

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇELİK VE CAM LİFİ POLİMER DONATILI**  
**ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI**  
**BETONLARIN EĞİLME DAVRANIŞLARININ**  
**İNCELENMESİ**

**Can OTUZBİR**

**Şubat, 2020**

**İZMİR**

**ÇELİK VE CAM LİFİ POLİMER DONATILI  
ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI  
BETONLARIN EĞİLME DAVRANIŞLARININ  
İNCELENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Yüksek Lisans Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemesi Programı**

**Can OTUZBİR**

**Şubat, 2020**

**İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

CAN OTUZBİR, tarafından PROF. DR. SELÇUK TÜRKEL yönetiminde hazırlanan “ÇELİK VE CAM LİFİ POLİMER DONATILI ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARIN EĞİLME DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Prof. Dr. Selçuk TÜRKEL

Yönetici



Prof. Dr. Semra TAŞI

Jüri Üyesi



Prof. Dr. H. Mehmet İNANCI

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Lisans eğitimim ve yüksek lisans eğitimim boyunca daima bana destek veren bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren, tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Selçuk TÜRKEL başta olmak üzere tüm değerli hocalarıma teşekkür ederim.

Deneysel çalışmaların öncesinde ve sonrasında sıkıştığım her konuda değerli bilgilerini benimle paylaşan başta Sayın Prof. Dr. Murat TANARASLAN'a, ve Doç. Dr. Mert Yücel YARDIMCI'ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca yüksek Lisans eğitim hayatım boyunca desteğini, bilgi ve tecrübelerini hiçbir zaman benden esirgemeyen, başta Batı Prefabrik A.Ş. Sayın Genel Müdürü Erdem ÇOTUR olmak üzere tüm Batı Prefabrik A.Ş. çalışanlarına teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen ve bana her zaman destek olan eşim Hatice KODAMAN'a ve değerli aileme sonsuz teşekkürler.

Can OTUZBİR

# ÇELİK VE CAM LİFİ POLİMER DONATILI ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARIN EĞİLME DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

## ÖZ

Bu tez kapsamında, çelik ve cam lifi polimer donatılı ultra yüksek performanslı betonlarla üretilen Kirişlerin eğilme etkisi altında davranışları incelenmiştir. Ultra yüksek performanslı betonların basınç dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü ve Kirişlerin enerji yutma kapasiteleri belirlenmiştir. İki farklı tipte donatı yerleşimi modellenen gerçek boyutlu Kiriş numunelerinin üretimi yapılmıştır. Ultra yüksek performanslı betonların üretiminde çelik lif kullanılmıştır.

Ultra Yüksek performanslı betonla üretilen cam lifi polimer donatılı Kirişlerin eğilme etkisi altında, çelik donatı ile üretilen Kirişlere göre eğilme etkisi altında dayanımının ve kırılma enerjisinin azaldığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Cam lifi polimer donatı, çelik lifli beton, ultra yüksek performanslı beton (UYPB), eğilme

# **INVESTIGATION OF BENDING BEHAVIOR OF ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE WITH STEEL AND GLASS FIBER POLYMER REINFORCEMENT**

## **ABSTRACT**

In this thesis, the behavior of beams produced with steel and glass fiber polymer reinforced ultra high performance concretes under bending effect was investigated. The compressive strength, flexural strength, modulus of elasticity of ultra high performance concrete were determined. Two different types of real-life beam samples were modeled. Steel fiber is used in the production of ultra high performance concrete.

It has been observed that glass fiber polymer reinforced beams produced with ultra high performance concrete have reduced strength and fracture energy under bending compared to steel reinforced beams.

**Keywords:** Glass fiber polymer reinforcement, steel fiber concrete, ultra high performance concrete (UHPC), bending

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTRACT .....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xii
<b>BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>BÖLÜM İKİ - CAM LİFİ POLİMER DONATI .....</b>	<b>3</b>
2.1 Cam Lifi .....	3
2.1.1 Cam Lifi Tarihi.....	3
2.1.2 Cam Lifi Özellikleri .....	3
2.1.3 Cam Lifi Çeşitleri.....	4
2.2 Polimer Donatı .....	5
2.2.1 Polimer Donatı Tanımı.....	5
2.2.2 Polimer Donatı Kullanım Alanları .....	6
2.2.3 Polimer Donatıların Kullanım Avantajları .....	8
2.2.4 Polimer Donatıların Mekanik Özellikleri.....	8
<b>BÖLÜM ÜÇ - LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI.....</b>	<b>10</b>
<b>BÖLÜM DÖRT - DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>23</b>

4.1 Amaç .....	23
4.2 Kapsam .....	23
4.3 Kullanılan Malzemeler .....	23
4.3.1 Çimento .....	24
4.3.2 Silis Dumanı.....	24
4.3.3 Karışım Suyu.....	25
4.3.4 Kimyasal Katkı .....	25
4.3.5 Donatı Çeliği .....	25
4.3.6 Cam Lifi Polimer Donatı.....	26
4.3.7 Kuvars Agregaları .....	26
4.3.8 Çelik Lifler .....	28
4.4 Beton Karışımlarının Hazırlanması.....	28
4.5 Betonların Karıştırılması .....	30
4.6 Numunelerin Döküm ve Yerleştirme İşlemi .....	31
4.7 Numunelerin Kür İşlemi .....	31
4.8 Deney Kirişlerinin Modellenmesi.....	32
4.8.1 Kirişlerin Donatı Oranı ve Dengeli Donatı Oranı Hesabı.....	33
4.9 Yapılan Deneyler .....	34
4.9.1 Taze Hal Deneyleri .....	34
4.9.2 Basınç Deneyi .....	34
4.9.3 Elastisite Modülü Deneyi .....	35
4.9.4 Eğilme Deneyi (75x75x285mm) .....	36
4.9.5 Eğilme Deneyi (200x300x3800mm) .....	37
4.9.6 Cam Lifi Donatı Çekme Deneyi .....	38
4.9.7 Donatı Aderans Deneyi .....	42

**BÖLÜM BEŞ - DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME ..... 45**

5.1 Taze Hal Deneý Sonuçları .....	45
5.2 Sertleşmiş Hal Deneý Sonuçları .....	45
5.2.1 Basınç Testi Sonuçları .....	45
5.2.2 Elastisite Modülü Tayini Deneý Sonuçları .....	46
5.2.3 Eğilme Deneýi Sonuçları (75x75x285mm) .....	48
5.2.4 Eğilme Deneýi Sonuçları (200x300x3800mm) .....	50
5.2.4.1 KİRİŞ-1 Deneý Sonuçları .....	50
5.2.4.2 KİRİŞ-2 Deneý Sonuçları .....	52
5.2.4.3 KİRİŞ-3 Deneý Sonuçları .....	54
5.2.4.4 KİRİŞ-4 Deneý Sonuçları .....	56

**BÖLÜM ALTI – DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ ..... 60**

6.1 Dayanım ve Davranış .....	60
6.2 Deplasman Sünekliliği .....	62
6.3 Enerji Tüketme Kapasitesi .....	64
6.4 Rijitlik .....	66

**BÖLÜM YEDİ – SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... 68**

**KAYNAKLAR ..... 71**

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1 Örnek Bir Cam Lifinin Kopma Yüğü ve Uzaması .....	4
Şekil 2.2 Fiber Tavkiyeli Donatı Örnekleri.....	6
Şekil 2.3 FRP ile Döşeme Güçlendirme İnşaatı,Lima OH .....	7
Şekil 2.4 GFRP ile Dalgakıran İnşaatı .....	7
Şekil 3.1 Farklı Donatılı Üretim Yapılan Kirişlerin Yük-Sehim Grafiğı.....	13
Şekil 3.2 7 Gün Sonunda Donatılı ve Donatısız Örneklerin Eğilme Dayanımları.....	14
Şekil 3.3 28 Gün Sonunda Donatılı ve Donatısız Örneklerin Eğilme Dayanımları...	15
Şekil 3.4 Kullanılan Donatıların Gerilme-Şekil Değıştirme Eğrileri.....	16
Şekil 3.5 Kullanılan Donatıların Beton ile Aderans Dayanımları.....	16
Şekil 3.6 Kiriş Yükleme Düzenęi ve Donatıların Gerilme-Şekil Değıştirme Eğrileri .....	17
Şekil 3.7 Kiriş Yükleme Düzenęi ve Donatı Yerleşimleri.....	18
Şekil 3.8 Kiriş Yükleme Düzenęi ve Donatı Yerleşimleri.....	20
Şekil 3.9 Kirişlerin Yük-Sehim Eğrileri.....	20
Şekil 3.10 Kirişlerde Oluşan Nihai Çatlak Şekilleri .....	21
Şekil 3.11 Kirişlere Ait Başlangıç ve Akma Rijitlikleri .....	22
Şekil 4.1 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Kuvars Agregalar .....	27
Şekil 4.2 Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Çelik Lifler .....	28
Şekil 4.3 Beton Karışımlarının Yapıldığı Beton Santrali.....	30
Şekil 4.4 Beton Karışımlarının Yapıldığı Betonyer .....	31
Şekil 4.5 Kiriş Numuneleri Kürleme İşlemi .....	32
Şekil 4.6 Kirişlerin Geometrik Özellikleri ve Donatı yerleşimleri .....	33
Şekil 4.7 Basınç Testlerinin Yapıldığı Test Presi .....	35
Şekil 4.8 Elastsite Modülü Tayini için Okumaların Yapıldığı Test Presi.....	36

Şekil 4.9 Test Kirişlerine Çentik Açılması .....	36
Şekil 4.10 Dört Noktalı Eğilme Deneyi Test Düzeneği.....	37
Şekil 4.11 Şematik Yükleme ve Ölçüm Düzenekleri.....	38
Şekil 4.12 Kirişlerde Kullanılan Cam Lifi Polimer Donatılar .....	39
Şekil 4.13 Çekme Düzeneğinin Detayları.....	39
Şekil 4.14 Çekme Testi için Hazırlanan GFRP Donatılar.....	40
Şekil 4.15 GFRP Donatıları Çekme Testi Yapılması .....	40
Şekil 4.16 GFRP Donatıların Çekme Testi Sonrası Durumları .....	41
Şekil 4.17 GFRP Donatıların Çekme Testi Sonrası Durumları .....	42
Şekil 4.18 Aderans Deney Düzeneği .....	43
Şekil 4.19 Aderans Deneyi İçin Üretilen Örnekler .....	43
Şekil 4.20 Aderans Deneyi İçin Yapılan Düzenek.....	44
Şekil 5.1 Gerilme-Deformasyon Eğrileri .....	48
Şekil 5.2 Prizmatik Örneklerin Eğilme Deneyi Öncesi ve Sonrası Durumları .....	49
Şekil 5.3 Kiriş-1 Üzerindeki Rötire Çatlakları.....	50
Şekil 5.4 Kiriş-1 Üzerindeki 2,3 ve 5 no’lu Çatlak Oluşumları.....	50
Şekil 5.5 Kiriş-1 Üzerindeki 8 no’lu Çatlak İlerlemesi.....	51
Şekil 5.6 Kiriş-1 Üzerindeki 3 no’lu Çatlağın 7mm’ye Ulaşması .....	51
Şekil 5.7 Kiriş-1 Üzerindeki 8 no’lu Çatlağın 7mm’ye Ulaşması .....	51
Şekil 5.8 Kiriş-1 Yük-Deplasman Grafiği .....	52
Şekil 5.9 Kiriş-2 Üzerindeki İlk Çatlakların Oluşumları .....	53
Şekil 5.10 Kiriş-2 Üzerindeki 11-14 nolu Çatlakların Oluşumları .....	53
Şekil 5.11 Kiriş-2 Üzerindeki 8 nolu Çatlağın Basınç Bölgesine Ulaşması.....	53
Şekil 5.12 Kiriş-2 Yük-Deplasman Grafiği .....	54
Şekil 5.13 Kiriş-3 Numune Üzerindeki 1 nolu Çatlağın Basınç Bölgesine Ulaşması	55

Şekil 5.14 Kiriş-3 Üzerindeki 1 nolu Çatlağın 31 mm Boyuta Ulaşması .....	55
Şekil 5.15 Kiriş-3 Üzerindeki 1 nolu Çatlağın 52 mm Boyuta Ulaşması .....	56
Şekil 5.16 Kiriş-3 Yük-Deplasman Grafiği .....	56
Şekil 5.17 Kiriş-4 1 nolu İlk Eğilme Çatlağı Oluşumu.....	57
Şekil 5.18 Kiriş-4 1 nolu Çatlağın Basınç Bölgesine Ulaşması.....	57
Şekil 5.19 Kiriş-4 Basınç Bölgesinde Oluşan Çatlak .....	58
Şekil 5.20 Kiriş-4 1 nolu Çatlak Genişliğinin 42 mm'ye Ulaşması.....	58
Şekil 5.21 Kiriş-4 Yük-Deplasman Grafiği .....	59
Şekil 5.22 Kiriş-4 Cam Lifi Donatıların Liflerinin Ayrılması .....	59
Şekil 6.1 Kiriş-1 ve Kiriş-3 Yük-Deplasman Grafiği .....	61
Şekil 6.2 Kiriş-2 ve Kiriş-4 Yük-Deplasman Grafiği .....	61
Şekil 6.3 Akma Yer Değiştirmesinin Belirlenmesi.....	63
Şekil 6.4 Kirişlerin Yer Değiştirme Süneklilikleri.....	64
Şekil 6.5 Kiriş-1 ve Kiriş-3 Enerji Yutma Miktarları .....	65
Şekil 6.6 Kiriş-2 ve Kiriş-4 Enerji Yutma Miktarları .....	65

## TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Örnek Bir Donatı Çeliği ve Cam lifi Polimer Donatı Eşdeğer Tablosu .....	8
Tablo 2.2 Örnek Çekme Donatıların Bazı Mekanik Özellikleri .....	9
Tablo 3.1 Örneklerin Donatı Yerleşimi .....	10
Tablo 3.2 Çelik Donatılı ve GFRP Donatılı Öneklerin Karşılaştırması.....	11
Tablo 3.3 Örneklerin Test Sonuçları.....	13
Tablo 3.4 Çelik ve GFRP Çubukların Ortalama Çekme Dayanımları.....	14
Tablo 3.5 Deneylerde Kullanılan Beton Karışım Oranları .....	19
Tablo 4.1 Çimentonun Fiziksel ve Kimyasal Analiz Sonuçları.....	24
Tablo 4.2 Silis Dumanı Kimyasal Analiz Sonuçları .....	25
Tablo 4.3 Kimyasal Katkının Özellikleri .....	25
Tablo 4.4 Donatı Çeliği Test Sonuçları.....	26
Tablo 4.5 Kuvars Agregaların Kimyasal Özellikleri .....	27
Tablo 4.6 Kuvars Agregaların Tane Dağılımları .....	27
Tablo 4.7 Kullanılan Çelik Liflerin Özellikleri.....	28
Tablo 4.8 Ultra Yüksek Performanslı Betonun(UYPB) Karışım Miktarları .....	29
Tablo 4.9 Ultra Yüksek Performanslı Betonun(UYPB) Maliyet Hesabı.....	29
Tablo 4.10 Kirişlerin Donatı Yerleşimleri .....	33
Tablo 4.11 Kirişlerin Donatı Oranları ve Dengeli Donatı Durumları.....	34
Tablo 4.12 GFRP Donatıların Çekme Testi Sonuçları.....	41
Tablo 4.13 Aderans Deney Sonuçları .....	44
Tablo 5.1 Aynı Karışım Miktarlarına Göre Hazırlanan betonların Birim Hacim Ağırlık ve Çökme Değerleri.....	45
Tablo 5.2 Hazırlanan Karışımlardan Alınan Numunelerin Basınç Dayanımları .....	46
Tablo 5.3 Birim Deformasyon Okumaları .....	47
Tablo 5.4 75x75x285mm Boyutlu Kiriş Numunelerin Eğilme Dayanımları.....	49

Tablo 6.1 200x300x3800 mm Boyutlu Kirişlere Ait Eğilme Deneyi Test Sonuçları	60
Tablo 6.2 Yer Değişirme Sünekliliği Parametreleri.....	63
Tablo 6.3 Kirişlerin Başlangıç ve Akma Rijitlikleri .....	66



## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

Beton ve beraberinde betonarme yapıların hızla gelişmesiyle yapılarında durabiliteyi sağlamak inşaat mühendisliğinin en zor alanlarından biridir.

Beton yaşayan bir malzemedir ve betonun bulunduğu yapı sürekli olarak fiziksel ve kimyasal etkilere maruz kalır. Bu kimyasal etkilerden birisi de donatı korozyonudur. Betonarme yapıların tasarım ve imalat süreçlerinde gerekli önemler alınmadığı durumlarda donatılar zaman içinde korozyona uğrar ve çapında belirgin ölçülerde azalmalar meydana gelir. Donatı, korozyon sonucunda işlevini yerine getiremez duruma gelir ve elemanın taşıma kapasitesinin belirgin ölçülerde azalmasına beraberinde servis ömrünün de azalmasına neden olur. Servis ömrünün tahmin edilenden daha kısa zamanda tamamlanması istenmeyen bir durumdur.

Son yıllarda cam lif teknolojisindeki ilerlemeler ve betonla beraber kullanılması hızla gelişmiştir. Çelik donatıları korozyona karşı koruyamama sonucunda cam lifi fiber donatılar çelik donatılara alternatif bir malzeme olarak araştırılmaya başlanmış ve halen araştırmalar ve deneysel çalışmalar devam etmektedir. Cam lifi donatıların, çelik donatıya kıyasla korozyona karşı dirençli, hafif ve yerleşiminin basit oluşu çelik donatıya alternatif bir malzeme olmuştur.

Cam lifi fiber donatıların korozyona uğramamasının yanında, çelik donatıya göre daha yüksek çekme dayanımlı, daha uzun ömürlü, daha hafif ve yalıtıcıdır. Bu avantajlarının yanında çeliğe göre yüksek sıcaklıklarda reçine matrisin zarar görmesi, alkali çevre koşullarında bazı cam liflerinin zarar görmesi gibi dezavantajları da vardır.

Yapılan deneysel çalışmalarda genel olarak cam lifi fiber donatılar, çelik donatıyla üretilen Kirişlere benzer hatta üstün mekanik özellikler gösterdiği kanıtlanmıştır. Cam lifi fiber donatıları uzun vadede kullanımın performansı, hızlandırılmış deneysel çalışmalarla devam etmektedir.

Ultra yüksek performanslı betonun (UYPB) üstün mekanik özellikleri, yapı elemanlarında dayanım, rijitlik ve süneklik bakımından önemli avantajlar sağlayarak geleneksel betonlara göre daha ekonomik, estetik ve uzun ömürlü yapılara imkan verecek potansiyele sahiptir. (Bırol ve diğeri., 2019)

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar içinde, 200x300x3800mm boyutlu UYPB ile cam lifli polimer ve çelik donatı kullanılarak üretilen Kirişlerin eğilme etkisi altında performansları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, cam lifli donatıların nervürlü olmasından dolayı Kirişlerin eğilme dayanımlarında istenen sonuçlara ulaşamamıştır.



## **BÖLÜM İKİ**

### **CAM LİFİ POLİMER DONATI**

#### **2.1 Cam Lifi**

##### **2.1.1 Cam lifi tarihi**

Camdan üretilen iplik ve çeşitli mamullerin yapımı çok eski zamanlara kadar dayanmaktadır. 1734 yılında R. F. de Reaumur tarafından cam lifi üretilmiş fakat fabrikasyon olarak üretimi 18. yüzyıl sonlarında gerçekleşmiştir. Bunun en büyük nedeni Reaumur'un, elde ettiği bu ipek gibi ince cam liflerinin dokunmasında zorluk olmasıdır (Öktem ve Seventekin, 2006).

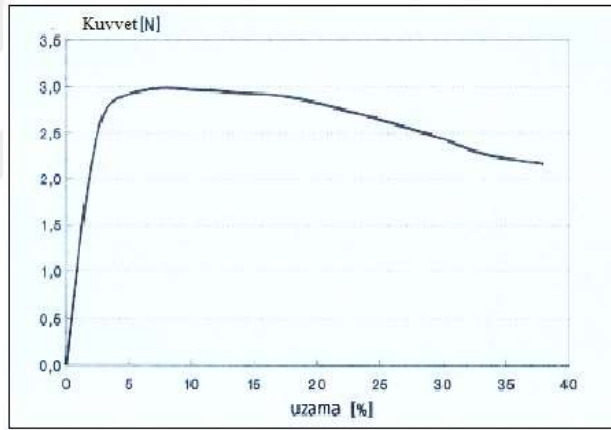
1935 yılında Owens-İllinois Glass Co., Newark, firması tarafından iplik haline getirilebilecek ve dokunabilecek incelikte cam lifleri üretilmiştir. 1942 yılında takviye edilmiş kompozit malzemeler olarak ilk zamanlarda havacılık sektöründe kullanılmaya başlamıştır. Yüksek mukavemetli cam lifi (S-tipi) ise O. Corning Tekstil Ürünleri ve Amerikan Hava Kuvvetleri'nin ortak çalışması sonucunda ilk olarak 1960'ların başında kullanılmıştır. 1968'de S-2 tipi cam lifi çok çeşitli ticari uygulamalarda kullanım alanı bulmaya başlamıştır. Daha sonraları birçok lif çekim yöntemlerinin geliştirilmesi ile cam liflerinin üretimleri hızla artışa geçmiştir. Bu oran 2000'li yıllarda 2,9 milyon ton/yıl'a ulaşmıştır (Öktem ve Seventekin, 2006).

##### **2.1.2 Cam lifi özellikleri**

Cam lifleri saydam ve düz yüzeylidirler. Ayrıca kesitleri daireseldir. İncelikleri 2 ile 13  $\mu$  aralığında değişmektedir. 6 $\mu$  inceliğindeki 1 kg cam lifi yüzeyi 280 m<sup>2</sup> dir. Cam lifleri dayanımlarının yüksek olması ile bilinirler ve genellikle kopma dayanımları 6-7,3 gr/denye\* arasında değişmektedir. Bununla beraber ince liflerin dayanımları kalın liflerden daha iyidir. Bunların kopma anındaki uzama yüzdeleri %2 civarındadır ve diğer liflere göre oldukça düşüktür. Ancak C tipi liflerde bu oran %3-4'e kadar çıkabilmektedir. Yoğunlukları 2,5-2,7 g/cm<sup>3</sup>'dür

\*denye: 1 denye 9000 metre uzunluğundaki ipliğin gram olarak ağırlığıdır.

Cam liflerinden yapılan yün camının özgül ağırlıkları 0,025 civarındadır ki normal cam liflerine göre düşük sayılmaktadır. Çünkü bu lifler büyük çapta geniş hacimli hava içermektedirler. Cam liflerinin içermiş oldukları nem miktarı %0,13-0,8 aralığındadır. Nem, cam lifinin dayanımını etkilemektedir. Cam liflerinin dayanımı buldukları ortamın sıcaklığının artışıyla birlikte düşmektedir. Sertleştirilmemiş silikat cam liflerinin elastisite modülleri yaklaşık 52 GPa ile 87 GPa arasında değişmektedir. Lif ısıtıldığında modül kademeli olarak artmaktadır. Yanmazlar fakat 1150 °C civarında erirler. Asitlere karşı dayanıklıdırlar fakat sıcak hidroflorik asit ve fosforik asitten etkilenirler. Derişik bazlar ve sıcak baz çözeltilerinden de olumsuz etkilenmektedirler. Birçok organik çözücünden, bakteri, güvelerden ve mikroorganizmalardan ise etkilenmemektedirler. Elektrik ve ısıyı iletmezler. Örnek olarak bir cam lifinin kopma yükü ve uzama yüzdesi Şekil 2.1’de verilmiştir (Öktem ve Seventekin, 2006).



Şekil 2.1 Örnek bir cam lifinin kopma yükü ve uzaması (Öktem ve Seventekin, 2006)

### 2.1.3 Cam Lifi Çeşitleri

Cam lifi çeşitleri ve özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

- A tipi cam elyafı – Çok fazla alkali dayanımı olmayan, hurda camların geri dönüşümünden elde edilen cam elyafı türüdür.

- E tipi cam elyafı – Alkali içermeyen Alüminyumborosilikat camıdır. İlk bulunan ve dünyada en çok üretilen türdür. Klorür iyonları yüzeyini eritebilmektedir. Yüksek sıcaklıkta erimezler ancak yumuşarlar .
- S tipi cam elyafı – Kopma dayanımı yüksek olan katı cam elyaf lifidir.
- C tipi cam elyafı – Kimyasallara karşı dayanımlı cam elyaf türüdür.
- T tipi cam elyafı – C cam elyafının Kuzey Amerikadaki benzeridir.
- AR tipi cam elyafı – Diğer cam elyaf türleri suda çözülebilirler ve pH değişimlerinden etkilenirken, AR Cam Elyaf alkali dayanıklılığı yüksek ve bu sayede beton üretiminde en çok tercih edilenidir (Öktem ve Seventekin, 2006).

İnşaat sektöründe donatı olarak kullanılan cam lif türü AR tipi cam elyaf'tır. AR'nin açılımı "Alkali Resistant"dir. Diğer cam elyaf lifi türlerinin beton üretiminde kullanılması sakıncalıdır (Öktem ve Seventekin, 2006).

## **2.2 Polimer Donatı**

### **2.2.1 Polimer donatı tanımı**

Polimer donatı çubukları, oldukça dayanıklı polimerik epoksi reçinesi ile emprenye edilmiş ve bağlanmış, yüksek mukavemetli ve korozyona dayanıklı cam elyaflarından yapılmış çelik donatıya alternatif bir malzemedir. Elyaf takviyeli polimerler, yapılara daha uzun hizmet ömrü veren, geleneksel takviye yöntemlerine göre sayısız avantaja sahip, kanıtlanmış ve başarılı bir yapı malzemesidir. Aynı zamanda bu malzeme epoksi veya galvaniz kaplı paslanmaz çelik donatıların yerini de alan yapı malzemesidir. Karakteristik özellikleri bakımında korozif ve zorlu ortamlara dayanıklıdır. Polimer donatı kimyasal asitlere ve alkali bazlara kalıcı olarak dirençli olduğundan, ekstra beton kaplama, büzülme önleyici katkı maddeleri hatta katodik koruma bile gerekli değildir. En yaygın kullanılan türleri aramid fiber, karbon fiber ve cam elyaf takviyeli polimer donatılardır. Yapılarda çelik donatıya alternatif olarak kullanılan türü cam elyaf polimer donatıdır. Cam elyaf polimer donatılar korozyondan kaynaklı yapı ömründeki azalmaları önemli ölçüde

engellemektedir. Şekil 2.2’de fiber donatı örnekleri gösterilmektedir(ACI-440.1R-15).



Şekil 2.2 Fiber takviyeli donatı örnekleri (ACI-440.1R-15, 2015)

### ***2.2.2 Polimer Donatı Kullanım Alanları***

Betonarme yapılarda donatı olarak, temellerde, beton yapıların güçlendirilmesi ve çelik beton yapıların karışık takviyesi için, zemin betonarmelerde ve temel levhalarında, korozif ortamlara maruz kalan yapılarda (Örneğin, iskele, deniz suyu ile temasta olan bütün yapılarda, kıyı korumalarında, barajlarda, sahiller, dalga kıranlar v.b.), yol yapımında, agresif (özellikle klorür) ortamlardan zarar görmüş betonarme konstrüksiyonların tamirinde, çeşitli amaçlar için inşa edilen ince duvarlı yapılarda, koruyucu katmanının talep olunan kalınlığını sağlamak için imkan bulundurmayan inşaatlarda, tuğladan inşa edilen yapıların güçlendirmesinde, özellikle kış aylarında harcın donmaması için çelik çubukların korozyonuna sebep olan klorür tuzları katılan ortamlarda, yol ışıklarının ve elektrik hatlarının desteğinde, köprülerde, su ve sulama

kanalları, seralarda, taşıma kapasitesi arttırılmak istenen döşemelerde, kolon güçlendirilmesinde, sehim yapan döşemelerde, Kiriş ve balkonlarda, donatı eksikliği olan yapılarda, döşemenin kesilmesi ve yapı elemanlarının zarar görmesi durumlarında, kullanılabilir. Şekil 2.3 ve şekil 2.4 'de yurtdışında bazı projelerde kullanım alanları gösterilmiştir (ACI-440.1R-15, 2015).



Şekil 2.3 FRP ile döşeme güçlendirme inşaatı Lima,OH (Pierce st. brige,'99) (ACI-440.1R-15, 2015)



Şekil 2.4 GFRP ile dalgakıran inşaatı (ACI-440.1R-15, 2015)

### 2.2.3 Polimer Donatıların Kullanım Avantajları

Polimer donatılar, 50 yıl ve üzeri kullanım ömrü ve korozyon direnci olan, çelik donatıdan yaklaşık 9 kat daha hafif, çelik donatıya kıyasla yaklaşık 3 kat fazla çekme dayanımlı, ısı ve elektrik iletkenliği ile manyetik özelliği olmayan, yüksek yorulma ve darbe dayanımlı, epoksi ve galvaniz kaplı paslanmaz çelik donatıya kıyasla daha az maliyetli bir yapı malzemesidir. Bu avantajları sayesinde gelecek nesillerde ülkemizde ve dünyada kullanımın daha fazla olması beklenmektedir. Örnek bir donatı çeliği ile GFRP donatıların eşdeğer tablosu Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1 Örnek bir donatı çeliği ve cam lifi polimer donatı eşdeğer tablosu (Armastek, 2017)

	<b>ÇELİK</b>	<b>GFRP</b>
<b>Çelik Donatının GFRP eşdeğeri</b>	6 mm	4 mm
	8 mm	6 mm
	10 mm	7 mm
	12 mm	8 mm
	14 mm	10 mm
	16 mm	12 mm
	18 mm	14 mm
	20 mm	16 mm
<b>Ağırlık Karşılaştırması (kg/m)</b>	6 mm - 0,222	4 mm - 0,02
	8 mm - 0,395	6 mm - 0,05
	10 mm - 0,670	7 mm - 0,07
	12 mm - 0,920	8 mm - 0,08
	14 mm - 1,280	10 mm - 0,10
	16 mm - 1,580	12 mm - 0,20
	18 mm - 2,000	14 mm - 0,35
	20 mm - 2,470	16 mm - 0,35

### 2.2.4 Polimer Donatıların mekanik özellikleri

ACI-440 ‘a göre çelik ve polimer donatıların mekanik özellikleri Tablo 2.2’ de gösterilmiştir.

Tablo 2.2 Örnek çekme donatılarının bazı mekanik özellikleri (ACI-440.1R-15, 2015)

	ÇELİK	GFRP	CFRP	AFRP
		(Cam Lifi Takviyeli Polimer Donatı)	(Karbon Lifi Takviyeli Polimer Donatı)	(Aramid Lifi Takviyeli Polimer Donatı)
Akma Dayanımı ,ksi (MPa)	40 - 75 (276 - 517)	-	-	-
Çekme Dayanımı, ksi (MPa)	40 - 75 (483 - 1600)	70 - 230 (483 - 690)	87 - 535 (600 - 3690)	250 - 368 (1720 - 2540)
Elastisite modülü x 10 <sup>3</sup> ksi (GPa)	29 -200	5,1 - 7,4 (35,0 - 51,0)	15,9 - 84,0 (120,0 - 580,0)	6,0 - 18,2 (41,0 - 125,0)
Akma Uzaması, %	0,14 - 0,25	-	-	-
Kopma Uzaması, %	6,0 - 12,0	1,2 - 3,1	0,5 - 1,7	1,9 - 4,4

## BÖLÜM ÜÇ

### LİTERATÜR ARAŞTIRMALARI

Bu bölümde tez konusuyla ilgili geçmişte yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

Venu R. Patil tarafından 2014 yılında yapılan çalışmada 7 farklı donatı yerleşim tipinde Kiriş numuneleri üretilmiştir. Tablo 3.1 'de örneklerin donatı yerleşimleri verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda Tablo 3.2'den görüleceği gibi eğilme bölgesindeki çelik donatıların cam lifi fiber donatıların değiştirilmesi eğilme yükü kapasitesine olumlu etkileri olmuştur. İçi boş cam lifi fiber donatıların kullanılması eğilme yükü kapasitesinin azalmasına neden olmuştur. Büyük projelerde çelik donatı yerine kullanılmasının maliyet yönünden avantaj sağlayabileceği belirtilmiştir (Patil, 2014).

Tablo 3.1 Örneklerin donatı yerleşimleri (Patil, 2014)

Örnek	Üst Donatı	Alt Donatı
1	2Φ10 çelik donatı	3Φ12 çelik donatı
2	2Φ10 çelik donatı	2Φ12 çelik donatı + 1Φ12 GFRP (içi boş)
3	2Φ10 çelik donatı	2Φ12 çelik donatı + 1Φ12 GFRP
4	2Φ10 çelik donatı	1Φ12 çelik donatı + 2Φ12 GFRP (içi boş)
5	2Φ10 çelik donatı	1Φ12 çelik donatı + 2Φ12 GFRP
6	2Φ10 çelik donatı	3Φ12 GFRP (içi boş)
7	2Φ10 çelik donatı	3Φ12 GFRP

Tablo 3.2 Çelik donatılı ve GFRP donatılı örneklerin karşılaştırması (Patil, 2014)

Örnek	Eğilme Yüğü	Deplasman	Kesme Gerilmesi	Eğilme Gerilmesi
	(kN)	(mm)	(kN/mm <sup>2</sup> )	(kN/mm <sup>2</sup> )
1	131,4	4,8	1,34x10 <sup>-3</sup>	23,57x10 <sup>-3</sup>
2	126,3	4,9	1,29x10 <sup>-3</sup>	22,45x10 <sup>-3</sup>
3	132,6	5	1,36x10 <sup>-3</sup>	23,66x10 <sup>-3</sup>
4	122,6	4,6	1,25x10 <sup>-3</sup>	21,79x10 <sup>-3</sup>
5	134,48	5,2	1,38x10 <sup>-3</sup>	23,96x10 <sup>-3</sup>
6	119,66	4,4	1,22x10 <sup>-3</sup>	21,27x10 <sup>-3</sup>
7	165,18	5,3	1,40x10 <sup>-3</sup>	24,08x10 <sup>-3</sup>

Aydın, Ekiz ve Sarıbyık (2014) tarafından yapılan çalışmada pultruzyon metoduyla üretilen Cam elyaf takviyeli plastik (CTP) donatılar kullanılmıştır. Bütün CTP kalıplama yöntemlerinde olduğu gibi pultruzyonda da temel işlem, lifli bir takviye malzemesi ile taşıyıcı matris olarak reçine üzerine oluşturulmuştur. Bunlarla birlikte dolgu, katalizör, iç kalıp ayırıcı ve renklendirici malzemeler de kullanılmaktadır. Bu yöntemlerle üretilen malzemeler, yapılarda kullanılan elemanların karşılaması gereken çekme, basınç veya kesme kuvvetlerine karşı gereken dayanımı gösterememektedirler. Bu sorun yeni bir kompozit üretim yöntemi olan pultruzyon yöntemi ile çözülebilmektedir. Pultruzyon metodu, malzemenin kalıp boyunca çekilerek üretilmesi yöntemidir. Kiriş deneylerinde düz yüzeyli, nervürlü ve yüzeyi kumla kaplı olmak üzere üç farklı CTP donatı kullanılmıştır. Yüzeyi nervürlü olan CTP malzemeler düz CTP donatılar üzerine CTP iplikler sarılarak girintili bir yüzey meydana getirilmiştir. Yüzeyi kum kaplanmış CTP malzemeleri ise düz CTP donatıların yüzeyleri zımparalanarak parlak yüzey temizlenmiş ve temiz yüzeye kum

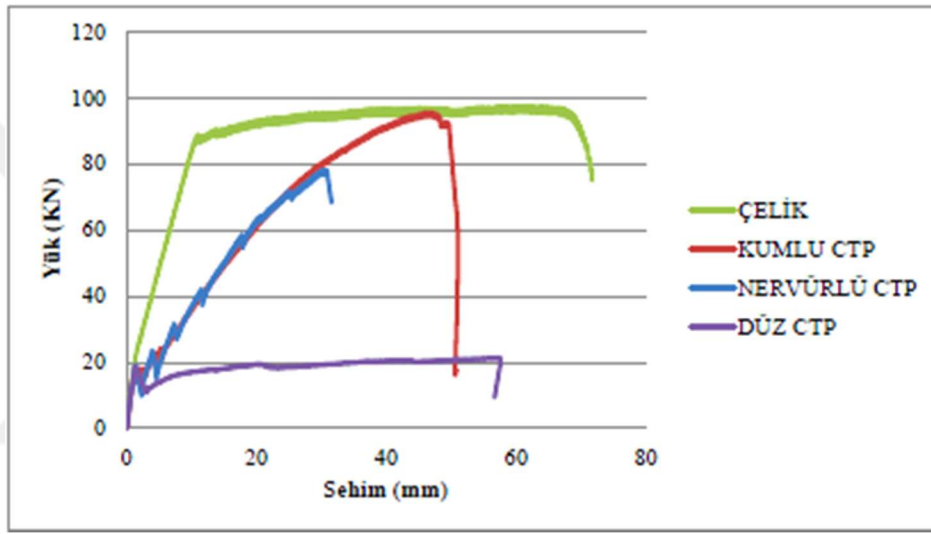
kaplama yapılmıştır. Tüm kirişlerde kullanılan etriyeler ve çelik donatılı kirişlerdeki boyuna donatılar S420 çeliğidir. Eğilme deneyi için 2000 mm uzunluğunda kiriş numuneleri oluşturulmuştur. Kiriş numunelerinde esas çekme donatıları için farklı yüzey özelliklerine sahip Ø12 CTP ve çelik donatılar, etriye için ise Ø8 çelik donatı kullanılmıştır (Aydın ve diğer., 2014).

Çelik donatıyla ve farklı yüzey özelliklerine sahip CTP donatılarla yapılan betonarme kirişlerin eğilme davranışlarının sonuçları Tablo 3.3’de, yük-sehim grafikleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, yüzeyi düz CTP donatılı kirişlerle yapılan 4 noktalı eğilme deneylerinde CTP donatılarının yüzeylerinin pürüzsüz olmasından dolayı sıyrılmalar meydana gelmiştir. Yüzeyi nervürlü ve kumlanmış CTP donatılı Kirişlerde sıyrılmaya dayanıklılığının arttığı görülmüştür. CTP donatılar içerisinde en iyi mukavemeti yüzeyi kumlanmış CTP donatılar vermiştir. Düz CTP donatılı referans kiriş numunelerin eğilme dayanımına göre kumlu CTP donatılı Kirişlerin eğilme dayanımının % 456 oranında arttığı görülmüştür. Kumlu CTP donatılı Kirişlerin eğilme dayanımı nervürlü CTP donatılı kirişlerin eğilme dayanımına göre %17,5 oranında artış gözlenmiştir. Düz CTP donatılı referans kiriş numunelerin eğilme dayanımına göre nervürlü üretilen CTP donatılı kirişlerin eğilme dayanımı %388 oranında artmıştır. Çelik donatılı kirişlerin eğilme dayanımı kumlu CTP donatılı Kirişlere göre %11,5 oranında daha fazla eğilme dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Düşük eğilme dayanımına sahip CTP donatılı kirişler CTP donatısının önce nervürlü daha sonra kumlu üretilmesiyle geliştirilmiş ve çelik donatılı kirişlerin dayanımına yakın eğilme dayanımına ulaşmıştır. Belirlenen dayanım sonuçlarının yanı sıra CTP donatıların hafifliği ve dayanıklılık gibi avantajlar sunduğunun unutulmaması gerektiği ifade edilmiştir (Aydın ve diğer., 2014).

Tablo 3.3 CTP donatılar ile yapılan betonarme kirişlerin eğilme sonuçları (Aydın ve diğer., 2014)

DONATI TİPİ	Maksimum Yük (KN)	Eğilme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )
DÜZ CTP	19,58	3,76
NERVÜRLÜ CTP	76,12	14,62
KUMLU CTP	89,43	17,17
ÇELİK DONATI	99,75	19,15



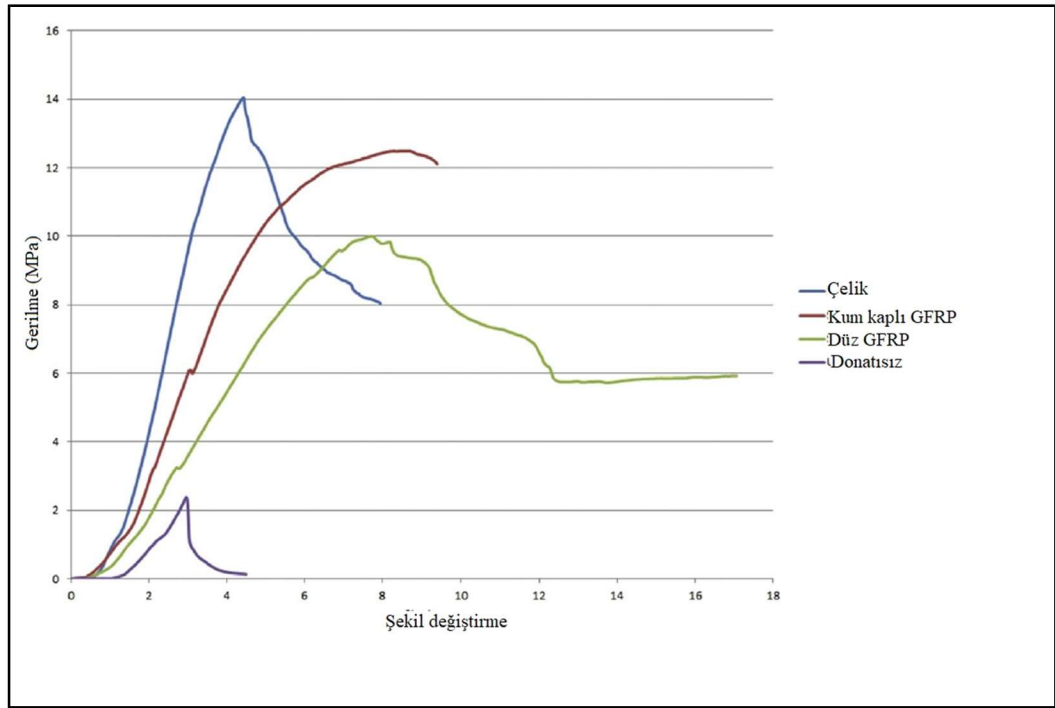
Şekil 3.1 Farklı donatı türlü Kiriş numuneleri Yük – Sehim grafikleri (Aydın ve diğer., 2014)

Farid ve Jabbar (2018) tarafından yapılan çalışmada 100x100x400 mm boyutlu Kiriş numuneler üzerinde eğilme deneyi yapılmıştır. Kirişlerde donatı olarak çelik, düz GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastic) ve kumlanmış GFRP kullanılmıştır. Çelik ve GFRP çubukların ortalama çekme dayanımları Tablo 3.4 'de verilmiştir. Deneylerde 28 günlük ortalama basınç dayanımı 25,67 MPa olan geleneksel beton kullanılmıştır. Kirişlerde 4 adet 12,5mm çapında donatılar kullanılmıştır.

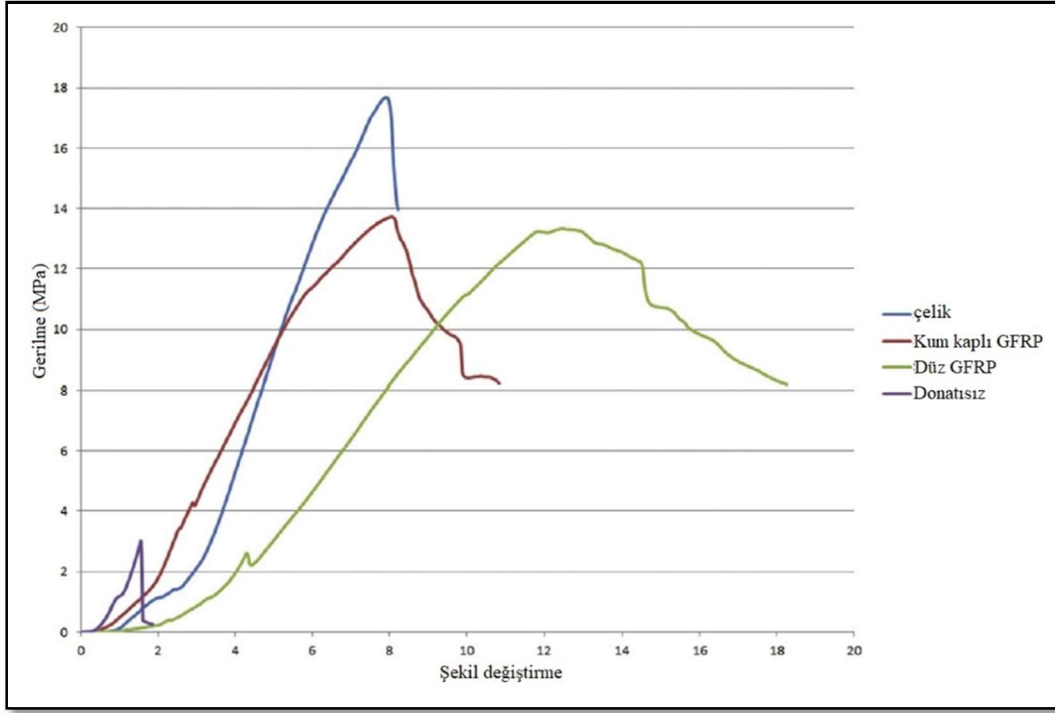
Tablo 3.4 Çelik ve GFRP çubukların ortalama çekme dayanımları (Farid ve Jabbar, 2018)

ÖZELLİK	ÖRNEKLER	
	ÇELİK	GFRP
Akma Dayanımı (Mpa)	520	593
Akma uzaması (%)	17	40

7 ve 28 gün sonra kirişlerin eğilme etkisi altındaki performansları Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de verilmiştir.



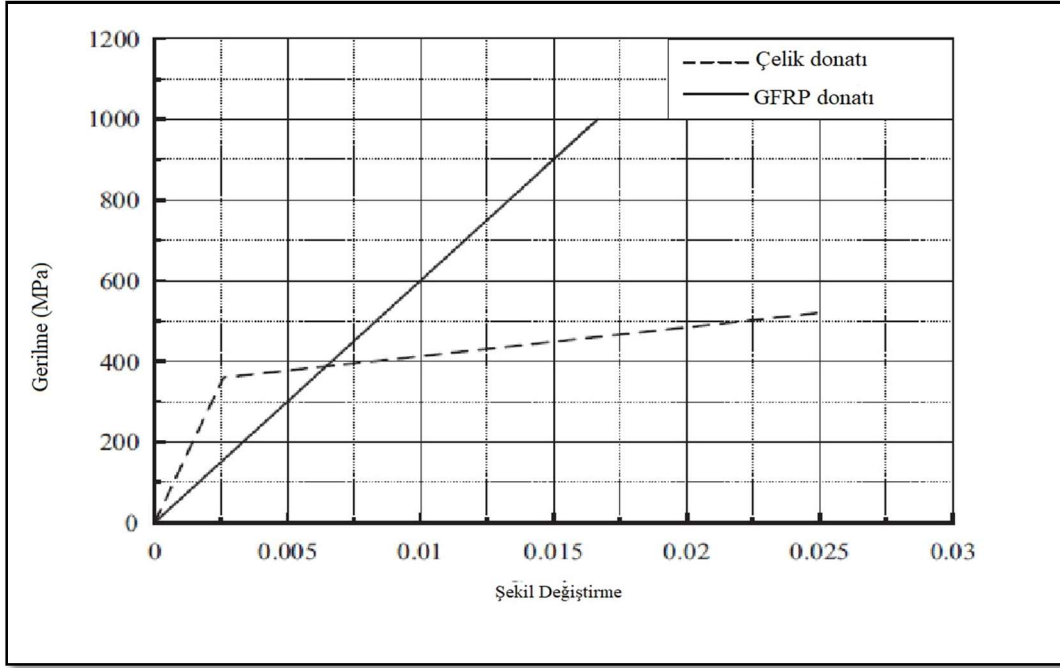
Şekil 3.2 7 gün sonunda donatılı ve donatısız örneklerin eğilme dayanımları (Farid ve Jabbar, 2018)



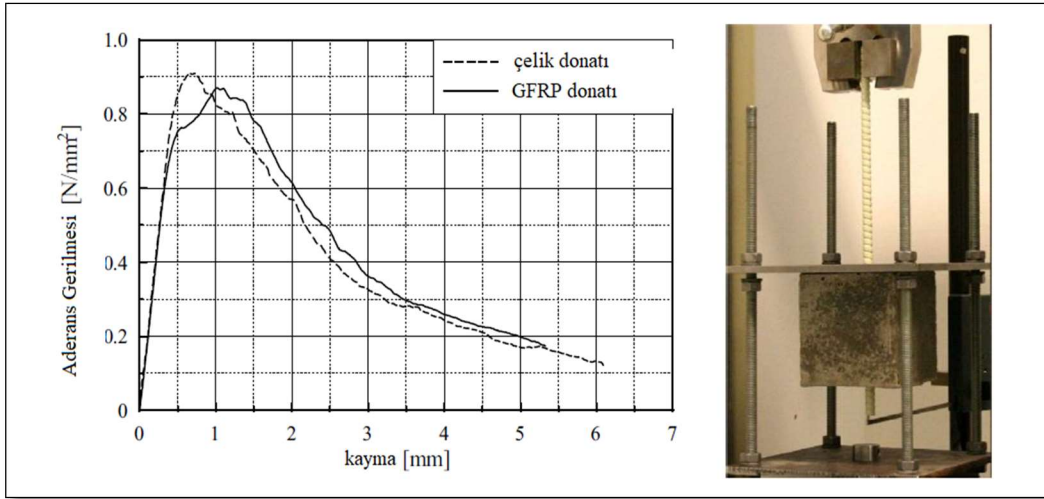
Şekil 3.3 28 gün sonunda donatılı ve donatısız örneklerin eğilme dayanımları (Farid ve Jabbar, 2018)

Deney sonuçlarına göre, düz GFRP donatıların akma dayanımları %17, kopma uzaması %58 çelik donatıya göre daha fazladır. 28 günlük sonuçlara göre kum kaplı GFRP donatılı kirişlerin eğilme dayanımları düz GFRP donatılı Kirişlere göre yaklaşık %8 daha fazladır. Çelik donatılı kirişlerin eğilme dayanımı kum kaplı GFRP donatılı kirişlere göre yaklaşık %29 fazladır.

El Madawy ve El Zareef (2018) tarafından yapılan çalışmada, 4 farklı donatı oranına sahip 150x300x3300 mm boyutlu kirişlerde cam lifi ve çelik donatı kullanılarak düktilite davranışları incelenmiştir. 28 günlük basınç dayanımı 32 MPa olan geleneksel beton kullanılmıştır. Kullanılan donatıların birim şekil değiştirme ve beton ile aderans dayanım grafikleri Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Kullanılan donatılan gerilme-şekil değiştirme eğrileri (El Madawy ve El Zareef, 2018)



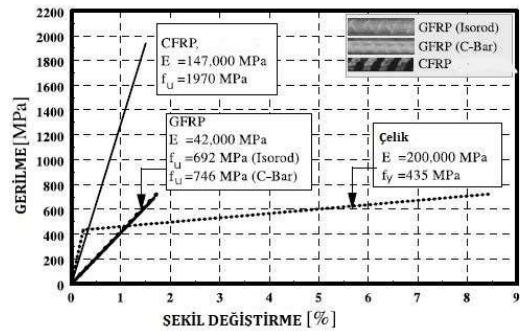
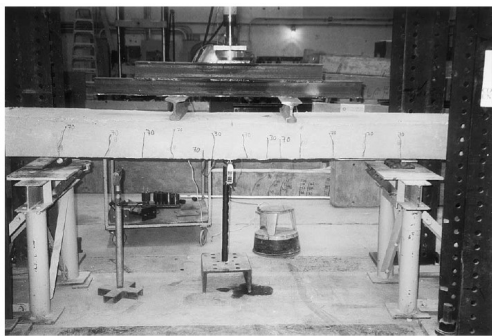
Şekil 3.5 Kullanılan donatıların beton ile aderans dayanımları (El Madawy ve El Zareef, 2018)

Deney sonucunda, çelik donatı kullanılan kirişlerde beklendiği gibi düktilite indeksi donatı oranının artmasıyla atmaktadır. Fakat GFRP kullanılan kirişlerde donatının donatı oranı arttıkça düktilite azalmaktadır. Bunun en büyük etkeni kullanılan GFRP çubukların yaklaşık 1000 MPa çekme dayanımının olmasıdır.

Park (2012) yılında yaptığı çalışmada agresif çevre koşullarında GFRP çubuklu Kirişlerin ve donatının performansını hızlandırılmış deneylerle incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre 300 gün sonra GFRP donatıların performansı ortalama %97 korunmaktadır.

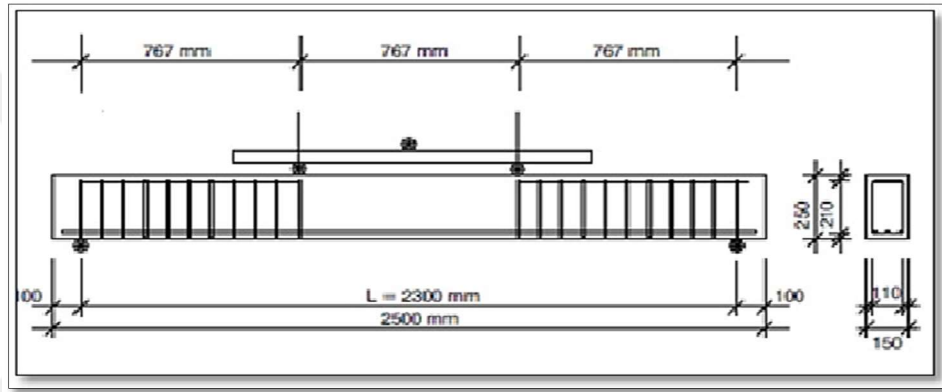
Ahmad ve Fan (2018) yılında yaptığı çalışmada, GFRP donatıların çimento matrisi ile ilişkileri incelenmiştir. Düz GFRP donatılar epoksi, vinilester, polyester ve poliüretan kaplanarak eğilme dayanımları incelenmiştir. Çelik donatıya en yakın performansı poliüretan kaplı GRFP örnekleri vermiştir.

Abdalla (2002) yılında yaptığı çalışmada, 4 farklı donatı tipi kullanılarak net açıklığı 2300mm olan 250x500mm enkesitli kirişler 4 noktali eğilme altında, taşıma kapasiteleri, kırılma enerjileri ve göçme şekilleri incelenmiştir (Şekil 3.6). 1970 MPa kopma mukavemetli CFRP, 746 MPa ve 692 MPa kopma mukavemetli GFRP donatılar ve 435 MPa akma dayanımlı çelik donatılar kullanılmıştır (Şekil 3.6). Kirişlerde kullanılan betonun ortalama silindirik basınç dayanımları 30-35 MPa'dır. Maksimum agrega çapı 13mm'dir. 4 farklı donatı yüzdesine sabit 15 farklı Kiriş test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre FRP ile üretilen kirişler kırılma olana kadar eğilme momentleri artmış fakat kırılma sonrası rijitlikleri büyük oranda azalmıştır.



Şekil 3.6 Kiriş yükleme düzeneği ve donatıların gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Abdalla, 2002)

Duranovic, Pilakoutas ve Waldron (2011) yılında yaptığı çalışmada, 150x250mm en kesitli 2300mm net açıklıklı 13 adet kiriş 4 noktalı eğilme düzeneği ile test edilmiştir (Şekil 3.7). Ortalama basınç mukavemeti C40/50 beton, ortalama kopma mukavemeti 1000 MPa olan GFRP çubuklar kullanılmıştır. Testlerde hem filament sarı hemde pultrüzyon yöntemi ile üretilen GFRP çubuklar kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, GFRP çubuklarla üretilen kirişlerin taşıma kapasiteleri, normal donatı ile üretilen kirişlerin hesap yöntemleri ile hesaplanabilir olduğu gösterilmiştir. GFRP çubukların eğilme ve kesme davranışları çelik donatılarla benzerlik göstermiştir.



Şekil 3.7 Kiriş yükleme düzeneği ve donatı yerleşimleri (Duranovic ve diğer., 2011)

Goldston, Remennikov ve Sheikh (2016) yılında yaptığı çalışmada, GFRP çubuklar ile üretilen Kirişlerin statik ve darbe yükleri altında performansları incelenmiştir. 12 adet 100x150x2400mm boyutlu kirişlerin donatı oranları dengeli (%1), denge altı (%0,5) ve denge üstü (%2) donatı oranı olacak şekilde tasarlanmıştır. 6 adet Kirişte eğilme dayanımı, kırılma enerjileri ve kirişlerin göçme şekilleri incelenmiştir. Diğer 6 Kirişin darbe yükleri altında performansları incelenmiştir. Kirişlerde kullanılan betonların ortalama basınç dayanımları 40 ve 80 MPa'dır. Elde edilen sonuçlara göre, beton dayanımının 40 MPa'dan 80 MPa'a çıkarılması %1,0, donatı oranlı Kirişte %7, %2,0 oranlı Kirişte ise %21 moment taşıma kapasitesinde artışa neden olmuştur. Beton dayanımını 40 MPa'dan 80 MPa'a arttırmak çatlak sonrası eğilme rijitliğini %1 donatı oranında %23, %2 donatı oranında % 25

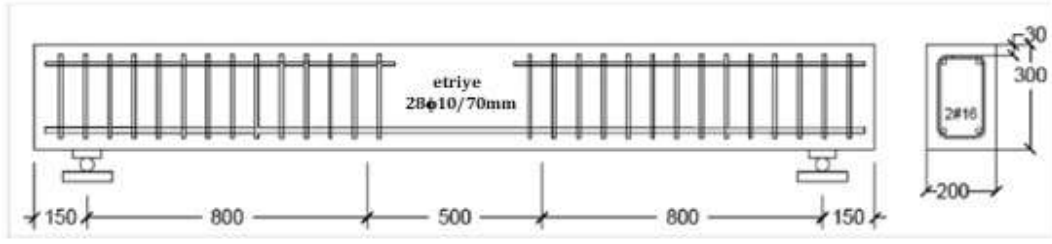
arttırmıştır. Çelik donatıyla kıyaslandığından GFRP donatılı Kirişler ortalama %32 daha fazla sehim yapmıştır.

Esfahani, Homami ve Vakili (2019) yılında yaptığı çalışmada, GFRP donatılı hafif agrega ile üretilmiş betonarme kirişlerin eğilme davranışları incelenmiştir. Beton tasarımında ilave olarak 8 farklı kombinasyonda makro çelik lifler, micro polipropilen lifler ve mikro cam lifler kullanılmıştır. Tasarlanan betonların ortalama basınç dayanımları 34-45 MPa aralığındadır. kiriş boyutları 100x200x1400mm'dir. Kullanılan GFRP donatı çapları 8 ve 10 mm'dir. Beton dizaynına hacimce en düşük %0,25, en yüksek %1,35 oranında lif koyulması taşıma kapasitesini %55-%233 oranında arttırmıştır.

Al-Sadoon ve diğer., (2019) yılında yaptığı çalışmada, GFRP çubuk ile üretilen farklı beton matrislerine sahip 8 farklı Kirişin eğilme etkisi altında performansları araştırılmıştır. Beton dizaynları Tablo 3.5'de gösterilmiştir. Bağlayıcı olarak sadece çimentonun kullanıldığı lifsiz karışıma OPC, lifli karışıma FRC, bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu ve uçucu külün kullanıldığı lifsiz karışıma GPC, lifli karışıma FRGC isimleri verilmiştir. Kiriş boyutları, 200x300x2400 mm'dir. Test modeli Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Testlerde 10 ve 16 mm çaplarında GFRP donatı çubukları kullanılmıştır.

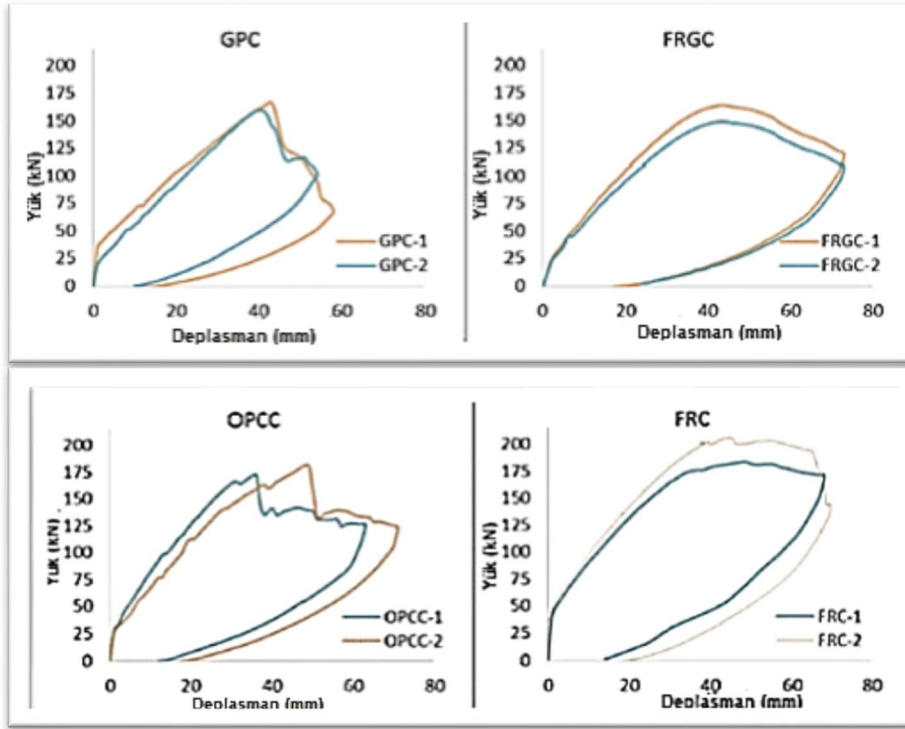
Tablo 3.5 Deneylerde kullanılan beton karışım oranları (Al-Sadoon ve diğer., 2019)

Beton Türü	OPC	FRC	GPC	FRGC
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
20 mm agrega	646	646	540,8	540,8
10 mm agrega	290	290	302,5	302,5
5 mm agrega	530	530	582,2	582,2
Kum	369	369	289,4	289,4
Çimento	365	365	0	0
NaOH (12M)	0	0	55,1	55,1
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	0	0	99,2	99,2
Uçucu kül	0	0	340	340
Yüksek fırın cürufu	0	0	85	85
Su	175	175	47	47
Makro lif	0	4,6	0	4,5
Akışkanlaştırıcı	4	4	4	4
28 gün Ort. Bas.	41	41	27,3	26



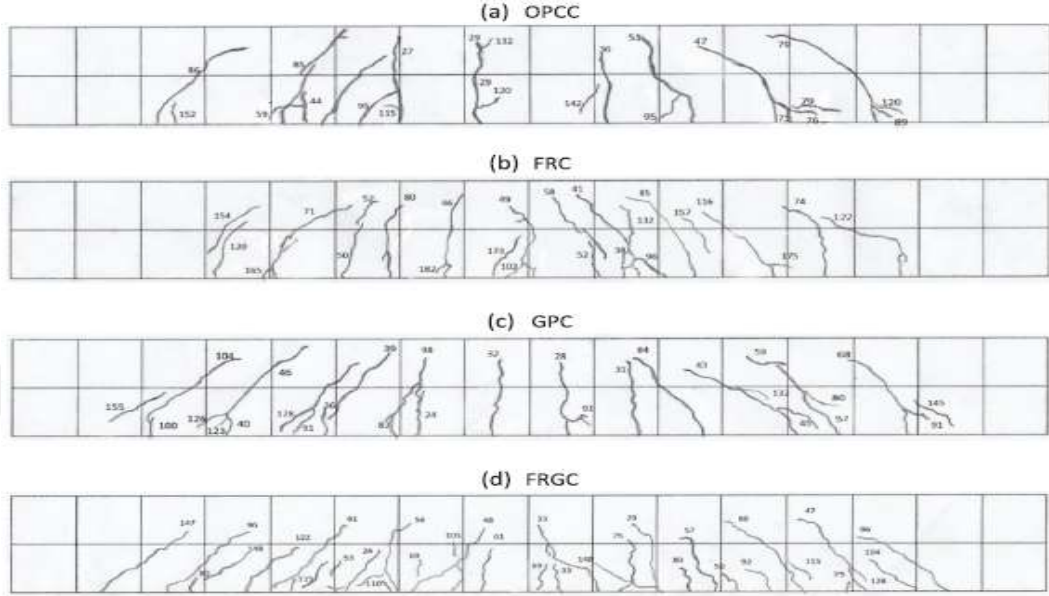
Şekil 3.8 Kiriş yükleme düzeneği ve donatı yerleşimleri (Al-Sadoon ve diğer., 2019)

Elde edilen sonuçlara göre, tüm kirişlerde yüklemenin ilk periyodunda yük doğrusal olarak artmıştır. Lifsiz üretilen kirişlerde (OPC-OPCC) kiriş maksimum taşıma yükü kapasitesine ulaştıktan sonra basınç bölgesinde ezilmeler meydana gelmiştir ve yükte ani düşüşler yaşanmıştır (Şekil 3.9). Lifli üretilen diğer kirişlerde ise (FRGC-FRC) sentetik liflerin etkisi ile yük tepe noktasına ulaştıktan sonra kiriş yük taşımaya devam etmiştir (Şekil 3.9). Bu sonuçlar gösteriyor ki lifsiz beton ve GFRP ile üretilen kirişler sünek davranış göstermemektedir. GFRP donatılı kirişlerde sünekliliği sağlamak için lif kullanılmalıdır.



Şekil 3.9 Kirişlerin yük-sehim eğrileri (Al-Sadoon ve diğer., 2019)

Lifsiz üretilen kirişlerde çatlaklar az ve geniş, lifli üretilen kirişlerde ise çatlaklar daha fazla ve genişlikleri lifsiz kirişlere göre daha azdır (Şekil 3.10).



Şekil 3.10 Kirişlerde oluşan nihai çatlak şekilleri (Al-Sadoon ve diğer., 2019)

Çotur, E. (2019) yılında yaptığı çalışmada, aynı özelliklere sahip 6 adet Kiriş üretimi yapılmıştır. Bu kirişlerde iki farklı donatı oranı ve üç farklı beton tipi kullanılmıştır. Çalışmanın referans kirişleri için geleneksel C30/37 betonu ile üretilmiş olup, çalışmada yer alan diğer kirişler ise aynı matristen ancak farklı çelik lif barındıran ultra yüksek dayanımlı beton (ortalama basınç dayanımı 155 MPa) kullanılarak üretilmiştir. Deney elemanları dört noktalı eğilme yükleri altında test edilmiş olup, deney elemanlarının eğilme yükleri altındaki dayanım ve davranışları, rijitlik durumları, süneklikleri incelenmiş ve kirişlerin kırılma mekanizmaları arasındaki farklar gözlenmiştir. Elde edilen bulgular karşılaştırmalı olarak analiz edilerek sunulmuştur (Çotur, 2019).

Elde edilen sonuçlar Şekil 3.11’de gösterilmiştir.

	1. ÇATLAK YÜKÜ ( kN )	1. ÇATLAK DEPLASMANI ( mm )	AKMA NOKTASI YÜKÜ ( kN )	AKMA NOKTASI DEPLASMANI ( mm )	BAŞLANGIÇ RİJİTLİĞİ ( kN/mm )	AKMA RİJİTLİĞİ ( kN/mm )
<b>K-01</b>	16,30	3,24	66,45	19,53	5,03	3,40
<b>K-02</b>	17,00	1,91	124,01	24,58	8,90	5,05
<b>K-03</b>	42,05	4,41	92,53	16,13	9,54	5,74
<b>K-04</b>	40,90	5,48	151,20	26,87	7,46	5,63
<b>K-05</b>	38,01	5,33	93,53	19,87	7,13	4,71
<b>K-06</b>	47,12	6,56	148,06	27,83	7,18	5,32

Şekil 3.11 Kirişlere ait başlangıç ve akma rijitlikleri (Çotur, 2019)

## **BÖLÜM DÖRT**

### **DENEYSEL ÇALIŞMA**

#### **4.1 Amaç**

Bu çalışmada, donatı çeliği ve cam lifi fiber donatı kullanılarak ultra yüksek dayanımlı betonla üretilen Kirişlerin eğilme etkisi altında performansları incelenmiş ve cam lifi fiber donatıların donatı çeliğine alternatif olup olmadığı araştırılmıştır.

#### **4.2 Kapsam**

Yapılan deneysel çalışmada, farklı tür donatıların Kirişlerde eğilme etkisi altında performansına etkisi incelenmiştir. Toplamda dört farklı 300x200x3800 mm ayrıtlı Kiriş üretimleri yapılmıştır. Ultra yüksek performanslı betonla (UYPB) ikişer adet çelik donatılı ve cam lifi polimer donatılı (donatı oranı 2,5 kat arttırılarak) aynı tip Kirişlerden üretim yapılmıştır.

Aynı karışım oranları ile üretilen her parti betona taze halde çökme, B.H.A. deneyleri yapıp, her parti karışımdan 4 adet 10 cm ayrıtlı küp, 4 adet 10x20 cm silindir ve daha sonra aynı karışım oranları ile hazırlanan karışımdan 4 adet 75x75x285 mm ayrıtlı prizmatik Kiriş numuneler alınmıştır. Alınan numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılıp yaklaşık 20 °C'deki suda 28 gün bekletilmiştir. Küp ve silindir numunelere basınç testi yapıp, prizma örneklere deplasman kontrolü için eğilme deneyi yapılmıştır. Ayrıca silindir numunelerde elastisite modülü ölçümü yapılmıştır.

#### **4.3 Kullanılan Malzemeler**

Üretilen karışımlarda çimento, silis dumanı, kaba ve ince agregalar, kuvars agregaları, su, çelik lif, nervürlü çelik donatı çubukları, cam lifi polimer donatılar ve yüksek oranda su azaltıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Malzeme özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

#### 4.3.1 Çimento

Deneysel çalışmada, ana bağlayıcı malzeme olarak Denizli OYAK çimento fabrikasının üretmiş olduğu TS EN 197-1:2000 standartlı CEM I 42.5 R Portland Çimentosu kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun üretici firmadan temin edilen bazı kimyasal, mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 4.1de sunulmuştur.

Tablo 4.1 CEM I 42.5 R Çimentosunun fiziksel ve kimyasal analiz sonuçları

<b>Kimyasal özellikler</b>	<b>Oran (%)</b>	<b>Fiziksel Özellikler</b>	
SiO <sub>2</sub>	20,9	<b>Özgül Ağırlık</b>	3,15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,5	<b>Özgül Yüzey-Blaine (cm<sup>2</sup>/g)</b>	3269
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,70	<b>Priz Başlangıcı (dak.)</b>	151
CaO	65,5	<b>Hacim Genleşmesi (mm)</b>	1,0
MgO	1,76	<b>Serbest (CaO) (%)</b>	2,5
Na <sub>2</sub> O	0,17	<b>Normal kıvam için gerekli su (%)</b>	29,2
K <sub>2</sub> O	0,60	<b>Kızdırma kaybı (%)</b>	3,50
SO <sub>3</sub>	2,71	<b>Çözünmeyen kalıntı (%)</b>	0,90
Cl <sup>-</sup>	0,0178	<b>Basınç Dayanımı (MPa)</b>	
C <sub>3</sub> A	8,4	<b>2 gün</b>	25,5
C <sub>4</sub> AF	11,3	<b>7 gün</b>	39,4
C <sub>3</sub> S	55,0	<b>28 gün</b>	52,2
C <sub>2</sub> S	18,5		

#### 4.3.2 Silis dumanı

Deneysel çalışmada, kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 4.2’de verilen Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi'nden temin edilen silis dumanı kullanılmıştır. Üreticiden alınan verilere göre kullanılan silis dumanının yoğunluğu 2,36 g/cm<sup>3</sup>, özgül yüzeyi 21080 m<sup>2</sup>/kg’dır.

Tablo 4.2 Silis Dumanı kimyasal analiz sonuçları

Bileşen	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Kızdırma kaybı
%	94,9	0,70	0,61	0,82	0,71	0,21	0,13	0,35	1,52

#### 4.3.3 Karışım Suyu

Deneysel çalışmalarda TS EN 1008' e uygun Beton karma suyu kullanılmıştır.

#### 4.3.4 Kimyasal Katkı

Deneysel çalışmada, ultra yüksek dayanımlı beton tasarımında BASF Yapı Kimyasalları üretimi olan Master Glenium ACE 450 yüksek oranda su azaltıcı beton katkıları kullanılmıştır. Kullanılan kimyasal katkıların üretici firma katalogundan temin edilen teknik özellikleri Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.3 Kimyasal katkıların özellikleri

ÖZELLİK	BASF ACE 450
Malzemenin yapısı	Polikarboksilik Esaslı
Görünüm	Kahverengi-sıvı
Özgül Ağırlık (20 °C)	1,069-1,109
pH değeri	~5,7
Klor iyon içeriği % (EN480-10)	<0,10
Alkali içeriği %(EN480-12)	<3,00

#### 4.3.5 Donatı Çeliği

Deneysel çalışmada, İzmir Demir Çelik firmasından temin edilen S420 tip Donatı çeliği kullanılmıştır. TS EN 708'e uygun donatı çeliğine ait test sonuçları Tablo 4.4'de verilmiştir. Donatı çeliği üzerinde yapılan deneyler VETAŞ firması laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.4 Kirişlerde kullanılan donatı çeliğinin çekme testi sonuçları

Num. No	Anma Çapı mm	Çap mm	Kütle Kg/m	Akma(Re) N/mm <sup>2</sup>	Çekme(Rm) N/mm <sup>2</sup>	Çek/Ak. Rm/Re	Kopma Uz. %
1	Φ8	7,97	0,392	525	675	1,29	17,5
2				520	641	1,23	22,5
3				537	660	1,23	20,0
1	Φ10	9,87	0,600	510	613	1,20	18,0
2				508	626	1,23	22,0
3				498	604	1,21	18,0
1	Φ14	13,98	0,885	491	587	1,20	18,6
2				488	592	1,21	21,4
3				476	579	1,22	20,0
1	Φ20	19,95	2,453	462	583	1,26	19,0
2				455	622	1,37	21,0
3				467	608	1,30	20,0

#### 4.3.6 Cam lifli polimer donatı

Deneyisel çalışmada, Uşak ili PULTECH FRP firmasından temin edilen Φ10, Φ14, Φ20 çaplarında düz cam lifli polimer donatı kullanılmıştır.

#### 4.3.7 Kuvars Agregaları

Deneyisel çalışmada, Menderes Pomza export kırma eleme tesisi'nden temin edilen kuvars kökenli, maksimum tane boyutu 3 mm olan dört farklı tane sınıfından (75 mikron, 400 mikron, 0,5-1 mm, 1-3 mm) kırma kuvars agregası kullanılmıştır. Kuvars agreganın özgül ağırlığı 2,85, birim hacim ağırlığı 1,5-1,6 g/cm<sup>3</sup>, su emme oranı ortalama %0,3'tür. Deneyisel çalışmalarda kullanılan kuvars agregaların fotoğrafları Şekil 4.1'de, kimyasal özellikleri Tablo 4.5'de, tane dağılımları Tablo 4.6'da gösterilmiştir. Kuvars agregaların kimyasal özellikleri üreticiden alınmıştır.

Tablo 4.5 Kuvars agregaların kimyasal özellikleri

BİLEŞEN	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	K.K.
%	99,28	0,049	0,28	0,002	0,14	0,02	0,09

Tablo 4.6 Kuvars agregaların tane dağılımları

400 $\mu$ Kuvars		1-3 mm Kuvars		75 $\mu$ Kuvars		0,5-1 mm Kuvars	
BOYUT	% geçen	BOYUT	% geçen	BOYUT	% geçen	BOYUT	% geçen
400 $\mu$	100	3 mm	100	75 $\mu$	100	1 mm	100
160 $\mu$	55	1 mm	5	63 $\mu$	93	0,5 mm	6
45 $\mu$	63	Elek altı	4	45 $\mu$	82	Elek altı	5
Elek altı	2			Elek altı	65		



Şekil 4.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan kuvars agregaların fotoğrafları (Kişisel arşiv, 2017)

#### 4.3.8 Çelik Lifler

Deneysel çalışmalarda Bekaert firmasından temin edilen iki tür Dramix marka uçları kancalı ve kancasız çelik lifler kullanılmıştır. Kullanılan çelik liflerin özellikleri Tablo 4.7’de gösterilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan çelik liflerin fotoğrafları Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.7 Kullanılan çelik liflerin özellikleri

DRAMİX	UZUNLUK	ÇAP	NARİNLİK	ÇEKME DAYANIMI	ELASTİSİTE MODÜLÜ
	mm	mm	l/d	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
<b>OL13/0.16</b>	13	0,15	87	3000	200.000
<b>ZP305</b>	30	0,55	54,5	1345	210.000



Şekil 4.2 Deneysel çalışmalarda kullanılan çelik liflerin fotoğrafları (Kişisel arşiv, 2017)

#### 4.4 Beton Karışımlarının Hazırlanması

Deneysel çalışmalar kapsamında çelik donatılı ve cam lifi donatılı olmak üzere toplamda 4 farklı karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar ultra yüksek dayanımlı betonlar ile hazırlanmıştır.

Bu deneysel çalışmalarda, bağlayıcı olarak çimento ve silis dumanı kullanılmış olup çimento dozajı  $850 \text{ kg/m}^3$  silis dumanı  $150 \text{ kg/m}^3$ 'dür. Normal dayanımlı betondan farklı olarak kırma kum yerine farklı boyutlarda 4 tip kuvars agregası kullanılmıştır. Ayrıca 2 farklı boyutta çelik lif kullanılmıştır. ZP 305 tipi lif %1,5, OL13/0.16 tipi lif ise %0,5 oranında kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,14'dür. Betonların ortalama çökme değeri  $140 \pm 20$  mm olacak şekilde beton tasarımı yapılmıştır. Hedef çökme değerini sağlamak için yüksek oranda su kesici performanslı akışkanlaştırıcı kimyasal katkı tercih edilmiştir. Kimyasal katkı ise %2,5 oranında kullanılmıştır. Tablo 4.8'de beton tasarımı görülmektedir. UYPB için yaklaşık 2018 yılı birim fiyatlarına göre maliyet hesabı Tablo 4.9'da verilmiştir.

Tablo 4.8 Ultra Yüksek Performanslı betonun (UYPB) karışım miktarları

MALZEME ADI	$\text{kg/m}^3$
ÇİMENTO (CEM-I 42,5 R)	850
SİLİS DUMANI	150
SU	138
KİMYASAL KATKI (BASF ACE 450)	25
0.5-1mm kuvars agregası	487
400 mikron kuvars agregası	244
1-3mm kuvars agregası	366
75 mikron kuvars agregası	122
LİF (ZP305)	118
LİF (OL13-0.16)	39
<b>TEORİK B.H.A</b>	<b>2539</b>

Tablo 4.9 Ultra Yüksek Performanslı betonun (UYPB) maliyet hesabı (2018 verilerine göre)

MALZEME ADI	$\text{kg/m}^3$	Birim fiyat TL/kg	TL/M <sup>3</sup>
ÇİMENTO (CEM-I 42,5 R)	850	0,20	170,0
SİLİS DUMANI	150	0,11	16,4
SU	138	0,00	0,0
KİMYASAL KATKI (BASF ACE 450)	25	12,00	300,0
0.5-1mm kuvars agregası	487	0,28	136,4
400 mikron kuvars agregası	244	0,28	68,2
1-3mm kuvars agregası	366	0,28	102,5
75 mikron kuvars agregası	122	0,28	34,3
LİF (ZP305)	118	5,00	590,0
LİF (OL13-0.16)	39	11,64	454,0
<b>TOPLAM</b>			<b>1871,63 TL/m<sup>3</sup></b>

#### 4.5 Betonların Karıştırılması

Betonların üretiminde, 2 farklı mikser kullanılmıştır. 1 m<sup>3</sup> kapasiteli twinshaftlı beton santrali mikseri (Şekil 4.3) 200x300x3800 mm ayrıtlı Kirişlerin üretimlerinde, 15 dm<sup>3</sup> kapasiteli ZENİTH marka laboratuvar tipi mikser ise (Şekil 4.4) küp, silindir ve 75x75x285mm ayrıtlı numunelerin üretiminde kullanılmıştır. Mikserlere önce iri sonra ince agregalar en son çimento ve silis dumanı konularak yaklaşık 1 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra karışım suyu içine akışkanlaştırıcı konularak betonyere yaklaşık 30 saniyede ilave edilmiştir. Islak karışım yaklaşık 2 dakika boyunca karıştırılmıştır. Çelik lifler yavaş yavaş ilave edilerek 2 dakika daha karıştırılmış ve liflerin topaklanması engellenmiştir.



Şekil 4.3 Batı prefabrik A.Ş. firmasına ait beton karışımlarının yapıldığı beton santrali (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 4.4 Beton karışımlarının yapıldığı betonyer (Kişisel arşiv, 2017)

#### 4.6 Numunelerin Döküm ve Yerleştirme İşlemi

Bu çalışmada, yapılacak deneyler için dört farklı boyutta örnekler hazırlanmıştır. Bu örnekler, 100 mm ayrıtlı küp, 10x20mm silindir, 75x75x285mm prizma ve 300x200x3800 mm boyutlarında prizmadır. Üretilen betonların kalıplara yerleştirilme işlemi, küp ve prizmatik numunelerde iki katman halinde yapılmıştır. Kalıbına yerleştirilen betonun sıkıştırılmasında kalıp vibratörleri ve tabla tipi vibratör kullanılmıştır. Vibratör uygulama süresi 30-45 saniye arasındadır.

#### 4.7 Numunelerin Kür İşlemi

Küp, silindir ve küçük prizmatik numuneler; döküm işlemlerinden 1 gün sonra kalıplarından çıkarılıp 28 gün süreyle 20 °C sıcaklıkta su içerisinde kür edilmiştir. Büyük prizmatik Kiriş numuneler ise 28 gün boyunca ortalama 20 °C ortam sıcaklığında Şekil 4.5'deki gibi telis beziyle sarılarak ve sürekli olarak ıslatılarak nemli

kalması sağlanmıştır. Kür süresinin sonunda numuneler kuru yüzey doygun halde deneye tabi tutulmuştur.

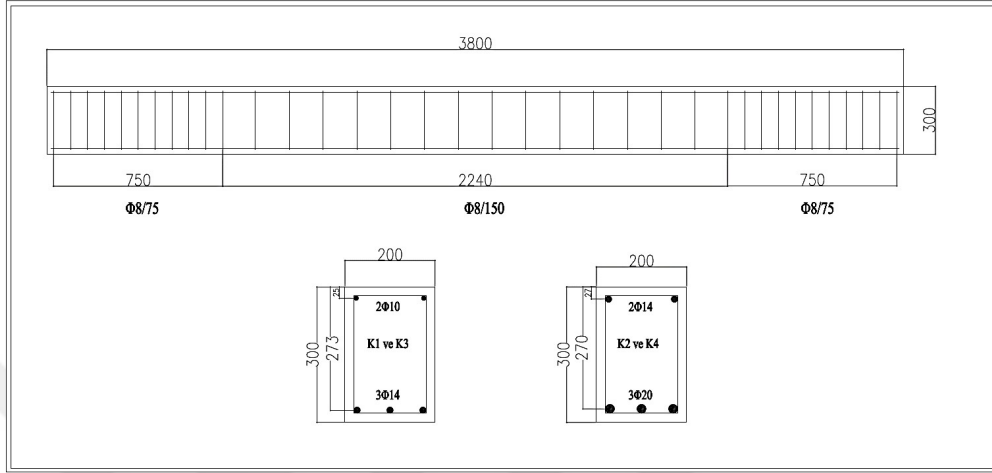


Şekil 4.5 Kiriş numunelerini kürleme işlemi (Kişisel arşiv, 2017)

#### 4.8 Deney Kirişlerinin Modellemesi

Kiriş modellemesinde 2 farklı türde tasarım yapılarak Kiriş performansları detaylı incelenmiştir. Kirişlerin alt ve üst donatıları hem donatı çeliği hem cam lifi fiber donatı ile hazırlanmıştır. Şekil 4.6’da Kirişlerin geometrik özellikleri ve donatı yerleşimleri gösterilmiştir. Etriyeler her iki tasarımda da donatı çeliğidir. Kirişlerin isimlendirmesi ve donatı yerleşimleri Tablo 4.10’da verilmiştir. TS 500’e uygun olarak tüm Kirişlerde hem basınç bölgesinde hem de çekme bölgesinde donatı bulunmaktadır. Kesme kırılmasını önlemek amacıyla mesnet noktalarında  $\Phi 8/75$ , eğilme bölgesinde  $\Phi 8/150$  etriye kullanılmıştır. Çelik donatılı Kiriş modellemesi kısaca Kiriş-1 ve Kiriş-2, cam lifi polimer donatılı Kiriş modellemesi kısaca Kiriş-3 ve Kiriş-4 ile gösterilmiştir. Kiriş-2 ve Kiriş-4 tip Kirişlerin donatı modellemesinde Kiriş-1 ve Kiriş-3 Kirişlere göre donatı oranı 2,5 kat arttırılmıştır. Dengeli donatı oranı  $\rho_b$  hesabı yapılırken geleneksel betonarmedeki kabuller kullanılmış, çekme bölgesindeki liflerin etkisi göz önüne alınmamıştır. Kiriş-1 ve Kiriş-3 Kirişleri için donatı oranı  $\rho=0,005$ , donatı oranı 2,5 kat arttırılarak Kiriş-2 ve Kiriş-4 Kirişlerin

donatı oranları  $\rho=0,012$  olarak hesaplanmıştır. Dengeli donatı oranı TS500 şartları göz önünde bulundurularak  $\rho_b=0.169$  olarak hesaplanmıştır.  $\rho < \rho_b$  göz önünde bulundurularak Kirişlerde denge altı donatı oranı ve sünek davranış sağlanmıştır.



Şekil 4.6 Kirişlerin geometrik özellikleri ve donatı yerleşimleri

Tablo 4.10 Kirişlerin donatı yerleşimleri

KİRİŞ ADI	$\rho/\rho_b$	Beton	Basınç Donatısı	Çekme Donatısı
KİRİŞ-1	0,03	UYPB	2Φ10 çelik donatı	3Φ14 çelik donatı
KİRİŞ-2	0,07	UYPB	2Φ14 çelik donatı	3Φ20 çelik donatı
KİRİŞ-3	0,03	UYPB	2Φ10 GFRP	3Φ14 GFRP
KİRİŞ-4	0,07	UYPB	2Φ14 GFRP	3Φ20 GFRP

#### 4.8.1 Kirişlerin donatı oranı ve dengeli donatı oranı hesabı

Kirişlerde donatı oranı hesabı TS 500 Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları göz önünde bulundurularak yapılmıştır.

Basınç bölgesinde donatı bulunduğundan  $\rho$  ve  $\rho'$  ayrı ayrı hesaplanmıştır.  $\rho$  hesabı için denklem 4.1 kullanılmıştır. Dengeli donatı oranı hesabı için ise denklem 4.2

kullanılmıştır. Hesaplama da ortalama beton ve donatı dayanımları kullanılmıştır. Kirişlerin donatı oranları ve dengeli donatı durumları Tablo 4.11’de gösterilmiştir.

$$\rho = \frac{A_s}{(b_w \cdot d)} \quad (4.1)$$

$$\rho_b = \left(0,85 \cdot k_1 \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}\right) \cdot \left(\frac{600}{600 - f_{yd}}\right) \cdot \frac{d'}{d} \quad (4.2)$$

Tablo 4.11 Kirişlerin donatı oranları ve dengeli donatı durumları

KİRİŞ ADI	$\rho$	$\rho'$	$\rho - \rho'$	$\rho_b$	$\rho - \rho' < \rho_b$
KİRİŞ-1 KİRİŞ-3	0,0085	0,0029	0,0056	0,169	uygundur
KİRİŞ-2 KİRİŞ-4	0,017	0,0057	0,0113	0,169	uygundur

#### 4.9 Yapılan Deneyler

Deney sel çalışmalar kapsamında üretilen betonlara, taze halde çökme testi, birim hacim ağırlık deneyi, sertleşmiş halde tek eksenli basınç deneyi, elastisite modülü deneyi, 75x75x285mm boyutlu beton Kiriş numunelere üç nokt alı eğilme deneyi, 200x300x3800mm boyutlu betonarme Kiriş numunelere dört nokt alı eğilme deneyi yapılmıştır. Ayrıca çelik ve cam lifi donatılara çekme testi yapılmıştır.

##### 4.9.1 Taze Hal Deneyleri

Betonun işlenebilirliğini ölçebilmek için TS EN 12350-2’ ye göre çökme deneyi ve TS EN 12350-6’ ya göre birim hacim ağırlık deneyi yapılmıştır.

#### **4.9.2 Basınç Deneyi**

Basınç deneyleri 300 ton kapasiteli ELE marka yük kontrollü, hidrolik sistemle çalışan pres makinesinde yapılmıştır. (Şekil 4.7). 10x10x10 cm'lik küp ve 10x20 cm silindir numunelerde basınç testi standart olarak 3,5 kN/saniye hızda yükleme yapacak şekilde ayarlanmıştır. Silindir numunelere basınç testinden önce başlıklama yapılarak prese tam basması sağlanmıştır.



Şekil 4.7 Basınç testlerinin yapıldığı test presi (Kişisel arşiv, 2017)

#### **4.9.3 Elastisite Modülü Deneyi**

Elastisite modülünün belirlenmesi için ölçümler basınç testinin yapıldığı test presinde yapılmıştır. Test düzeneği olarak çerçeve sistem ve analog komparatör kullanılmıştır (Şekil 4.8). Belirli yüklerde komparatörden okuma yapılarak gerilme-deformasyon eğri denklemi oluşturularak elastisite modülü tayin edilmiştir.



Şekil 4.8 Elastisite modülü tayini için okumaların yapıldığı test presi (Kişisel arşiv, 2017)

#### **4.9.4 Eğilme Deneyi (75x75x285mm)**

Kirişlerin eğilme dayanımlarının belirlenmesinde sulu kesimle orta noktasına çentik açılmış 75x75x285 mm boyutundaki prizmatik örnekler kullanılmıştır (Şekil 4.9). Elmas bıçakla sulu kesimde açılan çentiğin genişliği 4 mm, derinliği ise 20 mm'dir. Örnekler kısaca PRZ isimleri verilmiştir.



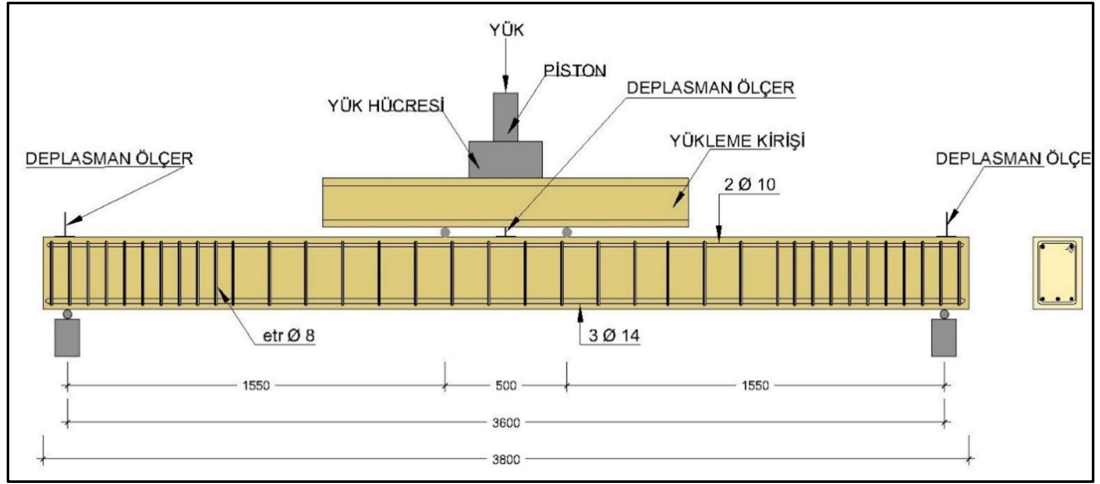
Şekil 4.9 Test Kirişlerine çentik açılması (Kişisel arşiv, 2017)

#### 4.9.5 Eğilme Deneyi (200x3000x3800mm)

Kirişlerin eğilme testleri Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan dört noktalı test düzeneği ile yapılmıştır. Düzenekte 300 kN kapasiteli düşey yük hücresi bulunmaktadır. Yük rijit bir profil aracılığıyla 500 mm açıklıklı iki tekil yüke dönüştürülerek Kirişe etkimektedir. Kirişin orta noktasındaki yer değiştirmeyi ölçmek için LVDT (Linear variable differential transformer) sensörü yerleştirilmiştir. Yükleme hızı ortalama 0,2 kN/sn'dir. Deney sırasında her saniye otomatik veri okuması yapılmıştır. Test esnasında belirli yükleme değerlerinde yükleme durdurularak oluşan çatlaklar işaretlenmiş ve çatlak genişlikleri ve Kirişin ortasındaki sehim değerleri kayıt altına alınmıştır. Kirişlerin eğilme dayanımların ve kırılma enerjilerinin belirlenmesinde 200x300x3800 mm boyutlarında betonarme Kirişler kullanılmıştır (Şekil 4.10). Şematik yükleme ve ölçüme düzenekleri Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Dört noktalı eğilme deneyi test düzeneği (Kişisel arşiv, 2018)



Şekil 4.11 Şematik yükleme ve ölçüm düzenekleri

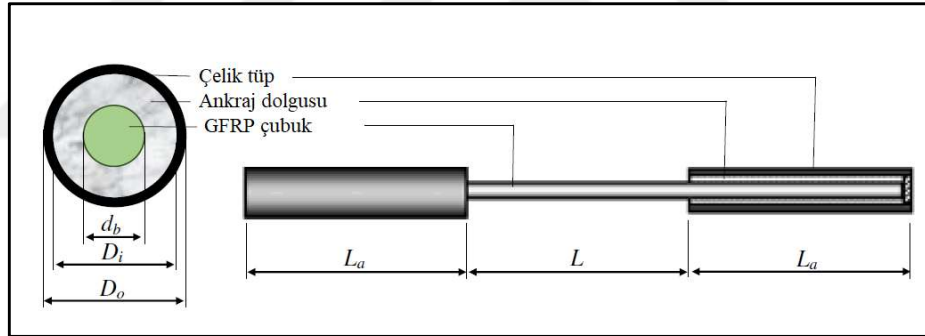
#### 4.9.6 Cam Lifi Donatı Çekme Testi

Cam lifi polimer donatılara çekme testi için  $\Phi 10$ ,  $\Phi 12$ ,  $\Phi 14$  çapında donatılardan 3'er adet 75 cm boyunda hazırlanmıştır. Kullanılan cam lifi polimer donatılar Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Cam lifi donatılar çekme işleminden önce çekme makinasının çenelerinde tam kenetlenme yapabilmesi ve yüksek çekme mukavemetlerinde çene içindeki çubuklarda ezilme olmaması için çelik boru içine özel epoksi esaslı yapıştırıcı dolgu malzemesi ile sabitlenmiştir (Şekil 4.13). Tüp içine yerleştirilecek donatıların boyları ASTM D7205 referans alınarak 300 mm olarak uygulanmıştır. Epoksi uygulamasından sonra malzemenin dayanım kazanması için en az 3 gün beklenmiştir. Hazırlanan test numuneleri Şekil 4.14'de gösterilmiştir. Çekme testleri Dokuz Eylül Üniversitesi Malzeme laboratuvarında yapılmıştır (Şekil 4.15). Deneyde kullanılan çekme cihazının çeneleri deney numuneleri kaymayacak şekilde pürüzlüdür ve çeneler kendiliğinden sıkışma özelliğine sahiptir.

Test sonuçlarının değerlendirilmesi Benmokrane ve diğer. (2017) yılında yaptığı çalışma referans alınarak ASTM D7205 standardına uygun olarak yapılmıştır. Elde edilen çekme kuvvetleri, çekme dayanımları ve birim deformasyon sonuçları Tablo 4.12'de gösterilmiştir.



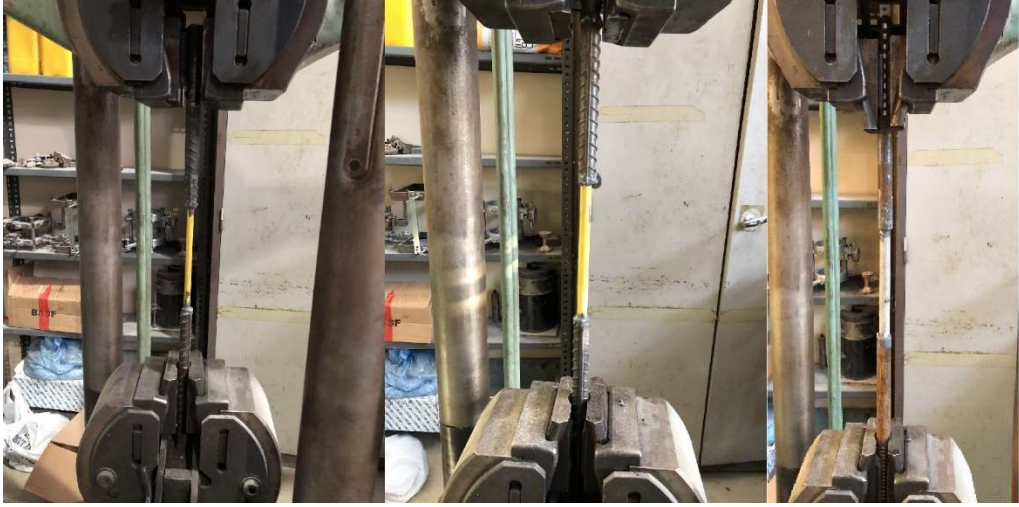
Şekil 4.12 Kirişlerde Kullanılan Cam Lifi Polimer Donatılar (Kişisel arşiv, 2018)



Şekil 4.13 Çekme düzeneğinin detayları (Benmokrane ve diğer., 2017)



Şekil 4.14 Çekme testi için hazırlanan GFRP donatılar (Kişisel arşiv, 2019)



Şekil 4.15 GFRP donatıların çekme testi yapılması (Kişisel arşiv, 2019)

Tablo 4.12 GFRP donatıların çekme test sonuçları

Num. No	Çap (mm)	Ağırlık (kg/m)	Çekme Kuvveti (N)	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Birim Deformasyon (%)
1	10	0,141	39500	503,2	2,2
2			35000	445,9	2,3
3			41000	522,3	2,4
1	12	0,203	52500	464,4	2,0
2			55000	486,6	2,5
3			59000	521,9	2,1
1	14	0,277	70000	455,0	2,3
2			79000	513,5	2,4
3			65000	422,5	2,5

Çekme testi sonrası GFRP donatılara ait fotoğraflar Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.16 GFRP donatıların çekme testi sonrası durumları (Kişisel arşiv, 2019)

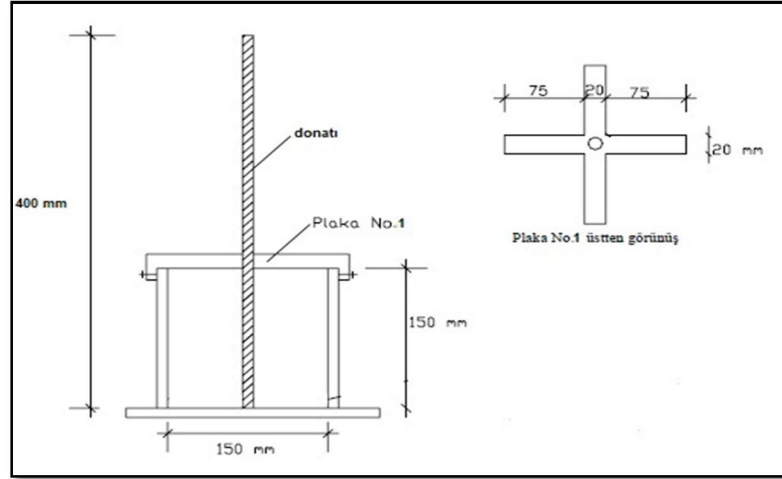


Şekil 4.17 GFRP donatıların çekme testi sonrası durumları (Kişisel arşiv, 2019)

GFRP donatıların çekme testinden elde edilen sonuçlara göre  $\Phi 10$  için ortalama  $490,4 \text{ N/mm}^2$ ,  $\Phi 12$  için ortalama  $491,0 \text{ N/mm}^2$ ,  $\Phi 14$  için ortalama  $463,6 \text{ N/mm}^2$ 'dir. Ortalama kopma uzamaları sırasıyla, %2,3, %2,2 ve % 2,4'dür.

#### ***4.9.7 Donatı aderans deneyi***

Beton ile donatı arasında etkileri aderans deneyi ile incelenmiştir. Deney, beton numunenin içine tam merkezlenmiş ve saplanmış donatının çekip sıyrılması şeklindedir. Deneyler  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$  boyutlarında küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Numune içinde donatıyı tam merkezlenip dik durmasını sağlamak için Şekil 4.18'de gösterilen düzenek kullanılmıştır.



Şekil 4.18 Aderans deney düzeneği

Deneylerde UYPB kullanılmıştır. Aderans deneyi 3'er adet  $\Phi 10$ ,  $\Phi 14$  ve  $\Phi 20$  çapında çelik ve cam lifi donatılar üzerinde yapılmıştır. Üretilen örnekler Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



Şekil 4.19 Aderans deneyi için üretilen örnekler (Kişisel arşiv, 2020)

Üretilen örneklere sabit 20 °C'de 28 gün su kürü uygulanmıştır. 28 gün sonunda Şekil 4.20'de gösterilen özel bir aparat yardımıyla aderans deneyi yapılmıştır.



Şekil 4.20 Aderans deneyi için yapılan düzenek (Kişisel arşiv, 2020)

Aderans dayanımı ( $\tau$ ) aşağıda verilen formül ile hesaplanmıştır (Uyan ve diğer., 1993).

$$\tau = P_{\max} / (\pi \cdot \Phi \cdot L) \quad (4.1)$$

Burada;  $P_{\max}$  deneyde uygulanan maksimum kuvveti,  $\Phi$  donatı çapını ve  $L$  donatının beton içine gömülü uzunluğunu (aderans boyu) göstermektedir. Testlerden elde edilen deney sonuçları Tablo 4.13’de gösterilmiştir.

Tablo 4.13 Aderans deney sonuçları

Çap	Sıyırılma Yükleri (kgf)				Aderans Dayanımları (Mpa)
	1.Numune	2. Numune	3. Numune	Ort.	$\tau = \frac{\text{aderans kuvveti}}{\pi * L * \varphi}$
$\Phi 10$	4400	4600	4700	4567	<b>9,70</b>
$\Phi 10$ GFRP	350	350	350	350	<b>0,74</b>
$\Phi 14$	6200	6150	5900	6083	<b>9,23</b>
$\Phi 14$ GFRP	500	500	500	500	<b>0,76</b>
$\Phi 20$	7500	6300	5700	6500	<b>6,90</b>
$\Phi 20$ GFRP	600	600	600	600	<b>0,64</b>

## BÖLÜM BEŞ

### DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

#### 5.1 Taze Hal Deney Sonuçları

Deneyisel çalışmalar kapsamında üretilen tüm karışımlara taze halde çökme-yayılma ve B.H.A. deneyi yapılmıştır. Tablo 5.1’de tüm serilerin taze hal birim hacim ağırlık ve çökme-yayılma değerleri verilmiştir. Tablo 5.1’den görüldüğü gibi çökme değerleri tasarımda hedeflenen  $140\pm 20$ mm değerlerini sağlamaktadır.

Tablo 5.1 Aynı karışım miktarlarına göre hazırlanan betonların birim hacim ağırlık ve çökme değerleri

	B.H.A.	ÇÖKME
	gr/cm <sup>3</sup>	mm
ÖRNEK-1	2586	150
ÖRNEK-2	2535	140
ÖRNEK-3	2574	160
ÖRNEK-4	2556	150

#### 5.2 Sertleşmiş Haldeki Deney Sonuçları

Deneyisel çalışma kapsamında, 28 gün su kürü görmüş örnekler üzerinde basınç, eğilme, elastisite modülü tayini deneyleri uygulanmış olup deney sonuçları aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

##### 5.2.1 Basınç Testi Sonuçları

Karışımlardan alınan küp ve silindir örneklerin 28 gün sonunda basınç dayanım sonuçları Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2 Hazırlanan karışımlardan alınan numunelerin basınç dayanımları

NUMUNE ADI	28 gün Ort. Basınç Dayanım Sonuçları	28 gün Ort. Basınç Dayanım Sonuçları
	10x10x10 cm küp	10x20 cm silindir
	MPa	MPa
ÖRNEK-1	200,5	153,9
ÖRNEK-2	208,6	155,8
ÖRNEK-3	210,7	160,2
ÖRNEK-4	218,1	158,4

### 5.2.2 Elastisite Modülü Tayini Deney Sonuçları

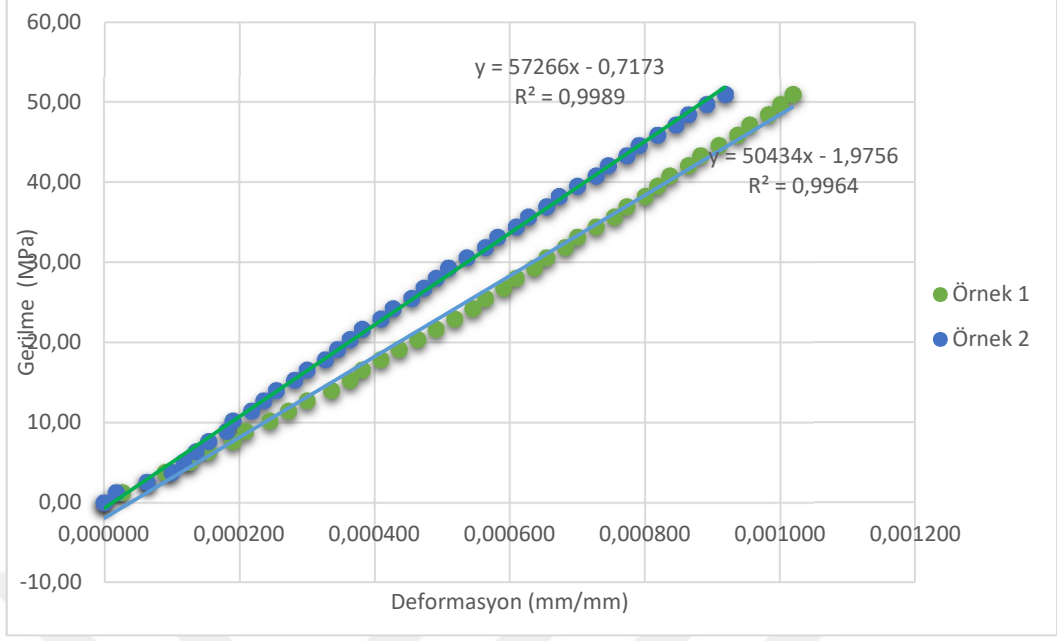
DeneySEL çalışma kapsamında 28 gün su kürü sonunda silindir (100x200 mm boyutlu) 2 adet örnek üzerinde elastisite modülü tayini yapılmıştır. Sünme olayını devre dışı bırakmak ve komparatörün oturmasını sağlamak amacıyla deney sırasında iki ön yükleme yapılmıştır. Elastisite modülü tayini için çerçeve sistem kullanılarak komparatör üzerinden deformasyon okumaları yapılmıştır. Deformasyon okumaları Tablo 5.3’de verilmiştir.

Deformasyon okumaların sonuçlarından birim Gerilme-Deformasyon eğrisi elde edilmiştir. Numunelerin elastisite modülleri, örnek-1 50,43 GPa, örnek-2 57,27 GPa’dır.

Elde Edilen doğruların denklemleri Şekil 5.1’de , örnek-1 için  $y = 50434x - 1,9756$ , örnek-2 için  $y = 57266x - 0,7173$  gösterilmiştir.

Tablo 5.3 Birim deformasyon okumaları

Yük (N)	ÖRNEK-1			ÖRNEK-2		
	$\mu\text{m}$	Gerilme (Mpa)	Şekil değiş. $\times 10^{-5}$ (mm/mm)	$\mu\text{m}$	Gerilme (Mpa)	Şekil değiş. $\times 10^{-5}$ (mm/mm)
0	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
10000	3	1,27	2,7	2	1,27	1,8
20000	7	2,55	6,4	7	2,55	6,4
30000	10	3,82	9,1	11	3,82	10,0
40000	14	5,10	12,7	13	5,10	11,8
50000	17	6,37	15,5	15	6,37	13,6
60000	21	7,64	19,1	17	7,64	15,5
70000	23	8,92	20,9	20	8,92	18,2
80000	27	10,19	24,5	21	10,19	19,1
90000	30	11,46	27,3	24	11,46	21,8
100000	33	12,74	30,0	26	12,74	23,6
110000	37	14,01	33,6	28	14,01	25,5
120000	40	15,29	36,4	31	15,29	28,2
130000	42	16,56	38,2	33	16,56	30,0
140000	45	17,83	40,9	36	17,83	32,7
150000	48	19,11	43,6	38	19,11	34,5
160000	51	20,38	46,4	40	20,38	36,4
170000	54	21,66	49,1	42	21,66	38,2
180000	57	22,93	51,8	45	22,93	40,9
190000	60	24,20	54,5	47	24,20	42,7
200000	62	25,48	56,4	50	25,48	45,5
210000	65	26,75	59,1	52	26,75	47,3
220000	67	28,03	60,9	54	28,03	49,1
230000	70	29,30	63,6	56	29,30	50,9
240000	72	30,57	65,5	59	30,57	53,6
250000	75	31,85	68,2	62	31,85	56,4
260000	77	33,12	70,0	64	33,12	58,2
270000	80	34,39	72,7	67	34,39	60,9
280000	83	35,67	75,5	69	35,67	62,7
290000	85	36,94	77,3	72	36,94	65,5
300000	88	38,22	80,0	74	38,22	67,3
310000	90	39,49	81,8	77	39,49	70,0
320000	92	40,76	83,6	80	40,76	72,7
330000	95	42,04	86,4	82	42,04	74,5
340000	97	43,31	88,2	85	43,31	77,3
350000	100	44,59	90,9	87	44,59	79,1
360000	103	45,86	93,6	90	45,86	81,8
370000	105	47,13	95,5	93	47,13	84,5
380000	108	48,41	98,2	95	48,41	86,4
390000	110	49,68	100,0	98	49,68	89,1
400000	112	50,96	101,8	101	50,96	91,8



Şekil 5.1 Gerilme-Deformasyon Grafiği

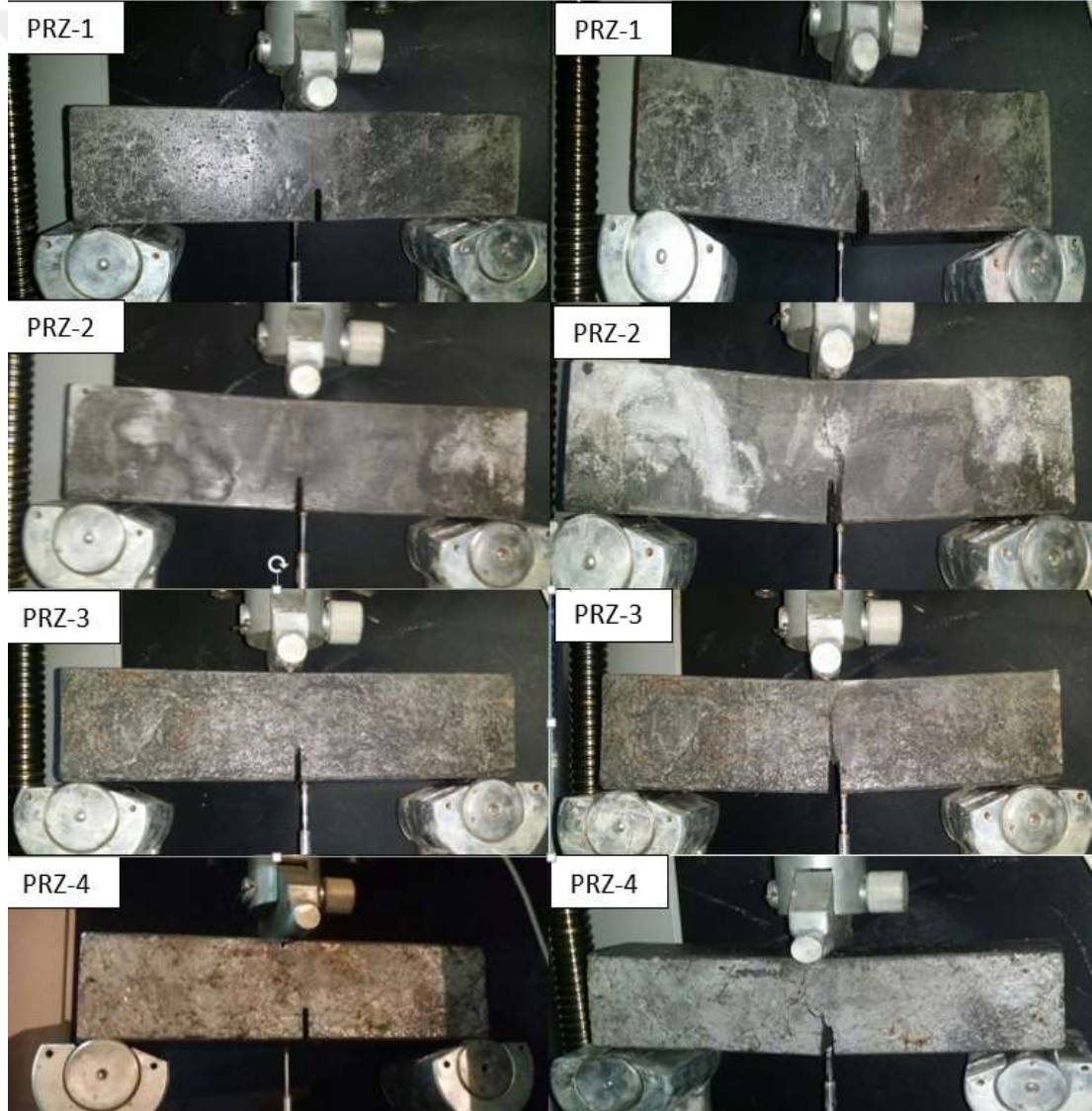
### 5.2.3 Eğilme Deneyi (75x75x285mm) Sonuçları

Üç noktalı eğilme deneyi sonucunda çentikli numunelerin eğilme dayanımları ( $f_{flex}$ ) (5.1) denklemi ile belirlenmiştir. Bu denklemde P, L, B, H ve a sırasıyla üç noktalı eğilme deneyinde kaydedilen maksimum yük, mesnet açıklığı, Kiriş eni, Kiriş yüksekliği ve çentik derinliğidir. Tablo 5.4’de 75x75x285 mm boyutlu Kiriş numunelerin eğilme dayanım sonuçları gösterilmiştir. Kirişlerin Eğilme deneyi öncesi durumları Şekil 5.2’de gösterilmiştir.

$$f_{flex} = \frac{3.P.l}{2.B.(H-a)^2} \quad (5.1)$$

Tablo 5.4 75x75x285 boyutlu Kiriş numunelerin eğilme dayanımları

NUMUNE ADI	YÜK	AÇIKLIK	KİRİŞ ENİ	KİRİŞ YÜKSEKLİĞİ	ÇENTİK DERİNLİĞİ	EĞİLME DAYANIMI
	(N)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(N/mm <sup>2</sup> )
PRZ-1	12589	200	75	75	20	16,65
PRZ-2	13856	200	75	75	20	18,32
PRZ-3	14256	200	75	75	20	18,85
PRZ-4	13129	200	75	75	20	17,36



Şekil 5.2 Prizmatik örneklerin eğilme deneyi öncesi ve sonrası durumları (Kişisel arşiv, 2017)

## 5.2.4 Eğilme Deneyi (200x300x3800mm) Sonuçları

### 5.2.4.1 Kiriş-1 Deney Sonuçları

Yükleme testinden önce Kirişte Şekil 5.3’de görülen rötre çatlakları tespit edilmiştir. Bu çatlakların Kirişin taşıma kapasitesine etki etmeyeceğine karar verilerek teste devam edilmiştir. 13 kN’da liflerden ses duyulmaya başlanmıştır. İlk eğilme çatlağı 38 kN’da görülmüştür. 67 kN’da Şekil 5.4’de görülen 2,3 ve 5 nolu çatlaklar Kirişi boydan boya dönmüştür ve sarmalamıştır. 81 kN’da liflerden gelen kopma sesleri daha da belirginleşmeye başlamıştır ve 93 kN’da donatı akmıştır. Lif sesleri daha belirgin gelmeye başlamıştır. 94 kN’da 5 nolu çatlağın yanında yaklaşık 0,1 mm’lik iki çatlak oluşmuştur. 95 kN’da 3 nolu çatlak 0,2 mm ‘lik genişliğe ulaşmaktadır. 8 nolu çatlak Şekil 5.5 te görüldüğü gibi basınç bölgesine doğru ilerlemektedir.



Şekil 5.3 Kiriş-1 üzerindeki rötre çatlakları (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 5.4 Kiriş-1 üzerindeki 2,3 ve 5 no’lu çatlak oluşumları (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 5.5 Kiriş-1 üzerindeki 8 no'lu çatlak ilerlemesi (Kişisel arşiv, 2017)

Deplasman 23 mm'ye ulaştığında 3 no'lu çatlak basınç bölgesine ulaşmıştır. Deplasman 31 mm'ye ulaştığında 3 nolu çatlak genişliği 0,3 mm'dir. Deplasman 34 mm'ye ulaştığında Kiriş üzerinde başka eğilme çatlağı gözlemlenmemiştir.

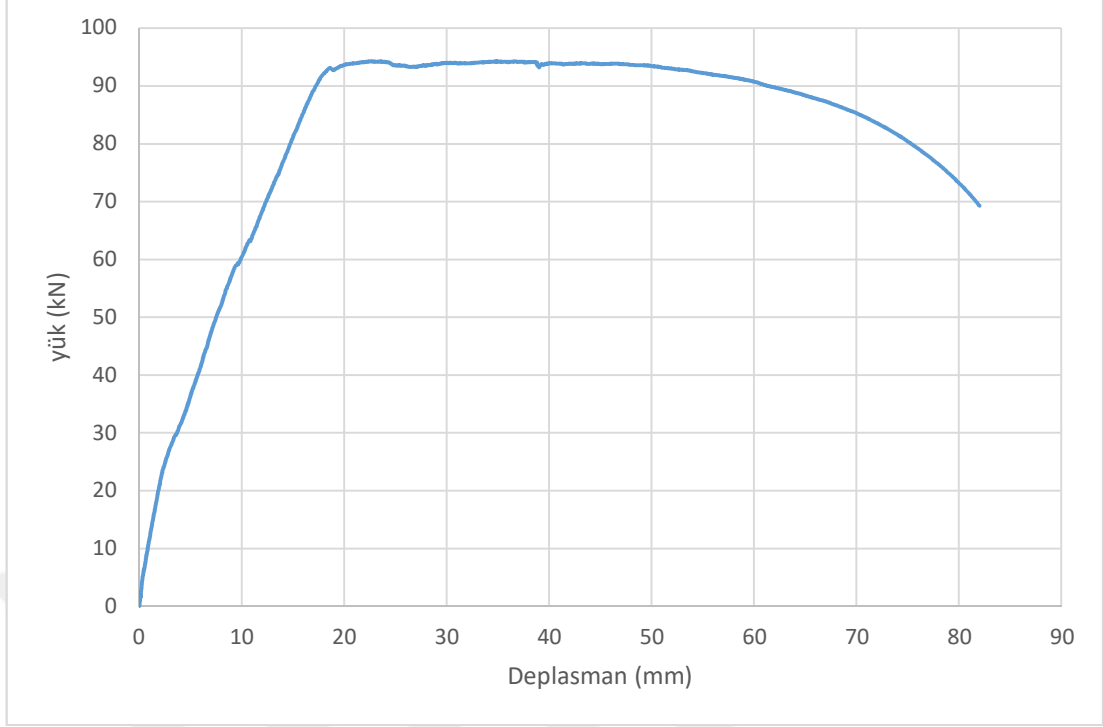


Şekil 5.6 Kiriş-1 üzerindeki 3 no'lu çatlağın 7mm'ye ulaşması (Kişisel arşiv, 2017)

Şekil 5.6'da görüldüğü gibi deplasman 45 mm'ye ulaştığında 3 nolu çatlağın genişliği 7mm'ye ulaşmıştır ve deney sonlandırılmıştır. Şekil 5.7'de 3 nolu çatlağın detayı gösterilmektedir. Kiriş-1 tasarımına ait Yük-Deplasman grafiği Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Kirişin maksimum taşıma kapasitesi 95 kN olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.7 Kiriş-1 üzerindeki 3 no'lu çatlağın 7mm'ye ulaşması (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 5.8 Kiriş-1 Yük-Deplasman grafiği

#### 5.2.4.2 Kiriş-2 Deney Sonuçları

21 kN'da lifler çalışarak liflerden ses gelmeye başlamıştır. İlk eğilme çatlak 47 kN'da oluşmaya başlamıştır. 49 kN'da 2 nolu çatlak 52 kN'da 3 nolu, 53 kN'da 4 nolu, 54 kN'da 5 nolu, 60 kN'da 6 nolu, 72 kN 8 nolu çatlak oluşmuştur. Şekil 5.9'da çatlak oluşumları gösterilmektedir. 80 kN'da 1 ve 5 nolu çatlaklar ilerlemeye devam etmektedir. 93 kN'da 9 nolu, 94 kN'da 10 nolu çatlaklar oluşmuştur. 110 kN'da 6 nolu çatlak ilerlemeye devam etmektedir. 130 kN'da 11 nolu çatlak, 138 kN'da 12 ve 13 nolu, 140 kN'da 14 nolu çatlaklar oluşmuştur. Şekil 5.10'de çatlakların oluşumları gösterilmektedir.

150 kN'da donatı akmaya başlamıştır. 15 ve 16 nolu yeni çatlakların genişlikleri 2,4 ve 2,5 mm'ye ulaşmıştır. 150 kN'da Kiriş ortasında 33 mm deplasman yapmıştır.

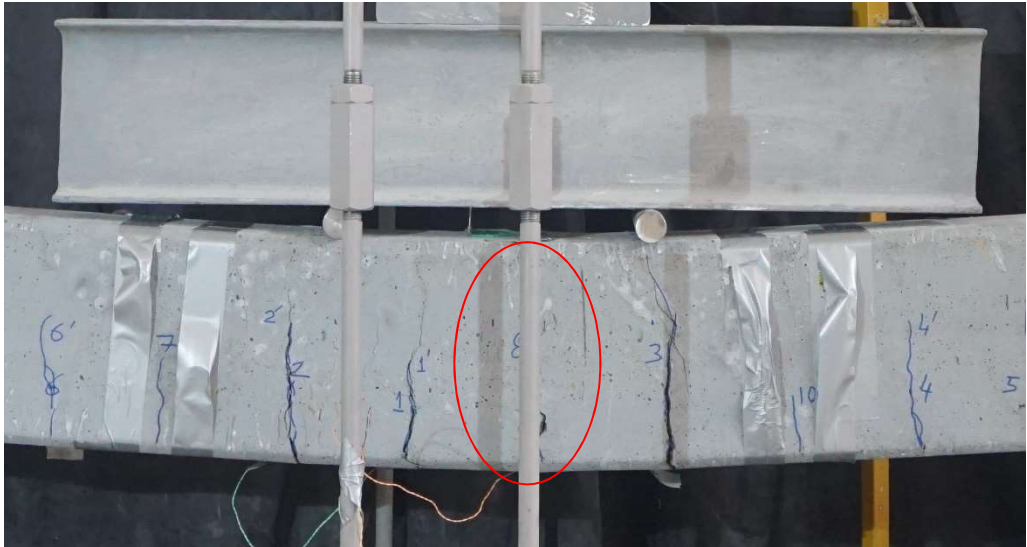


Şekil 5.9 Kiriş-2 üzerindeki ilk çatlakların oluşumları (Kişisel arşiv, 2017)

Donatı aktıktan sonra 8 nolu çatlak ilerlemeye devam etmiştir. 164 kN'da Kiriş ortasında deplasman 67 mm'ye 8 nolu çatlağın genişliği 4 mm'ye ulaşmıştır. Şekil 5.11'da 8 nolu çatlağın basınç bölgesine ulaştığı görülmektedir.



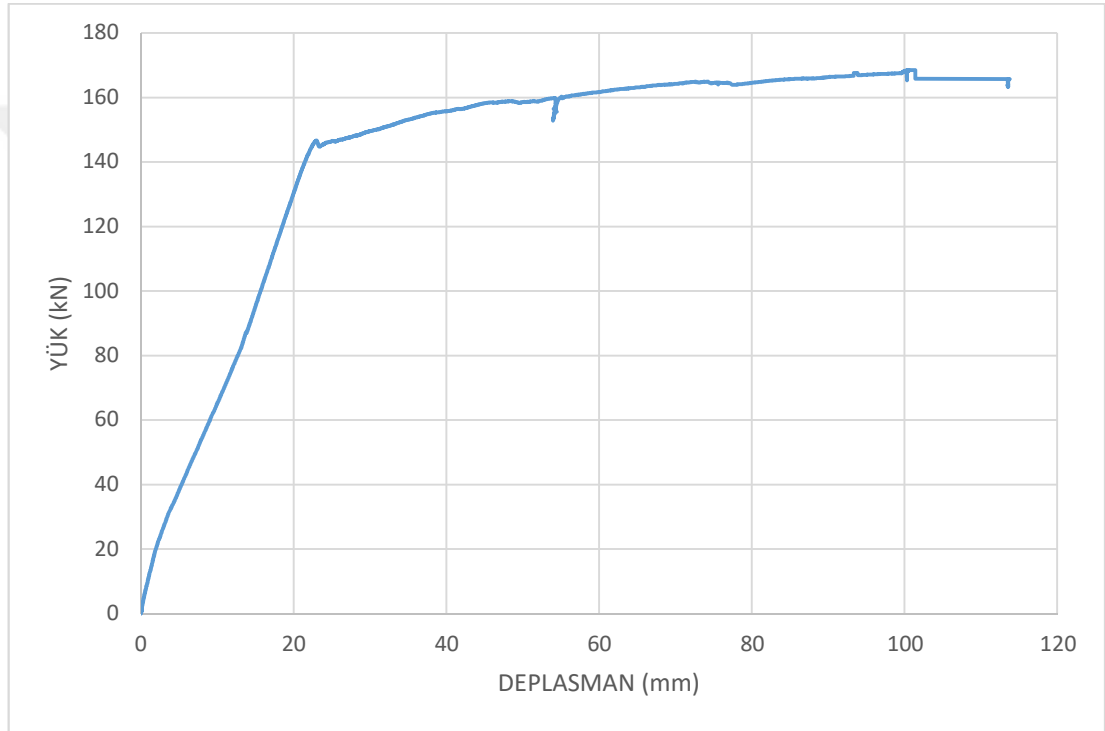
Şekil 5.10 Kiriş-2 üzerindeki 11-14 nolu çatlakların oluşumları (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 5.11 Kiriş-2 üzerindeki 8 nolu çatlağın basınç bölgesine ulaşması (Kişisel arşiv, 2017)

Yük 168 kN iken deney ekipmanlarına zarar vereceği düşüncesiyle deneye son verilmiştir. Muhtemelen deneye devam edilseydi deplasman 125 mm'ye kadar ulaşacağı düşünülmüştür.

Kiriş-2 tasarımına ait Yük-Deplasman grafiği Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Kirişin maksimum taşıma kapasitesi 168 kN olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.12 Kiriş-2 Yük-Deplasman grafiği

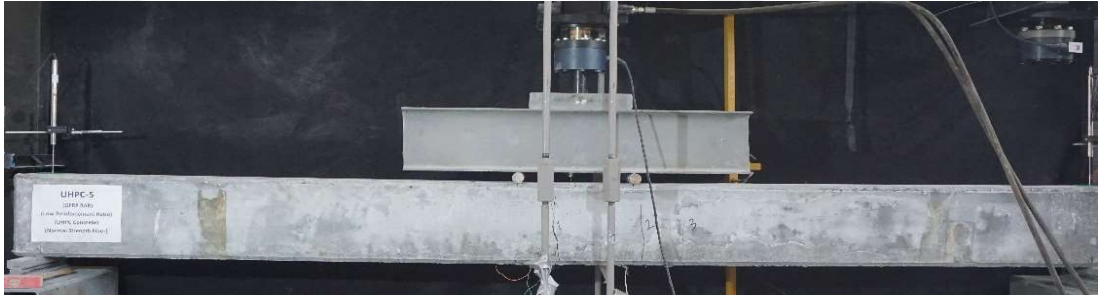
#### 5.2.4.3 Kiriş-3 Deney Sonuçları

İlk eğilme çatlak oluşmadan liflerden ses gelmeye başlamıştır. İlk eğilme çatlak 28,5 kN'da oluşmuştur. 35 kN'da 2 nolu çatlak, 36,4 kN'da 3 nolu çatlak oluşmuştur. Bu yük seviyelerinde liflerden çok yoğun bir ses gelmeye başlamıştır ve Şekil 5.13 'de görüldüğü gibi 1 nolu çatlak kesiti boydan boya sarmıştır. 29,66 mm deplasman seviyesinde 1 nolu çatlak genişliği yaklaşık 11 mm, 39,67 mm deplasman seviyesinde

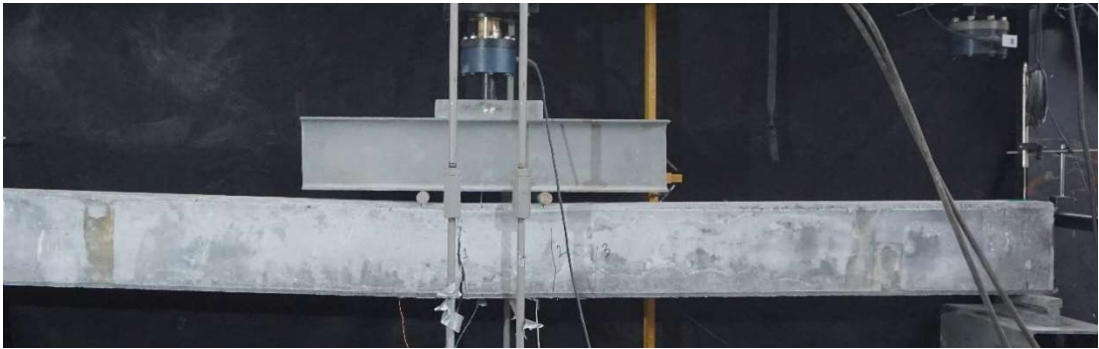
14 mm olarak ölçülmüştür. Çatlak 1 nolu kesitte lokalize olmuştur ve Kirişte toplam 3 adet çatlak gelişmiştir. Kirişin tüm enerjisi 1 nolu kesitte tüketilmektedir.

Deplasmanın 44,76 mm olduğu durumda çatlak basınç bölgesine ulaşmış olup bu noktada basınç bölgesini ezmeye çalışmaktadır. Deplasmanın 48,74 mm olduğunda çatlak 18 mm, deplasman 81,22 mm olduğunda çatlak 25 mm, deplasmanın 94,83 mm olduğunda 31 mm 1 nolu çatlak genişliğine ulaşmıştır (Şekil 5.14).

Deplasman 97,91 mm olduğunda üst lifler ayrılmıştır. Deney sonucunda 1 nolu çatlak genişliği 52 mm değerine ulaşmıştır (Şekil 5.15). Kiriş-3 Kiriş tasarımına ait Yük-Deplasman grafiği Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Kirişin maksimum taşıma kapasitesi 37 kN olarak hesaplanmıştır.



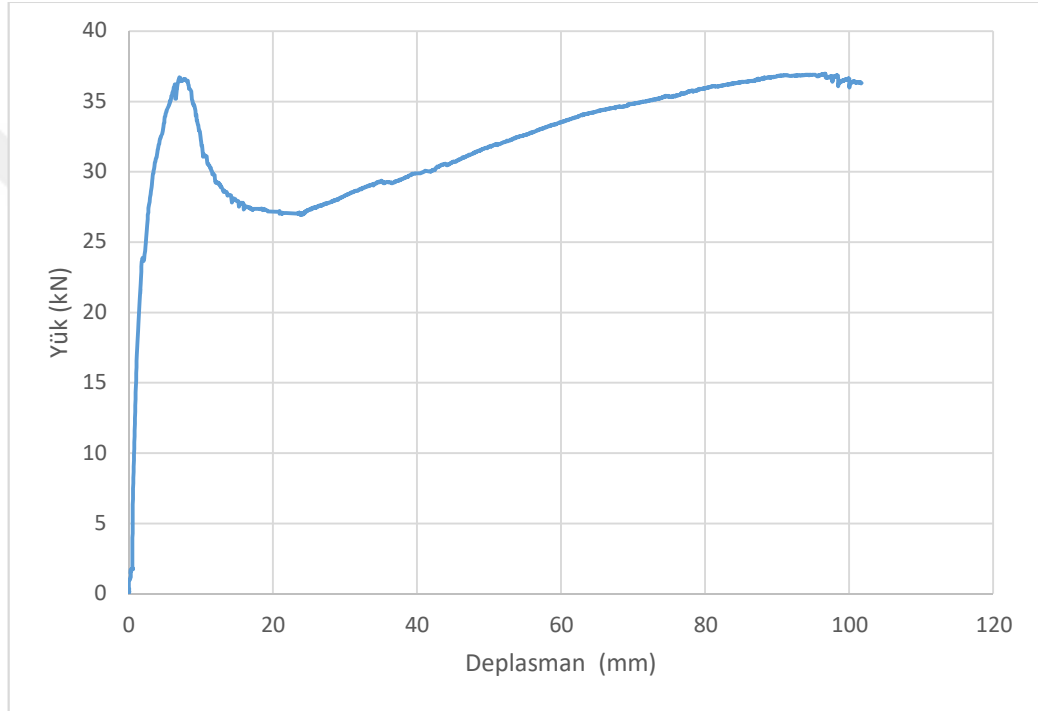
Şekil 5.13 Kiriş-3 üzerindeki 1 nolu çatlakın basınç bölgesine ulaşması (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 5.14 Kiriş-3 üzerindeki 1 nolu çatlakın 31 mm boyuta ulaşması (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 5.15 Kiriş-3 üzerindeki 1 nolu çatlakın 52 mm boyuta ulaşması (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 5.16 Kiriş-3 Yük-Deplasman grafiği

#### 5.2.4.4 Kiriş-4 Deney Sonuçları

İlk eğilme çatlakı 29 kN'da oluşmuştur (Şekil 5.17). Yük 57 kN seviyelerinde iken deplasman 25,6 mm olarak ölçülmüştür. 1 nolu çatlak genişliği 8 mm genişliğine ulaşmıştır. 1 nolu çatlak devam etmiştir ve çatlak basınç bölgesine kadar ulaşmıştır. (Şekil 5.18) Yük 60 kN'da iken yük-deplasman eğrisi donatı akmış gibi düz bir çizgi haline dönüşmüştür fakat daha sonra basınç bölgesindeki betonun ezilmeye karşı gösterdiği direnç ile bir miktar daha yük taşıma devam etmiştir (Şekil 5.19).

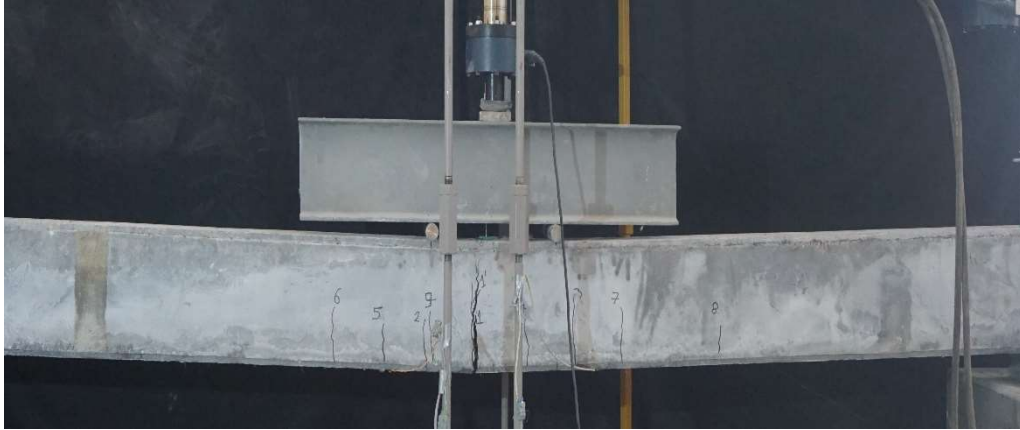
Kiriş 66 kN’da 42,55 mm deplasman yapmıştır ve basınç bölgesindeki liflerin sıyrılmaya başladığı gözlenmiştir. 67 kN’da Kiriş 44,92 mm deplasman yapmıştır ve çatlak genişliği 12 mm’ye ulaşmıştır.

Deplasman 105,8 mm’ye ulaştığında çatlak genişliği 42 mm’ye ulaşmıştır. (Şekil 5.20)

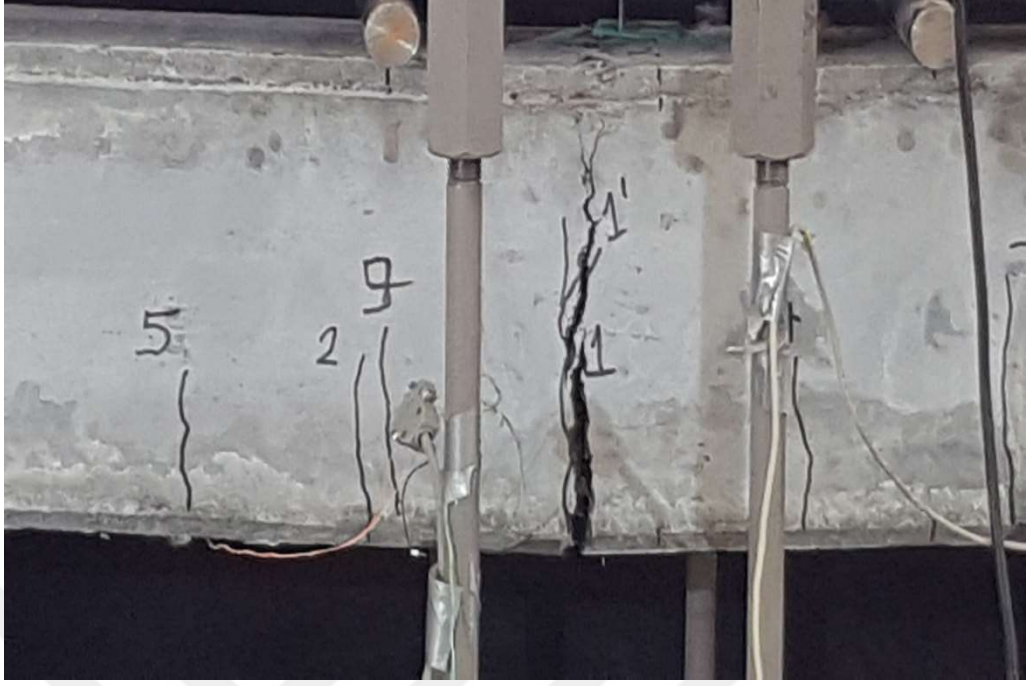
Kiriş-4 Kiriş tasarımına ait Yük-Deplasman grafiği Şekil 5.21’de gösterilmiştir. Kirişin maksimum taşıma kapasitesi 73,8 kN olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.17 Kiriş-4 1 nolu ilk eğilme çatlak oluşumu (Kişisel arşiv, 2017)



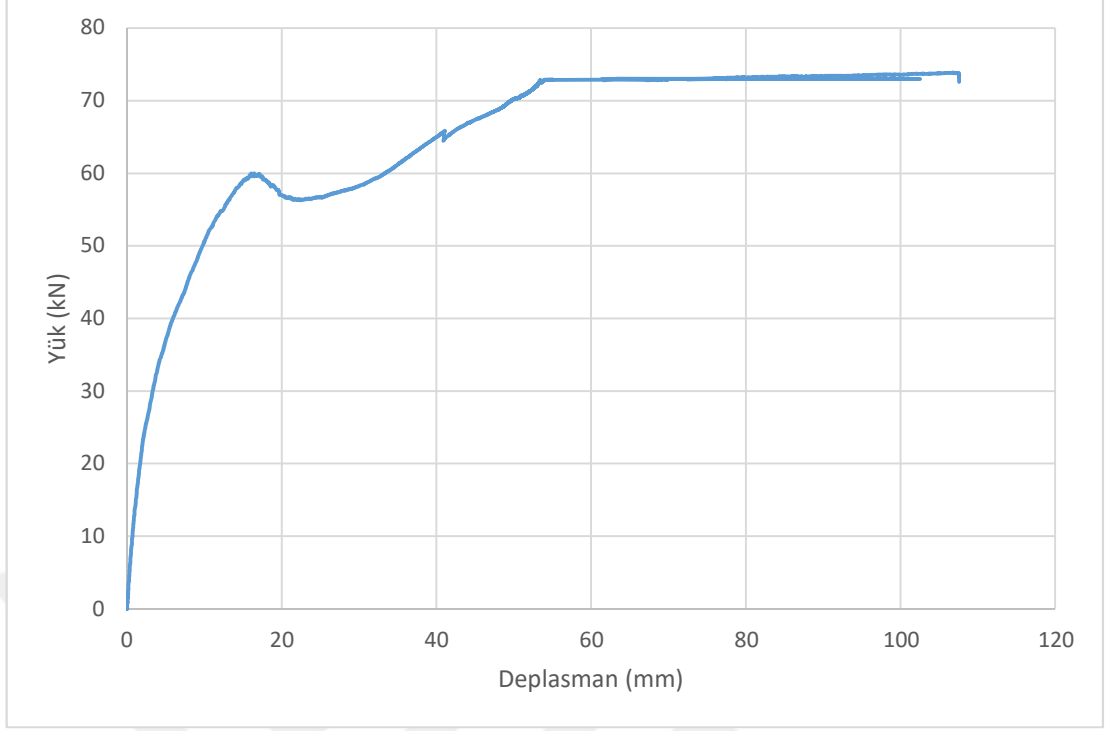
Şekil 5.18 Kiriş-4 1 nolu çatlakın basınç bölgesine ulaşması (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 5.19 Kiriş-4 basınç bölgesinde oluşan çatlak (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 5.20 Kiriş-4 1 nolu çatlak genişliğinin 42 mm'ye ulaşması (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 5.21 Kiriş-4 Yük-Deplasman grafiği

Deney sonunda Şekil 5.22’de cam lifi polimer donatıların betondan sıyrıldığı ve cam liflerinin birbirinden ayrılmaya başladığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.22 Kiriş-4 cam lifi donatıların liflerinin ayrılması (Kişisel arşiv, 2017)

## BÖLÜM ALTI

### DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

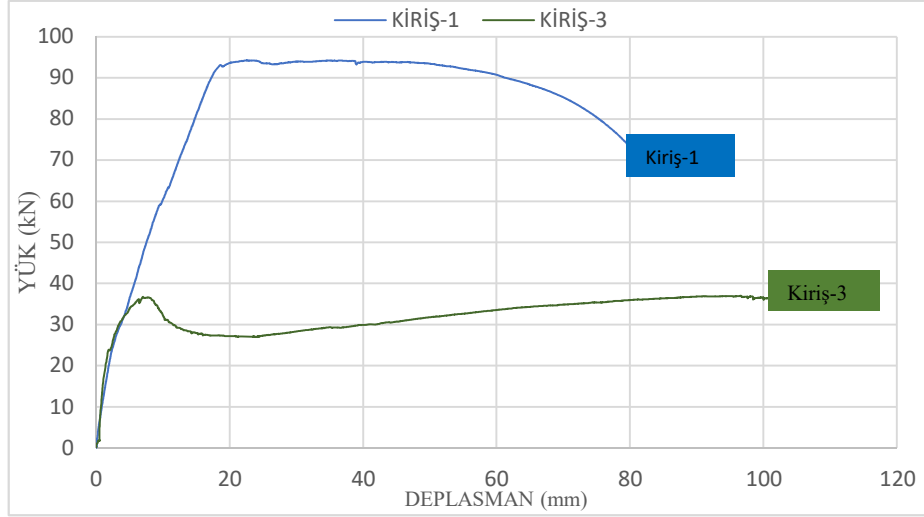
Bu bölümde deney sonuçları, dayanım ve davranış, süneklilik, rijitlik ve enerji tüketimleri başlıkları altında değerlendirilmiştir. Test sonuçları kirişlerin donatı tipi ve donatı oranına göre gruplandırılıp irdelenmiştir. Kirişlere ait yük-deplasman eğrileri Şekil 6.1 ve 6.2’de gösterilmiştir.

Tablo 6.1 200x300x3800 mm boyutlu Kirişlere ait eğilme deneyi test sonuçları

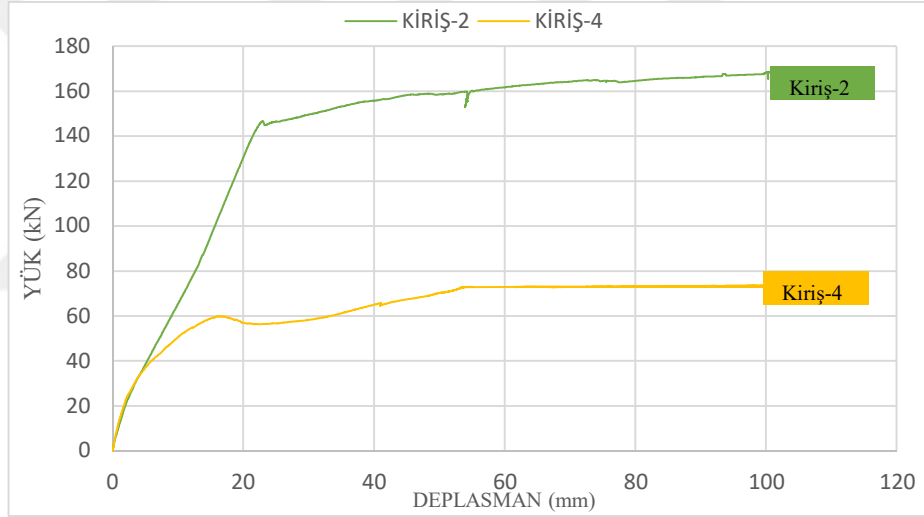
Kiriş Adı	Donatı Tipi	Donatı Oranı ( $\rho$ )	İlk Çatlak Yükü (kN)	İlk Çatlak Deplasmanı (mm)	Maksimum Taşıma Yükü (kN)	Maksimum Deplasman (mm)	Maksimum Çatlak Genişliği (mm)
Kiriş-1	ÇELİK	0,005	38,00	12,00	95,00	45,00	45,00
Kiriş-2	ÇELİK	0,012	47,00	6,60	168,00	125,00	125,00
Kiriş-3	GFRP	0,005	28,50	3,00	37,00	98,00	97,90
Kiriş-4	GFRP	0,012	29,00	3,15	73,80	105,80	105,80

#### 6.1 Dayanım ve Davranış

Dayanım, eleman davranışlarının değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir parametredir. Deneysel çalışmada kirişlerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılmasında yük-deplasman eğrileri kullanılmıştır. Tüm Kirişlerin test sonuçlarından elde edilen karakteristik değerler Tablo 6.1’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Kiriş-1 ve Kiriş-3 Yük-Deplasman grafiği



Şekil 6.2 Kiriş-2 ve Kiriş-4 Yük-Deplasman grafiği

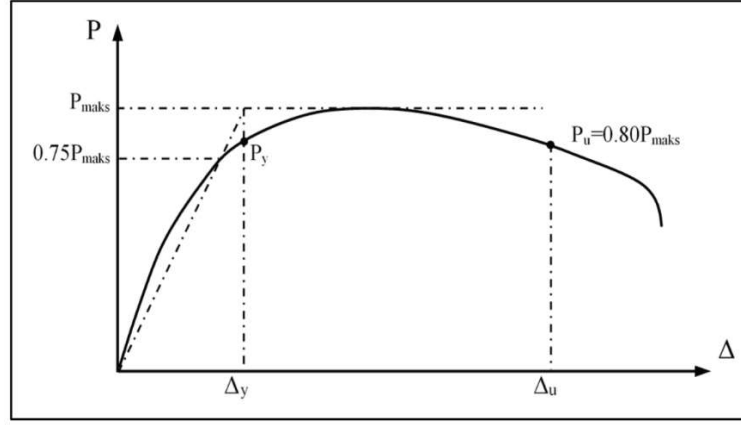
Çelik donatı ile üretilen kirişlerin cam lifine oranla daha yüksek taşıma kapasitesine ulaştığı görülmüştür.  $\rho=0,005$  donatı oranına sahip çelik donatılı Kiriş-1 GFRP donatılı Kiriş-3'e göre dayanımı %157 oranında fazladır.  $\rho=0,012$  donatı oranına sahip çelik donatılı Kiriş-2, GFRP donatılı Kiriş-4'e göre %128 oranında daha fazla dayanıma sahiptir. Cam lifli donatılı kirişlerin öngörülen dayanımdan daha düşük seviyede olması, cam liflerinin nervürlü ve pürüzsüz yüzeyleri nedeniyle betonla aderansının zayıf olmasıdır. Cam lifindeki bu dezavantajı azaltmak için çalışma kapsamında ultra yüksek dayanımlı beton tercih edilmiştir. Fakat ultra yüksek dayanımlı betonun kullanılması GFRP ve çelik donatılı kirişlerin dayanım ve davranış

özellikleri incelendiğinde de dezavantajı tam anlamıyla ortadan kaldırmadığı görülmektedir.

Ersoy ve Özcebe (2004)'nin öngördüğü gibi tek eksenli basınç altında düz yüzeyle cam lifi ve nervürlü donatı kullanılan Kirişlerde benzer çatlak şekilleri oluşmuştur. Çelik donatılı kirişlerinde donatının nervürlü olmasından dolayı çatlak adedi fazla ama çatlak genişlikleri küçük, GFRP donatılı kirişlerinde cam lifi donatılar nervürlü olmadığından çelik donatılı kirişlere göre hem çatlak adedi daha az hem de çatlak genişlikleri daha büyüktür.

## 6.2 Deplasman Sünekliği

Deplasman sünekliği, elemanın taşıma kapasitesini kaybetmeden yapabileceği şekil değiştirmedir. Eleman, kuvvet altında (eğilme kuvveti) şekil değiştirebiliyorsa ve bu şekil değişikliğine rağmen taşıma kapasitesinde bir azalma olmuyorsa süneklikten bahsedebiliriz. Eleman kuvvet altında şekil değiştiriyorsa, buna mukabil taşıma kapasitesi düşüyorsa süneklikten bahsedemeyiz. Geleneksel beton ile üretilen kirişlerde yük-deplasman eğrisinde belirgin şekilde akma düzlemi oluşmuştur. Ancak UYPB ile üretilen kirişlerde akma düzlemi oluşmamıştır. Bu yüzden, deney elemanlarının deplasman sünekliklerini karşılaştırmak amacıyla UYPB ile üretilen kiriş örneklerinin; akma yükü ( $P_y$ ), maksimum deplasman yükü ( $P_u$ ), akma deplasmanı ( $\Delta_y$ ) ve maksimum deplasman ( $\Delta_u$ ) değerleri Şekil 6.3'de gösterilen metoda göre hesaplanmıştır.



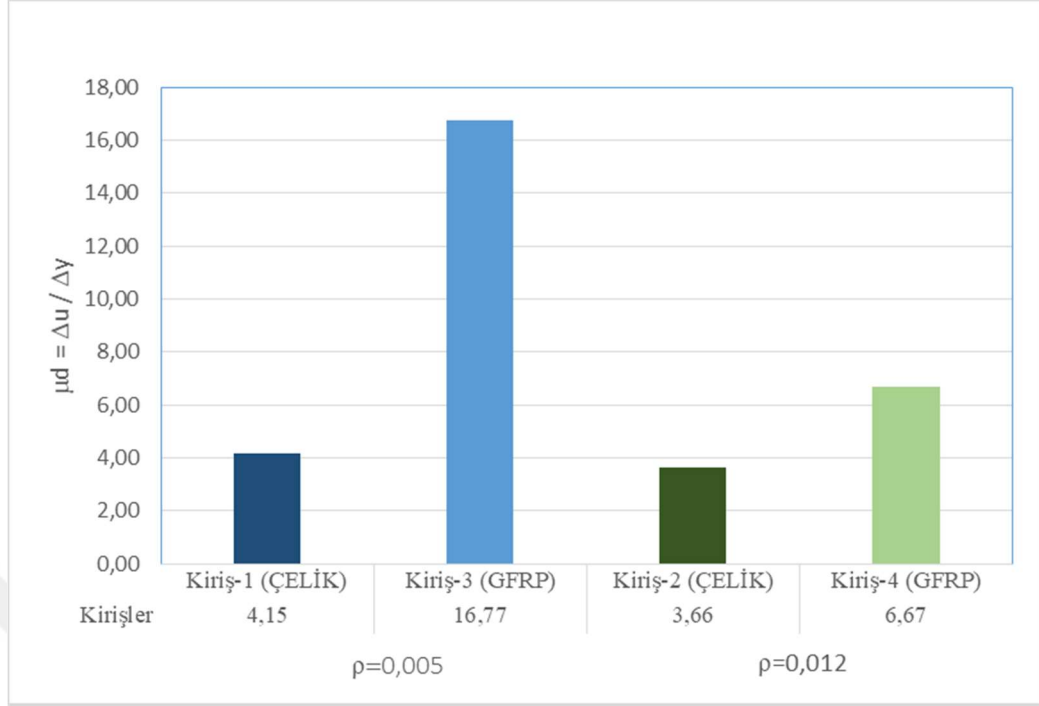
Şekil 6.3 Akma yer değiştirmesinin belirlenmesi (Park, 1988)

Deney kirişlerinin hesaplanan akma deplasmanı ve maksimum deplasman değerleri Tablo 6.2’ de verilmiştir. Deplasman suneğliği  $\mu_d = \Delta_u / \Delta_y$  bağıntısı kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 6.2 Yer değiştirme Suneğliliği Parametreleri

Deney Elemanı	$\Delta_y$	$\Delta_u$	$\mu_d$
<b>Kiriş-1 (ÇELİK)</b>	19,67	81,56	4,15
<b>Kiriş-3 (GFRP)</b>	5,78	96,93	16,77
<b>Kiriş-2 (ÇELİK)</b>	27,64	101,10	3,66
<b>Kiriş-4 (GFRP)</b>	16,12	107,60	6,67

$\rho=0,005$  donatı oranına sahip çelik donatılı Kiriş-1 elemanın deplasman suneğliği 4,15’dir. GFRP donatılı Kiriş-3’te bu oran %304 artarak 16,77 seviyesine ulaşmıştır.  $\rho=0,012$  donatı oranına sahip çelik donatılı Kiriş-2 elemanın deplasman suneğliği 3,66’dir. GFRP donatılı Kiriş-3’te bu oran %82 artarak 6,67 seviyesine ulaşmıştır. GFRP donatıların çelik donatıya oranla daha fazla elastisite modülüne sahip oluşu suneğliliği olumlu yönde etkilemiştir. Şekil 6.4’de deney elemanlarının karşılaştırılmalı deplasman suneğlikleri gösterilmiştir

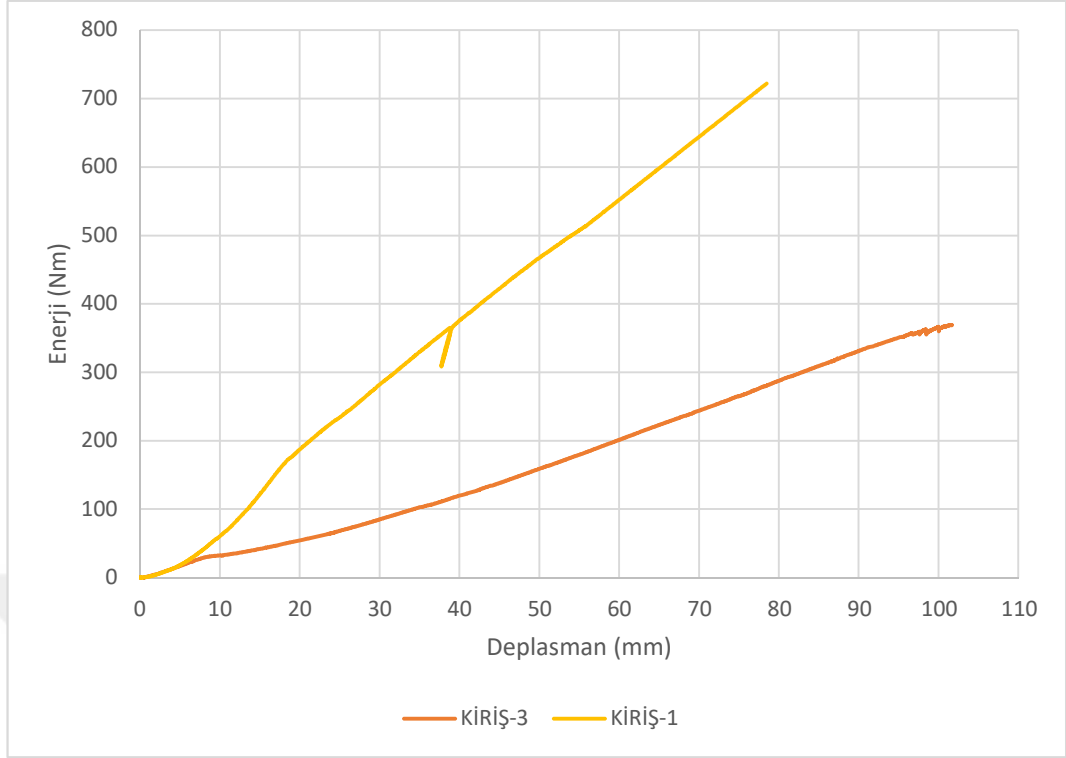


Şekil 6.4 Kirişlerin Yer Değiştirme Süneklilikleri

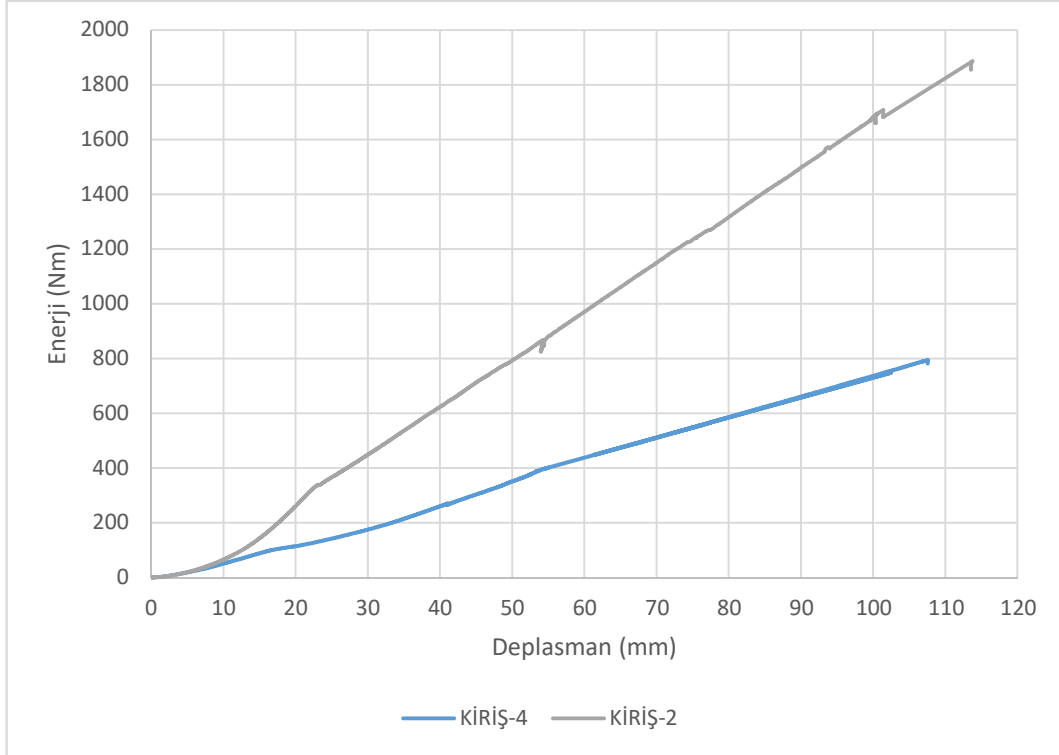
### 6.3 Enerji Tüketme Kapasitesi

Kiriş örneklerin enerji yutma kapasiteleri, göçme yükleri referans alınarak yük-deplasman grafiği altında kalan alanların hesaplanması ile elde edilmiştir. Hesaplama EXCEL programı kullanılmıştır. Kiriş-1 ve Kiriş-3 Kirişlerine ait enerji yutma kapasiteleri Şekil 6.5’de, Kiriş-2 ve Kiriş-4 Kirişlerine ait enerji yutma kapasiteleri Şekil 6.6’de gösterilmiştir.

Düşük donatı oranına sahip kirişlerde çelik donatılı kiriş, GFRP donatılı kirişe göre yaklaşık %130 oranında daha fazla enerji tüketme kapasitesine sahiptir. Yüksek donatı oranında sahip kirişlerde ise bu oran %90 seviyelerindedir. Buradaki oluşun farkın temel nedeni çelik donatılı kirişlerin GFRP donatılı kirişlere göre çok daha fazla yük taşıma yapabilmesidir.



Şekil 6.5 Kiriş-1 ve Kiriş-3 kirişlerine ait enerji yutma miktarları



Şekil 6.6 Kiriş-2 ve Kiriş-4 kirişlerine ait enerji yutma miktarları

## 6.4 Rijitlik

Rijitlik, etkiye yükler altında şekil değiştirmeden kalabilen olarak tanımlanabilir. Deneysel kirişlerde farklı türde donatı kullanılması elemanların rijitliği üzerindeki etkileri belirlemek için kirişlerin başlangıç ve akma rijitlikleri hesaplanmıştır. Kirişlerin rijitliği yük-deplasman grafiğinde belirlenen bir yük noktasını grafik orijini ile birleştiren doğrunun eğimi olarak hesaplanmıştır.

Başlangıç rijitliği, deneysel kirişlerinin yüklemesi sırasında ilk çatlak oluştuğu yük değeri için hesaplanmıştır. Deneysel kirişlerinde ikinci olarak akma rijitliği hesaplanmıştır. Akma rijitliği ise deneysel elemanında çekme donatısının aktığı andaki yük değerine karşılık gelen rijitliktir. Bu değer yardımıyla donatıda akma gerçekleşinceye kadar rijitlikte ne oranda değişim olduğunu belirlemek mümkün olacaktır. Deneysel kirişlerinin başlangıç ve akma rijitlikleri Tablo 6.3’de gösterilmiştir.

Tablo 6.3 Kirişlerin Başlangıç ve Akma Rijitlikleri

Kiriş Adı	Donatı Tipi	Donatı Oranı ( $\rho$ )	İlk Çatlak Yükü (kN)	İlk Çatlak Deplasmanı (mm)	Akma Noktası Yükü (kN)	Akma Noktası Deplasmanı (mm)	Başlangıç Rijitliği (kN/mm)	Akma Rijitliği (kN/mm)
Kiriş-1	ÇELİK	0,005	38,00	5,32	93,01	18,75	7,14	4,96
Kiriş-2	ÇELİK	0,012	47,00	6,59	145,44	23,63	7,13	6,15
Kiriş-3	GFRP	0,005	28,50	3,06	31,11	10,76	9,31	2,89
Kiriş-4	GFRP	0,012	29,00	3,15	56,96	20,04	9,21	2,84

$\rho=0,005$  donatı oranına sahip GFRP donatılı kirişin başlangıç rijitliği, çelik donatılı kirişe göre %30 artmıştır.  $\rho =0,012$  donatı oranına sahip GFRP donatılı kirişin başlangıç rijitliği ise çelik donatılı kirişe göre %29 artmıştır. Çelik donatı yerine GFRP donatının kullanılması ilk çatlak yükü ve deplasman oluşumunu olumlu etkilemiştir.

Akma rijitliği, donatıda akma gerçekleşinceye kadar deney elemanında ne kadar çatlak olduğu ve bu çatlakların rijitliği ne oranda etkilediğini belirleyeceği için oldukça önemlidir.  $\rho=0,005$  donatı oranında sahip elik donatılı kirişin akma rijitliği GFRP donatılı kirişe göre %72 fazladır. Bu oran  $\rho=0,012$  donatı oranında sahip kirişte ise %116'dır. Donatı oranının  $\rho=0,005$ 'den  $\rho=0,012$ 'ye yükselmesi elik donatıda artışa GFRP donatılıda azalmaya sebep olmuştur. Donatı oranının artmasıyla deney elemanlarında akma gerçekleşinceye kadar daha az çatlak oluşmakta bu da elemanlarda akma rijitliğinin artmasına neden olmaktadır.



## BÖLÜM YEDİ

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Kirişlerin üretimi için tasarlanan ultra yüksek performanslı betonun elastisite modülü ortalama 53 GPa, basınç dayanımı ise ortalama 155 MPa mertebelerindedir.
- Kirişlerde kullanılan GFRP donatıların çekme dayanımları ortalama 482 MPa, şekil değiştirme oranı ise ortalama %2 seviyelerindedir.
- Deneysel çalışmalarda kullanılan donatıların beton ile aderans performansı kıyaslandığında GFRP donatıların düz olmasından kaynaklı çelik donatıya göre performansı oldukça düşüktür.
- Kirişlerin performansları kıyaslandığında, düşük donatı oranında sahip çelik donatılı kirişte donatı akmış ve kiriş maksimum taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Yüksek donatı oranına sahip kirişte ise donatı akmaya başlamadan basınç bölgesinde ezilmeler meydana gelmiştir.
- GFRP donatılı kirişlerde donatılar düz olduğundan eğilme çatlakları tek noktadan ilerlemiştir. Çatlak genişlikleri arttıkça basınç bölgesinde ezilmeler meydana gelmiştir. Yüksek donatı oranlı kirişte çatlaklar düşük donatı oranlı kirişe göre daha geniştir ve basınç bölgesinin ezilmeye karşı gösterdiği direnç ile taşıma kapasitesinin belli bir noktadan sonra da arttığı görülmüştür.

- $\rho=0,005$  donatı oranına sahip çelik donatılı kiriş aynı donatı oranına sahip GFRP donatılı kirişe göre yaklaşık %125 fazla taşıma yüküne sahiptir.  $\rho=0,012$  donatı oranına sahip kirişte ise bu oran %230 seviyelerindedir.
- Kirişlerdeki enerji yutma kapasiteleri karşılaştırıldığında, 80 mm deplasman seviyesi için  $\rho=0,005$  donatı oranına sahip elemanlar Kiriş-1, Kiriş-3'den %130 daha fazla enerji yutma kapasitesine sahiptir. 100 mm deplasman seviyesi için  $\rho=0,012$  donatı oranına sahip elemanlar Kiriş-2, Kiriş-4'den %90 daha fazla enerji yutma kapasitesine sahiptir.
- Çelik donatı yerine GFRP donatının kullanılması ilk çatlak yükü ve deplasman oluşumunu olumlu etkilemiştir.  $\rho=0,005$  donatı oranlı kirişte bu oran %30,  $\rho=0,012$  donatı oranlı kirişte ise %29 mertebelerindedir.
- Çelik donatı yerine GFRP donatı kullanılması akma rijitliğini olumsuz etkilemiştir.

Bu çalışmayı takiben öneriler şu şekilde özetlenebilir:

- Cam lifi polimer donatılar malzeme yapısı gereği, çelik donatıdan yaklaşık 3 kat daha fazla kopma mukavemetine sahip olmasına rağmen birim deformasyonu çelik donatıdan yaklaşık 5-6 kat daha düşüktür. Betonarme yapı içinde tek başına GFRP donatıların kullanılması sakıncalı olmakla birlikte beton içerisine çok az oranda lif koyulması bile Kirişin sünek davranışını olumlu yönde değiştirmektedir. Nitekim Esfahani ve diğer., (2019) yılında yaptığı çalışmada hacimce %25 oranında sentetik lif kullanmak bile taşıma kapasitesi referans Kirişe göre %55 oranında arttırdığı belirlenmiştir.

- Cam lifli donatıların elik donatılardan çok daha fazla çekme mukavemetine sahip olmasına rağmen düz tip cam lifi polimer donatılar nervürlü elik donatı performansına ulaşamamıştır. Bu durum, Aydın, Ekiz ve Sarıbyık (2014) tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarına benzerlik göstermektedir.
- Nervürlü elik donatı kullanılan kirişlerde daha iyi kenetlenme sağlandığından eğilme çatlakları daha fazla sayıda ama daha az çatlak genişliği oluşmaktadır. Düz cam lifi polimer donatı kullanılan Kirişlerde ise çatlak sayısı daha az ama çatlak genişlikleri daha fazladır. Bu nedenle cam lifi polimer donatı kullanılacaksa nervürlü olanları tercih edilip betonla daha iyi kenetlenme ve aderans sağlanmalıdır. Ayrıca donatı-beton aderansını ve kenetlenmeyi daha da arttırmak için cam lifi donatıyı kum veya epoksi kaplı tercih etmekte mümkündür.
- Bu çalışmada kullanılan UYPB maliyeti oldukça yüksektir. Bu maliyeti azaltabilmek için alternatif malzemelerle daha düşük maliyetli beton tasarımları yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- Abdalla, H.A. (2002). Evaluation of deflection in concrete members reinforced with fibre reinforced polymer (FRP) bars. *Composite Structures*, 56 (2002), 63–71
- ACI 440.1R-15. (2015). *Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars*. USA
- Ahmad, H. ve Fan, M. (2018). Interfacial properties and structural performance of resin-coated natural fibre rebars within cementitious matrices. *Cement and Concrete Composites*, 87 (2018), 44-52
- Al-Sadoon, Z., Altoubat, S., Elbana, A. ve Junaid, M.T. (2019). Experimental study on the effect of matrix on the flexural behavior of beams reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) bars. *Composite Structures*. 222 (2019), 110930
- ASTM D7205/D7205M (2016). *Standard Test Method for tensile properties of fiber reinforced polymer matrix composite bars*. USA
- Aydın, F., Ekiz Y. ve Sarıbyık, M. (2014). Betonarme kirişlerde cam elyaf Takviyeli plastik donatıların kullanımının araştırılması. *Akademik Platform*, 136-143
- Benmokrane, B., Manola, A., Nazair, C. ve Seynave, X. (2017). Comparison between ASTM D7205 and CSA S806 Tensile-Testing Methods for Glass Fiber–Reinforced Polymer Bars. *Journal of Composites for Construction* 21 (5), 04017038
- Birol, T., Hasgöl, U., Türker, K., Yavaş, A., Yazıcı, H. (2019). Ultra yüksek performanslı lifli beton ile üretilmiş betonarme Kirişlerin eğilme davranışı. *Teknik Dergi*, 523, 8777-8801
- Çotur E. (2019). *Lif katkılı yüksek mukavemetli beton ile üretilmiş elemanların eğilme davranışları*. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir

- Duranovic, N., Pilakoutas, K. ve Waldron, P. (1995). Tests on concrete beams reinforced with glass fibre reinforced plastic bars. *EUROCRETE, CCC/95/21A*, 26-35
- Esfahani, R. M., Homami, P. ve Vakili, S.E. (2019). Effect of fibers and hybrid fibers on the shear strength of lightweight concrete beams reinforced with GFRP bars. *Structures*, 20, 290-297
- Ersoy, U. ve Özcebe, G. (2004). *Betonarme* (8. Baskı). İstanbul:Evrım Yayınevi
- Farid, S.B.H. ve Jabbar, S.A. (2018). Replacement of steel rebars by GFRP rebars in the concrete structures. *Karbala International Journal of Modern Science*, 4, 216-227
- GFRP (Glass fiber reinforced polymer) rebar*, (b.t.). 2015, <https://armastek.ru/en/composite-reinforcement/glassfiber-reinforcement/>
- Goldston, M., Remennikov A. ve Sheikh M.N. (2016). Experimental investigation of the behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars under static and impact loading. *Engineering Structures*, 113, 220–232
- Madawy, M.E. ve El Zareef, M.A.(2018). Effect of glass-fiber rods on the ductile behaviour of reinforced concrete beams. *Alexandria Engineering Journal*, 57, 4071-4079
- Mecit, D., Öktem, T., Özdemir, D., ve Seventekin, N. (2006). Cam Lifleri. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 281-286
- Park, R. (1988). Ductility evaluation from laboratory and analytical testing. *In Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan*, 8, 605-616.

Park, Y. (2012). *Long-term performance of GFRP reinforced concrete beams and bars subjected to aggressive environments*. Doktora Tezi, Teksas Üniversitesi, Arlington.

Patil V.R. (2014). Experimental study of behavior of RCC beam by replacing steel bars with glass fibre reinforced polymer and carbon reinforced fibre polymer (GFRP). *IJIRAE*, 1 (5), 205-209

TS 500 (2000). *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*.

TS EN 197-1 (2012). *Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*.

TS EN 206-1 (2002). *Beton - Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk*.

TS EN 708 (2016). *Çelik - Betonarme için - Donatı çeliği*.

TS EN 1008 (2003). *Beton - Karma suyu - Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları*.

TS EN 12350-2 (2010). *Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 2: Çökme (slump) deneyi*

TS EN 12350-6 (2010). *Beton-Taze beton deneyleri-Bölüm 6: Yoğunluk*