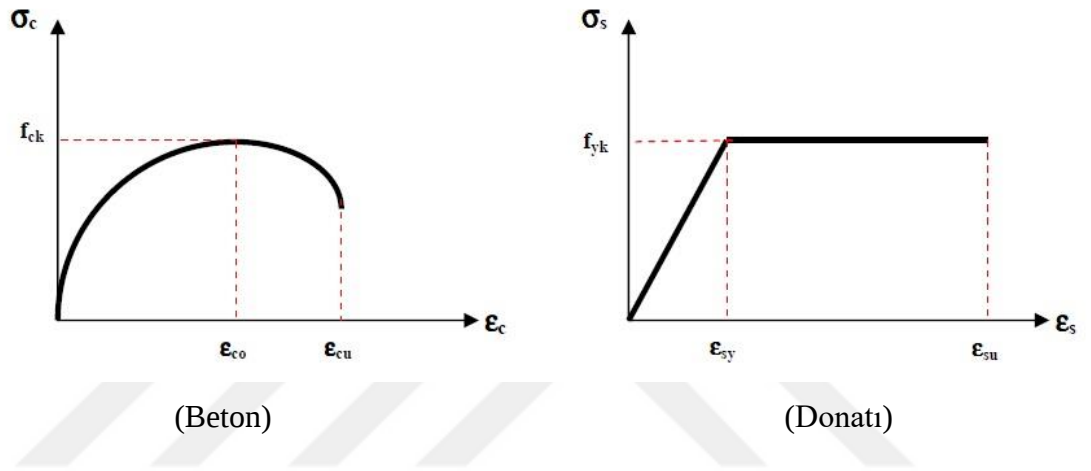
$$M_{cr} = f_{ct} \frac{b_w h^2}{6} = \frac{2 f_{ctk} b_w h^2}{6} \quad (3.2)$$

İlk çatlaklar momentin maksimum olduğu bölgede oluşur. Bu çatlaklar kılcal seviyededir ve görülmeleri son derece zordur. Yük arttıkça bu çatlakların boyu genişliği ve derinliği artar ve yeni çatlaklar belirir. Betonda çatlamlar, asal çekme zorlarına dik yönde gelişir, bu nedenle kirisin kesme olmayan bölgesinde gözlenen çatlaklar kiriş eksenine dik yönde oluşmaktadır. Yük artmaya devam ettikçe yük ile mesnet arasındaki kesitlerde de çatlama momentine ulaşıldığından bu bölgede de çatlak oluşumu başlar. Bu bölgede kayma gerilmeleri bulunduğu için asal çekme gerilmeleri kiriş eksenine paralel olmadığından, oluşan çatlaklar kiriş eksenine belirli bir açıyla oluşmaktadır (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. Betonarme kirişte eğilme etkisi altında çatlak oluşumu.

Eğilme etkisi altında kirişte oluşan ilk çatlak sonrası, beton ve çelik malzemedeki gerilme dağılımı için ilgili malzemelere ait tek eksen yük durumuna ait bilinen gerilme şekil değiştirme (σ - ϵ) ilişkileri kullanılması gerekir (Şekil 3.5.). İlk çatlak sonrası çekme bölgesinin en altında yer alan liflerde betonun çekme dayanımları aşılmış, çekme donatısında ise henüz akma sınırına ($\epsilon_s < \epsilon_{sy}$) ulaşılmamıştır. Basınç bölgesinin en üstünde yer alan liflerde birim kısalma henüz maksimum gerilmeye karşılık gelen (ϵ_{co}) ulaşmamıştır.



Şekil 3.5. Beton ve çeliğe ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi (V.K. Özhan, 2012).

Kirişe etkililen düşey yük arttıkça, eğilme momenti değeri artacak ve belirli bir yük seviyesinde çekme donatısı akma birim uzama sınırına ulaşacaktır. Basınç bölgesindeki en dış lifteki şekil değiştirmeler ϵ_{co} 'a ulaşmadığından bu lifteki beton basınç gerilmeleri f_{ck} ' dan küçüktür. Donatının akmasından dolayı, donatıdaki çekme değeri $F_T = A_s \cdot f_{yk}$ olur. Yük artmaya devam ettikçe donatıdaki şekil değiştirmeler artacak, donatı akma sınırına ulaştığından, donatı gerilmeleri alamadan uzamalar artacaktır. Donatıdaki birim şekil değiştirme artışı betona göre çok yüksek değerde seyrederek çatlakların oluşumu hızlanacaktır. Betonarme kesitte birim şekil değiştirme dağılımının Bernouilli-Navier hipotezi gereği doğrusal olacağından beton ve donatıdaki farklı şekil değiştirme artışları tarafsız eksenin yukarı kayması ile doğrusallık korunacaktır. Çeliğin elasto-plastik davranışı sebebiyle akma sonrasında gerilmeler sabit kalacak ve donatıdaki çekme

mukavemetleri değişmeyecektir. Kesitte denge şartlarından dolayı beton basınç bileşkesinin sabit kalacaktır (Ersoy ve Özebe, 2001, V.K. Özhan, 2012).

$$F_r = A_s \cdot f_{yk} = F_c \quad (3.3)$$

Yüklerin artmasıyla tarafsız eksenin yukarı kayması sonrasında basınç bölgesinin en dış cidarında beton birim kısalması ε_{co} 'a ulaşıldığında bu lifteki beton basınç gerilmeleri f_{ck} değerini alacaktır. Bu sebeple betonda ezilmeler başlayacak ve şekil değiştirme artımı ancak gerilme azalması ile mümkün olacaktır. En dış cidardaki beton birim kısalması ε_c , betonun nihai birim kısalması ε_{co} 'a ulaşıldığında basınç bölgesindeki beton ezilerek dağılacak, çekme bölgesindeki donatı aktığından, kiriş göçecektir. Basınç bölgesindeki bileşke basınç kuvveti ile çekme bölgesindeki donatı bileşke çekme kuvvetleri arasındaki mesafe olan moment kolu (z) ile kesitin moment taşıma gücü belirlenecektir. Moment kolu (z) akma ve kırılma anında tarafsız eksen derinliğinin değişmesinden farklılık gösterecektir. Bu farklılık taşınan eğilme momentlerinin hesabında %5 mertebesinde fark gösterdiğinden dolayı oldukça az olduğu kabul edilir. Bu nedenle, momentin akmadan sonra artmadığı kabul edilerek hata payı an az olacak şekilde tasarım kabul edilmektedir (Ersoy ve Özebe, 2001, V.K. Özhan, 2012).

Kirişlerin taşıma gücü kapasitesine ulaşmasında eğilme etkisini karşılayan çekme donatısının görevi önem arz etmektedir. Eğilme momenti etkisinin artması bir betonarme kiriş için her zaman basınç bölgesindeki en dış lifin betonun birim kısalmasının ezilme birim kısalması değerine ulaşmasıyla ($\varepsilon_{cu} = 0.003-0.0035$) taşıma gücünü kaybederek göçmektedir. Sonuç olarak göçmenin aynı şekilde olması kırılma durumuna gelinceye kadar, kirişin göçme davranışının çekme donatısı miktarına göre belirlenebileceği açıkça görölmektedir (V.K. Özhan, 2012).

3.3. Sargılı Beton Davranışı

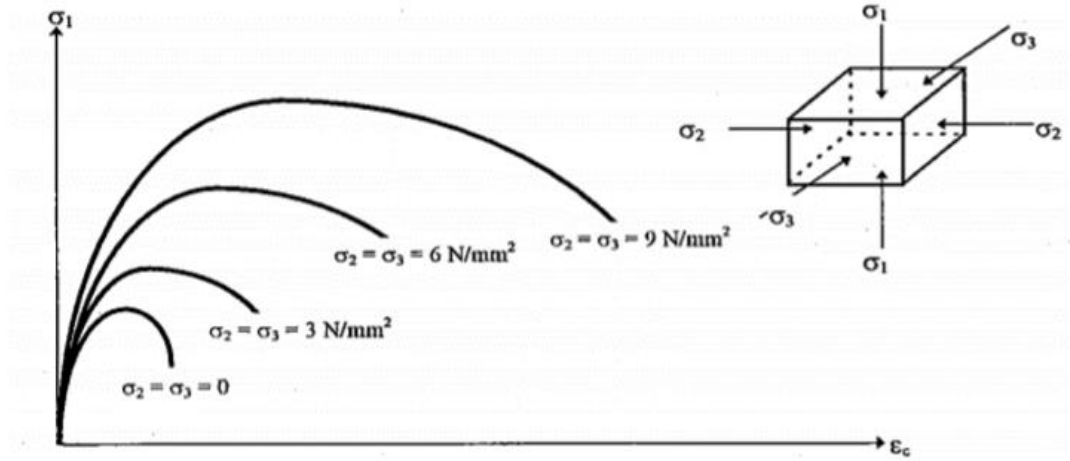
Donatıların beton çekirdeğini sarmasıyla çekirdeğe uygulanan yanal basıncın karşılanmasına prensibine sargılı beton prensibi denir. Bu konuda 20. YY'ın başlarında başlayan birçok araştırma hidrolik basınç, spiral donatı, dikdörtgen etriye uygulamalarıyla devam etmiştir. Bütün bu araştırmalar neticesinde sargılı betonarme elemana yanal basınç uygulandığı zaman dayanımın ve sünekliliğin sargılamanın artmasıyla arttığı rapor edilmiştir. (İnel vd., 2008). Etriyeli betonun gerilme- birim şekil değiştirme bağıntıları tek eksenli yüklemeye göre incelemiş, etriyeli betonun gerilme- birim şekil değiştirme bağıntıları ise üç eksenli yükleme durumuna göre incelemişlerdir. Deneylerin üç eksenli yapılmasındaki asıl amaç yanal basıncın eksenel basınç üzerinde nasıl bir etkiye sahip olduğunu araştırmaktır. Bu durum; basit olarak şu bağıntı ile ifade edilmektedir.

$$f_{cc}=f_c+K.\sigma_1 \quad (3.4)$$

Burada; σ_1 , yanal basınç gerilmesini; K yanal basınç katsayısını f_{cc} ise eksenel basınç dayanımını ifade etmektedir.

Beton, üzerine herhangi bir eksenel yük uygulandığı zaman Poisson ilişkisi ile alakalı olarak beton üzerine uygulanan eksenel yükün doğrultusuna dik olacak şekilde genişlemeye çalışır. Eksenel yük etkisi beton elemanlarının dayanımına olumsuz bir etki yaratmaktadır. Bu sebeple bu olumsuz etkiyi azaltmaya yönelik sargı donatısı ile beton sarılmaktadır. Sargılanmış beton durumunda sargı donatıları, bu eksenel yük doğrultusuna dik yönde gelişen şekil değiştirmesine karşı koyarak üç yönlü gerilme durumu oluşturup beton dayanımını ve sünekliliğini arttırmaktadır.

Sünekliliğin artmasını sağlayan sargılı beton durumunda betonarme elemanlar genellikle üç yönlü gerilme davranışı sergilerler. 1982'de Richart, Brandzaeg ve Brown üç yönlü gerilme durumunu inceleyen ilk deneyi yapmışlardır. Bu durumu Ersoy ve Özcebe'nin 2017'de yaptıkları çalışmayla da kanıtlamak mümkündür. Şekil 3.4'de görüldüğü üzere sargılama etkisini ifade eden σ_2 ve σ_3 arttıkça betonun sünekliliği ve buna bağlı olarak da dayanımı artmaktadır.



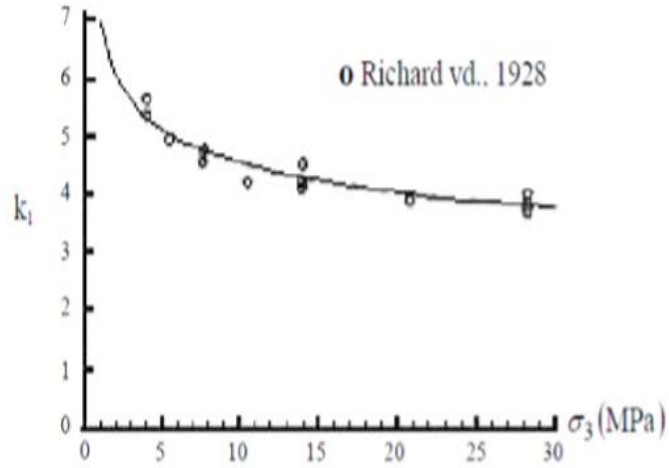
Şekil 3.6. Üç eksenli gerilme altında betondaki davranış

Bu sargılı betonun dayanımını arttırması ile alakalı olarak bir çalışmada Saatçioğlu ve Ravzi (1992) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada aşağıdaki denklem kullanılmıştır (3.5.).

$$f_{cc} = k_3 \cdot f_c + k_1 \cdot \sigma_2 \quad (3.5)$$

Bilindiği üzere beton imalatlarında uygulama koşullarına ve insani hatalara bağlı olarak çeşitli sorunlar meydana gelebilir. Bu sebeple burada, standart silindir deneyinden elde edilen beton dayanımı ile elemanda ortaya çıkan beton dayanımı arasındaki güvenliği ifade eden bir katsayı olarak 0,85 ile 1,0 arasında değişkenlik gösteren k_3 katsayısı kullanılmıştır. Richart tarafından yapılan deneyleri inceleyen Saatçioğlu ve Ravzi, yanal basıncın 15 MPa'dan daha fazla olduğu durumlarda $k_1=4,0$ katsayısının geçerli olabileceğini belirlemişlerdir. Yine yaptıkları deneylerde k_1 değerinin ise ancak yanal basıncın 15 MPa'dan daha az olduğu durumlarda 4,0'dan fazla olabileceği kanıtlanmıştır. Bu deney sonuçlarına göre k_1 parametresi için denklem (3.6.) yazılmış ve Şekil 3.7'de belirtmişlerdir.

$$k_1 = 6,7 / \sigma_2^{0,17} \quad (3.6)$$



Şekil 3.7. k_1 parametre eğrisi (Saatçioğlu ve Ravzi, 1992)

3.4. Betonarme Kiriş Tasarımı İçin TS500 (2000) Hükümleri

3.4.1. Malzeme Karakteristik Özellikleri ve Kabulleri

- Betonun çekme mukavemeti çok küçük olduğundan göz önüne alınmaz
- Donatı ve çevresindeki beton örtüsü arasında tamamıyla aderans olduğu düşünülerek, donatı birim şekil değiştirmesi ile aynı seviyedeki beton lifi birim şekil değiştirmesine eşit alınacaktır.
- Taşıma gücü kapasitesinde tarafsız eksene en uzak cıvardaki beton basınç lifindeki birim kısalma $\varepsilon_{cu} = 0,003$ olmaktadır.
- Donatı çeliği elasto-plastik davranış gösterdiği kabul edilmektedir.

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s \leq f_{yd}$$

- Tüm donatı çelikleri için elastisite modülü; $E_s = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$, $\varepsilon_{su} = 0,1$ alınmaktadır.

- Kirişlerde net beton pas payı, özel yapılar haricinde, dış ortamdaki elemanlarda 25 mm'den, iç ortamdaki elemanlarda ise 20 mm'den az olmamalıdır. Elverişsiz çevre koşulları durumunda ve daha fazla yüksek sıcaklığa maruz kalınacak durumlarda ise bu değerler artırılmalıdır.
- Kirişlerde çekme donatısı oranı $\rho = \frac{A_s}{b_w d} \geq \rho_{min} = 0,8 \frac{f_{ctd}}{f_{yd}}$ koşulunu sağlayacaktır.
- Kirişlerde çekme ve basınç donatı oranları farkı, dengeli donatı oranının 0,85 katından fazla olamaz.

$$\rho - \rho \leq \rho_{max} = 0,85 \rho_b$$

- Kirişlerde çekme donatısı oranı, $\rho \leq 0,02$ sınırını aşamaz.
- Kirişlerde boyuna donatı alt sınırı 12 mm'dir.
- Açıklıktaki çekme donatısının, en az üçte birinin mesnede kadar uzatılması ile gerekli kenetlenme sağlanmalıdır. Net kiriş açıklığı, toplam yüksekliğinin 2,5 katından küçük olan sürekli kirişler ile net açıklığının 1,5 katından küçük olan basit kirişler, kısa kiriş olarak davranacağından yüksek kiriş olarak tasarlanıp donatılır. Bu tür kirişlerin tasarım hesapları, doğrusal olmayan birim şekil değiştirme dağılımı ve yanal burkulma durumları düşünülerek yapılmalıdır.

3.4.3. Kesme kuvveti hesabı hükümleri

- Betonarme yapı elemanlarında eğilme momenti ile birlikte etkiyen kesme kuvvetlerinin oluşturduğu asal çekme gerilmeleri, beton ve uygun kesme donatısı ile karşılanacak, asal basınç gerilmelerinin de gövdede ezilme oluşturmayacak bir düzeyde tutulması sağlanacaktır.
- Tasarım kesme kuvveti V_d , mesnet yüzünden “d” mesafesinde hesaplanmalıdır. Ancak, mesnet olarak başka bir eğilme elemanına oturan kirişlerde mesnet yüzündeki kesme kuvveti esas alınmalıdır.

- Tekil bir yükün mesnet yüzünden “ d ” veya daha az uzaklıkta etkime olasılığı bulunan durumlarda da, mesnet yüzünde hesaplanan kesme kuvveti temel alınmalıdır.
- Kesme güvenliği için $V_r \geq V_d$ koşulu sağlanmalıdır. Yan taraftaki denklemde, V_d tasarım kesme kuvveti, V_r ise kesitin kesme dayanımıdır. Kesitin kesme dayanımı, beton katkısı (V_c) ve kesme donatısı katkısının (V_w) toplanması ile elde edilir ($V_r = V_c + V_w$).
- Etriye katkısı ise $V_w = \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{ywd} \cdot d$ denklemi yardımıyla hesaplanır.
- Tasarım kesme kuvveti eğik çatlama dayanımına eşit veya ondan az ise ($V_d \leq V_{cr}$) kesme donatısı hesabına gerek yoktur. Ancak bu durumda, minimum etriyenin bulundurulması zorunludur. Minimum etriye hesabında $\frac{A_{sw}}{s} \geq \frac{f_{ctd}}{f_{ywd}} \cdot b_w$ koşulu sağlanmalıdır.
- Yüksek asal basınç gerilmeleri nedeni ile gövde betonunun ezilmesini önlemek amacıyla, hesap kesme kuvveti $V_d \leq 0,22 \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d$ formüldeki gibi sınırlanmıştır. Bu koşul sağlanamazsa, kiriş kesit boyutları büyütülmelidir.

Kesme dayanımını sağlamak için bireysel çubuklar (düşey ve yatay etriye, firkete, çiroz vb.) ve hasır donatı kullanılır. Etriye aralığı kiriş faydalı yüksekliğinin yarısından fazla olamaz ($s \leq d/2$). Ayrıca, $V_d > 3V_{cr}$ olan durumlarda, etriye aralığı yukarıda verilen değer yarısını aşamaz ($s \leq d/4$).

3.5. Beton - Donatı Aderansı

Çelik donatılar ve beton arasında kenetlenmeyi sağlayan bağ kuvvetlerinden dolayı oluşan kayma-tutunma gerilmelerine aderans gerilmesi denir. Betonarme bir elemanda çelik donatı beton içerisine yeterli uzunlukta gömülmüş ise çelik donatıyı kopmadan çekip çıkartmak olanaksızdır. Çelik donatının beton içerisinde gömme boyunun yetersiz olduğu durumlarda çelik donatının yüzey şekline bağlı olarak donatı betondan sıyrılarak

çıkabilir ya da etrafındaki betonu hasara uğratabilir. Beton ile çelik donatı arasındaki aderansın üç önemli durum mevcuttur. Bunlar;

- Beton ile çelik donatının arasında var olan yapışma- tutunma kuvvetleri,
- Çelik donatı ile beton arasında çeliğin yüzey şekli betonun ise içyapısındaki malzeme türüne göre değişebilen sürtünme kuvvetleri,
- Beton ile çelik donatı yüzeyi arasında oluşan mekanik dış kuvvetleridir.

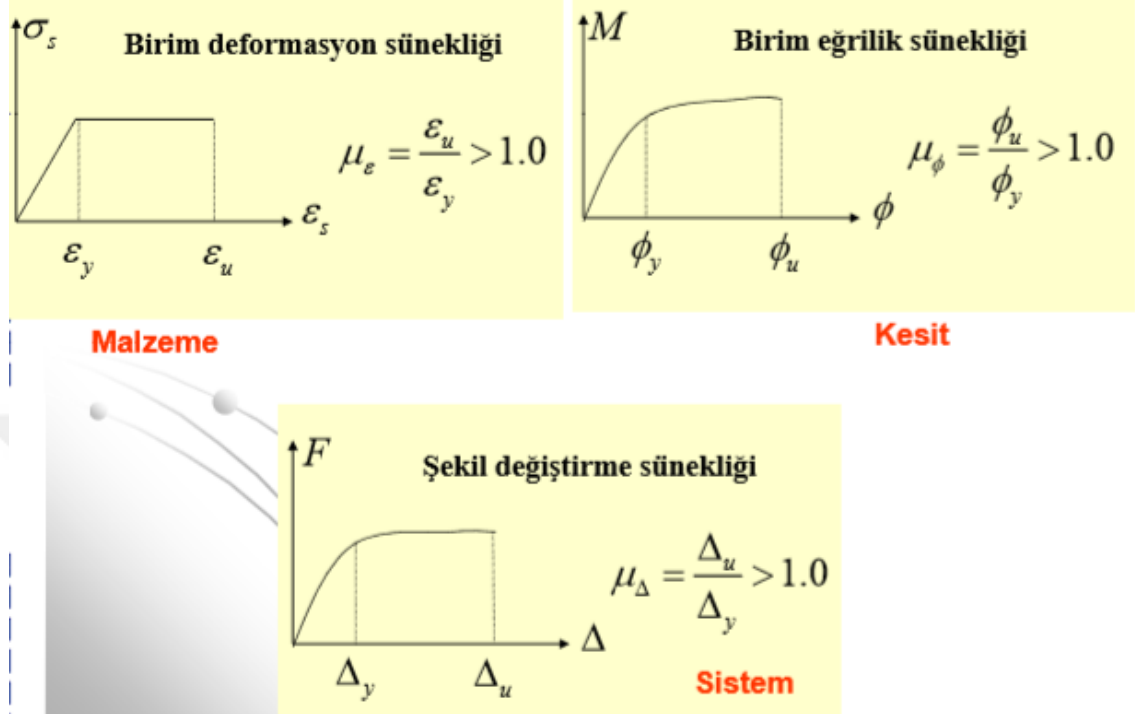
Beton ile çelik donatı arasındaki aderans betonun karakteristik çekme mukavemeti, agreganın cinsi, betondaki katkı maddelerinin farklılığı, donatı çapının değişimi, çeliğin akma mukavemeti değeri, çelik donatının yüzey şekli, beton örtüsü miktarı ve donatının betona gömülme boyu gibi birden fazla değişken ile değişebilir. (Bingöl , Ersoy 1985). Beton ile donatı arasındaki aderansın incelenmesiyle alakalı çalışmalar deneysel olarak iki gruba ayrılır. Bunlardan birincisi aderansla doğrudan alakalı özellikleri (sınır gerilme değeri, kenetlenme boyu, bindirme boyu) inceleyen deneylerdir İkincisi ise betonarme iç aderansı olarak bilinen çatlama özelliklerini araştıran deneylerdir. Bahsi geçen ilk gruptaki en çok araştırması yapılan deney çekip-çıkarma (pull-out) deneyleridir (Bingöl, Aka vd. 1996).

3.5. Moment-Eğrilik ve Yük-Deplasman İlişkileri

Çalışmada 15x20x90 cm boyutlarında üretilen GFRP donatılı betonarme kirişlere açıklık ortasından etkitilen tekil yükün neden olduğu moment ve buna karşılık gelen birim boydaki dönme değerleri kesitin davranış biçimini okumada yardımcı olan en açık parametrelerdir. Moment-Eğrilik grafikleri kesitin dayanımı ve dönme kapasitesi hakkında bilgi verirken oluşan eğrinin iki kez entegre edilmesi durumunda ne deformasyon hesabı da yapılabilir. Yapılan deneyden yük ve deformasyon ölçerlerden elde edilen deneysel veriler sayesinde hem moment-eğrilik hem de yük-deplasman grafikleri oluşturulmuştur (Kutanış, 2010).

Yük-deplasman grafikleri ise çalışmada kesit rijitlikleri hakkında bilgi verirken eğilme etkisindeki kirişlerde bu grafik altında kalan alan hesabı enerji yutma kapasiteleri

hakkında bilgi vererek süneklik ve enerji sönümleyebilme konularında malzeme hakkında önemli sonuçlar vermektedir.



Şekil 3.9. Yük-deplasman, gerilme-birim şekil değiştirme ve moment-eğrilik grafikleri (Kutaniş, 2010)

Yük-deplasman grafikleri altında kalan alanın hesabından ortaya çıkan enerji yutma kapasitesi kesitin yük olarak sönümlediği enerjiye karşılık gelmektedir. Bu kapasite yükleme hızından, deney düzeneğinin yükleme şeklinden ve deney numune boyutlarından etkilenmektedir.

4. MATERİYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde yukarıda açıklanan TS500 (Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları) yönetmeliğindeki hesaplar dikkate alınarak 15X20 kesitli 90 cm uzunluğundaki betonarme kirişlerin tasarım detayları verilmiştir. Kiriş elemanları çelik etriye ile çelik boyuna donatı şeklinde imal edilerek kontrol grubunu ve çelik etriye ile GFRP boyuna donatı şeklinde imal edilerek ise deney numune grubunu oluşturmuştur. Bu her iki grup da kesme etkisi yönünden aynı tip ve etriye aralığı ile aynı sınıf beton ile imal edildiğinden deneylerde kesme etkisi yönünden karşılaştırılma yapılmamıştır. Bu bölümde kiriş eğilme hesaplamaları çelik donatılı numune üzerinden yapıp ikame donatı olarak sadece eğilmeye çalışan kirişin boyuna donatıları GFRP ile değiştirilerek tasarlanmıştır. Böylece yüksek sıcaklık etkileri altında GFRP ve donatı çeliği arasında eğilme etkisi yönünden nasıl davranış gösterdiği karşılaştırılarak araştırılmıştır. Ayrıca her bir sıcaklık değerinde numunelerin hepsi için pull-out (çekip –çıkarma) deneyleri ve donatılar için eksenel çekme deneyleri ile GFRP donatıların aderans gerilmeleri ve kopma gerilmeleri hakkında numuneler içerisinde karşılaştırmalar yapılmıştır.

Sonuç olarak bu kısımda deney çalışmalarında ne gibi hazırlıkların yapıldığı, hangi malzeme, düzenek ve aletlerin kullanıldığı, deney verilerinin alet ve düzenekler yardımıyla değerlendirilmesi gibi hususlarda detaylı açıklamalar yapılmıştır.

4.1. Malzeme Özellikleri

Bu bölümde çekip çıkarma (pull-out) numunelerini oluşturan C35/45 beton ve donatı olarak kullanılan S420 Çelik ve GFRP malzemelerin mekanik özelliklerini gösteren deneyler hakkında bilgi verilmektedir.

4.1.1. Beton

Betonarme kiriş ve çekip çıkarma (pull-out) deney numunelerinde kullanılan beton hazır beton santralinden 28 günlük nihai dayanımı 45 MPa olacak şekilde temin edilmiştir. Betonda kullanılan agregalar kalker kırma taş ve bağlayıcısı CEM-I 42,5 R Portland Kompoze çimentodur. Tüm numunelerde eşzamanlı olarak hazırlandığından aynı gün ve

tek döküm hazırlanmıştır. Betondaki agreganın en büyük dane çapı 16 mm, çökme (slump) değeri 16 cm olacak şekilde hazır beton santraline sipariş verilmiştir. Beton malzemesi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında FBA-2017-491 numaralı projeden sağlanan kaynak ile temin edilmiştir.

Kirişlerde yapılan tasarıma uygun olup olmadığının tespiti ve sıyrılma deneylerindeki aderans kuvvetlerinin sorgulanabilmesi için beton dayanımı kontrol grubu olmak şartıyla ve her bir sıcaklık grubu için 3'er adet 15x15x15 küp numune hazırlanmıştır. Tüm kiriş, pull-out ve küp numuneleri aynı kür havuzunda uygun değer kür sıcaklığında 28 gün bırakılmıştır. Deneylerin yapıldığı günlerde her deney için ve betonun genel dayanımının tespiti amacıyla da 7 ve 28. günlerde üçer adet küp numune TS EN 12390-1, TS EN 12390-2 ve TS EN 12390-3 standartlarına uygun olarak Erzincan Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü 13 Mart Yapı Mekaniği Laboratuvarında Şekil 4.1'de gösterilen ELE marka evrensel yükleme cihazında deneye tabi tutulmuş ve basınç dayanımları belirlenmiştir.

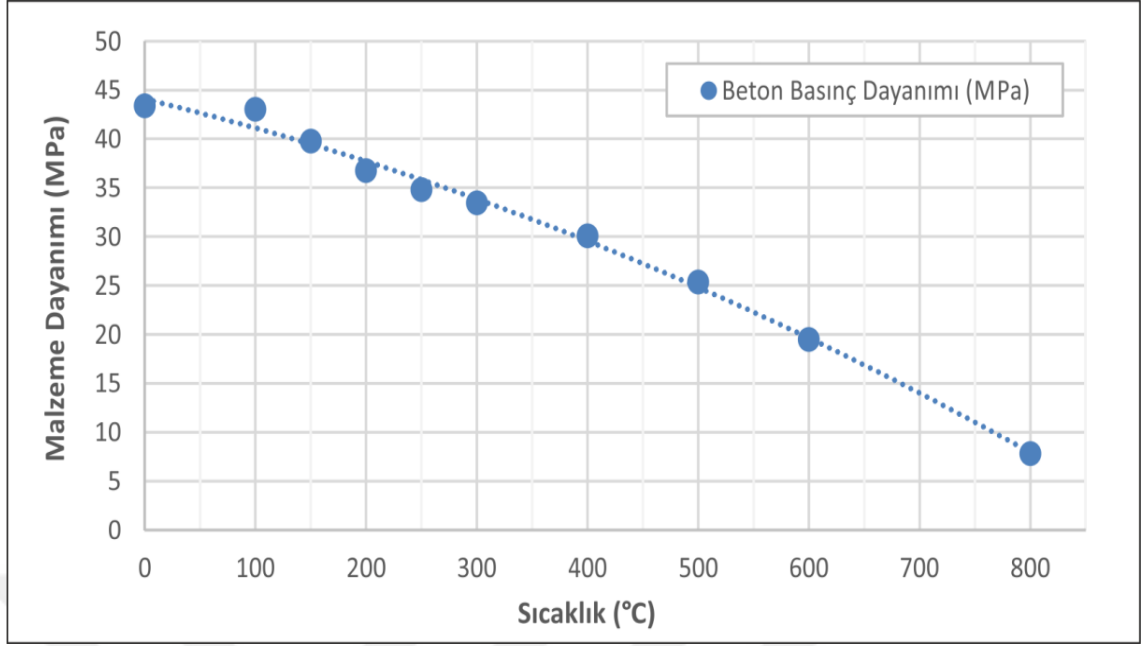


Şekil 4.1. Beton basınç dayanımı test cihazı.

Yüksek sıcaklık etkilerinin incelenmesinde malzeme olarak beton önemli bir rol oynamaktadır. Bunun sebebi olarak yüksek sıcaklık etkisinde, beton hem içerisinde muhafaza ettiği donatının mekanik özelliklerine dolaylı olarak etki etmesi ve hem de bizzat basınç gerilmelerini taşıdığı için mukavemetini yitirmekle karşı karşıya kalması gösterilebilir. Bu amaçla çalışmada betonun yükselen sıcaklık değerlerinde nasıl bir davranış sergilediğini görebilmek için her bir sıcaklık grubunda üçer adet 15×15×15 cm küp beton numune 100°C ile 800°C arasında oda sıcaklığındaki kontrol numunelerde dahil olmak üzere 10 farklı sıcaklık aşamasında 1 saat boyunca bekletilip oda sıcaklığında (havada) soğumaya bırakılmıştır. Betondaki dayanım azalmasının hedef sıcaklıklara göre durumu Tablo 4.1 ve Şekil 4.2’de sunulmuştur.

Tablo 4.1. Beton küp numunelerin hedef sıcaklıklara göre basınç dayanımı değerleri

Sıcaklık (°C)	Beton Basınç Dayanımı (MPa)
0	43,45
100	43,03
150	39,77
200	36,77
250	34,89
300	33,47
400	30,19
500	25,37
600	19,58
800	7,83



Şekil 4.2. Beton küp numunelerin hedef sıcaklıklara göre basınç dayanımı değişimi

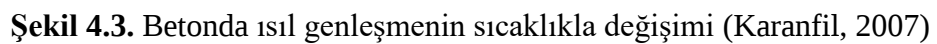
Deneyler için tasarlanan betonu oluşturan çimento (SiO_2 %25.68) ve agregalar (kalker %90 CaCO_3), silis ve kalker esaslı olduğundan dayanımdaki kayıpların nedeni açıklamak gerekirse; silis esaslı agregaların bünyesinde bulunan kuvarz, 570°C 'de polimorfik değişime uğrar, α kuvarzdan β kuvarza dönüşerek %15 hacim artışına ve doğal olarak betonda parça atmalara neden olur. ve kalkerli ve dolomitli agregalarda ise karbonatlar $800-900^\circ\text{C}$ 'lerde CaO veya MgO 'ya dönüşür. Bu dönüşüm sıcaklık değeri yükseldikçe artar ve dönüşen bileşiklerde genleşmeler meydana gelerek betonda hasara sebebiyet verir. CO_2 'nin ayrışması ile ve CaO 'nun veya MgO 'nun meydana gelmesi ile büzülme başlar (Yüzer, 2001).

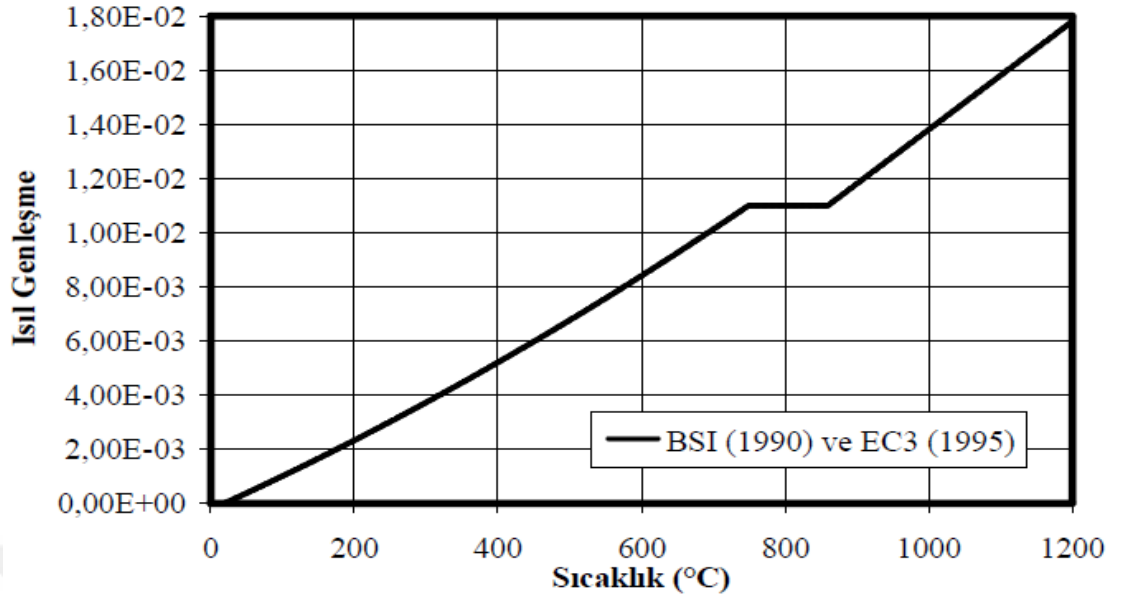
Deney sonuçlarına göre 600°C 'de beton dayanımının %45'i korunuyorken, 800°C 'de ise ancak %18'i korunabilmiştir. Bu da günümüzde kullanılan betonların bilinene nazaran yüksek sıcaklık başarımlarında ne düzeyde olduğunu gösteren bir gerçektir.

4.1.2. Çelik donatılar

Genel olarak betonarme yapılarda S420 donatı çeliği kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda çekme, akma dayanımları ve elastisite modüllerinde düşüşler olmaktadır.

Genel olarak yapılarda kullanılan inşaat çeliği 650°C kristalize olmaktadır (Milke J., 1988). Bu sıcaklık değerlerine göre betonun yapısının bozularak ısı ilettiği kadar çelikte mekanik değişimler başlamaktadır. İki yapı malzemesini de ısı iletkenlikleri ısı genleşmeleri açısından karşılaştırsak, ısı iletkenlik, malzemeye verilen ısıyı iletebilme hızıdır. Isı genleşme ise elemanın boyundaki uzamanın, elemanın ilk boyuna oranıdır. Isı genleşmenin betonda ve çelikte sıcaklıkla değişimi Şekil 4.3. ve Şekil 4.4’de sunulmaktadır.





Şekil 4.4. Çelikte ısı genleşmenin sıcaklıkla değişimi (Karanfil, 2007)

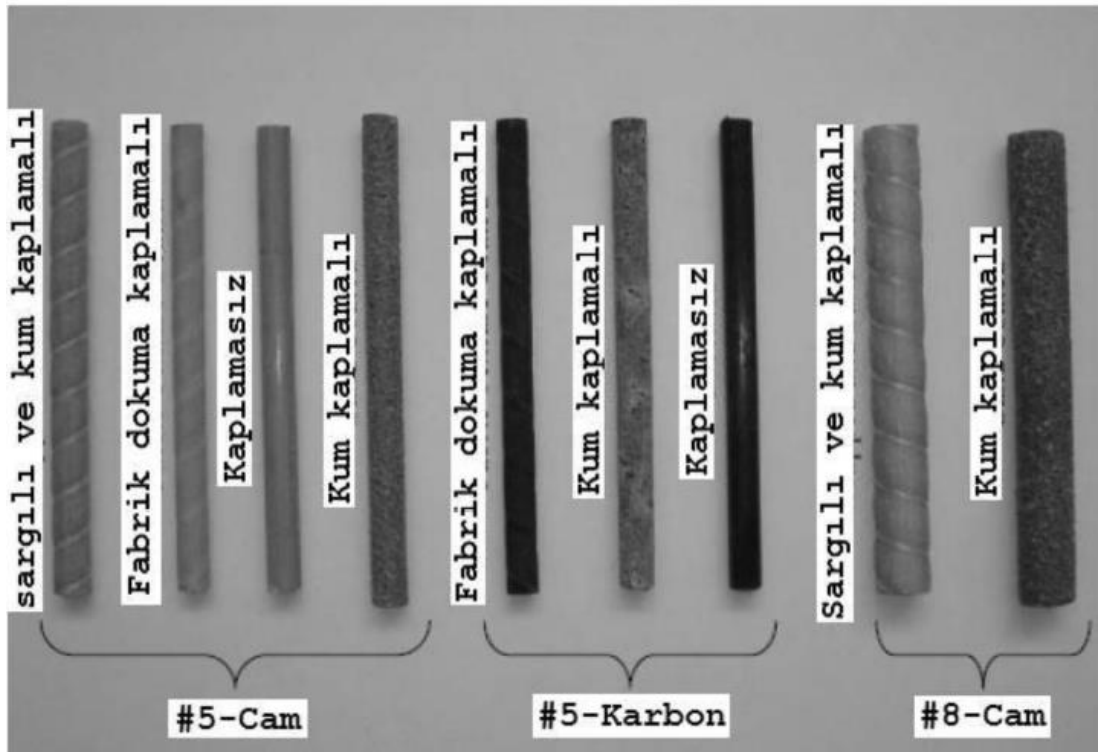
4.1.3. FRP donatı

FRP donatılar yani lif takviyeli polimerler günümüzde korozyona karşı ve yüksek çekme ve yorulma mukavemeti, hafif olması ve işçiliğinin kolay oluşu nedeniyle tercih sebebidir. Ancak yüksek sıcaklık etkisi altında sadece onarım amaçlı laminant şerit olarak kullanılmıştır. Donatı olarak kullanıldığı çalışmalarda çekme donatısı olarak kullanılmış ve performans analizi ölçülmüştür. Yüksek sıcaklık etkisinde betonarme elemanda çeliğin yerinde kullanıldığında nasıl davranış gösterdiğini anlayabilmek için mekanik özelliklerini iyi bilmemiz gerekir.

FRP ürünler reçine matrisi içinde yer alan yüksek dayanımlı liflerden oluşan kompozit bir yapıdır. Reçine matrisi bu liflerin birlikte çalışmasına olanak sağlayarak donatı iç aderansının oluşmasını ve yük aktarımındaki homojenliğin oluşmasında ortam oluşturan önemli bir malzemedir. Cam, karbon ve aramid (Şekil 4.5.) yaygın olarak kullanılan lifler olmakla birlikte, reçine matrisi olarak ise epoksi, polyeester vinylester kullanılmaktadır.

Günümüzde betonarme ve öngerilmeli beton uygulamaları için kullanılan FRP donatıları tek doğrultulu, düz veya nervürlü çubuklar ve burulmuş tendonlar şeklindedir. Bazı FRP çubukları kendisini çevreleyen betonla arasında daha iyi bir aderansı olması için kumla kaplanmakta veya aderansı sağlamak üzere yüzey deformasyonlarının elde edilebilmesi için helezonik tel sarma yöntemi ve döküm kalıbında nervür oluşturulması gibi ikincil bir işleme tabi tutulmaktadır.

FRP donatılar genel olarak aynı anma çapında çeliğe göre yüksek çekme mukavemetine ve düşük elastisite modülüne sahiptirler. Elastisite modülünün düşük olması kesme dayanımlarının düşüklüğünü ve bu nedenden etriye olarak kullanılmalarının sorun yaratabileceğini göstermektedir. Elastik olmalarından dolayı etriyeler kadar net bükülemezler büküldükleri takdirde büküm yerlerinde gerilme birikimleri oluşur ve gevrek bir şekilde koparlar.



Şekil 4.5. FRP donatılara ait örnekler (Yavuz 2011)

4.1.3.1. Cam lifler

Cam lifler, FRP donatılar arasında kullanılan en yaygın malzemedir. Bu malzemenin uygun fiyata bulunabilmesi ve çelik donatılara göre aynı çap aralığında yüksek kopma mukavemeti göstermesi tercih edilmesinde bir avantaj sağlamaktadır. "Cam" fiberler silika (SiO_2) esaslı olup muhtevasında az miktarda diğer inorganik oksitler de bulunmaktadır. Cam lifler karbon lifler kadar yüksek mukavemet göstermese de inşaat alanında kendine yer bulmaya çalışmaktadır. Cam fiber liflerinin üretiminde lifler 1400°C 'yi aşan sıcaklıklarda eritilip elyaf haline getirilmektedir. Yüksek çekme mukavemeti için yüksek oranda silika içeren cevherler kullanılmaktadır.

Çalışmamızda kullanılan cam lif takviyeli donatılar Avrupa Kompozit firmasından temin edilmiştir. Firma tarafından verilen malzeme teknik özellikleri; malzeme yoğunluğu 2 gr/cm^3 , ısı iletkenlik katsayısı $\lambda < 0,57 \text{ W/m.K}$ (inşaat demirinde $\lambda = 58 \text{ W/m.K}$), kopma dayanımı 1100 MPa değerindedir.

4.1.3.2. Matris

Matris, fiber donatılardaki kompozit yapının bağlayıcı bileşenidir. Liflerin bir arada tutulmasını sağlayarak donatı dayanımını artırır. Matris tiplerinden vinilester ve doymamış poliestere-stiren yüksek sıcaklık uygulamalarında kötü davranış göstermektedir. Epoksi esaslı reçineler ise 160°C gibi yüksek sıcaklıklarda dayanımını büyük oranda korumaktadır. Yüksek sıcaklık tabiri yangın etkisi üzerinden bakıldığında 160°C çok yüksek bir sıcaklık olarak kabul edilememektedir. Ancak bu malzemeler betonarmede kullanıldıklarında uygun beton örtü tabakası ile bu düşük sıcaklık değerlerinde yüksek performans gösterebilirler. Matris ve lifler birlikte çalıştığından matrisin yüksek sıcaklık ile mekanik özelliklerini kaybetmesi donatı iç aderansını etkileyerek liflerin bütünsel çalışma ortamını ortadan kaldıracak ve çekme mukavemetini düşürecektir. Temin edilen GFRP donatılarda matris epoksi esaslı bir reçineden oluşmaktadır.

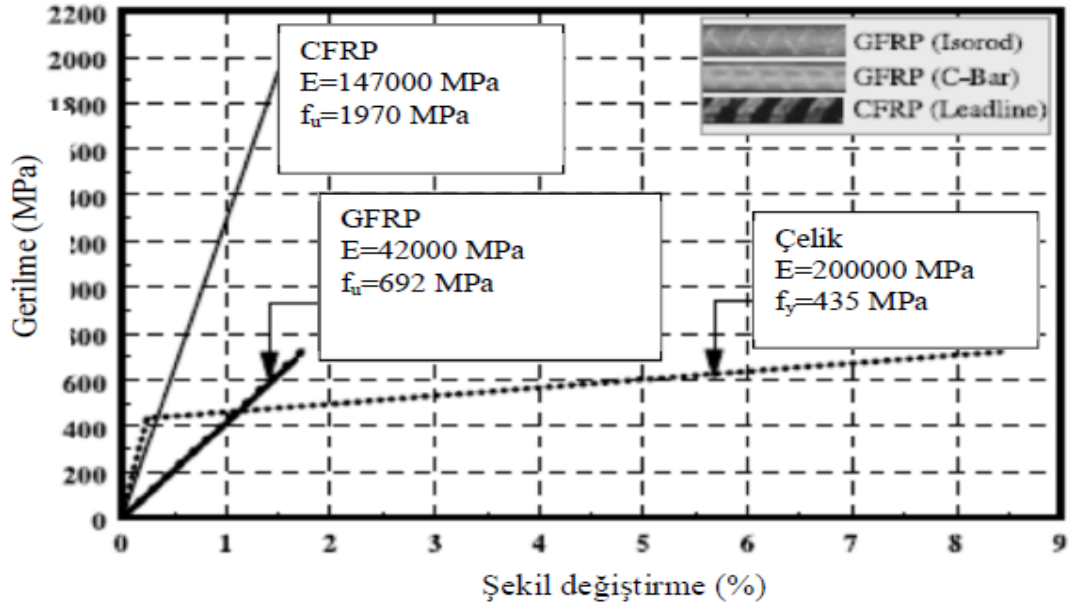
Genel açıklamalara bakıldığında FRP donatıları oluşturan malzemelerin özellikleri de bilinerek Tablo 4.2’ de FRP donatıların uygulama yerlerine göre uygunluk tespiti yapılabilir.

Tablo 4.2. FRP donatılarının avantaj ve dezavantajları (ACI 440.1R-06-Yavuz, 2011)

Avantajları	Dezavantajları
Yüksek eksenel çekme dayanımı (liflerin yükleme yönü ve işaretiyle değişmektedir)	Kopma şekli ani ve gevrektr. Akma gerçekleşmez.
Korozyona dayanıklıdır.	Düşük enine dayanım (liflerin yükleme yönü ve işaretiyle değişmektedir)
Manyetik olmaması	Düşük elastisite modülü (takviye lifi tipine göre değişmektedir)
Yüksek yorulma dayanımı (takviye lifi tipine göre değişmektedir)	Ultraviyole radyasyon etkisi altında polimer reçineler ve lifler için hasar hassasiyeti

Tablo 4.2’ deki ifadeler ek olarak FRP donatıda kopmadan önce akma olmamasından dolayı gevrek kırılma yaşaması ve yangın dayanımının düşük olması gösterilebilir. Yangın dayanımı FRP donatı liflerini bir arada tutan matrisin 160°C de özelliğini yitirmesinden iç aderansını kaybeden donatının da özelliklerinin yok olmasına sebep vermektedir.

Bazı FRP donatı tipleri ve çeliğin gerilme birim şekil değiştirme grafikleri ve ortalama mekanik özelliklerini gösteren değerler Şekil 4.6 ve Tablo 4.3’ de verilmiştir.



Şekil 4.6. FRP ve çelik donatıların gerilme şekil değiştirme ilişkisi (Abdalla 2002)

Tablo 4.3. FRP donatı çubuklarının tipik çekme özellikleri (ACI 440.1R-06, 2006)

	Çelik	GFRP
Akma gerilmesi, MPa	276-517	-
Çekme dayanımı, MPa	483-690	483-1600
Elastisite Modülü, MPa	200	35-51
Akma şekil değiştirmesi, %	0.14-0.25	-
Kopma şekil değiştirmesi, %	6.0-12.0	1.2-3.1

4.2. Yüksek Sıcaklık Etkileri Altında GFRP ve Çelik Donatı Eksenel Çekme Dayanımı Deneyleri

Çalışmamızda GFRP ile çelik donatıların yüksek sıcaklık etkileri altında mekanik davranışları incelenmiştir. Bu amaçla bazı numuneler kontrol grupları olmak üzere, kiriş numunelerinde S420 sınıfı nervürlü inşaat demiri ve dış yüzeyi sarmal yapıda kumlu cam fiber donatılar kullanılmıştır. Her deney grubu için TS 500 standartlarına uygun olarak çelik numunelerden 12mm çapında ve 80cm uzunluğunda, GFRP donatılardan ise yine 12 mm çelik donatı çapına eşdeğer olarak 9mm çapında 80 cm uzunluğunda üçer adet

numune alınmıştır. Alınan numuneler Erzincan Üniversitesi Temel Araştırma Bilimleri Merkezi Laboratuvarları bünyesinde bulunan maksimum sıcaklık rejimi 1200°C olan seramik fırınında (Şekil 4.7) tıpkı kiriş ve küp numunelerinde de olduğu gibi kademeli olarak 100°C ile 800°C arasında belirlenen sıcaklıklara 1 saat maruz bırakılıp oda sıcaklığında soğumaya bırakıldıktan sonra deneye tabi tutulmuştur.

GFRP donatılar korumasız olarak sıcaklığa maruz kaldıktan sonra çekme test cihazına yerleştirilirken tutucu çenelerin GFRP yüzeyini aşındırıp erken sıyrılma ve kopmalara mahal vermemek adına özel çelik tüpler içerisine yüksek çekme mukavemetli epoksi dolgu malzemesi ile ankrajlanıp, donatının her iki ucu çelik tüp içerisine alınıp çekme testinde donatıya zarar vermeden her bir sıcaklık değeri için gerçek kopma mukavemeti tayini yapılmıştır.



Şekil 4.7. 1200°C rejimli seramik fırını.

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra numuneler Erzincan Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü 13 Mart Yapı Mekaniği Laboratuvarı bünyesindeki bulunan 100 kN çekme kapasitesine sahip Alşa marka çekme cihazında (Şekil 4.8.) deneye tabi tutulmuştur.



(1)



(2)

Şekil 4.8. Çelik ve GFRP donatılar için gerçekleştirilen eksenel çekme deneyi

Bu deney sonuçlarına göre ortalama bir grafik oluşturulmuştur. Şekil 4.10'da gerilme-birim uzama grafiği verilmiştir. Aynı zaman da akma ve kopma anındaki uzama değerleri de Tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.4. Çelik ve GFRP donatının mekanik özellikleri

Malzeme	Akma Dayanımı	Kopma Dayanımı	Akma Uzaması (%)	Kopma Uzaması (%)
Çelik	505,38	621,98	0,235	18,17
GFRP	-	907,95	-	1,84

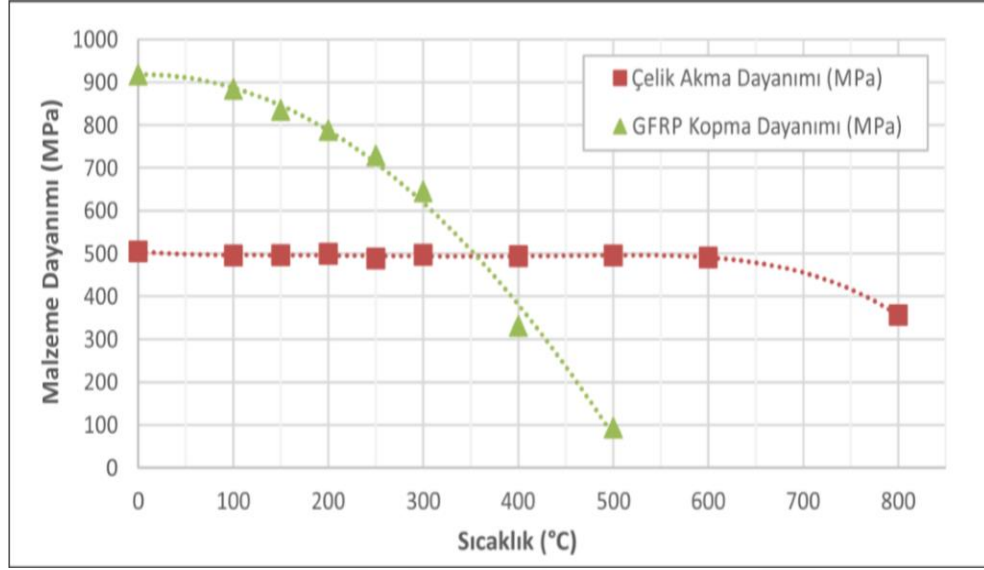
Çekme deneyleri sonucunda yüksek sıcaklık etkileri altında GFRP ve çelik donatılara ait akma ve kopma dayanımlarının karşılaştırmalı olarak gösterimi Tablo 4.5’de ve Şekil 4.11’de gösterilmektedir. Şekil 4.10’da ise donatıların sıcaklık değerlerine göre görseli mevcuttur.

Tablo 4.5. Yüksek sıcaklık etkileri altında çelik ve gfrp donatılar için eksenel çekme deneyi sonuçları

Sıcaklık (°C)	Çelik Akma Dayanımı (MPa)	GFRP Kopma Dayanımı (MPa)
Oda sıcaklığı	505,38	917,95
100	495,72	884,35
150	496,69	835,25
200	499,51	787,81
250	487,93	729,19
300	497,45	644,63
400	493,81	330,43
500	495,65	93,67
600	490,95	Numune Tamamen Yandı
800	356,09	Numune Tamamen Yandı

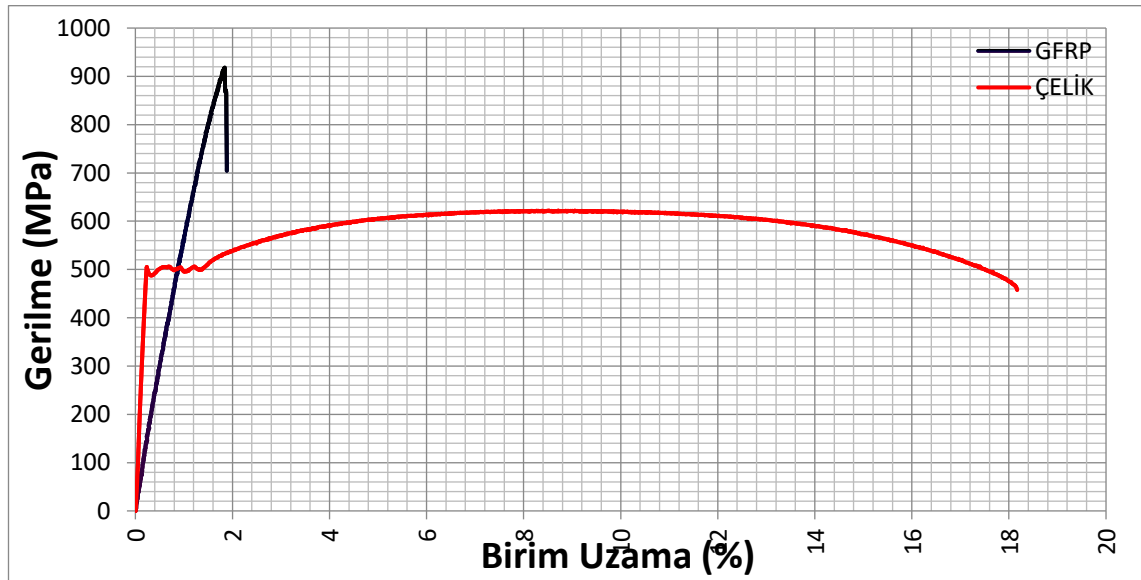


Şekil 4.9. GFRP donatıların her bir sıcaklık değerindeki görünüşleri



Şekil 4.10. Çelik ve GFRP donatılarının hedef sıcaklıklara göre dayanım değişimleri

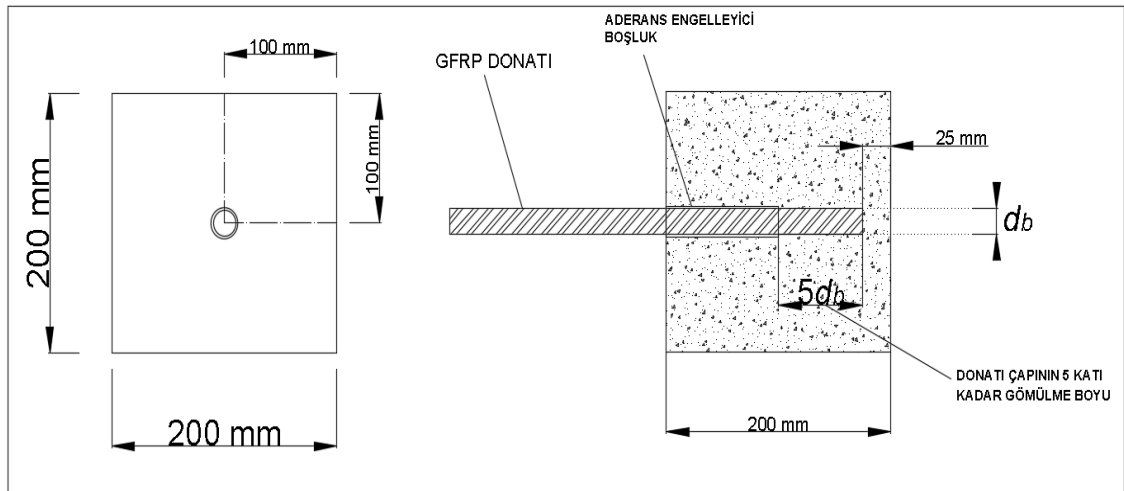
Kontrol numunelerinin çekme dayanımı karşılaştırmaları ise gerilme ve birim uzama grafiği halinde Şekil 4.11’de sunulmuştur. Çelik donatısında akma değerinin görüldüğü, buna karşın GFRP donatının akma olmadan çelik donatıya göre çok daha yüksek bir değerde koptuğu ve şekil değiştirmesinin daha sınırlı olduğu anlaşılmaktadır. Bu da GFRP donatının kopma davranışının çeliğe göre gevrek olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.11. GFRP ve çelik donatı gerilme-şekil değiştirme grafiği

4.3. Yüksek Sıcaklık Etkileri Altında Çelik ve GFRP Donatılar İçin Çekip Çıkarma Deneyleri

Çelik ve GFRP donatıları birbiriyle daha sağlıklı bir biçimde kıyaslayabilmek amacıyla her iki malzeme de ASTM D7913/D7913M-14 ve ACI 440.3R-12 yönergelerine göre çekip çıkarma deneyine tabi tutulmuştur. Donatı çaplarının 5 katı kadar bir mesafede beton küp numuneye saplanıp beton küp içinde geri kalan kısmı plastik bir tüp içerisinde serbest kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Bunun sebebi sıyrılma deneyleri esnasında donatı eksenine dik olan, çekme yönü doğrultusundaki, küp numune yüzeyinin donatıya tutunmasını engelleyip yüzey gerilimi oluşturma durumunu engellemek ve gerçek sıyrılma dayanımını elde etmektir. Donatının beton dışarısında kalan kısmı ise yangın sıvası diye adlandırılan ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı bir sıva ile kaplanarak ısı yalıtımı uygulanmıştır. İlgili standartlarda (Şekil 4.12. – Şekil 4.13.) donatının, betonun diğer ucundan dışarı çıkması tavsiye edilse de; yine çelik ve GFRP donatıların hepsinde betonun altından 2,5 cm’lik bir pay bırakılarak donatı içeride tutulmuştur. Yukarıda özetlendiği şekilde uygulanan deneyler sonucunda (Şekil 4.13.) betonun 100°C -800°C aralığındaki sıcaklık değerlerinde davranışına bağlı olarak beton-donatı arası aderans gerilmesi tespit edilmiştir.



Şekil 4.12. FRP çubuklar için ilgili standartlarda tanımlanan çekip çıkarma deneyi şeması



(1)



(2)

Şekil 4.13. Yangın sıvası ile kaplanmış çekip çıkarma numunesi ve oluşturulan deney düzeneği

Yüksek sıcaklık seviyelerinin hem beton dışında kalan donatıda hasar oluşturmasını hem de donatı-beton arasındaki yüzey sıcaklığını daha erken artırmasını önlemek amacıyla ve bir yangın ortamında sıcaklığın donatıya beton aracılığıyla aktarıldığını kabul ederek beton dışında kalan donatılar yangına dayanıklı sıvayla korumaya alınmıştır. Yangın sıvası diye tabir edilen ve Şekil 4.13’de de görüleceği üzere 5 cm çapında dairesel bir kesitli kalıp yardımıyla donatılar tamamıyla koruma altına alınmıştır. Sıvanın yapısı genişletilmiş perlittir. Genleştirilmiş perlit 900°C ile 1100°C arasında imal edildiğinden donatılar bu sıva sayesinde korunduğu çekip çıkarma deneylerindeki sonuçlardan anlaşılmaktadır. Zira deneylerin tamamı donatıların betondan sıyrılması şeklinde gerçekleşmiştir. Aderans kuvvetindeki düşüş sadece betonda oluşan zarar ile açıklanabilir. Tablo 4.6. ve Şekil 4.14’da sunulan aderans gerilmesi değişimleri incelendiğinde, hem çelik hem de yüzeyi kumlanmış tipteki GFRP donatılar için sıcaklık artışına bağlı olarak kademeli bir düşüş görülmektedir. Deney sonuçlarına göre çelik donatılar için 400°C civarında aderans gerilmesinin %70’inin muhafaza edildiği, 600°C civarında bu değer %42 seviyesine düşüp, sonrasında ise tamamına yakını kaybettiği gözlenmektedir. FRP çubuklar için ise geçmiş çalışmalarda sıcaklığın artmasıyla reçine

matrisindeki bozulmalardan dolayı lifler arasındaki aderansın sağlanamaması sebebiyle kenetlenme hem betonla FRP arasında hem de kendi içinde azaldığı belirtilmektedir. Referans sıcaklığı olarak verilen 210°C sıcaklıkta ise FRP donatılar başlangıç mukavemetlerinin ancak %10-20' sini koruyabildiği anlatılmaktadır. Ancak gerçekleştirilen deneyler sonucunda 250°C'de GFRP donatıların sergilediğini en yüksek aderans gerilmesinin %70'ini, 400°C seviyesinde ise %50'den fazlasını muhafaza edebildiği gözlenmiştir. Bu da GFRP'nin yangın başarımının, geçmiş çalışmalarda öne sürülen sonuçlardan daha üstün olabileceğini ortaya koymaktadır.

Tablo 4.6. Yüksek Sıcaklık Etkileri Altında Çelik ve GFRP Donatılar için Çekip Çıkarma Deneyi Sonuçları

Sıcaklık(C°)	Çelik Aderans Gerilmesi (MPa)	GFRP Aderans Gerilmesi (Mpa)
Oda sıcaklığı	12,76	9,94
100	11,77	8,18
150	11,05	7,69
200	10,81	7,67
250	9,81	6,90
300	9,54	6,22
400	9,40	5,69
500	8,25	4,47
600	7,50	3,38
800	1,48	Numuneler patladı

Yapılan deneyler sonucunda kayma gerilmeleri hesaplanırken çekme aletine yerleştirilen numunede donatının betona gömülme yüzeyinden tutucu çeneye kadar olan kısım ilk net boy olarak alınmıştır. Deney sonucunda tutucu çene ile donatının betona gömüldüğü yüzey arasındaki uzaklık ise son net boy olarak alınmıştır. Net kayma miktarı bu iki durumun farkından ve (4.1)'deki ifadeden bulunabilmektedir.

$$\Delta L_1 = \frac{F_x L_1}{A E}$$

$$S_{net} = \Delta L_{top} - \Delta L_1$$

Formüllerde;

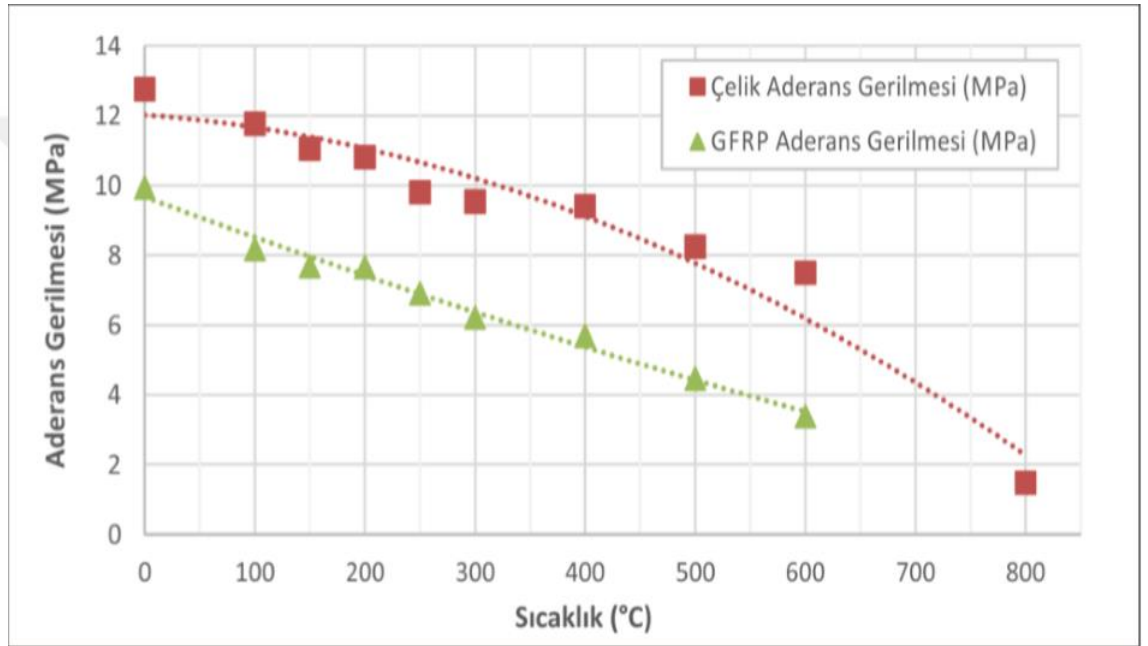
ΔL_1 = Serbest kısımdaki uzama miktarı

L_1 = Serbest kısım ilk boy

E = Elastisite modülü

S_{net} = Net kayma miktarı

ΔL_{top} = Çekme aletinden alınan son uzama miktarı



Şekil 4.14. Çelik ve GFRP donatıların hedef sıcaklıklara göre aderans gerilmesideğişimleri

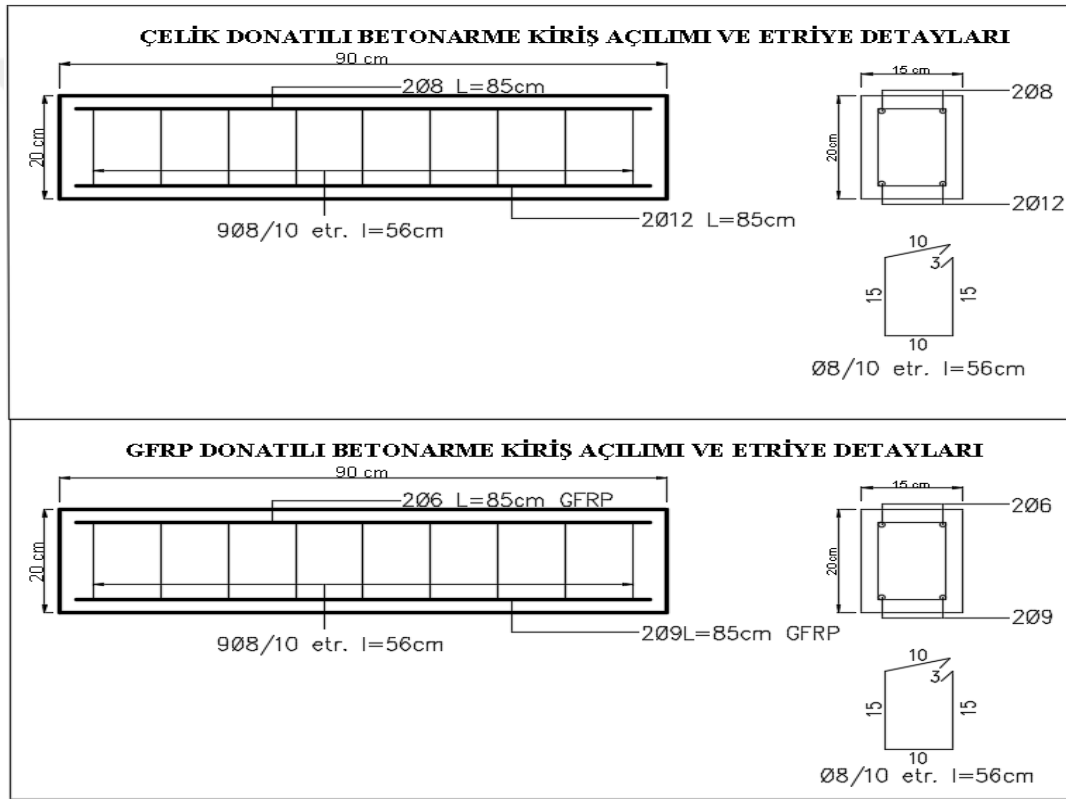
4.4. Kiriş Deney Numunelerinin Tasarım detayları

Çelik ve GFRP donatı için yapılan malzeme deneylerine göre mekanik özellikler belirlenmiştir. Bu veriler yardımıyla kiriş numuneleri eğilme etkisine göre kesme yönünden güçlü ve aynı davranışı gösterecek şekilde tasarımı yapılmıştır. Kullanılan malzemeler hakkında kuvvet-birim uzama eğrileri Şekil 4.10'teki grafikte, mekanik özellikleri de Tablo 4.4' de daha önce Bölüm 4.2'de gösterilmiştir. Farklı sıcaklık değerlerinde kullanılmak için GFRP ve Çelik donatılı eğilme davranışı yönünden

tasarlanan 2 farklı kiriş numuneleri (her grupta toplam 10 adet numune) toplamda 20 adet olarak üretilmiştir.

4.4.1. Eğilme numunelerinin tasarımı

Kiriş tasarımlarımız her iki numunede de kesme yönünden 135° kancalı kapalı çelik etriye ile güçlendirilerek GFRP ve Çelik numunelerin sadece eğilme davranışları hakkında fikir edinmek için, kiriş donatı planlarında da gösterildiği üzere, boyuna donatı olarak kullanılmışlardır. Bu gruptaki numunelerin detaylı çizimi Şekil 4.15’de gösterilmiştir.

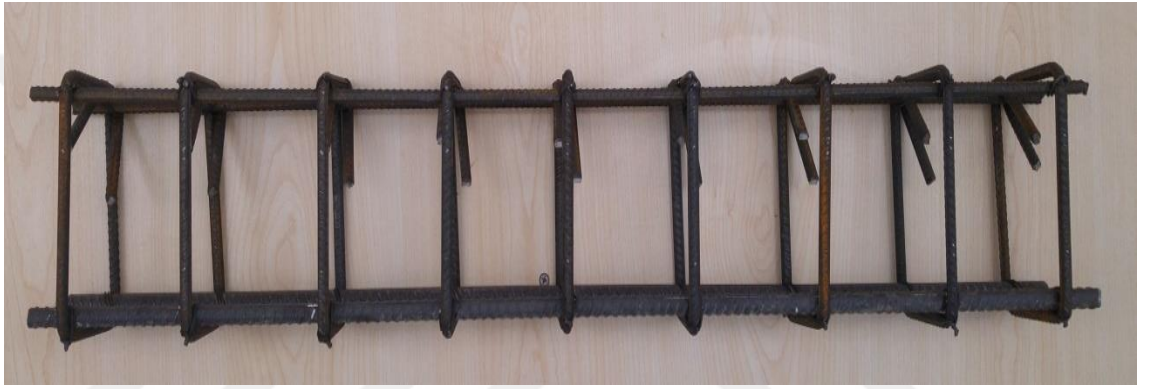


Şekil 4.15. Eğilme davranışına göre kiriş tasarımları

TS500 standardına göre eğilme davranışına göre tasarlanan kiriş numunelerinin en kesiti 15x20 cm’dir. Eğilme numunelerinden çelik donatılı kirişlerde Kiriş açıklığında çekme bölgesinde altta 2 adet $\phi 12$ boyuna donatı, üstte basınç bölgesinde ise 2 adet $\phi 8$ montaj donatısı bulunmaktadır. Etriyeler $\phi 8$ çelik donatıdan ve kiriş boyunca 10 cm ara ile montajlanmıştır. Belirlenen tasarıma göre eğilme numunelerinin üretimi için çelik donatılar fabrikadan hazır olarak istenmiş ve $\phi 8$, $\phi 12$ ’lik donatılar tasarımda öngörülen

uzunluklara göre kesilmiştir. Etriyeler bükme kolu yardımıyla standarda uygun olarak etriye çapının en az 5 katından büyük bir daire etrafında bükülerek imal edilmiştir. Şekil 4.16'de gösterilen numunelerden 10'ar adet hazırlanmıştır.

Aynı şekilde GFRP donatılar da üretim yerinden sipariş edilerek kullanılmadan önce laboratuvarımızda mekanik özelliklerine bakılarak ve çelik donatı için yukarıda anlatılan imalat aşamalarında basınç ve çekme bölgelerinde Ø12 donatı yerine Ø9, Ø8 donatı yerine ise Ø6 GFRP donatı kullanılarak tasarlanmıştır. Bu seçim her iki çelik donatıya en yakın sınıftaki GFRP'ler seçilerek tasarım tamamlanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 4.16 Eğilme davranışına göre tasarlanmış çelik ve gfrp donatılı kirişler

4.4.2. Deney numunelerinin adlandırılması

Deney numuneleri donatı çeşidi, maruz kaldığı sıcaklık derecesi ve ait olduğu grup parametrelerine göre Şekil 4.17’de gösterilmiştir.

FS 000 FL - SS 000 FL			
F-S	S	000	FL
F=GFRP S=ÇELİK	ÇELİK ETRİYE	SICAKLIK DERECEŚİ	EĞİLME GRUBU

Şekil 4.17 Eğilme grubu kirişlerinin adlandırılması

Örneğin 300°C ye sıcaklığa maruz eğilme grubu çelik donatılı kiriş numunesinin adlandırılması SS300FL, GFRP numunesinin ise FS300FL şeklinde olacaktır. ‘000’ olarak tabir edilen sıcaklık sınıfı ise oda sıcaklığını temsil etmektedir. Numuneler 0°C ‘de bekletilmemiştir. Her iki grup için numunelerinin tamamının isimleri Tablo 4.7. ‘de verilmiştir.

Tablo 4.7. Tüm deney numunelerinin isimleri

EĞİLME GRUBU KİRİŞLER	
Çelik Donatılı	GFRP Donatılı
SS000FL	FS000FL
-	FS100FL
-	FS150FL
-	FS200FL
-	FS250FL
-	FS300FL
-	FS400FL
-	FS500FL
-	FS600FL
-	FS800FL

4.5. Deney Düzeneği ve Yükleme Programı

Çalışmamızda imal edilen kiriş numunelerine ait deneyler, Erzincan Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü 13 Mart Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yükleme sistemi için kullanılan aletler Tablo 4.8' de listelenmiştir.

Tablo 4.8. Yükleme sisteminde kullanılan alet listesi

Cihaz Adı	Kullanım Amacı	Marka	Kapasite / Özellik
Hidrolik Silindir	Eksenel Yükleme	ENERPAC	100 ton/itme-çekme
Yük hücresi	Yük Ölçümü	CAS	60 ton/itme-çekme

Laboratuvarda mevcut bulunan çelik kafes sistem yardımıyla, eksenel yüklemede 30 ton itme-çekme kapasitesine sahip hidrolik pistonlar vasıtasıyla kiriş numuneler üzerine kademeli bir yük artışı uygulanarak yapılmıştır. Kiriş numunelerin açıklıklarında tekil yükü elde etmek için numunelerin mesnetlerden 45 cm mesafesine (tam orta noktasına) silindir çelik yükleme noktası oluşturulmuştur. Bu düzenek sayesinde kiriş numunelerinin eğilme etkisi yönünden incelenmesine olanak sağlanmıştır. Deney düzeneği daha detaylı bir gösterimle Şekil 4.18'de gösterilmiştir.

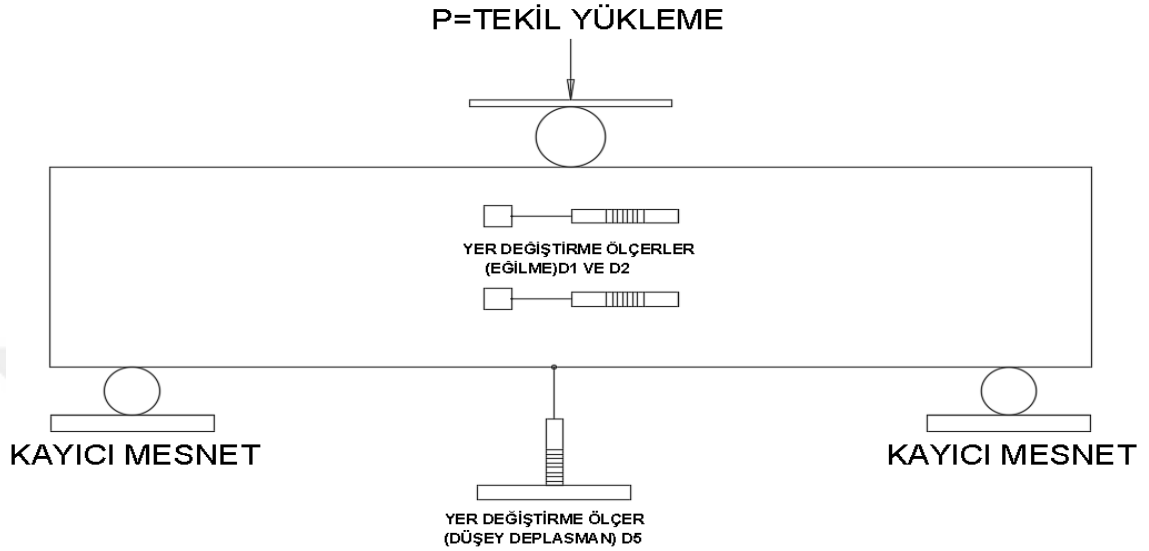


Şekil 4.18. Kiriş numuneleri için deney düzeneği

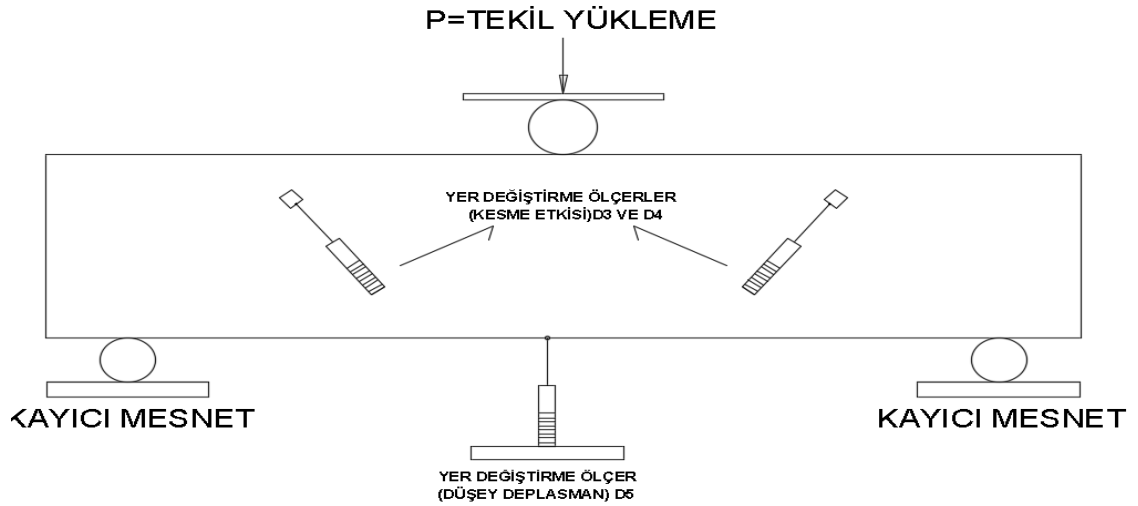
4.5.1. Ölçüm ve veri toplama sistemi

Ölçüm düzeneği hazırlanırken kirişte meydana gelen kesme ve eğilme çatlağı miktarları ve aynı zaman da kirişte meydana gelen deplasman miktarının yer değiştirme ölçerler (YD) yardımıyla ölçülmesi hedeflenmiştir. Bütün bu ölçümler deney esnası sırasında 1 adet veri aktarım cihazı ile anlık olarak bilgisayar ortamına kayıt edilmiştir. Düşey deplasman ölçmek için kullanılan yer değiştirme (D5) ölçer kirişin tam orta noktasında, kesme çatlağını ölçmek için noktasal yükten mesnetlere doğru uzanan doğrultulara(D3,D4) ve eğilme çatlağını ölçmek için ise kiriş boyu doğrultusunda

çatlakların oluşacağı öngörülen yerlere (D1,D2) olmak üzere toplam 5 adet yer değiştirme ölçer kullanılmıştır. Yer değiştirme ölçerlerin kiriş üzerindeki ayrıntılı gösterimi Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.19. Kiriş numunelerinin arka kısmına yerleştirilen deplasman ölçerler



Şekil 4.20. Kiriş numunelerinin ön kısmına yerleştirilen deplasman ölçerler

Deneyde kullanılmış ölçüm ve veri aktarma cihazlarının özellikleri Tablo 4.9’da gösterilmiştir.

Tablo 4.9. Ölçüm ve veri toplama cihazları listesi.

Adı	Kullanım Amacı	Marka	Kapasite/Özellik
Yer Değiştirme Ölçer (D5)	Düşey Deplasman Ölçümü	OPKON	50 mm
Yer Değiştirme Ölçer (D1-D2)	Eğrilik Hesabı	OPKON	100 mm
Yer Değiştirme Ölçer (D4-D5)	Kesme Çatlak Ölçümü	OPKON	100 mm
Veri Aktarma Cihazı	Sinyallerin dijital veriye dönüştürülüp bilgisayar ortamına aktarılması	Test Box	8 kanal girişli

4.5.2. Ölçümlerin değerlendirilmesi

Yapılan ölçümler ile elde edilen eş zamanlı verilere göre değerlendirmeler aşağıda sıralanan yöntemler ile yapılmıştır:

- Silindir yükleme cihazı ve deplasman ölçerler yardımıyla yük-deplasman hesabının yapılması,
- Kiriş ön ve arka yüzeylerinde bulunan deplasman ölçerler yardımı ile moment-eğrilik hesabının yapılması,
- Numunelerdeki enerji tüketim kapasitelerinin belirlenmesi,
- Her bir sıcaklık grubu için beton ve çeliğin mekanik özelliklerinin belirlenmesi,
- Elde edilen sonuçların birbiriyle karşılaştırılması.

4.6. Eğrilik Hesabının Yapılması

Eğrilik birim dönme açısı yani birim boyda meydana gelen dönme miktarıdır. Eğrilik, iki kesit arasındaki dönme açısı farkından veya doğrudan kesitteki birim deformasyon değerlerinden hesaplanabilir. İki kesit arasındaki dönme açısı radyan cinsinden tespit edilerek, bu açının ölçüm bölgesi uzunluğuna bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Ancak özellikle betonarme elemanların eğrilik değerinin ölçümünde henüz tam olarak bir kabul geliştirilememiştir. Zira eğrilik ölçümü yapılacak bölgenin uzunluğu, hesaplanacak değeri büyük oranda etkilemektedir. Bu nedenle eğrilik hesabı yapılacak bölümler oluşabilecek tüm çatlakları kapsayacak şekilde olmalı ki ölçülen eğrilik değeri gerçek anlamda hesabı daha doğru bulmamıza yardımcı olacaktır. Ayrıca, bölge içerisindeki aynı çatlakları kapsayacak şekilde ölçüm bölgesinin uzunluğunun artırılması durumunda da dönme açısı sabit kalacağından eğrilik değeri gerçek değerden daha düşük olarak hesaplanacaktır. Eğrilik hesabı yapılırken bu durumlar göz önüne alınmadığı takdirde deneysel olarak yapılan çalışmalarda eğrilik hesap değerleri doğru hesaplanamazsa bize numune davranışları hakkında yanlış bilgiler verebilir. Dolayısıyla eğrilik hesaplarının analitik hesaplarla karşılaştırmadan ziyade, eleman üzerindeki çatlak dağılımı hakkında fikir edinmek ve farklı deney numuneleri arasında mukayese amacıyla kullanılması tavsiye edilmektedir.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Çalışmamızın bu bölümünde eğilme açısından davranışları araştırılan GFRP donatılı kiriş numunelerinin yüksek sıcaklık etkileri altında her bir sıcaklık değeri için deney sonuçları incelenmiştir. Kontrol numunesi olarak yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmayan çelik donatılı kiriş numuneleri taşıma gücü yönünden GFRP donatı kirişler ile karşılaştırılmıştır. Yüksek sıcaklık kademeleri arttırılarak yapılan deneylerde ise GFRP donatılı kirişler kendi içerisinde değerlendirilmeye tabi tutulmuştur.

5.1. Çelik Donatılı Eğilme Grubu Kiriş Numune Deneyleri

5.1.1. SS000FL kirişi deneyleri

Tamamen çelik boyuna donatı ve çelik etriye ile TS500 standardına uygun olarak imal edilen SS000FL numunesi diğer tüm kiriş numuneleri gibi 28 gün kür havuzunda kürlenmiş ve yüksek sıcaklığa maruz bırakılmayarak oda sıcaklığında muhafaza edilmiş, kontrol numunesi olarak deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.1. Deney Düzenekindeki SS000FL Numunesi

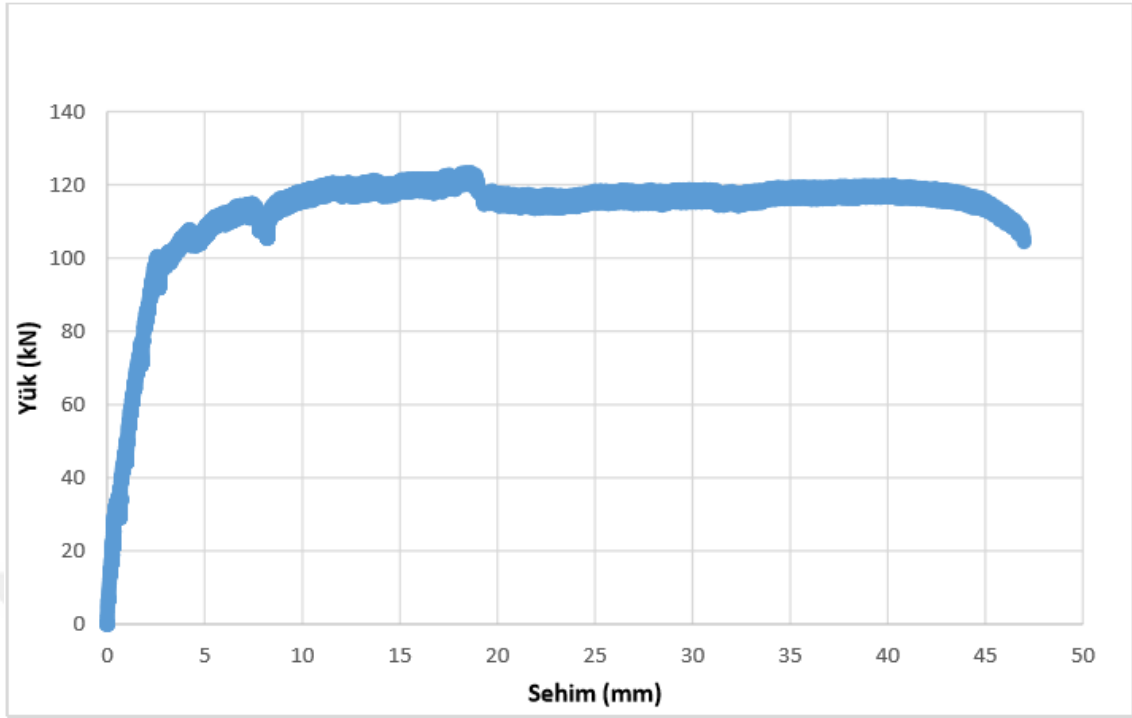
Kiriş numunesinde yük 35 kN seviyesine ulaştığında çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Çatlakları renkli kalemler yardımıyla işaretlenmesi çatlak genişliklerinin, şekil ve

yönlerinin kırılma davranışı üzerindeki yorumu açısından bilgi vermektedir. Eksenel yükün artmaya devam etmesiyle yeni ve daha derin çatlaklar oluştukça farklı işaretleme kalemiyle yeri çatlaklar belirlenmiştir. Eksenel yükün 50 kN ile 75 kN değerlerine ulaştığı anlarda yeni çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Kirişin göçme öncesi anına kadar çatlakların farklı renklerde çizilerek belirlenmesi işlemi tekrarlanmıştır. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



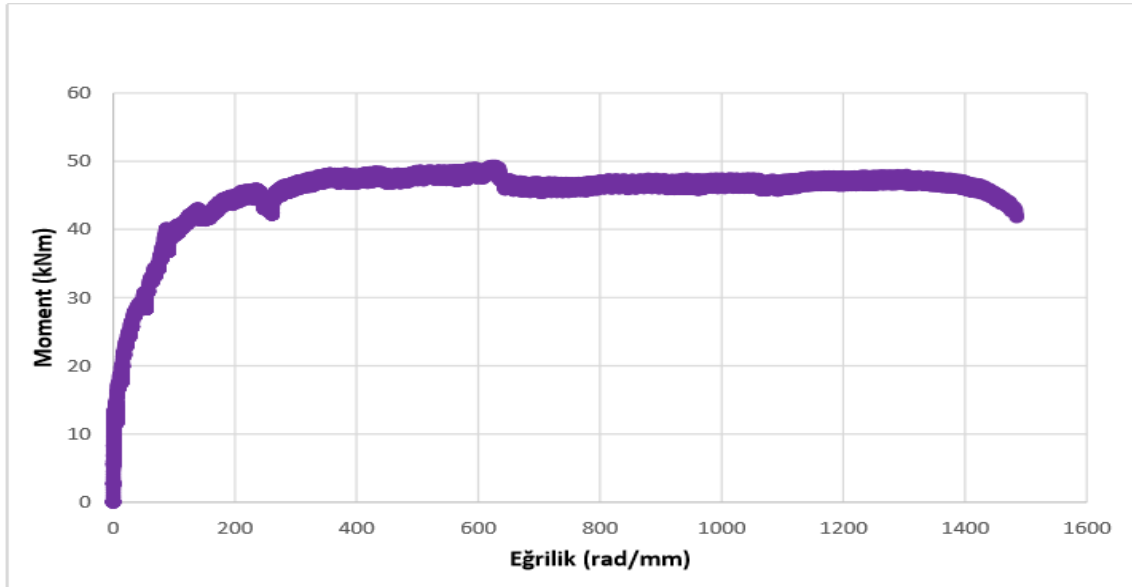
Şekil 5.2. Deney Sonunda SS000FL Kiriş Numunesi

Deney sonrası YD-5 deplasman ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-deplasman grafiği Şekil 5.3’de gösterilmiştir. Deney sonunda kirişin göçmesine neden olan yük değeri 123,31 kN ve bu yükteki düşey deplasman değeri ise 18,40 mm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.3. SS000FL için yük- sehim grafiği

YD-1,YD-2,YD-3,YD-4 deplasman ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.4’de grafik olarak verilmiştir.



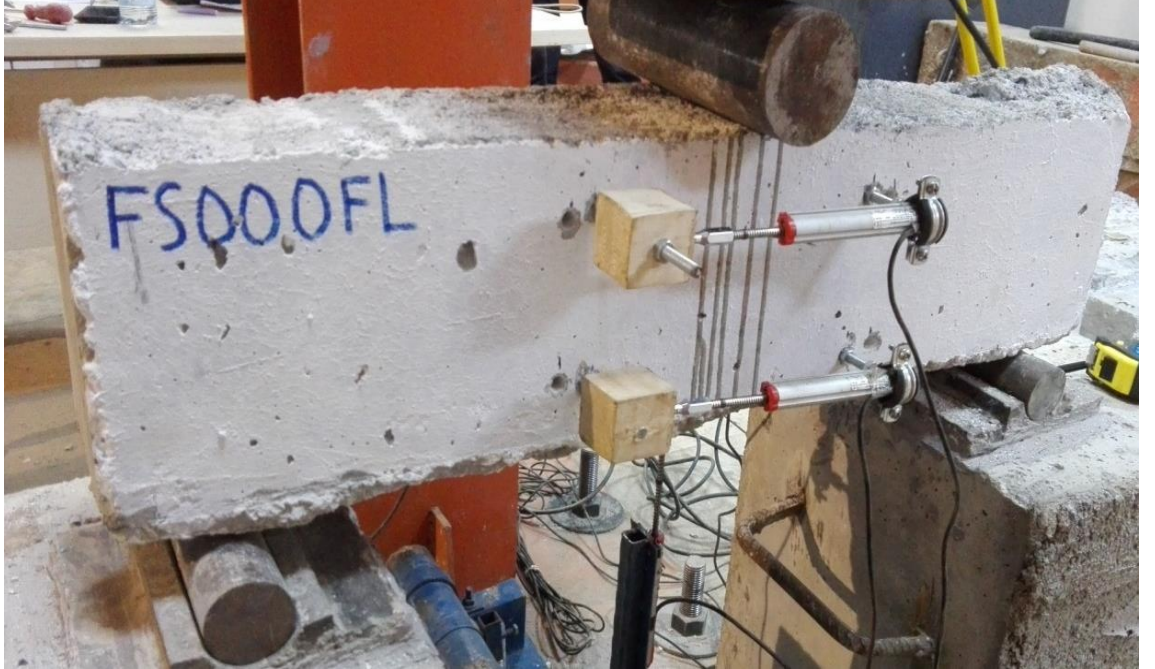
Şekil 5.4. SS000FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği

Çelik donatılı kiriş kontrol numunesi yaklaşık olarak 100 kN'a kadar çok şekil değiştirmeden yük almıştır. Bu durum aynı şekilde moment-eğrilik grafiğinde yaklaşık olarak 42 kNm moment sınırından sonra gerçekleşmektedir. Bu sınır değerlerden sonraki durumlarda ise kiriş sünek bir davranış göstererek eskisi kadar yük alamayıp moment karşılayamasa bile şekil değiştirmeye devam ederek eğilmeden dolayı göçmüş ve deney tamamlanmıştır.

5.2. GFRP Donatılı Eğilme Grubu Kiriş Numune Deneyleri

5.2.1. FS000FL kirişi deneyleri

Bu kiriş numunelerinde boyuna donatılar GFRP donatıdan, etriyeler ise çelik donatıdan üretilmiştir. Üretilen FS000FL numunesi diğer kiriş numunelerde olduğu gibi 28 gün küre tabi tutularak oda sıcaklığında kurumaya bırakılmış ve kontrol grubu olması amacıyla hiçbir sıcaklığa maruz bırakılmadan Şekil 5.5'de görüldüğü gibi deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur.



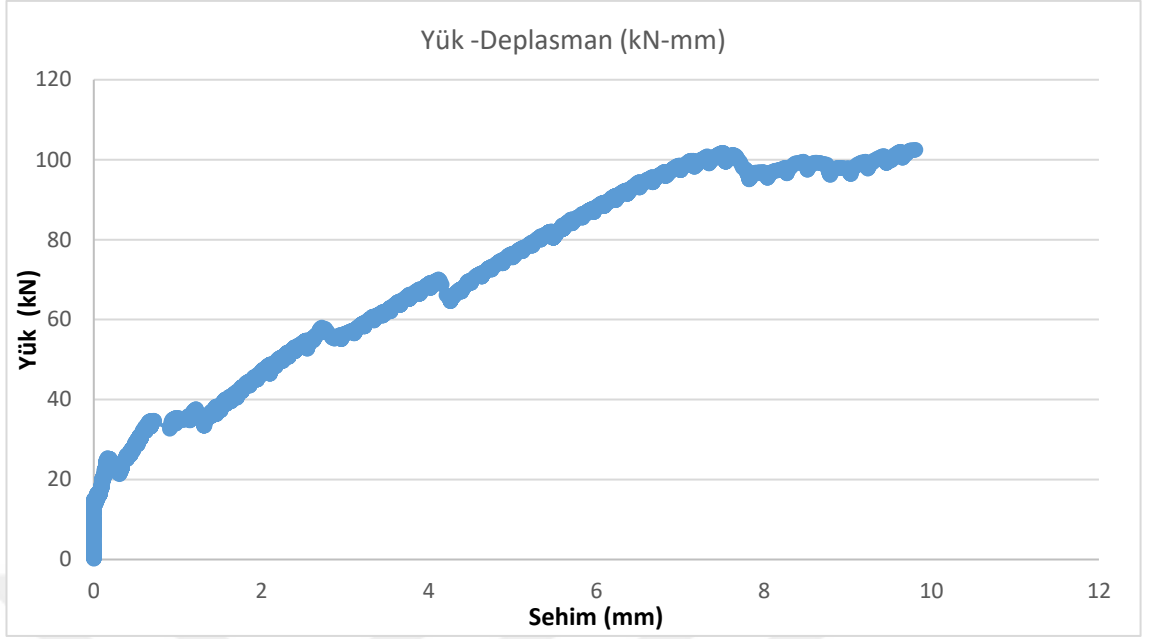
Şekil 5.5. Deney Düzeneğindeki FS000FL Numunesi

Kiriş numunesinde yük 24 kN seviyesine ulaştığında çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Çatlakları renkli kalemler yardımıyla işaretlenmesi çatlak genişliklerinin, şekil ve yönlerinin kırılma davranışı üzerindeki yorumu açısından bilgi vermektedir. Eksenel yükün artmaya devam etmesiyle yeni ve daha derin çatlaklar oluştukça farklı işaretleme kalemiyle yeri çatlaklar belirlenmiştir. Eksenel yükün 37 kN ile 69 kN değerlerine ulaştığı anlarda yeni ve derin çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Kirişin göçme öncesi anına kadar çatlakların farklı renklerde çizilerek belirlenmesi işlemi tekrarlanmıştır. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.6'de gösterilmiştir.



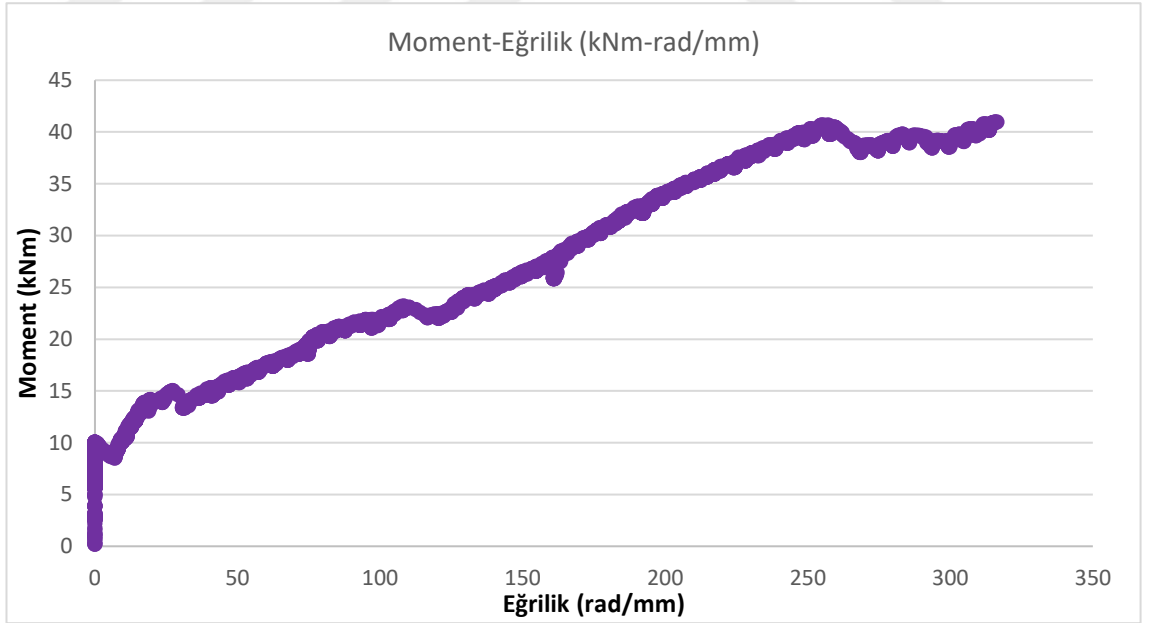
Şekil 5.6. Deney Sonunda FS000FL Kiriş Numunesi

Deney sonrası YD-5 deplasman ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-deplasman grafiği Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Deney sonunda kirişin göçmesine neden olan yük değeri 102,44 kN ve bu yükteki düşey deplasman değeri ise 9,81 mm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.7. FS000FL için yük- sehim grafiği

YD-1,YD-2,YD-3,YD-4 deplasman ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.8’de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.8. FS000FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği

GFRP donatılı kiriş kontrol numunesi yaklaşık olarak 30 kN'a kadar çok şekil değiştirmeden yük almıştır. Bu durum aynı şekilde moment-eğrilik grafiğinde yaklaşık olarak 10 kNm moment taşıma gücü sınırından sonra gerçekleşmektedir. Bu sınır değerlerden sonraki durumlarda ise GFRP'li kiriş aynı şartlardaki çelik donatılı kiriş numunesine göre daha az sünek-gevrek bir davranış göstererek eğilmeden dolayı göçmüş ve deney tamamlanmıştır. Gevrek tabiri YD-5 düşey deplasman ölçer değerlerinden $YD-5_{\text{çelik}} = 18,40 \text{ mm} > YD-5_{\text{GFRP}} = 9,81 \text{ mm}$ anlaşılmaktadır.

5.2.2. FS100FL kirişi deneyleri

Bu kiriş numunesinde de boyuna donatılar GFRP donatıdan, etriyeler ise çelik donatıdan üretilmiştir. Üretilen FS100FL numunesi diğer kiriş numunelerde olduğu gibi 28 gün küre tabi tutularak oda sıcaklığında kurumaya bırakılmış ve seramik fırın içerisinde 1 saat süre ile 100°C' de sıcaklığa maruz bırakılmış, oda sıcaklığına kadar laboratuvar ortamında soğuduktan sonra Şekil 5.9'da görüldüğü gibi deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.9. Deney Düzeneğindeki FS100FL Numunesi

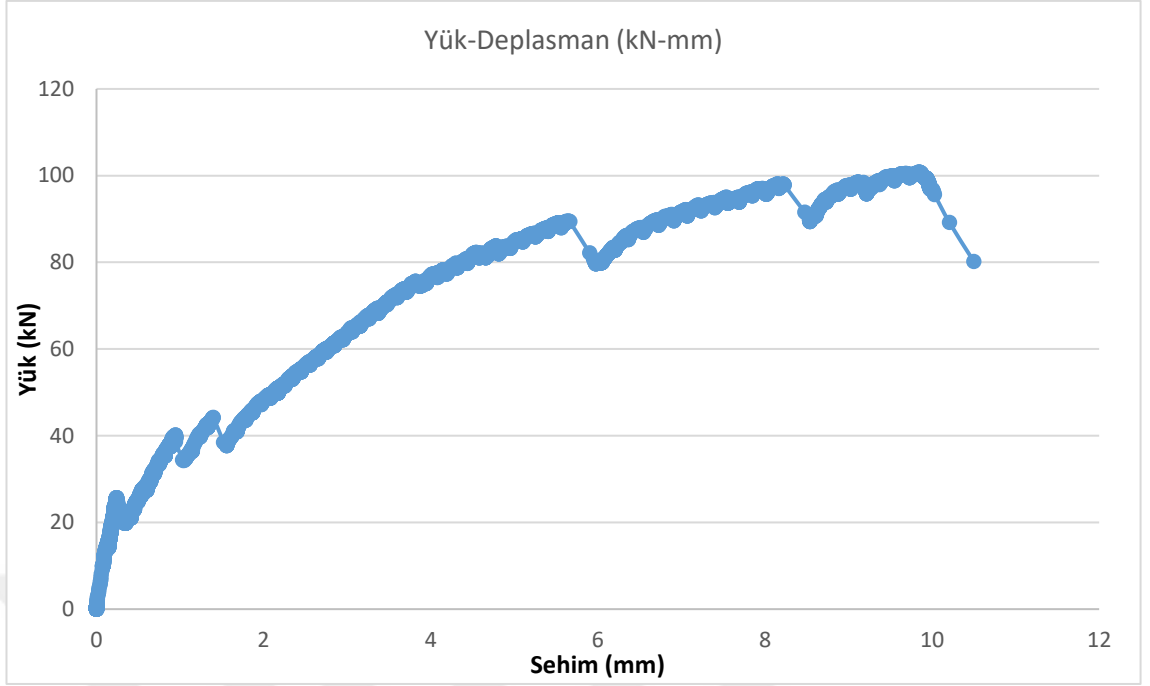
Kiriş numunesinde yük 28 kN seviyesine ulaştığında çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Çatlakları renkli kalemler yardımıyla işaretlenmesi çatlak genişliklerinin, şekil ve

yönlerinin kırılma davranışı üzerindeki yorumu açısından bilgi vermektedir. Eksenel yükün artmaya devam etmesiyle yeni ve daha derin çatlaklar oluştukça farklı işaretleme kalemiyle yeni çatlaklar belirlenmiştir. Eksenel yükün 37 kN ile 53 kN değerlerine ulaştığı anlarda yeni ve derin çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Kirişin göçme öncesi anına kadar çatlakların farklı renklerde çizilerek belirlenmesi işlemi tekrarlanmıştır. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.10'da gösterilmiştir.



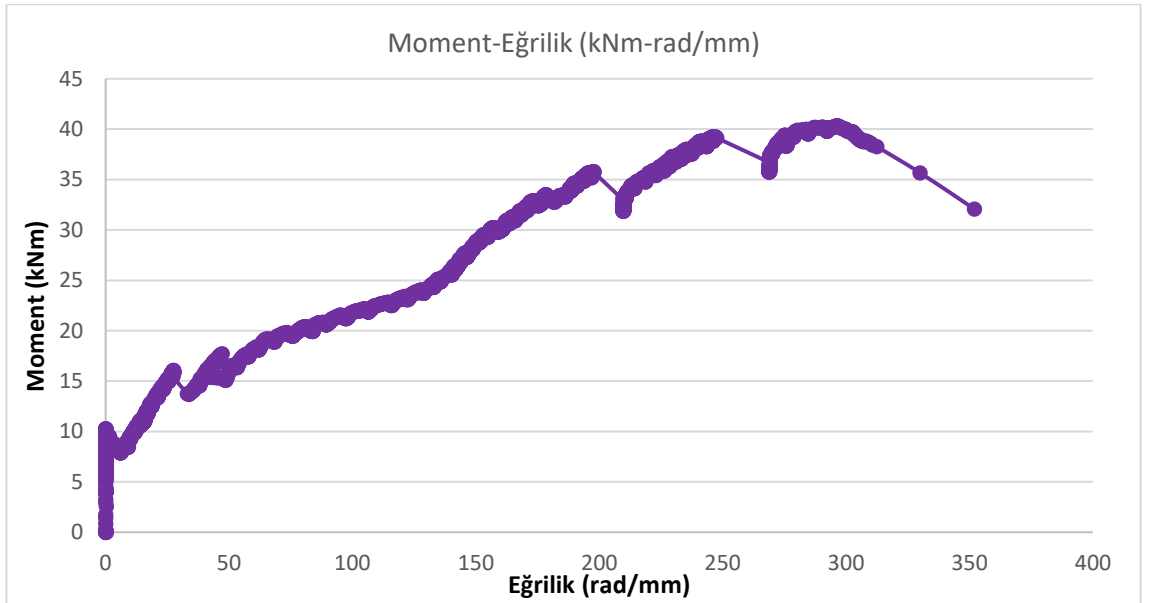
Şekil 5.10. Deney Sonunda FS100FL Kiriş Numunesi.

Deney sonrası YD-5 deplasman ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-deplasman grafiği Şekil 5.11'de gösterilmiştir. Deney sonunda kirişin göçmesine neden olan yük değeri 100,80 kN ve bu yükteki düşey deplasman değeri ise 9,84 mm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.11. FS100FL için yük- sehim grafiği

YD-1,YD-2,YD-3,YD-4 deplasman ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.12’de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.12. FS100FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği

100°C’de GFRP donatılı kiriş numunesi yaklaşık olarak 30 kN’a kadar çok şekil değiştirmeden yük almıştır. Bu durum aynı şekilde moment-eğrilik grafiğinde yaklaşık olarak 10 kNm moment taşıma gücü sınırından sonra gerçekleşmektedir. Bu sınır değerlerden sonraki durumlarda ise GFRP’li kiriş aynı şartlardaki kontrol numunesine göre çok yakın bir davranış göstererek eğilmeden dolayı göçmüş ve deney tamamlanmıştır. YD-5 düşey deplasman ölçer değerlerinden $YD-5_{000}=9,81 \text{ mm} < YD-5_{100}=9,84 \text{ mm}$ elde edilmektedir.

5.2.3. FS150FL kirişi deneyleri

Bu kiriş numunesinde de boyuna donatılar GFRP donatıdan, etriyeler ise çelik donatıdan üretilmiştir. Üretilen FS150FL numunesi diğer kiriş numunelerde olduğu gibi 28 gün küre tabi tutularak oda sıcaklığında kurumaya bırakılmış ve seramik fırın içerisinde 1 saat süre ile 150°C’ de sıcaklığa maruz bırakılmış, oda sıcaklığına kadar laboratuvar ortamında soğuduktan sonra Şekil 5.13’de görüldüğü gibi deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.13. Deney Düzeneğindeki FS150FL Numunesi

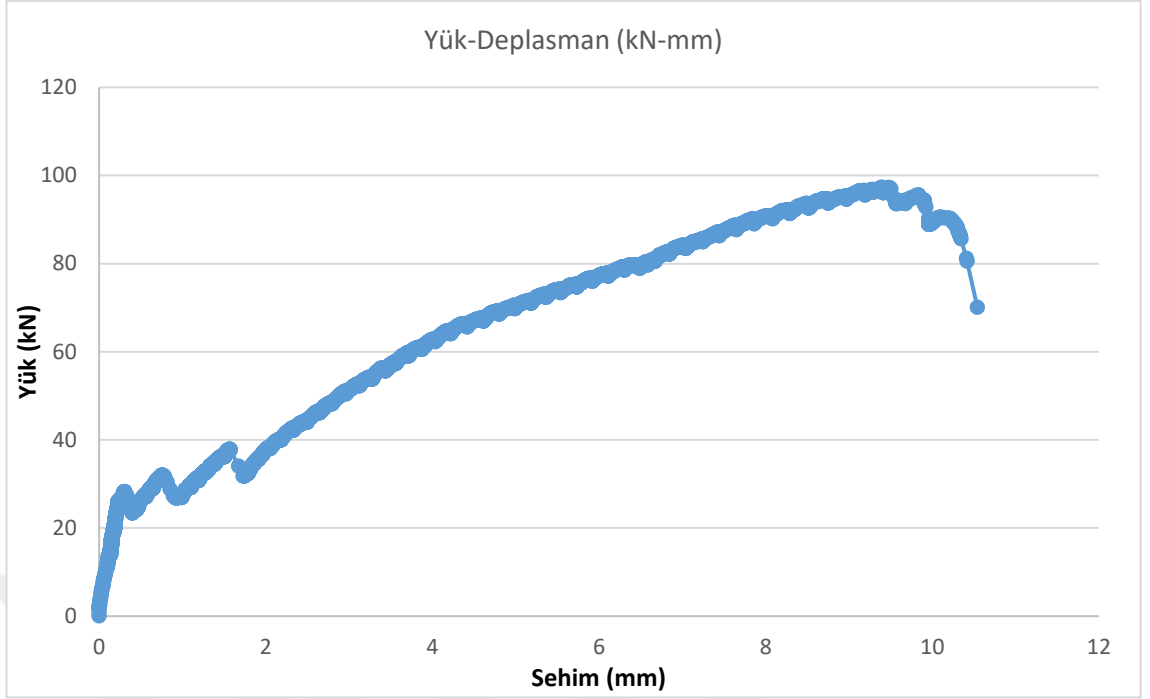
Kiriş numunesinde yük 27 kN seviyesine ulaştığında çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Çatlakları renkli kalemler yardımıyla işaretlenmesi çatlak genişliklerinin, şekil ve

yönlerinin kırılma davranışı üzerindeki yorumu açısından bilgi vermektedir. Eksenel yükün artmaya devam etmesiyle yeni ve daha derin çatlaklar oluştukça farklı işaretleme kalemiyle yeri çatlaklar belirlenmiştir. Eksenel yükün 37 kN ile 55 kN değerlerine ulaştığı anlarda yeni ve derin çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Kirişin göçme öncesi anına kadar çatlakların farklı renklerde çizilerek belirlenmesi işlemi tekrarlanmıştır. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.14’de gösterilmiştir.



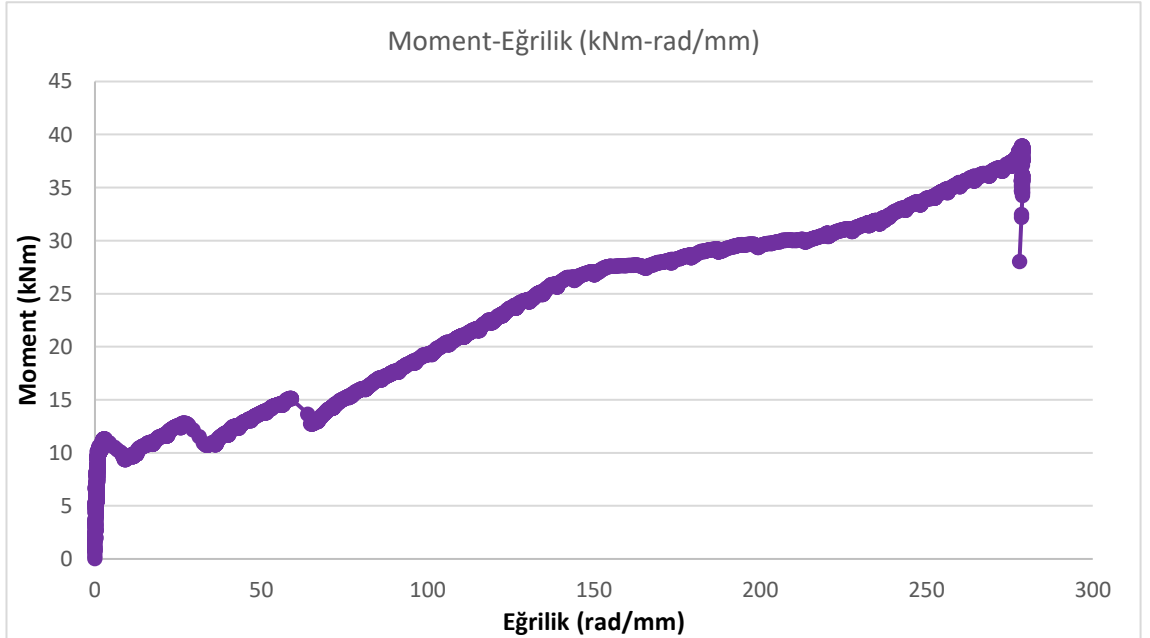
Şekil 5.14. Deney Sonunda FS150FL Kiriş Numunesi

Deney sonrası YD-5 deplasman ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-deplasman grafiği Şekil 5.15’de gösterilmiştir. Deney sonunda kirişin göçmesine neden olan yük değeri 97,32 kN ve bu yükteki düşey deplasman değeri ise 9,39 mm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.15. FS150FL için yük- sehim grafiği

YD-1,YD-2,YD-3,YD-4 deplasman ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.16’de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.16. FS150FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği

150°C’de GFRP donatılı kiriş numunesi yaklaşık olarak 30 kN’a kadar çok şekil değiştirmeden yük almıştır. Bu durum aynı şekilde moment-eğrilik grafiğinde yaklaşık olarak 12 kNm moment taşıma gücü sınırından sonra gerçekleşmektedir. Bu sınır değerlerden sonraki durumlarda ise GFRP’li kiriş kontrol numunesine nazaran taşıma gücünde bir kayıp yaşamıştır. çok yakın bir davranış göstererek eğilmeden dolayı göçmüş ve deney tamamlanmıştır. YD-5 düşey deplasman ölçer değerlerinden $YD-5_{100}=9,84 \text{ mm}$ $> YD-5_{150}=9,39 \text{ mm}$ elde edilmektedir. Bu bize bu numunenin 100°C’ deki numuneye göre daha gevrek davrandığını göstermektedir.

5.2.4. FS200FL kirişi deneyleri

Bu kiriş numunesinde de boyuna donatılar GFRP donatıdan, etriyeler ise çelik donatıdan üretilmiştir. Üretilen FS200FL numunesi diğer kiriş numunelerde olduğu gibi 28 gün küre tabi tutularak oda sıcaklığında kurumaya bırakılmış ve seramik fırın içerisinde 1 saat süre ile 200°C’ de sıcaklığa maruz bırakılmış, oda sıcaklığına kadar laboratuvar ortamında soğuduktan sonra Şekil 5.17’de görüldüğü gibi deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur.



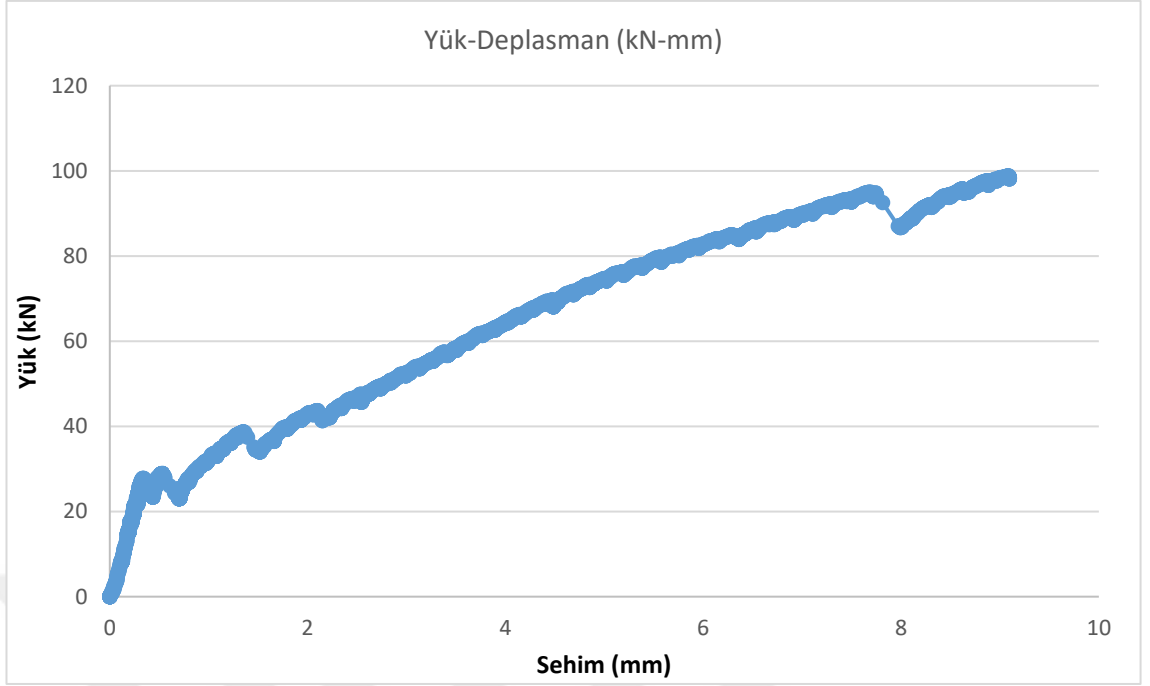
Şekil 5.17. Deney Düzeneğindeki FS200FL Numunesi

Kiriş numunesinde yük 27 kN seviyesine ulaştığında çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Çatlakları renkli kalemler yardımıyla işaretlenmesi çatlak genişliklerinin, şekil ve yönlerinin kırılma davranışı üzerindeki yorumu açısından bilgi vermektedir. Eksenel yükün artmaya devam etmesiyle yeni ve daha derin çatlaklar oluştukça farklı işaretleme kalemiyle yeri çatlaklar belirlenmiştir. Eksenel yükün 37 kN ile 55 kN değerlerine ulaştığı anlarda yeni ve derin çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Kirişin göçme öncesi anına kadar çatlakların farklı renklerde çizilerek belirlenmesi işlemi tekrarlanmıştır. Deney sonrası oluşan çatlaklar şekil 5.18’de gösterilmiştir.



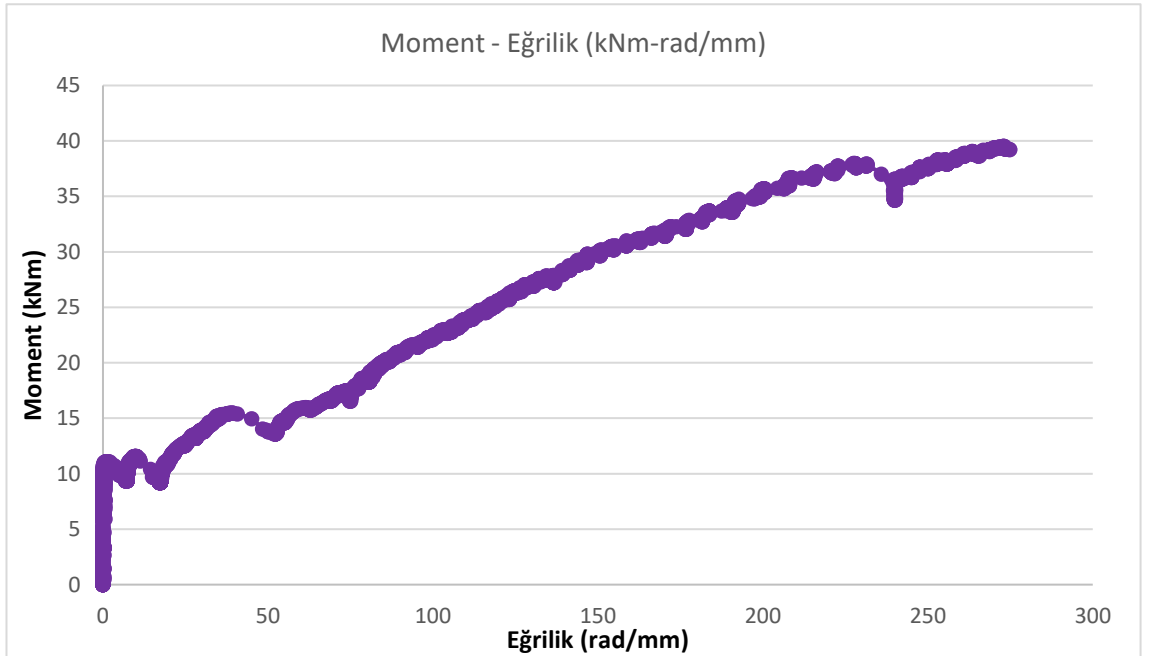
şekil 5.18. Deney Sonunda FS200FL Kiriş Numunesi

Deney sonrası YD-5 deplasman ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-deplasman grafiği şekil 5.19’de gösterilmiştir. Deney sonunda kirişin göçmesine neden olan yük değeri 98,80 kN ve bu yükteki düşey deplasman değeri ise 9,08 mm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.19. FS200FL için yük- sehim grafiği

YD-1,YD-2,YD-3,YD-4 deplasman ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.20’de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.20. FS200FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği

200°C’de GFRP donatılı kiriş numunesi yaklaşık olarak 30 kN’a kadar çok şekil değiştirmeden yük almıştır. Bu durum aynı şekilde moment-eğrilik grafiğinde yaklaşık olarak 11 kNm moment taşıma gücü sınırından sonra gerçekleşmektedir. Bu sınır değerlerden sonraki durumlarda ise GFRP’li kiriş kontrol numunesine nazaran taşıma gücünde kayıp yaşamış eğilmeden dolayı göçmüş ve deney tamamlanmıştır. YD-5 düşey deplasman ölçer değerlerinden $YD-5_{150}=9,39\text{ mm} > YD-5_{200}=9,08\text{ mm}$ elde edilmektedir. Bu bize bu numunenin 150°C’ deki numuneye göre daha gevrek davrandığını göstermektedir.

5.2.5. FS250FL kirişi deneyleri

Bu kiriş numunesinde de boyuna donatılar GFRP donatıdan, etriyeler ise çelik donatıdan üretilmiştir. Üretilen FS250FL numunesi diğer kiriş numunelerde olduğu gibi 28 gün küre tabi tutularak oda sıcaklığında kurumaya bırakılmış ve seramik fırın içerisinde 1 saat süre ile 250°C’ de sıcaklığa maruz bırakılmış, oda sıcaklığına kadar laboratuvar ortamında soğuduktan sonra Şekil 5.21’de görüldüğü gibi deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur.



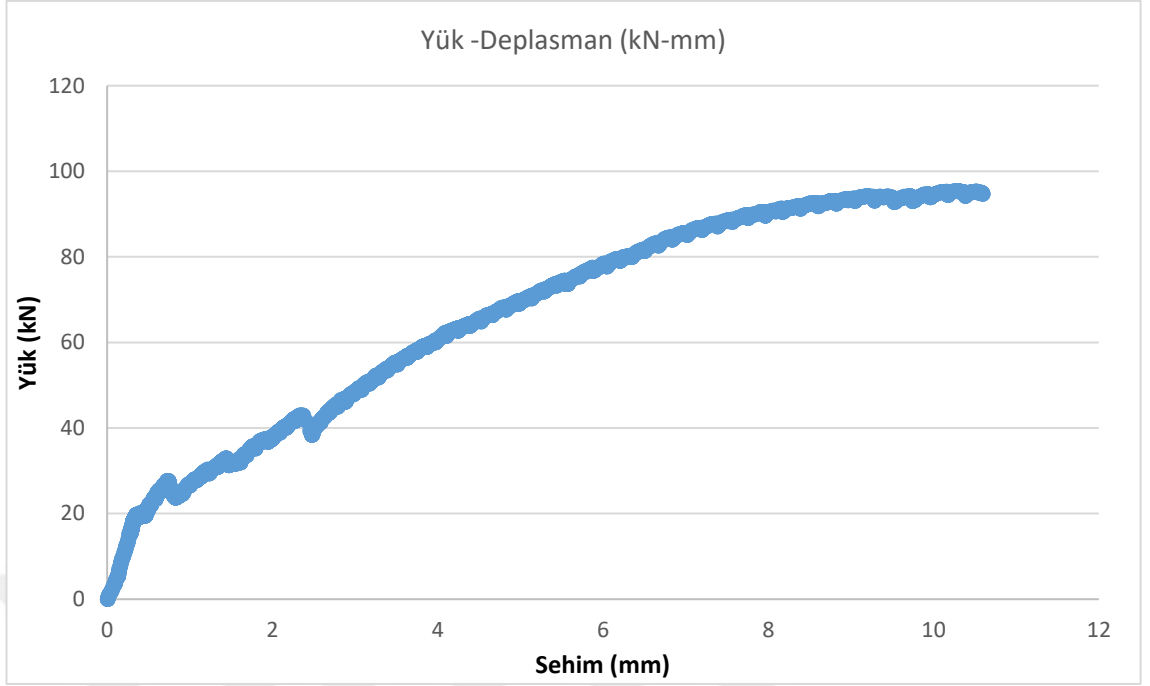
Şekil 5.21. Deney Düzeneğindeki FS250FL Numunesi

Kiriş numunesinde yük 20 kN seviyesine ulaştığında çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Çatlakları renkli kalemler yardımıyla işaretlenmesi çatlak genişliklerinin, şekil ve yönlerinin kırılma davranışı üzerindeki yorumu açısından bilgi vermektedir. Eksenel yükün artmaya devam etmesiyle yeni ve daha derin çatlaklar oluştukça farklı işaretleme kalemiyle yeri çatlaklar belirlenmiştir. Eksenel yükün 26 kN ile 46 kN değerlerine ulaştığı anlarda yeni ve derin çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Kirişin göçme öncesi anına kadar çatlakların farklı renklerde çizilerek belirlenmesi işlemi tekrarlanmıştır. Deney sonrası oluşan çatlaklar şekil 5.22. 'de gösterilmiştir.



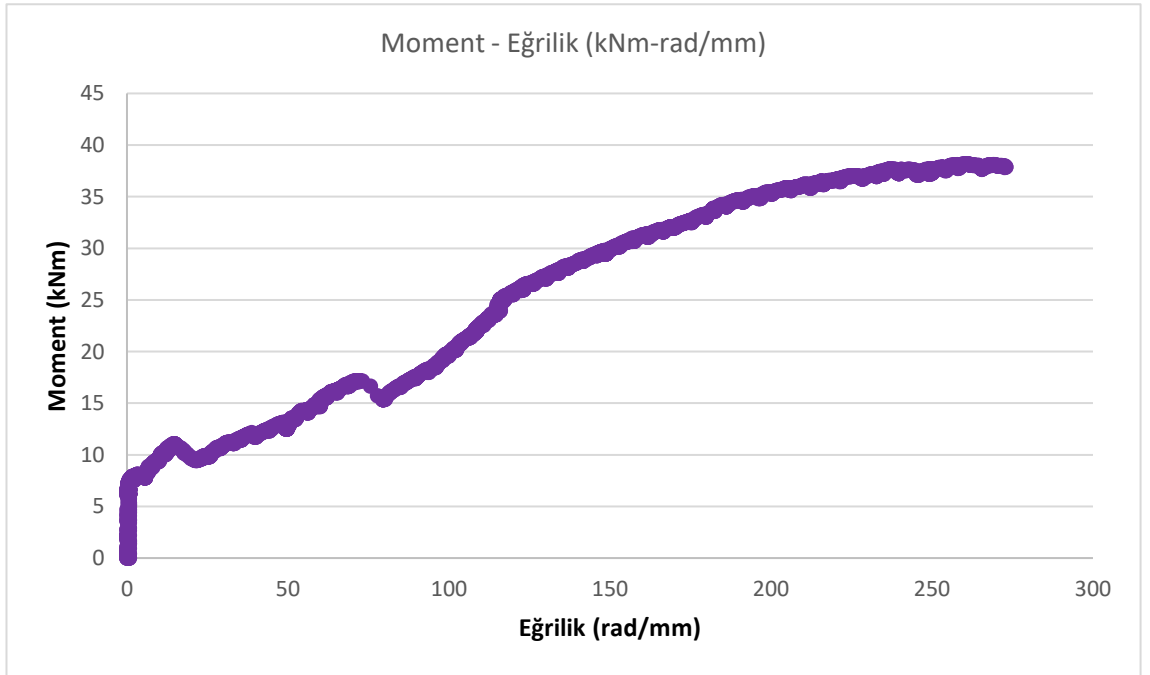
şekil 5.22. Deney Sonunda FS250FL Kiriş Numunesi

Deney sonrası YD-5 deplasman ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-deplasman grafiği şekil 5.23'de gösterilmiştir. Deney sonunda kirişin göçmesine neden olan yük değeri 95,44 kN ve bu yükteki düşey deplasman değeri ise 10,3 mm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.23. FS250FL için yük- sehim grafiği

YD-1,YD-2,YD-3,YD-4 deplasman ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.24’de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.24. FS250FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği

250°C’de GFRP donatılı kiriş numunesi yaklaşık olarak 20 kN’a kadar çok şekil değiştirmeden yük almıştır. Bu durum aynı şekilde moment-eğrilik grafiğinde yaklaşık olarak 8 kNm moment taşıma gücü sınırından sonra gerçekleşmektedir. Bu sınır değerlerden sonraki durumlarda ise GFRP’li kiriş kontrol numunesine nazaran taşıma gücünde kayıp yaşamış eğilmeden dolayı göçmüş ve deney tamamlanmıştır.

YD-5 düşey deplasman ölçer değerlerinden $YD-5_{200} = 9,08 \text{ mm} < YD-5_{250} = 10,30 \text{ mm}$ olmasına rağmen deplasman değerinin büyük çıkması kirişin sünekleştiği anlamına gelemez çünkü gerek kırılma yükü gerekse kırılma hızı olarak burada kiriş ani olarak zayıf olan eğilme çatlağının herhangi birinde kırılmıştır. YD-5 deplasman ölçere kırılma anında ani bir tepki geldiğinden bu değer bir önceki numuneye göre deplasman değeri artmıştır.

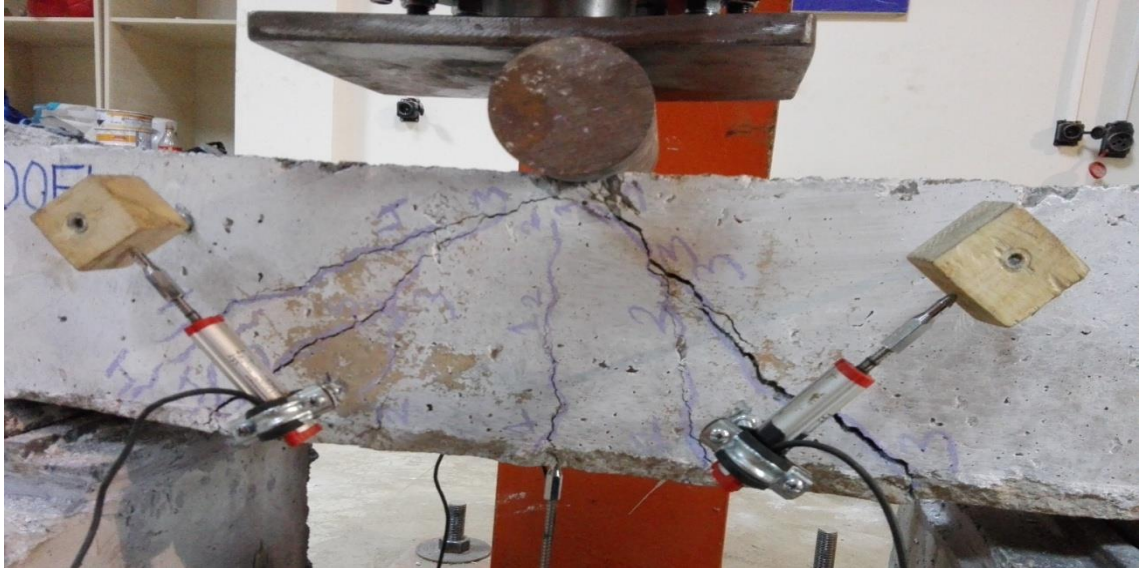
5.2.6. FS300FL kirişi deneyleri

Bu kiriş numunesinde de boyuna donatılar GFRP donatıdan, etriyeler ise çelik donatıdan üretilmiştir. Üretilen FS300FL numunesi diğer kiriş numunelerde olduğu gibi 28 gün küre tabi tutularak oda sıcaklığında kurumaya bırakılmış ve seramik fırın içerisinde 1 saat süre ile 300°C’ de sıcaklığa maruz bırakılmış, oda sıcaklığına kadar laboratuvar ortamında soğuduktan sonra Şekil 5.25’de görüldüğü gibi deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur.

Kiriş numunesinde yük 20 kN seviyesine ulaştığında çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Çatlakları renkli kalemler yardımıyla işaretlenmesi çatlak genişliklerinin, şekil ve yönlerinin kırılma davranışı üzerindeki yorumu açısından bilgi vermektedir. Eksenel yükün artmaya devam etmesiyle yeni ve daha derin çatlaklar oluştukça farklı işaretleme kalemiyle yeri çatlaklar belirlenmiştir. Eksenel yükün 26 kN ile 36 kN değerlerine ulaştığı anlarda yeni ve derin çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Kirişin göçme öncesi anına kadar çatlakların farklı renklerde çizilerek belirlenmesi işlemi tekrarlanmıştır. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.26’de gösterilmiştir



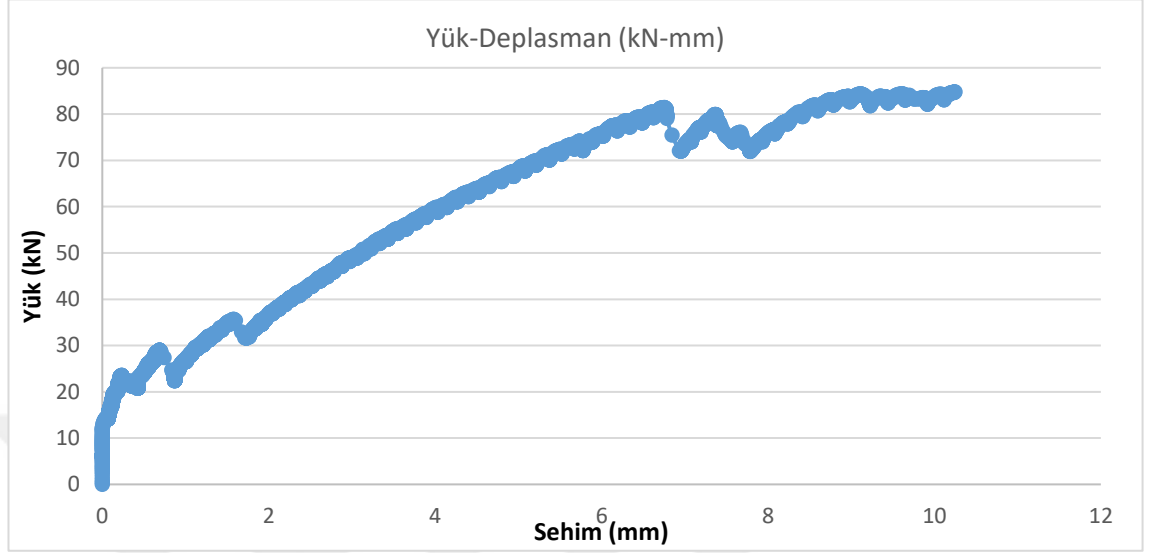
Şekil 5.25. Deney Düzenegindeki FS300FL Numunesi



Şekil 5.26. Deney Sonunda FS300FL Kiriş Numunesi

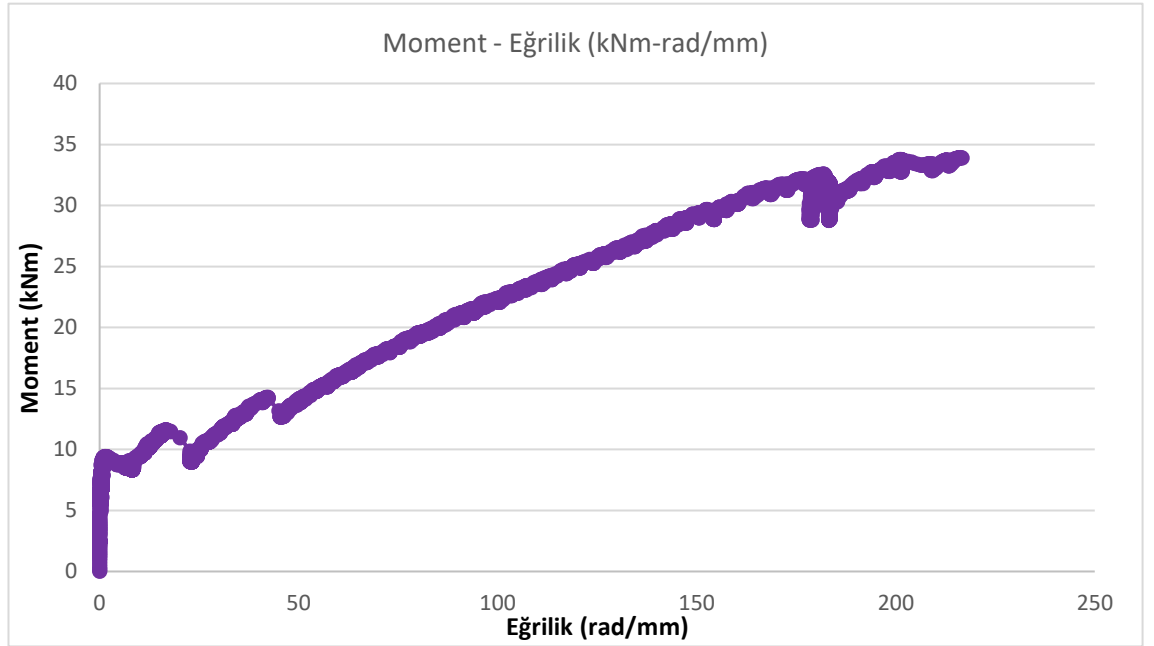
Deney sonrası YD-5 deplasman ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-deplasman grafiği Şekil 5.27’de gösterilmiştir. Deney sonunda kirişin

göçmesine neden olan yük değeri 84,78 kN ve bu yükteki düşey deplasman değeri ise 10,25 mm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.27. FS300FL için yük- sehim grafiği

YD-1,YD-2,YD-3,YD-4 deplasman ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.28’de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.28. FS300FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği

300°C’de GFRP donatılı kiriş numunesi yaklaşık olarak 25 kN’a kadar çok şekil değiştirmeden yük almıştır. Bu durum aynı şekilde moment-eğrilik grafiğinde yaklaşık olarak 10 kNm moment taşıma gücü sınırından sonra gerçekleşmektedir. Bu sınır değerlerden sonraki durumlarda ise GFRP’li kiriş kontrol numunesine nazaran taşıma gücünde bir kayıp yaşamış, eğilmeden dolayı göçmüş ve deney tamamlanmıştır. YD-5 düşey deplasman ölçer değerlerinden

$YD-5_{250} = 10,3 \text{ mm} > YD-5_{300} = 10,25 \text{ mm}$ elde edilmektedir. Bu bize bu numunenin 250°C’ deki numuneye göre daha gevrek davrandığını göstermektedir.

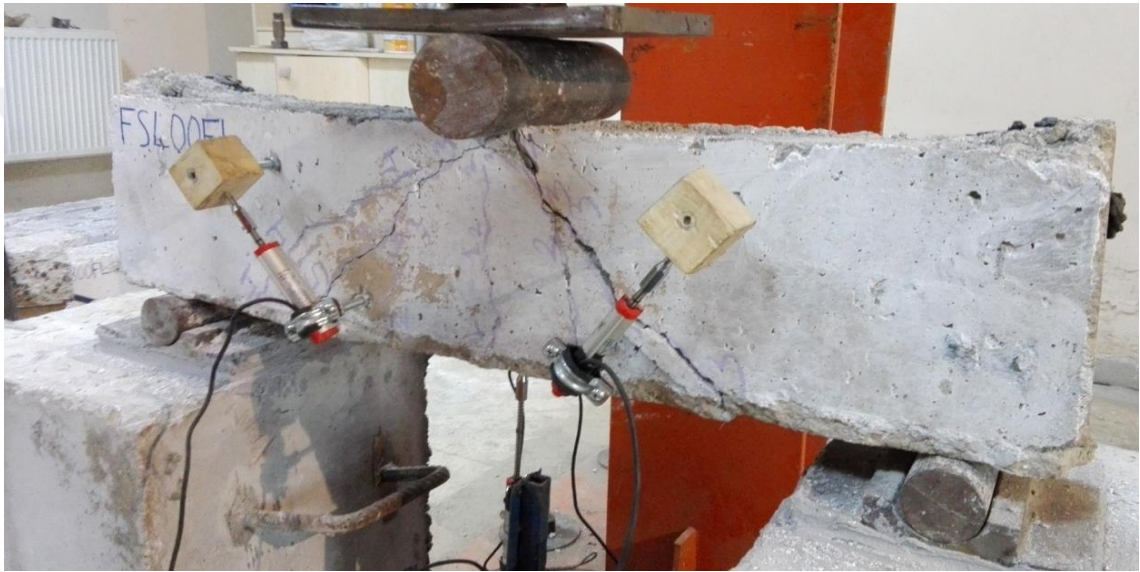
5.2.7. FS400FL kirişi deneyleri

Bu kiriş numunesinde de boyuna donatılar GFRP donatıdan, etriyeler ise çelik donatıdan üretilmiştir. Üretilen FS400FL numunesi diğer kiriş numunelerde olduğu gibi 28 gün küre tabi tutularak oda sıcaklığında kurumaya bırakılmış ve seramik fırın içerisinde 1 saat süre ile 400°C’ de sıcaklığa maruz bırakılmış, oda sıcaklığına kadar laboratuvar ortamında soğuduktan sonra Şekil 5.29’de görüldüğü gibi deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur.



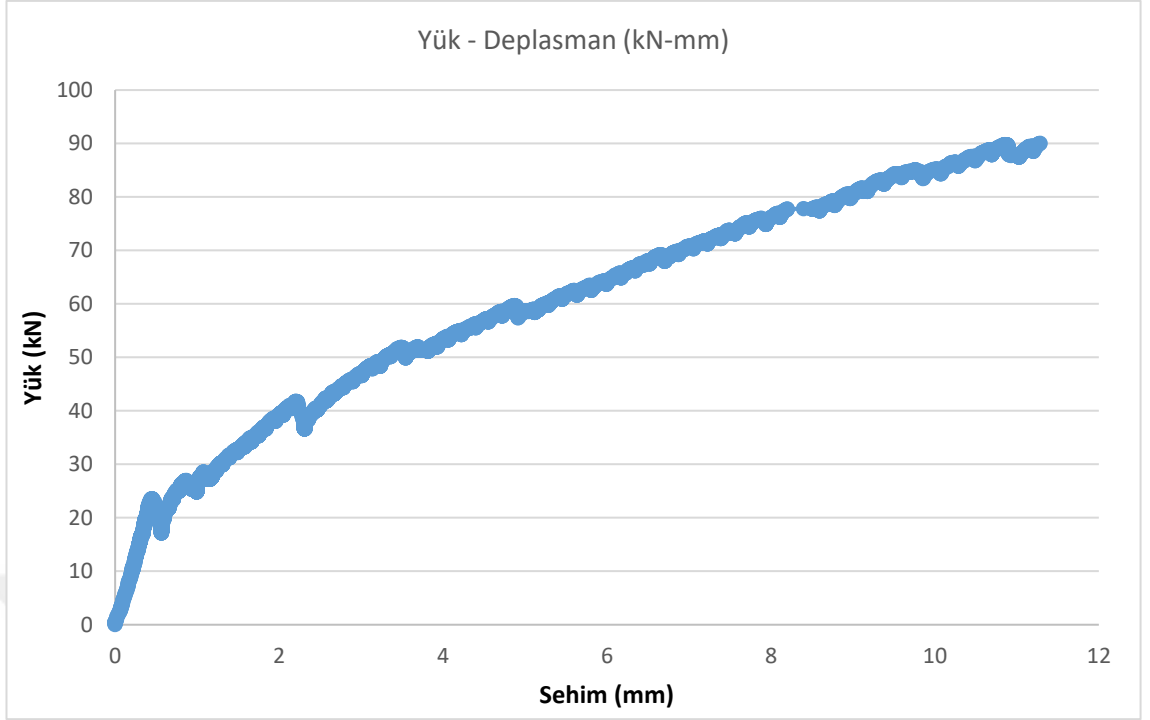
Şekil 5.29. Deney Düzeneğindeki FS400FL Numunesi

Kiriş numunesinde yük 23 kN seviyesine ulaştığında çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Çatlakları renkli kalemler yardımıyla işaretlenmesi çatlak genişliklerinin, şekil ve yönlerinin kırılma davranışı üzerindeki yorumu açısından bilgi vermektedir. Eksenel yükün artmaya devam etmesiyle yeni ve daha derin çatlaklar oluştukça farklı işaretleme kalemiyle yeri çatlaklar belirlenmiştir. Eksenel yükün 28 kN ile 35 kN değerlerine ulaştığı anlarda yeni ve derin çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Kirişin göçme öncesi anına kadar çatlakların farklı renklerde çizilerek belirlenmesi işlemi tekrarlanmıştır. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.30’de gösterilmiştir.



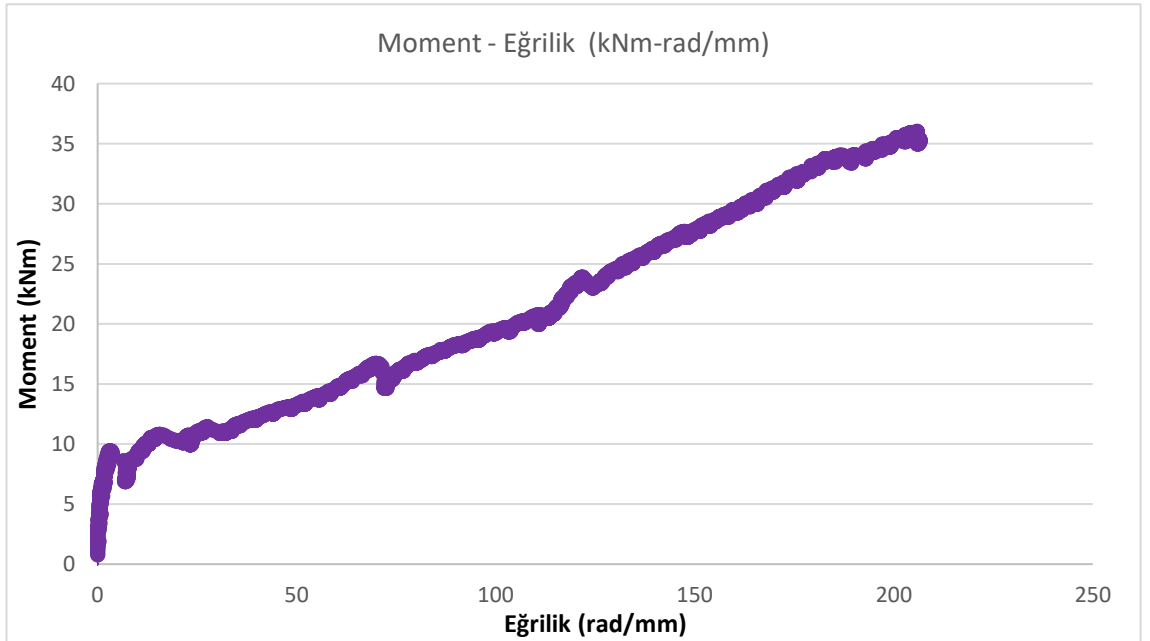
Şekil 5.30. Deney Sonunda FS400FL Kiriş Numunesi

Deney sonrası YD-5 deplasman ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-deplasman grafiği Şekil 5.31’de gösterilmiştir. Deney sonunda kirişin göçmesine neden olan yük değeri 90,02 kN ve bu yükteki düşey deplasman değeri ise 11,28 mm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.31. FS400FL için yük- sehim grafiği

YD-1,YD-2,YD-3,YD-4 deplasman ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.32’de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.32. FS400FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği

400°C’de GFRP donatılı kiriş numunesi yaklaşık olarak 30 kN’a kadar çok şekil değiştirmeden yük almıştır. Bu durum aynı şekilde moment-eğrilik grafiğinde yaklaşık olarak 12 kNm moment taşıma gücü sınırından sonra gerçekleşmektedir. Bu sınır değerlerden sonraki durumlarda ise GFRP’li kiriş kontrol numunesine nazaran taşıma gücünde bir kayıp yaşamıştır ve gevrek bir davranış göstererek eğilmeden dolayı göçmüş ve deney tamamlanmıştır.

YD-5 düşey deplasman ölçer değerlerinden $YD-5_{300} = 10,25 \text{ mm} < YD-5_{400} = 11,28 \text{ mm}$ elde edilmektedir. Bu bize bu numunenin 300°C’ deki numuneye göre sehim miktarının fazla olmasına rağmen çatlakların düşük yüklerde derinleşip ve daha düşük yükte göçmesinden dolayı daha gevrek davrandığını göstermektedir.

5.2.8. FS500FL kirişi deneyleri

Bu kiriş numunesinde de boyuna donatılar GFRP donatıdan, etriyeler ise çelik donatıdan üretilmiştir. Üretilen FS500FL numunesi diğer kiriş numunelerde olduğu gibi 28 gün küre tabi tutularak oda sıcaklığında kurumaya bırakılmış ve seramik fırın içerisinde 1 saat süre ile 500°C’ de sıcaklığa maruz bırakılmış, oda sıcaklığına kadar laboratuvar ortamında soğuduktan sonra Şekil 5.33’de görüldüğü gibi deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur.



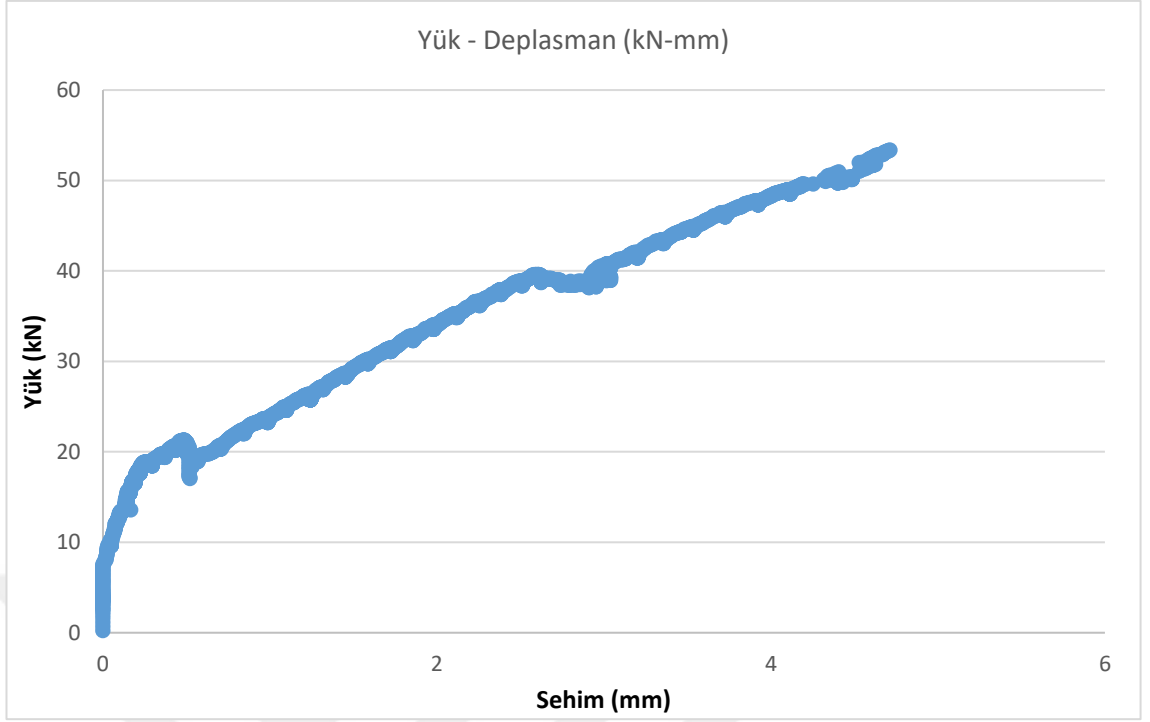
Şekil 5.33. Deney Düzeneğindeki FS500FL Numunesi

Kiriş numunesinde yük 10 kN seviyesine ulaştığında çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Çatlakları renkli kalemler yardımıyla işaretlenmesi çatlak genişliklerinin, şekil ve yönlerinin kırılma davranışı üzerindeki yorumu açısından bilgi vermektedir. Eksenel yükün artmaya devam etmesiyle yeni ve daha derin çatlaklar oluştukça farklı işaretleme kalemiyle yeri çatlaklar belirlenmiştir. Eksenel yükün 15 kN ile 25 kN değerlerine ulaştığı anlarda yeni ve derin çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Kirişin göçme öncesi anına kadar çatlakların farklı renklerde çizilerek belirlenmesi işlemi tekrarlanmıştır. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.34’de gösterilmiştir.



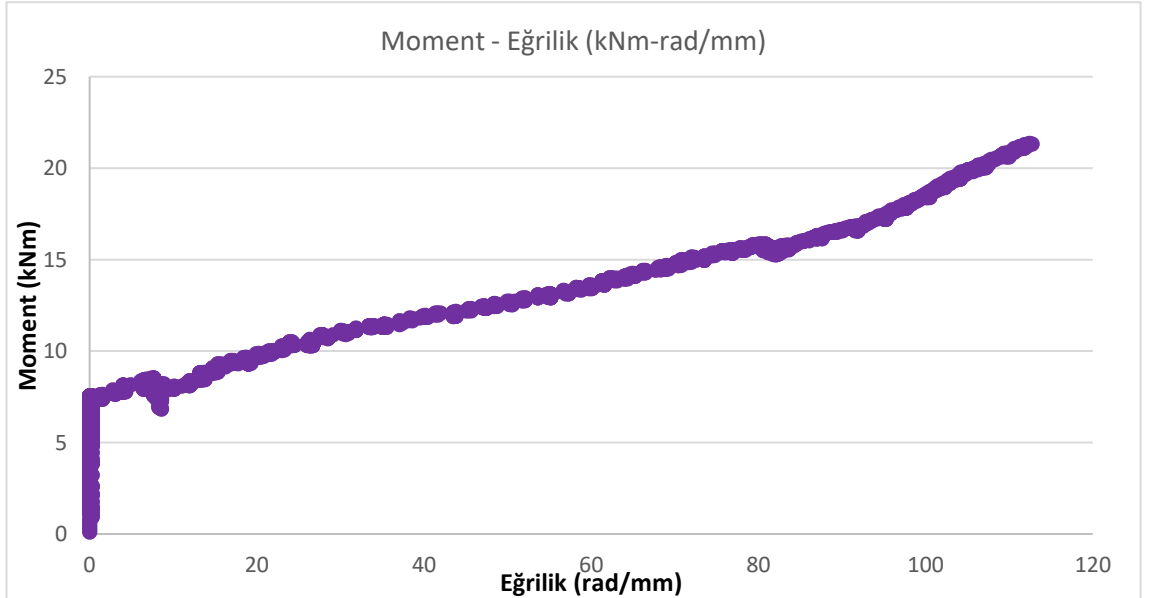
Şekil 5.34. Deney Sonunda FS500FL Kiriş Numunesi

Deney sonrası YD-5 deplasman ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-deplasman grafiği Şekil 5.35’de gösterilmiştir. Deney sonunda kirişin göçmesine neden olan yük değeri 53,37 kN ve bu yükteki düşey deplasman değeri ise 4,71 mm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.35. FS500FL için yük- sehim grafiği

YD-1,YD-2,YD-3,YD-4 deplasman ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.36’da grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.36. FS500FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği

500°C’de GFRP donatılı kiriş numunesi yaklaşık olarak 10 kN’a kadar çok şekil değiştirmeden yük almıştır. Bu durum aynı şekilde moment-eğrilik grafiğinde yaklaşık olarak 8 kNm moment taşıma gücü sınırından sonra gerçekleşmektedir. Bu sınır değerlerden sonraki durumlarda ise GFRP’li kiriş kontrol numunesine nazaran taşıma gücünde bir kayıp yaşamış eğilmeden dolayı göçmüş ve deney tamamlanmıştır. YD-5 düşey deplasman ölçer değerlerinden

$YD-5_{400} = 11,28 \text{ mm} > YD-5_{500} = 4,71 \text{ mm}$ elde edilmektedir. Bu bize bu numunenin 400°C’ deki numuneye göre daha gevrek davrandığını göstermektedir.

5.2.9. FS600FL kirişi deneyleri

Bu kiriş numunesinde de boyuna donatılar GFRP donatıdan, etriyeler ise çelik donatıdan üretilmiştir. Üretilen FS600FL numunesi diğer kiriş numunelerde olduğu gibi 28 gün küre tabi tutularak oda sıcaklığında kurumaya bırakılmış ve seramik fırın içerisinde 1 saat süre ile 600°C’ de sıcaklığa maruz bırakılmış, oda sıcaklığına kadar laboratuvar ortamında soğuduktan sonra Şekil 5.37’de görüldüğü gibi deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur.



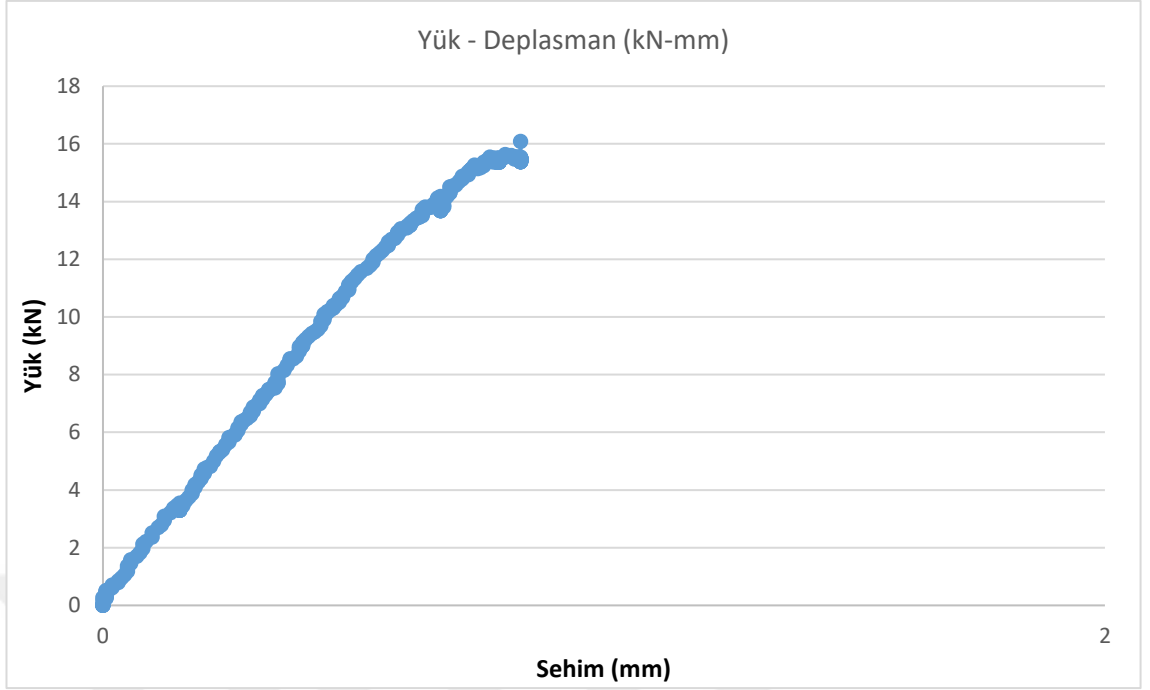
Şekil 5.37. Deney Düzeneğindeki FS600FL Numunesi

Kiriş numunesinde yük 10 kN seviyesine ulaştığında çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Çatlakları renkli kalemler yardımıyla işaretlenmesi çatlak genişliklerinin, şekil ve yönlerinin kırılma davranışı üzerindeki yorumu açısından bilgi vermektedir. Eksenel yükün artmaya devam etmesiyle yeni ve daha derin çatlaklar oluştukça farklı işaretleme kalemiyle yeri çatlaklar belirlenmiştir. Eksenel yükün 15 kN ile 25 kN değerlerine ulaştığı anlarda yeni ve derin çatlaklar oluşmaya devam etmiştir. Kirişin göçme öncesi anına kadar çatlakların farklı renklerde çizilerek belirlenmesi işlemi tekrarlanmıştır. Deney sonrası oluşan çatlaklar şekil 5.38’de gösterilmiştir.



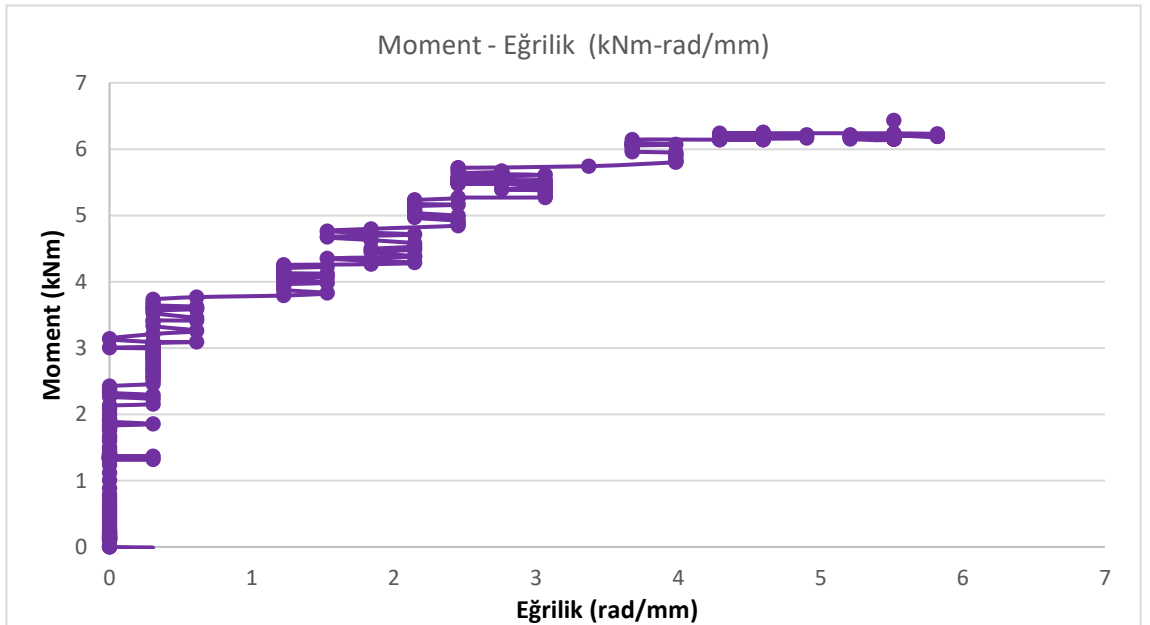
şekil 5.38. Deney Sonunda FS600FL Kiriş Numunesi

Deney sonrası YD-5 deplasman ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-deplasman grafiği şekil 5.38’de gösterilmiştir. Deney sonunda kirişin göçmesine neden olan yük değeri 16,08 kN ve bu yükteki düşey deplasman değeri ise 0,83 mm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.39. FS600FL için yük- sehim grafiği

YD-1,YD-2,YD-3,YD-4 deplasman ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.39’da grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.40. FS600FL için moment-eğrilik ilişkisi grafiği

600°C’ de GFRP donatılı kiriş numunesi yükleme başlar başlamaz şekil değiştirmeye başlamıştır. Bu durum aynı şekilde moment-eğrilik grafiğinde yaklaşık olarak 2,5 kNm eğilme momentine ulaştığında eğrilik gerçekleşmeye başlamıştır. Bu sınır değerlerden sonraki durumlarda ise GFRP’li kiriş kontrol numunesine nazaran taşıma gücünde çok büyük bir kayıp yaşamış, hemen göçmüştü ve deney tamamlanmıştır.

YD-5 düşey deplasman ölçer değerlerinden $YD-5_{500} = 4,71 \text{ mm} > YD-5_{600} = 0,83 \text{ mm}$ elde edilmektedir. Bu bize bu numunenin 500°C’ deki numuneye göre daha gevrek davrandığını göstermektedir. Özellikle bu sıcaklık değerinde betonun çok hasar aldığı 600°C’ de kırılmanın hemen gerçekleşmesi için bir tespit niteliğindedir.

5.2.10. FS800FL kirişi deneyleri

Bu kiriş numunesinde de boyuna donatılar GFRP donatıdan, etriyeler ise çelik donatıdan üretilmiştir. Üretilen FS800FL numunesi diğer kiriş numunelerde olduğu gibi 28 gün küre tabi tutularak oda sıcaklığında kurumaya bırakılmış ve seramik fırın içerisinde 1 saat süre ile 800°C’ de sıcaklığa maruz bırakılmış, oda sıcaklığına kadar laboratuvar ortamında soğuduktan sonra Şekil 5.41’de görüldüğü gibi deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.41. Deney Düzeneğindeki FS800FL Numunesi

Kiriş numunesine yükleme yapılmaya başlandığı anda göçme gerçekleştiğinden yük-deplasman ve moment eğrilik grafikleri elde edilememiştir.

Bu durumun en önemli sebebi 800°C’ de betonun dayanımının tamamına yakınını kaybetmesi GFRP’nin ise matrisinin tamamıyla erimesinden kaynaklı göçme yaşanmıştır. GFRP donatının elik gibi doğrultusuna dik yönde yk alamamasının en büyük nedeni yüksek sıcaklık etkisi ile çeliğe göre az olan doğrultusuna dik mukavemetini artık yitirmiş olmasıdır.



şekil 5.42. Deney Sonunda FS800FL Kiriş Numunesi

6. SONUÇLAR

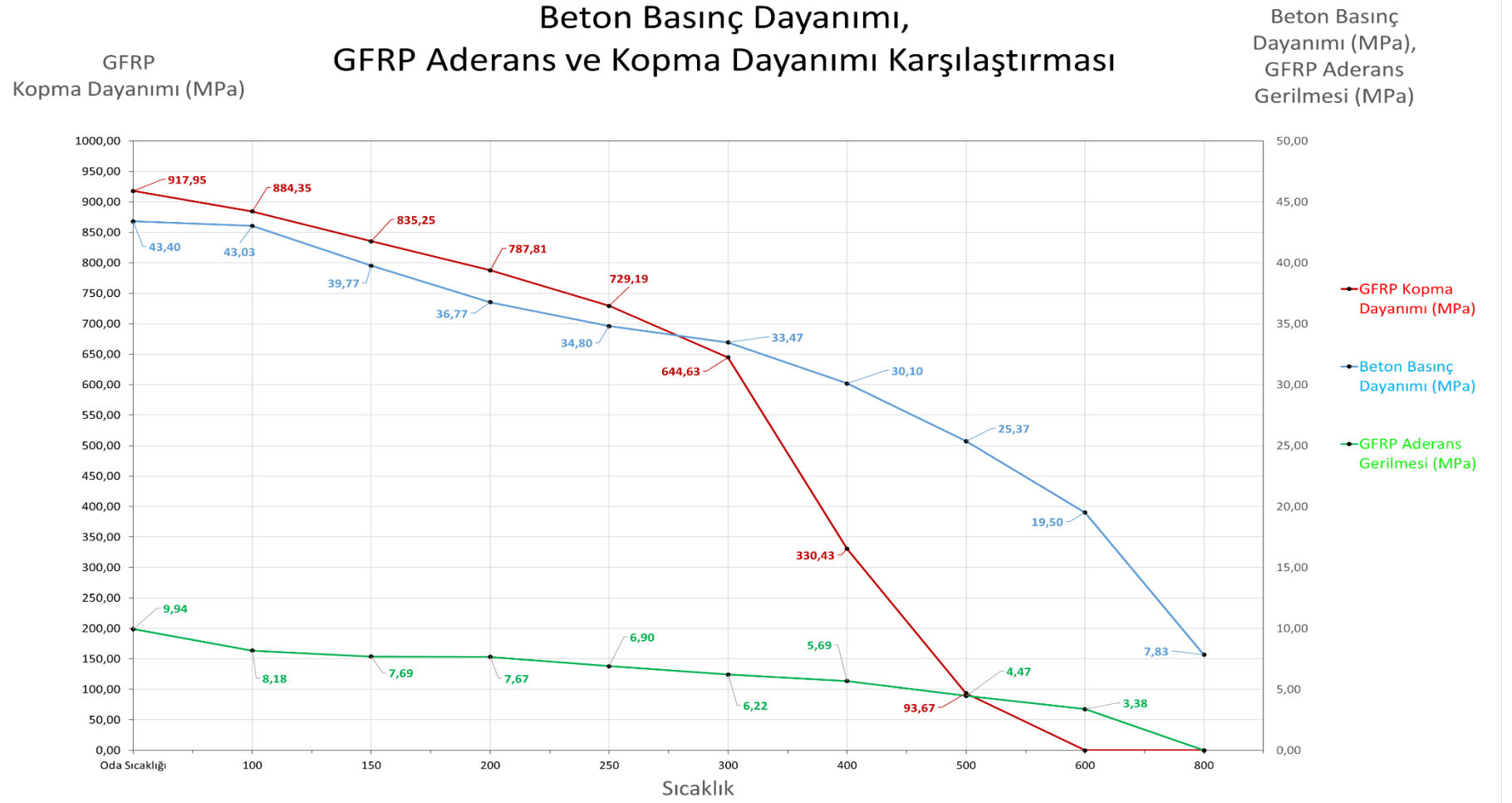
Yapılan deneysel çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, betonarme yapı elemanlarına yüksek sıcaklık etkileri, betonarmeyi oluşturan ve bir bütün davranış sergileyen malzemelerin sonuç olarak ayrı ayrı incelenmesine dayanmaktadır. Betonarmeyi oluşturan, beton ve donatı kendi içerisinde malzeme yapısı olarak da incelenmedikçe yapılan deneysel çalışmaların doğru okunması yapılamaz. Bu sebeple yapılan çalışmalarda ve literatürün genelinde mekanik olarak gerçekleşen bir deney sonucunda hep malzeme karakteristik özelliklerine dayanmıştır.

Deneylerimizde kullandığımız betonu oluşturan çimento (SiO_2 %25.68) ve agregalar (kalker %90 CaCO_3), silis ve kalker esaslı olduğundan dayanımdaki kayıplar silis içerisindeki kuvarsın 570°C 'de çoklu bir şekil değişimine uğrayarak %15 hacim artışına uğraması, kalkerli agrega içerisindeki karbonatın ise 800°C - 900°C aralığında MgO ve CaO 'a dönüşmesi nedeniyle agrega yapısında hacimde büzülme olması sonucunda beton kendi iç aderansını tamamıyla yitirerek dayanım kaybına uğramaktadır (Yüzer, 2001). Çalışmalarımızda esas çekme donatısı olarak kullanılan GFRP'nin yüksek sıcaklıkla alakalı literatürde çalışmalara ek olarak betonarme bir kesit içerisinde yüksek sıcaklık etkisinin eğilme yönünden incelenmiş ve ülkemizde yaygın olarak kullanılan S420 çeliğinin de kontrol kiriş numunesi ve GFRP donatılı kirişin etriyelerinde kullanılmasıyla kompozit donatılı bir betonarme eleman tasarlanmıştır.

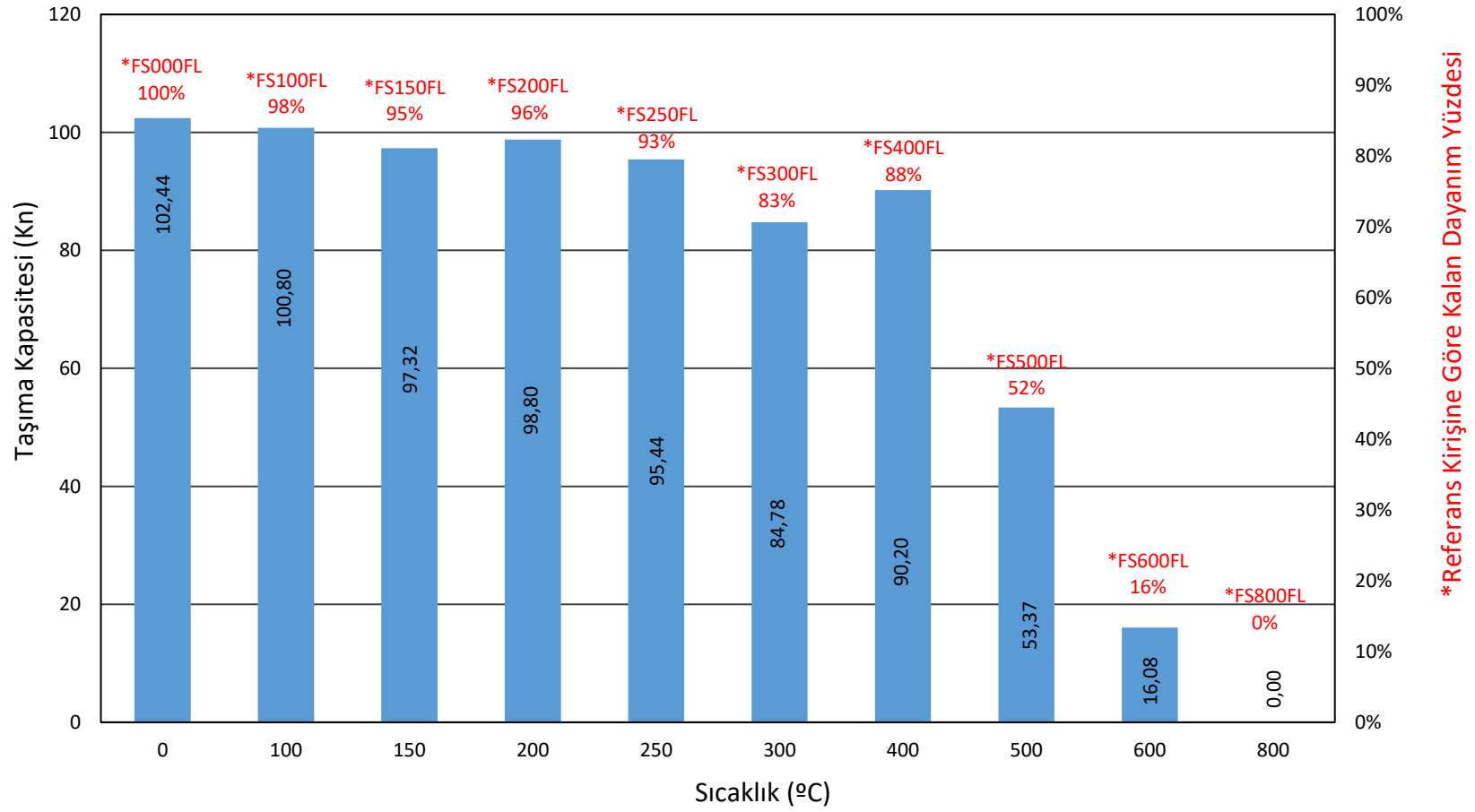
GFRP donatı malzeme yapısı olarak kompozit bir yapıdadır. Çekme mukavemeti yönünden 900 MPa üzerinde bir kopma dayanımına sahip cam liflerden ve bu lifleri yine iç aderans olarak bütün çalıştıran epoksi esaslı reçineden oluşmaktadır. Yüksek sıcaklık etkilerinin cam liflere en yüksek sıcaklık seviyesi olan 800°C 'de zarar vermesi lif malzemenin üretiminde 1400°C gibi bir sıcaklık gördüğü düşünüldüğünde matris reçineye göre daha düşük olacaktır. Deneylerde de matrisin 300°C gibi bir sıcaklıkta aşırı bir yapısal bozulmaya uğramadığını GFRP numunenin bu sıcaklığa maruz kaldıktan sonra 644 MPa gibi bir kopma dayanımı göstermesinden anlamaktayız. Literatürde 160°C gibi bir sıcaklıkta matrisin bozulduğu bilgisi verilmesine rağmen bu sıcaklıkta kullanılan reçinenin epoksi, polyester ya da vinilester esaslı olup olmadığı konusunda sorular mevcuttur.

Betonarmede kullanılan malzemelerin yüksek sıcaklık başarımları ilk önce betonun daha sonra ise donatıların bireysel yüksek sıcaklık başarımlarıyla açıklanabilir. Yüksek sıcaklık beton engelini aşp sıcaklığın donatıya ulaşması halinde aynı senaryoların ve yaptığımız deneysel çalışmaların birebir gerçekleşeceğini söyleyebiliriz. Ancak bu çalışmada numuneler gerçek yangın şartlarında ve yüklemeler altında yüksek sıcaklık başarımları incelenebilseydi, yüklü bir şekilde yüksek sıcaklık etkilerine maruz kalıp şartlar değişeceğinden sonuçlarımız kuvvetle muhtemel daha düşük değerlerde taşıma gücü kapasiteleri tespit edilebilecekti. Bu bölüme kadar anlatılan deneysel çalışmaların yüksek sıcaklık ile nasıl etkileşim gösterdiği Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de sunulmuştur.





Şekil 6.1. Yüksek sıcaklık etkileri altında donatı kopma dayanımları, beton basınç dayanımları ve donatı aderans değişimi



Şekil 6.2. Yüksek sıcaklık etkileri altında kiriş numunelerinin taşıma gücü değerleri

Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de görüldüğü üzere:

Beton küp numuneler basınç dayanımı olarak 600°C’de %55 dayanım kaybederken 800°C’de %82 gibi büyük bir dayanım kaybına uğramıştır. GFRP donatı numuneleri malzeme olarak 400 °C’de kopma dayanımlarının %65’ini 500 °C’de %90’ını kaybetmiş sonraki sıcaklıklarda ise mekanik özelliklerini tamamen yitirmişlerdir. Malzeme aderans dayanımlarına bakıldığında çekip çıkarma deneylerinde GFRP donatılar 500 °C’ de %55 üzerinde bir sıyrılma dayanım kaybına uğrayıp bu dayanımını 800 °C’ de tamamen kaybetmiştir.

Kiriş numunelerin yüksek sıcaklıklar altındaki dayanımı ise tamamıyla malzemelerin birlikte başarım göstermesine göre değişkenlik göstermektedir. Kiriş numunelerin beton ve demir işçiliği tarafımızdan yapıldığı için uygulamaya yönelik olarak beton yerleşiminde segregasyon yaşanması, pas payının düzgün uygulanmadığı ve beton bakımının uygun kürleme koşullarına göre yapılmadığı durumlarda sıcaklık kesit içerisine yani donatıya daha fazla etki edecektir. Bu durum kiriş deney sonuçlarına beklenmedik bir etki olarak yansımıştır. Bu gibi durumları göz ardı etmeden yapılan her uygulama için yapılan bu deneysel çalışma geliştirilebilir ve yol gösterici niteliktedir. Kirişler genel olarak yüksek sıcaklık başarımı yönünden değerlendirilirse;

GFRP donatılı kiriş numunelerdeki taşıma gücü kayıpları ise 500 °C’de %48, 600 °C’de ise %85 değerinde bir kayıp yaşamıştır. Malzemelerin aderans ve dayanım kayıplarına bakıldığında betonun yüksek sıcaklık etkileri altındaki rolünün önem arz ettiği ve betonarme bir elemanı oluşturan tüm malzemelerin sistematik olarak bu duruma doğrudan etki ettiği yapılan çalışmalar neticesinde net olarak görülmüştür.

Eğilmeye çalışan betonarme kiriş çalışma prensibi basitçe; tarafsız eksen üzerinde kalan alan basınca, altta kalan alan çekmeye ve etriyeler de kesme kuvvetini karşılamaya çalışmaktadır. Bu çalışmadaki kirişler tasarlanırken kesme donatısı olan etriyeler (S420 çeliği) kesit kesmeden göçmeyecek şekilde yerleştirilmiştir. Yükleme halinde eğilme etkisinde olan GFRP donatılar yüksek sıcaklık etkisine betondan sıcaklık geçişinin izin verildiği kadar bir sıcaklık değerine çıkıp tekrar oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Dayanımdaki bu düşüşün sebebi beton 600°C’ den sonra tamamıyla geçirimli hale gelerek GFRP donatıya fazla etki etmesidir. 300 °C’ye kadar çeliğe nazaran kopma dayanımı yüksek olan GFRP matrisindeki bozulmadan dolayı direkt aksenal çekmeye değil de eğilmeye maruz kaldığından daha kötü bir başarımla sergilemiştir. Bu duruma ek olarak kiriş tasarımında esas çekme donatıları olarak kullanılan GFRP’lerin kiriş uçlarında gönye yapılamaması da sıyrılmaların fazla olmasına sebep olarak gösterilebilir. GFRP donatı düşük elastisite modülüne sahip olması nedeniyle ve yapısı çeliğe göre kompozit bir yapıda olduğundan gerek aderans dayanımı gerekse eğilme etkisinde düşük bir başarımla sergilemiştir.

Ayrıca yüksek sıcaklık başarımlı 600°C’ye kadar standardın altına düşmeyen çelik donatı kesme donatısı olarak kullanılıp GFRP donatısını sargıladığından eğilme etkisinde GFRP nin çelik donatıya temas eden yerlerinde yüzeysel bir ezilme yaşanması da GFRP donatının eğilme etkisinde aksenal kopma dayanımından daha düşük bir performans sergilemesi ihtimali göz ardı edilmemelidir. Bu çalışmada beton tasarımı için malzeme yapısı olarak kullanılan kalker agregası silisli kum ve Portland Kompoze çimento yüksek sıcaklık etkisinde Yüzer (2001) tarafından yapılan çalışmada bahsedildiği gibi yüksek sıcaklık etkilerinde kötü başarımla sergilemiştir. Malzemeler içerisindeki silis miktarının

fazla olması kiriş numunelerinin sıcaklıklar arttıkça daha fazla geçirimli hale gelmesine neden olarak donatıdaki sıcaklık artışının erken ve fazla olmasına neden olmuştur. Beton tasarımı yapılırken yüksek sıcaklık etkilerine karşın daha yüksek performans sergileyebilen agregalardan şamot, boksit ve kalker kullanılarak; çimento kimyasal yapısındaki bileşiklerden ise SiO_2 miktarının azaltılarak Al_2O_3 miktarının fazla olduğu çimento tipleri seçilerek yüksek sıcaklıklarda betondaki dayanım kayıplarının önüne geçilebilir ve donatıya ısı geçişi yavaşlatılarak yüksek başarımlar elde edilebilir.

Son olarak GFRP donatıların yüksek sıcaklığa maruz kalmadığı durum için kiriş eğilme deneylerinde çelik donatılı kirişlere göre gösterdiği gevrek kırılma davranışı Yaz (2014) tarafından yapılan çalışmada da desteklenmektedir. Ancak yüksek sıcaklık etkileri altında bu donatının kirişlerde esas donatı olarak kullanılması bu gevrek davranışın gerek aderansın azalması, gerekse GFRP matrisinin bozulmasından kaynaklı olarak artış göstermesinden sürekli artmaktadır. Enerji yutma kapasiteleri yük-deplasman grafiklerinin altında kalan alanı temsil ettiğinden grafikler incelendiğinde oda sıcaklığında çeliğe göre GFRP donatılı kirişlerin daha az enerji sönümlendiği ve sıcaklıklar arttıkça enerji sönümleme kapasitelerinin azaldığı bu durum da sünekleşmeden uzak gevrek bir davranışa sahip olan GFRP donatılı kirişlerde görüldüğü söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Abbasi, A., and Hogg, P. (2005) "Temperature and Environmental Effects on Glass Fibre Rebar: Modulus, Strength and Interfacial Bond Strength with Concrete", *Science Direct Composites Part B*, 36 pp. 394-404.
- ASCE-ACI 426 (1973), "The Shear Strength of Reinforced Concrete Members", *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 99(ST6); 1091-1187.
- Arslan G., (2005) "Tersinir Ykler Altında Betonarme ubukların Kesme Mukavemeti", Doktora Tezi, *YT Fen bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Ashrafi, H., Bazli, M., Najafabadi, E. P., and Oskouei, A. V. (2017) "The Effect of Mechanical and Thermal Properties of FRP Bars on Their Tensile Performance Under Elevated Temperatures", *Construction and Building Materials*, 157 pp. 1001-1010.
- Bingöl, A.F., ve Gl, R. (2009) "Donatı-beton aderansı, yüksek sıcaklıkların beton dayanımına ve aderansa etkileri konusunda bir derleme", *TÜBAV Bilim Dergisi*, vol. 2, no. 2, pp. 211-230.
- Bingöl, A.F. (2008) "Beton-Donatı Aderansına Yüksek Sıcaklıkların Etkisi" Doktora Tezi.
- Burnaz, O. (2010) "Betonarme Yapılarda Yangın ve Bu Yapıların Yangın Etkisi Altında Doğrusal Olmayan Davranışlarının İncelenmesi", Ph.D. Thesis, *Karadeniz Technical University*, Trabzon.
- BYKHY, (2002), "*Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik*"
- Carvelli, V., Pisani, M.A., and Poggi, C. (2013) "High Temperature Effects on Concrete Members Reinforced with GFRP Rebars" *Sciverse Science Direct , Composites Part B* 54 pp. 125-132.
- Celep Z. ve Kumbasar N. (2005) Betonarme Yapılar, *Beta Dağıtım*, İstanbul.
- Coşkun, A. (2007) "Mineral Katkılı Betonun Aderans Dayanımına 800 °C' nin Etkisi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 13, 3, Denizli, 347-351s.
- Cullazoğlu, F. (2014) "FRP Donatılı Betonarme Kirişlerin Eğilme ve Kesme Etkisi Altındaki Analizi", M.Sc. Thesis, *Niğde University*, Niğde.
- Durmuş, A., Dahil, H. ve Arslan, M. E. (2006) "Yüksek Dayanımlı Beton-Donatı Aderansının Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi", *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 441, 45-52s.

- Dwaikat, M. B. M. (2009) "Flexural response of reinforced concrete beams exposed fire", PhD Thesis, *Michigan State University*, USA.
- Ersoy, U., ve Özcebe G. (2001) Betonarme: Temel İlkeler, TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap, 6. baskı, *Evrin Yayinevi*, İstanbul, ISBN:978-975- 503-233-7, 90-91, 31-37, 58-73, 459-477.
- Hamad, R., Johari, M.A., and Haddad, R. (2017) "Mechanical Properties and Bond Characteristics of Different Fiber Reinforced Polymer Rebars at Elevated Temperatures" *Construction and Building Materials* 142 pp. 521-535.
- Huang Z. (2010) "Modelling the bond between concrete and reinforcing steel in a fire." *Eng Struct* 2010;32:3660–9.
- Jau, W. and Huang, K. (2008). "A study of reinforced concrete corner columns after fire." *Cement and Concrete Composites*, 30(7), 622-638.
- Karanfil, H. (2007) "Yüksek Sıcaklık Etkisi Altında Kalan Betonarme Yapılarda Çelik Donatı Özelliklerinin Değişimine Pas Payı Kalınlığının Etkisi", M.Sc. Thesis, *Eskişehir Osmangazi University*, Eskişehir.
- Kashwani, G., and Al-Tamimi, A. (2014) "Evaluation of FRP Bars Performance under High Temperature" *Physics Procedia* 55 pp. 296-300.
- Katz, A., Berman, N., and Bank, L., (1999) "Effect of High Temperature on Bond Strength of Frp Rebars" *Journal of Composites for Construction* pp. 73-81.
- Kaygusuz, M.A. (2008) "Yangın Hasarına Uğramış Betonun GFRP ve Epoksi Enjeksiyonu ile Onarım ve Güçlendirilmesi", M.Sc. Thesis, *Atatürk University*, Erzurum.
- Kodur, V. R. and Dwaikat (2008) M. B. A Flexural response of reinforced concrete beams exposed to fire Cement and Concrete Composites, doi:10.1680/stco.2008.9.1.45.
- Kutanış, M. (2010) "Malzeme Davranışı Moment Eğrilik İlişkisi", Ders Notu, *Sakarya Üniversitesi*, Sakarya.
- Masmoudi, R., Masmoudi, A., Ouezdou, M., and Daoud, A. (2011) "Long-term bond performance of GFRP bars in concrete under temperature ranging from 20C to 80" *Construction and Building Materials* 25 pp. 486-493.
- Robert, M., and Benmokrane, B. (2010) "Behavior of GFRP Reinforcing Bars Subjected to Extreme Temperatures" *Journals of Composites for Construction ASCE* pp. 353-360.
- Selamet, S., (2017) "Türkiye’de Yangın Mühendisliği", *Tüyak, Yangın Mühendisliği, Yangın Güvenliği ve Teknolojileri Dergisi*, 62-63s.

- Şentürk, H.O. (2006) “Betonarme Binalarda Depremlerin ve Yangınların Binaya Etkisinin İncelenmesi ve Bir Uygulama Örneği”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, Türkiye.
- Uysal, A. (2004) “Yüksek Sıcaklığın Beton Üzerindeki Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, Türkiye.
- Ünlüoğlu, E. (2007) “Yüksek sıcaklıkta kalmış yapılarda pas payının betonarme çelikdonatı özelliklerine etkisi”, **İMO Teknik Dergi**, vol. 18, no. 87, pp. 4145-4155.
- Ya-nan, F., Jun, Z., and Ya-li, L. (2011) “Research on Tensile Mechanical Properties of GFRP Rebar after High Temperature” **Advanced Materials Research Vols** 181-182 pp. 349-354.
- Yavuz, G., (2011) “Lif takviyeli polimerlerin betonarme kirişlerde donatı olarak kullanımı”, **Engineering Sciences**, vol. 6, no. 4, pp. 1001-1015.
- Yüzer, N., (2001) “Yangına maruz yapılarda betonun basınç dayanımı-renk değişimi ilişkisi”, **Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi**, vol. 2001, no. 4, pp. 51-60.
- Yaz, M., (2014) “Betonarme Kirişlerde Cam Elyaf Donatıların Eğilme Davranışına Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kırıkkale, Türkiye.
- Zha, X. X., (2003) “Three-Dimensional Non-Linear Analysis of Reinforced Concrete Members in Fire”, **Building and Environment**, 38, 2, 297-307.



EK-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar

‘Construction & Building Materials’ Makale - Mechanical Properties and Bond Strength
Degradation of GFRP and Steel Rebars at Elevated Temperatures 184, 45-57.



ÖZGEÇMİŞ

Mehmet POLAT, 1989 yılında Erzincan’da doğdu. Lisans eğitimi öncesi tüm eğitimlerini Erzincan’da tamamladı. 2013 yılında Lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde tamamladı. Construction and Building Materials isimli Dergide (sayı:184, sayfa:45-57) yayımlanmış bir makalesi bulunmaktadır. Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında FBA-2017-491 Numaralı Projede araştırmacı olarak görev almıştır. 2013 yılından itibaren çeşitli yapı projelerinde mühendislik hizmeti vermektedir. Evli ve 1 çocuk babasıdır.

