

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**POLİMER KOMPOZİTLERLE  
GÜÇLENDİRİLEN KESME DAYANIMI  
YETERSİZ BETONARME KİRİŞLERİN  
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**Mustafa Furkan GÜLER**

**Haziran, 2023**

**İZMİR**

**POLİMER KOMPOZİTLERLE  
GÜÇLENDİRİLEN KESME DAYANIMI  
YETERSİZ BETONARME KİRİŞ  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Yüksek Lisans Tezi  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı**

**Mustafa Furkan GÜLER**

**Haziran, 2023**

**İZMİR**

## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

**Mustafa Furkan GÜLER**, tarafından **PROF. DR. HASAN MURAT TANARSLAN** yönetiminde hazırlanan “**POLİMER KOMPOZİTLERLE GÜÇLENDİRİLEN KESME DAYANIMI YETERSİZ BETONARME KİRİŞ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

.....  
Prof. Dr. Hasan Murat TANARSLAN

Yönetici

.....  
Doç. Dr. Çağlar YALÇINKAYA

Jüri Üyesi

.....  
Doç. Dr. Mutlu SEÇER

Jüri Üyesi

.....  
Prof. Dr. Okan FISTIKOĞLU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda ve yetişmemde büyük emekleri olan, söylediği her kelimenin kıymetini asla unutamayacağım, akademik kariyerimde ilerlemem için görüşleri ve tavsiyeleriyle bana yön veren değerli danışman hocam Prof. Dr. Hasan Murat TANARSLAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Projede ve tez yazım aşamalarında kıymetli bilgilerini, tecrübelerini her daim aktaran, verdiği tavsiyelerle farklı bakış açıları kazanmama vesile olan saygıdeğer Doç. Dr. Çağlar YALÇINKAYA'ya, deneysel çalışmalarda bilgi birikimini ve tecrübesini aktararak bana destek olan kıymetli Prof. Dr. Kutlay Sever'e ve tez çalışmasında büyük emeği olan Öğr. Gör. Cihan KARADEMİR'e, deneylerde yardımını ve desteğini esirgemeyen Halis KANDAŞ'a, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda bana her türlü imkânı sağlayan Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Dostluklarını ve samimiyetlerini her daim hissettiğim kıymetli dostlarım A.Alper SAYLAN'a, Çiğdem ERYILMAZ SAYLAN'a Dilara KÖKALIŞLAR'a ve Saide ÇELİKTAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda ve hayatım boyunca bana desteğini esirgemeyen aileme; bu süreçte beni destekleyen, bana olan güveni ve inancıyla beni hep motive ederek cesaretlendiren, sevgisini ve desteğini her zaman hissettiğim yol arkadaşım Sevinç Zeynep KAVRUK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yapılan çalışmalarda teknik ve finansal desteğinden dolayı TÜBİTAK'a (Proje No: 219M394 Proje Başlığı: Sürdürülebilir Bir Güçlendirme Yöntemi Olarak Polimer Matrisli Lif Takviyeli Kompozit Laminelerin Geliştirilmesi) ve betonarme numunelerin üretimindeki desteklerinden dolayı Batı Prefabrike Beton İnşaat San. ve Tic. A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Mustafa Furkan GÜLER

# POLİMER KOMPOZİTLERLE GÜÇLENDİRİLEN KESME DAYANIMI YETERSİZ BETONARME KİRİŞ DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

## ÖZ

Bu tez çalışması kapsamında kesme dayanımı yetersiz betonarme kiriş elemanların polimer kompozitler kullanılarak güçlendirilmesi ve uygulanan kompozitlerin betonarme kiriş elemanların dayanım ve davranışına sağlayacağı katkı araştırılmıştır. Bu amaçla öncelikle kompozit üretiminde kullanılacak doğal ve/veya atık malzemeler belirlenmiştir. Belirlenen malzemeler literatür taraması yapılarak kendi içlerinde gruplandırılmış ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bu bağlamda kompozit üretimine geçmeden önce kullanılacak malzemeler arasında bulunan jüt kumaşa Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Tekstil Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında modifikasyon işlemleri uygulanarak modifikasyon işleminin ara yüzey dayanımına sunacağı katkı araştırılmıştır. Yapılan ön çalışmalar ışığında güçlendirme malzemesi olarak kullanılacak kompozitin belirlenmesi amacıyla farklı katman sayısı ve dizilişlere sahip toplam on dokuz adet polimer kompozit vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen kompozitlere çekme ve eğilme testleri yapılmıştır. Güçlendirme malzemesi olarak kullanılacak kompozit malzemesi belirlendikten sonra kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişler üretilmiştir. Gerçek boyutlu kirişler üretildikten sonra karar verilen diziliş ve katman sayısında gerçek boyutlu polimer kompozitler üretilerek kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin kesme bölgesine yapıştırma biçimi ankraj veya epoksi uygulama biçimi ise şerit veya plaka olacak şekilde uygulanmıştır. Kiriş testlerinde polimer kompozitlerin kesme dayanımına ve davranışına katkısı incelenmek amacıyla güçlendirme uygulanmamış referans kirişlere dört noktalı eğilme testi yapılmıştır. Deneysel çalışmada beş adet kesme dayanımı yetersiz betonarme kiriş test edilmiştir. Yapılan çalışmalar ışığında betonarme kirişlere uygulanan güçlendirmenin kirişin enerji yutma kapasitesine katkısı, betonarme kirişlerin yük-deplasman ilişkileri ve farklı güçlendirme şekillerinin kirişin mekanik özelliklerine katkısı karşılaştırılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Güçlendirme, polimer kompozit, betonarme kiriş

# INVESTIGATING THE BEHAVIOR OF SHEAR DEFICIENT RC BEAMS STRENGTHENED WITH POLYMER COMPOSITES

## ABSTRACT

In this thesis, the reinforcement of reinforced concrete beam elements with insufficient shear strength using polymer composites and the contribution of the applied composites to the strength and behavior of reinforced concrete beam elements were investigated. For this purpose, first of all, the materials to be used in composite production were determined. The determined materials were grouped within themselves by making a literature review and their mechanical properties were investigated. In this context, the contribution of the modification process to the interfacial strength was investigated by applying the modification processes to the jute fabric, which is among the materials to be used before the production of composite, in the Laboratory of the Textile Engineering Department of the Faculty of Engineering of Dokuz Eylul University. In order to determine the composite to be used as a reinforcement material for the preliminary studies, a total of nineteen polymer composites with different number of layers and arrays were produced using the vacuum infusion method. Tensile and bending tests were performed on the produced composites. After determining the composite material to be used as the reinforcement material, reinforced concrete beams with insufficient shear strength were produced. After producing the real size beams, real size polymer composites were produced in the determined sequence and number of layers and applied as reinforcement material to the shear zone of the reinforced concrete beams with insufficient shear strength. In order to examine the contribution of polymer composites to shear strength and behavior in beam tests, four-point bending test was performed on non-reinforced reference beams. In the experimental study, five reinforced concrete beams with insufficient shear strength were tested. As a result of the experimental study, the load-displacement relations of the beams, their energy absorption capacities and the contribution of different laminate application forms to the mechanical properties of the beam were compared.

**Keywords:** Strengthening, polymer composite, reinforced concrete beam

## İÇİNDEKİLER

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ .....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xiv

### **BÖLÜM BİR - GİRİŞ..... 1**

1.1 Amaç ve Kapsam.....	2
1.2 Tez Bölümlerine Bakış .....	3
1.3 Literatür Özeti .....	4
1.4 Literatürün Tartışılması.....	18

### **BÖLÜM İKİ - POLİMER KOMPOZİT ÜRETİMİ ..... 20**

2.1 Genel .....	20
2.2 Malzemeler .....	20
2.2.1 Epoksi Reçine .....	21
2.2.2 Atık Cam Lifleri.....	22
2.2.3 Jüt Kumaş .....	24
2.2.3.1. Jüt Kumaşlar İçin Modifikasyon Çalışmaları .....	25
2.2.4 Kenevir Lifli Dokuma Kumaşlar .....	26
2.3 Lif Takviyeli Polimer Kompozitlerin Hazırlanması .....	27

2.3.1 Farklı Düzende Polimer Matrisli Lif Takviyeli Kompozitlerin Üretilmesi	27
2.3.2 Gerçek Boyutlu Laminelerin Üretilmesi.....	31

**BÖLÜM ÜÇ - LAMİNE KONFIGÜRASYONLARI VE MEKANİK PERFORMANS ..... 35**

3.1 Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	35
3.1.1 Çekme Deneyleri .....	36
3.1.2 Eğilme Deneyleri .....	37
3.2 Lamine Konfigürasyonları ve Mekanik Performans .....	38
3.2.1 Laminelerin Çekme Yükleri Altındaki Performansı.....	42
3.2.1.1 Katmanlarında Dokuma Jüt Elyaf Bulunan Kompozitlerin Çekme Performansı .....	42
3.2.1.2 Katmanlarında Kenevir Lif Bulunan Kompozitlerin Çekme Performansı .....	45
3.2.1.3 Katmanlarında Mat Atık Cam Bulunan Kompozitlerin Çekme Performansı .....	47
3.2.1.4 Katmanlarında Dokuma Kenevir ve Mat Atık Cam Bulunan Hibrit Kompozitlerin Çekme Performansı .....	49
3.2.1.4.1 Üç Katmanlı Kompozitler.....	49
3.2.1.4.2 Altı Katmanlı Kompozitler.. .....	50
3.2.1.4.3 Dokuz Katmanlı Kompozitler .....	52
3.2.2 Laminelerin Eğilme Yükleri Altındaki Performansı .....	53
3.2.2.1 Katmanlarında Dokuma Jüt Elyaf Bulunan Kompozitlerin Eğilme Performansı .....	53
3.2.2.2 Katmanlarında Dokuma Kenevir Bulunan Kompozitlerin Eğilme Performansı .....	55

3.2.2.3 Katmanlarında Mat Atık Cam Bulunan Kompozitlerin Eğilme Performansı .....	57
3.2.2.4 Katmanlarında Dokuma Kenevir ve Mat Atık Cam Bulunan Bulunan Hibrit Kompozitlerin Eğilme Performansı.....	58
3.2.2.7.1 Altı Katmanlı Kompozitler .....	58
3.2.2.7.2 Dokuz Katmanlı Kompozitler.....	61
3.3 Sonuçlar.....	62

## **BÖLÜM DÖRT - BETONARME DENEY ELEMANLARI VE DENEY TEKNİĞİ..... 65**

4.1 Genel .....	65
4.2 Malzemeler.....	65
4.2.1 Beton.....	66
4.2.2 Donatı.....	67
4.3 Kesme Yetersizliği Gösteren Deney Elemanları.....	67
4.4 Deney Elemanlarının Üretilmesi.....	68
4.5 Kiriş Yüzey Hazırlığı ve Fan Tipi Ankrajların Betonarme Kirişlere Uygulanması .....	71

## **BÖLÜM BEŞ - POLİMER KOMPOZİTLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞ TESTLERİ..... 75**

5.1 Giriş.....	75
5.2 Kiriş-1.....	76
5.3 Kiriş-2.....	77
5.4 Kiriş-3.....	80
5.5 Kiriş-4.....	82

5.6 Kiriş-5.....	84
<b>BÖLÜM ALTI - DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....</b>	<b>87</b>
6.1 Dayanım ve Davranış .....	87
6.2 Süneklik ve Enerji Tüketimi.....	90
6.3 Rijitlik.....	93
<b>BÖLÜM YEDİ - SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>95</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>98</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1 Betonarme kiriş kesit ve boy kesiti (Zhou vd., 2019).....	7
Şekil 1.2 Betonarme kiriş akış şeması (Leblouba vd., 2019).....	10
Şekil 1.3 Kiriş kesit ve boy kesiti (İbrahim vd., 2020) .....	11
Şekil 1.4 NSM-FRP ve etriye konfigürasyonları (İbrahim vd., 2020).....	12
Şekil 1.5 CFRP çubuk konfigürasyonları (Saadah vd., 2021) .....	15
Şekil 1.6 CFRP şerit konfigürasyonları (Saadah vd., 2021) .....	15
Şekil 1.7 T kiriş kesit detayı (Arslan vd., 2022) .....	17
Şekil 2.1 Fibermak F-1564 epoksi reçine ve sertleştirici (Kişisel arşiv, 2023) .....	21
Şekil 2.2 Atık cam lifleri (a) ve mat hale getirilen atık cam lifleri (b) (Kişisel arşiv, 2023) .....	23
Şekil 2.3 Mat atık cam (Kişisel arşiv, 2023).....	24
Şekil 2.4 Jüt kumaş (a) ve jüt kumaş çekme deneyi (b) (Kişisel arşiv, 2023) .....	25
Şekil 2.5 Dokuma kenevir kumaş (Kişisel arşiv, 2023).....	26
Şekil 2.6 Masaya yapıştırılmış vakum torbası (Kişisel arşiv,2023).....	28
Şekil 2.7 Peel ply malzemesi ve epoksi filesinin sisteme yerleştirilmesi (Kişisel arşiv, 2023) .....	29
Şekil 2.8 Vakum torbasının sisteme yerleştirilmesi (Kişisel arşiv, 2023) .....	29
Şekil 2.9 Reçine yayılma anı (Kişisel arşiv, 2023) .....	30
Şekil 2.10 Sulu hızar kesim makinası (a), kesim sonrası elde edilen kompozitler (b), (c) (Kişisel arşiv, 2023).....	31
Şekil 2.11 Masaya yapıştırılmış vakum torbası (Kişisel arşiv, 2023).....	32
Şekil 2.12 Peel ply malzemesi ve epoksi filesinin sisteme yerleştirilmesi (Kişisel arşiv, 2023).....	33
Şekil 2.13 Vakum torbasının sisteme yerleştirilmesi (Kişisel arşiv, 2023) .....	33
Şekil 2.14 Reçine yayılma anı (Kişisel arşiv, 2023) .....	33
Şekil 3.1 Shimadzu Autograph AGS-X mekanik test cihazı .....	35
Şekil 3.2 Çekme testi .....	37
Şekil 3.3 Eğilme testi .....	38
Şekil 3.4 Dokuma kenevir ve atık cam liflerinden hibrit şekilde oluşturulan plaka (a), dokuma jüt kumaş malzemesi kullanılarak oluşturulmuş plaka (b).....	42

Şekil 3.5 Deney elemanı 2 (a), deney elemanı 3 (b) deney elemanı 8 (c), deney elemanı 9 (d), deney elemanı 17 (e) ve deney elemanı 18 (f) için çekme yükü – uzama grafikleri .....	43
Şekil 3.6 Deney elemanı 2 (a), deney elemanı 3 (b), deney elemanı 8 (c), deney elemanı 9 (d), deney elemanı 17 (e) ve deney elemanı 18 (f) için çekme gerilmesi – birim uzama grafikleri.....	44
Şekil 3.7 Deney elemanı 4 (a) ve deney elemanı 11 (b) için çekme yükü-uzama grafikleri.....	45
Şekil 3.8 Deney elemanı 4 (a) ve deney elemanı 11 (b) için çekme gerilmesi-birim uzama grafikleri .....	46
Şekil 3.9 Deney elemanı 5 (a), deney elemanı 6 (b), deney elemanı 10 (c) ve deney elemanı 19 (d) için çekme yükü-uzama grafikleri .....	47
Şekil 3.10 Deney elemanı 5 (a), deney elemanı 6 (b), deney elemanı 10 (c) ve deney elemanı 19 (d) için çekme gerilmesi-birim uzama grafikleri.....	48
Şekil 3.11 Deney elemanı 7 için çekme yükü-uzama grafikleri .....	49
Şekil 3.12 Deney elemanı 7 için çekme gerilmesi-birim uzama grafikleri.....	49
Şekil 3.13 Deney elemanı 12 (a), deney elemanı 14 (b), deney elemanı 13 (c) ve deney elemanı 15 (d) için çekme yükü-uzama grafikleri.....	50
Şekil 3.14 Deney elemanı 12 (a), deney elemanı 14 (b), deney elemanı 13 (c) ve deney elemanı 15 (d) için çekme gerilmesi-birim uzama (mm/mm) grafikleri.....	51
Şekil 3.15 Deney elemanı 16 için çekme yükü- uzama grafikleri .....	52
Şekil 3.16 Deney elemanı 16 için çekme gerilmesi-birim uzama grafikleri.....	53
Şekil 3.17 Deney elemanı 8 (a), deney elemanı 9 (b), deney elemanı 17 (c) ve deney elemanı 18 (d) için yük – sehim grafikleri .....	54
Şekil 3.18 Deney elemanı 8 (a), deney elemanı 9 (b), deney elemanı 17 (c) ve deney elemanı 18 (d) için eğilme gerilmesi – birim deformasyon grafikleri .....	55
Şekil 3.19 Deney elemanı 11 için yük-sehim grafikleri.....	56
Şekil 3.20 Deney elemanı 11 için eğilme gerilmesi-birim deformasyon grafikleri...	56
Şekil 3.21 Deney elemanı 10 (a) ve deney elemanı 19 (b) için yük-sehim grafikleri	57
Şekil 3.22 Deney elemanı 10 (a) ve deney elemanı 19 (b) için eğilme gerilmesi-birim deformasyon grafikleri.....	58

Şekil 3.23 Deney elemanı 12 (a), deney elemanı 14 (b), deney elemanı 13 (c) ve deney elemanı 15 (d) için yük-sehim grafikleri .....	59
Şekil 3.24 Deney elemanı 12 (a), deney elemanı 14 (b), deney elemanı 13 (c) ve deney elemanı 15 (d) için eğilme gerilmesi-birim deformasyon grafikleri	60
Şekil 3.25 Deney elemanı 16 için yük-sehim grafikleri.....	61
Şekil 3.26 Deney elemanı 16 için eğilme gerilmesi-birim deformasyon grafikleri...	62
Şekil 4.1 Kesme yetersizliğine sahip 150x250 mm kesitli betonarme kiriş donatı planı.....	68
Şekil 4.2 Çelik kalıp kesit detayı.....	69
Şekil 4.3 Donatı bağlanması .....	69
Şekil 4.4 Beton dökümüne hazır deney elemanları.....	70
Şekil 4.5 Deney elemanları beton dökümü .....	70
Şekil 4.6 Deney elemanları beton dökümü .....	71
Şekil 4.7 Yüzey hazırlığı işlemi.....	72
Şekil 4.8 Donatı ve cam lifli kumaş (a), fan tipi ankraj (b) .....	72
Şekil 4.9 Ankraj deliklerinin açılması (a), ankraj deliklerinin temizlenmesi (b), fan tipi ankraj yöntemiyle betonarme kirişlerin güçlendirilmesi (c).....	74
Şekil 5.1 Yükleme öncesi referans deney elemanı.....	76
Şekil 5.2 Yükleme sonrası referans deney elemanı .....	77
Şekil 5.3 Kiriş-1 yük-deplasman grafiği .....	77
Şekil 5.4 Yükleme öncesi güçlendirilmiş deney elemanı .....	78
Şekil 5.5 Yükleme sonrası güçlendirilmiş deney elemanı .....	79
Şekil 5.6 Kiriş-2 yük-deplasman grafiği .....	79
Şekil 5.7 Yükleme öncesi güçlendirilmiş deney elemanı .....	80
Şekil 5.8 Yükleme sonrası güçlendirilmiş deney elemanı .....	81
Şekil 5.9 Kiriş-3 yük-deplasman grafiği .....	82
Şekil 5.10 Yükleme öncesi güçlendirilmiş deney elemanı .....	82
Şekil 5.11 Yükleme sonrası güçlendirilmiş deney elemanı .....	83
Şekil 5.12 Kiriş-4 yük-deplasman grafiği .....	84
Şekil 5.13 Yükleme öncesi güçlendirilmiş deney elemanı .....	84
Şekil 5.14 Yükleme sonrası güçlendirilmiş deney elemanı .....	85
Şekil 5.15 Kiriş-5 yük-deplasman grafiği .....	86

Şekil 6.1 Betonarme deney elemanlarının yük-yer değiştirme grafikleri .....	89
Şekil 6.2 Betonarme deney elemanlarının enerji tüketim seviyeleri .....	92
Şekil 6.3 Betonarme deney elemanları süneklik oranları .....	93
Şekil 6.4 Betonarme deney elemanları başlangıç ve akma rijitlikleri.....	94



## TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1 Deney elemanı detayları .....	13
Tablo 1.2 Test edilen kirişlerin tasarım parametreleri .....	14
Tablo 2. 1 Epoksi reçinenin bazı özellikleri.....	22
Tablo 2.2 Sprey yapıştırıcı 3M™ Super 77™ özellikleri .....	24
Tablo 2. 3 Jüt kumaş malzemesi özellikleri.....	25
Tablo 2.4 Kenevir kumaş malzemesi özellikleri.....	27
Tablo 3.1 Lamine detayları ve gösterimleri .....	40
Tablo 3.2 Katmanlarında dokuma jüt elyaf bulunan kompozitlerin çekme testi sonuçları .....	45
Tablo 3. 3 Katmanlarında dokuma kenevir kumaş bulunan kompozitlerin çekme testi sonuçları .....	46
Tablo 3.4 Katmanlarında atık cam lifi bulunan kompozitlerin çekme testi sonuçları	48
Tablo 3.5 Katmanlarında atık cam lifi ve dokuma kenevir kumaş bulunan üç katmanlı kompozitlerin çekme testi sonuçları .....	50
Tablo 3.6 Katmanlarında atık cam lifi ve dokuma kenevir kumaş bulunan altı katmanlı kompozitlerin çekme testi sonuçları .....	52
Tablo 3.7 Katmanlarında atık cam lifi ve dokuma kenevir kumaş bulunan dokuz katmanlı kompozitlerin çekme testi sonuçları .....	53
Tablo 3.8 Katmanlarında dokuma jüt bulunan kompozitlerin eğilme testi sonuçları	55
Tablo 3.9 Katmanlarında dokuma kenevir bulunan kompozitlerin eğilme testi sonuçları .....	56
Tablo 3.10 Katmanlarında atık cam lifi bulunan kompozitlerin eğilme testi sonuçları .....	58
Tablo 3.11 Katmanlarında dokuma kenevir kumaş ve atık cam lifi bulunan altı katmanlı kompozitlerin eğilme testi sonuçları .....	60
Tablo 3.12 Katmanlarında dokuma kenevir kumaş ve atık cam lifi bulunan dokuz katmanlı kompozitlerin eğilme testi sonuçları .....	62
Tablo 4.1 Kiriş imalatında kullanılan betonun karışım oranları .....	66
Tablo 4.2 S420a donatı çeliğinin mekanik özellikleri .....	67
Tablo 4.3 Cam fiber kumaşın mekanik özellikleri.....	71
Tablo 6.1 Betonarme kiriş testlerinden elde edilen deneysel sonuçlar .....	90

## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

Ülkemiz dünyanın aktif deprem kuşaklarından biri olan Alp Himalaya deprem kuşağında yer almaktadır. Bu nedenle ülkemizde son otuz yılda 1999 Gölcük, 1999 Düzce, 2003 Bingöl, 2011 Van, 2020 Elâzığ, 2020 İzmir Seferihisar ve 2023'te merkez üssü Kahramanmaraş olup birçok ili etkileyen ülkemizi ve dünyayı sosyal ve ekonomik anlamda derin yasa boğan yıkıcı depremler meydana gelmiş bunun sonucunda can ve mal kayıpları yaşanmıştır. Deprem sonrası yapılan araştırmalarda yıkılan binalardaki kusurların mevcut yönetmeliklere göre yetersiz olduğu belirlenmiştir(Dokuz Eylül Üniversitesi [D.E.U.], 2023; İstanbul Teknik Üniversitesi [İ.T.Ü.], 2023; Orta Doğu Teknik Üniversitesi [O.D.T.Ü], 2023). Ülkemizde bulunan mevcut betonarme yapıların da büyük bir çoğunluğu gerekli performans analizleri yapıldığında riskli çıktığı görülmektedir. Depremin ne zaman ve nerede olacağını belirleyen önceden uyarı veren bir teknoloji bulunmadığından geçmişte yaşanan can ve mal kayıplarının önlenmesi adına mevcut yapıların çeşitli yetersizliklerinin giderilmesi önemli bir husustur.

Betonarme elemanların işçilik hataları, uygun olmayan beton ve/veya donatı kullanımı, tasarım hataları, deprem etkisiyle betonarme elemanlarda oluşan hasarlar gibi birçok nedenden dolayı taşıma kapasiteleri azalmaktadır (Ersoy, Özcebe, ve Canbay, 2019; Galvão, Matos, Oliveira, ve Hajdin, 2022). Taşıma kapasitesi azalan bir elemanın olası deprem anında yıkılması ve bunun sonucunda can ve mal kaybının yaşanması kaçınılmazdır. Hasar almış ve deprem güvenliğinin sağlanmadığı yapıların yıkılıp tekrar yapılması veya onarılıp güçlendirilmesi gerekmektedir. Çoğu zaman yapının güçlendirilmesi maliyet, çevre kirliliği ve zaman açısından daha makul olmaktadır. Betonarme yapılarda yükler döşemelerden kirişlere, kirişlerden kolonlara ve kolonlardan da temele aktarılmaktadır. Bu bağlamda betonarme elemanların yük aktarımında kirişlerin görevi oldukça önemlidir. Betonarme kirişler genellikle kesme kuvveti ve eğilme momentine maruz kalmaktadır (Siddika, Mamun, Al, Alyousef, ve Amran, 2019; Zhu, Zhang, Hussein ve Chen, 2020). Kirişlerde oluşabilecek kesme kırılmaları ani ve tehlikeli olup gevrek kırılmalara neden olmaktadır. Bu tür

kırılmalarda kırılma öncesi belirgin çatlaklar gözlemlenmediğinden öncesinde önlem almak oldukça zordur. Bu nedenle kirişin kesme kırılmasına uğramadan eğilme kapasitesine ulaşması istenir. Kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde başta karbon, cam ve aramid lif takviyeli polimerler olmak üzere birçok malzeme kullanılmaktadır (Al-Shamayleh, Al-Saoud, Abdel-Jaber, ve Alqam, 2022; Baraghith, Mansour, Behiry, ve Fayed, 2022; Sinh, Komuro, Kawarai, ve Kishi, 2022).

## **1.1 Amaç ve Kapsam**

Dünyada; nüfus artışı, sanayileşmenin artması ve doğal kaynakların bilinçsiz kullanılması sayısız atık malzemenin çevre kirliliği yaratarak doğaya zarar vermesine neden olmaktadır. Çevresel ve ekonomik etkiler dikkate alındığında atık malzemelerin sürdürülebilir halde ekonomiye geri kazandırılması oldukça önemlidir. Bazı atık malzemelerin yeni alternatif yöntemler ile inşaat sektöründe kullanılarak geri kazanımlarının sağlanmasını hem ekonomik hem de çevresel etkiler göz önüne alındığında son derece önemlidir. Bu bağlamda sanayi ve tarım atıklarının rutin kullanım alanları dışında yeni kullanım alanı yaratacak şekilde kullanılabilir hale dönüştürülmesi, ülke ekonomisine önemli katkı sağlayacaktır.

Bu amaç kapsamında farklı özelliklere sahip malzemelerin birbiri içerisinde kimyasal tepkimeye girmeden birleştirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemeler son yıllarda önemli bir alternatif olmuştur. Sanayi, uzay, havacılık ve inşaat gibi birçok sektörde kullanım imkânı bulan geri dönüştürülebilir ve çevre dostu kompozit malzemeler araştırmacıların dikkatini çekmektedir (Karaca Uğural, 2022). Gelişen teknolojiyle birlikte birçok alanda çeşitli üretim teknikleri kullanılarak ihtiyaca uygun kompozit üretimi gerçekleştirilmektedir. Her yıl 100 milyar tondan fazla kaynak üretimi gerçekleştirilirken üretilen malzemelerin %60'ından fazlası atık olarak bertaraf edilmektedir ve bu durum küresel ısınmaya neden olmakta ve çevreye çok büyük zararlar vermektedir (Balbay, Sarıhan ve Avşar, 2021). Çevre kirliliğini azaltmak amacıyla doğada tamamen çözünür veya atık malzemeler kullanılarak üretilen kompozitlerin geliştirilmesi hem ekonomik anlamda hem de çevre dostu

malzemelerin ekonomiye kazandırılması anlamında son derece önemlidir (Cousins, Suzuki, Murray, Samaniuk, ve Stebner, 2019; Ferdous vd., 2021; Ratnawati, Yani, Suprihatin, ve Hardjomidjojo, 2023).

Bu çalışma kapsamında dokuma jüt, dokuma kenevir ve atık cam lifleri kullanılarak farklı katman dizilimlerine sahip on dokuz adet kompozit üretilerek dayanım ve geri dönüşüm açısından en uygun kompozit seçilmiş ve gerçek kiriş boyutlarında üretilmiştir. Seçilen malzemenin kesme dayanımı yetersiz betonarme kiriş üzerine katkısını incelemek amacıyla aynı kesit özelliklerine sahip beş adet kiriş farklı güçlendirme ve uygulama teknikleriyle güçlendirilerek karşılaştırılmıştır. Yapılan testlerde güçlendirme malzemesinin katkısını kıyaslamak amacıyla bir adet kiriş referans seçilerek güçlendirilmeden test edilmiştir.

## **1.2 Tez Bölümlerine Bakış**

Tez toplam yedi bölümden oluşmaktadır. Tez kapsamında yürütülen deneyler polimer kompozit testleri ve betonarme kiriş testleri olmak üzere iki farklı alandan oluşmaktadır. Betonarme kiriş testlerine başlanmadan önce en uygun güçlendirme malzemesini bulmak amacıyla 19 farklı konfigürasyonda kompozit numune üretilmiştir. Bu numuneler arasından maliyet ve dayanım açısından en uygun kompozit seçilmiş ve kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlere uygulanarak güçlendirilmiştir. Güçlendirilen ve referans kirişlere dört noktalı eğilme testleri yapılarak mekanik performansları incelenmiştir.

*İkinci Bölüm*'de güçlendirme malzemesi olarak kullanılacak polimer kompozitlerin vakum infüzyon yöntemiyle üretiminde izlenen yol, kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri, malzemelerin üretime hazırlanması ve gerçek boyutlu laminelerin üretilme adımları detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

*Üçüncü Bölüm*'de aşamalı olarak üretilen farklı konfigürasyondaki kompozitlerin kalınlıkları, kopma uzamaları, elastisite modülleri, maksimum çekme kuvveti, çekme dayanımı, maksimum eğilme kuvveti, tokluk ve eğilme dayanımı değerleri yük-sehim, yük-uzama ve gerilme-birim uzama grafikleri sunularak yorumlanmıştır.

*Dördüncü Bölüm'de* kesme dayanımı yetersiz betonarme deney elemanlarının kesit özellikleri, kullanılan beton ve donatı malzemesinin özellikleri sunulmuştur. Malzeme ve kesit özelliklerine ek olarak kullanılan betonarme kirişlerin üretim adımları da bu bölümde açıklanmıştır.

*Beşinci Bölüm'de* kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin test adımları, yükleme sonrası referans numuneye göre mekanik performansta elde edilen katkı ve betonarme kiriş davranışı detaylı bir şekilde yorumlanmıştır.

*Altıncı Bölüm'de* yapılan testler dayanım ve davranış, rijitlik, süneklik ve enerji tüketimi alt başlıkları altında değerlendirilerek sunulmuştur.

*Yedinci Bölüm'de* yapılan test sonuçları detaylı bir şekilde sunularak değerlendirmeler yapılmıştır. Kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin vakum infüzyon yöntemiyle üretilen kompozitlerle güçlendirilmesinin avantaj ve dezavantajları tartışılmış ve önerilerde bulunulmuştur.

### **1.3 Literatür Özeti**

Betonarme yapılarda yapıya gelen yüklerin döşemelerden kirişlere kirişlerden kolonlara ve kolonlardan da temele iletilmektedir. Bu bağlamda yatay taşıyıcı eleman olan betonarme kirişlerde eğilme momenti ve kesme kuvvetine ek olarak aksel kuvvet ve burulma momenti de oluşabilmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda sonuçları daha iyi irdeleyebilmek için betonarme kiriş davranışına hakim olmak gerekmektedir.

Genellikle kesme kuvveti ve eğilme momentine maruz kalan betonarme kirişlerde kesme gerilmesi ve asal çekme gerilmeleri sonucunda betonun düşük çekme dayanımı nedeniyle ani kesme kırılmaları meydana gelmektedir. Bu tür kırılmalar ani ve gevrek olup kırılmadan önce tahmin edilemediği için son derece tehlikelidir (Hamrat vd., 2020; Wakjira ve Ebead, 2018). Bu sebeple betonarme kirişin kesme dayanımına ulaşmadan eğilme kapasitesine ulaşması son derece önemlidir.

Yapılan araştırmalar sonucunda kesme dayanımı yetersiz betonarme kiriş davranışı üzerine literatürde mevcut birçok çalışma bulunmaktadır. Özetlenen çalışmaların güncel ve günümüzde kullanılan teknolojiyle üretilen çalışmalar olması amacıyla literatür özeti bölümünde son 15 yılda yayımlanan makaleler seçilmiştir. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

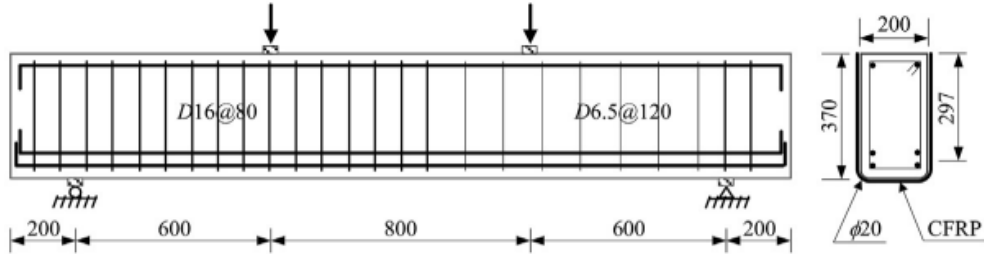
Kim, Sim, ve Oh (2008), yaptığı çalışmada 11 adet betonarme kirişi simetrik iki tekil yük altında test etmiştir. Çalışmada 1400 mm veya 2000 mm uzunluğunda 250×250 mm kesit özelliklerine sahip kesme dayanımı yetersiz olarak tasarlanan betonarme kirişler kullanılmıştır. Betonarme kirişlerin 28 günlük beton basınç dayanımları 24,7 MPa'dır. Deney programında 2,2 ve 1,7 a/d oranlarına sahip birer kiriş referans olarak belirlenmiş ve güçlendirme işlemi uygulanmadan test edilmiştir. Çalışmada olarak a/d oranı (1,7 veya 2,2), güçlendirme malzemesi tipi (CFRP veya CFS), güçlendirme malzemesi oryantasyonu (45°,90°) ve güçlendirme tipi (kanat veya şerit) test değişkenleri olarak belirlenmiştir. CFS malzemesiyle güçlendirilen bütün kirişler kesme kırılmasından göçmüştür. CFRP malzemesiyle kanat şeklinde güçlendirilen a/d oranı 2,2 olan kiriş hariç CFRP malzemesiyle güçlendirilen kirişlerde FRP malzemesinin delaminasyonu sonucunda gevrek kesme kırılması görölmüştür. CFRP malzemesiyle 45° şerit şeklinde güçlendirilen 1,7 a/d oranına sahip betonarme kirişlerde diyagonal çatlaklar yerine dikey çatlaklar oluştuğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi güçlendirme malzemesinin 45° yönlendirilmesi sonucu diyagonal çatlakları önlemesidir. FRP malzemesinin kullanımıyla kirişlerin kesme dayanımı %50-%70 oranında artmıştır. şerit şeklinde uygulanan ve a/d oranı 1,7 olan kirişlerde CFRP malzemesinin 45° açıyla yapıştırılması 90° yapıştırılan kirişlere göre %14 daha fazla dayanım artışı göstermiştir. Test sonuçları analitik model oluşturularak kıyaslanmıştır.

Al-Tersawy (2013), yaptığı çalışmada 9 adet betonarme kirişi simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. 1800 mm uzunluğundaki betonarme kirişlerin kesit boyutları 100×200 mm boyutlarındadır. Kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) 2,00'dır. Farklı beton dayanımının kirişin kesme performansına etkisini incelemek amacıyla betonarme kirişler iki farklı beton dayanımına sahip karışımla üretilmiştir (21 MPa ve 35 MPa). Yapılan testlerde kirişler 3 gruba ayrılmıştır. Birinci grupta iki

adet farklı beton dayanımına sahip kiriş vardır ve güçlendirme işlemi uygulanmadan test edilmiştir. İkinci grupta dört adet betonarme kiriş vardır. İkinci gruptaki kirişler farklı fiber yönleriyle güçlendirilen (90 ve 45 derece) betonarme kirişlerin kesme dayanımına katkısını araştırmak amacıyla test edilmiştir. Üçüncü grupta üç adet betonarme kiriş test edilmiştir. Bu gruptaki testlerde CFRP kalınlığı ve beton dayanımı değişiminin betonarme kirişin kesme performansına etkisi araştırılmıştır. Yapılan testlerde CFRP güçlendirmesinin kiriş kesme dayanımına katkı sağladığı bulunmuştur. CFRP malzemesinin kalınlığının ve yönlendirmesinin test sonuçlarını etkilediği görülmüştür. 45 derece yönlendirilerek uygulanan CFRP malzemesinin kesmeye katkısının daha fazla olduğu görülmüştür.

Alam ve Al Riyami (2018), yaptığı çalışmada 2300 mm uzunluğunda, 150×300 mm boyutlarında 8 adet betonarme kiriş test edilmiştir. Kesme açıklığı 550 mm olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmada güçlendirme plakaları modifikasyon işlemi görmüş ve görmemiş şekilde kenaf lif, jüt lif ve jüt lifinden üretilen halatlar el yatırma yöntemi uygulanarak üretilmiştir. Doğal liflerle güçlendirilen kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlere sağlanacak katkıyı kıyaslamak amacıyla bir adet kontrol kirişi ve bir adet CFRP ile güçlendirilmiş kiriş test edilmiştir. Doğal liflerle üretilen laminelerin kalınlıkları, genişlikleri ve uzunlukları sırasıyla 6 mm, 35 mm, 300 mm'dir. CFRP plaka kalınlığı 1,2 mm ve diğer boyutları doğal liflerle üretilen plakalarla aynıdır. Güçlendirme malzemeleri kirişlere 100 mm boşluk bırakılarak şerit şeklinde uygulanmıştır. Güçlendirme işleminde epoksi yapıştırma ve ankraj uygulaması birlikte yapılmıştır. Yapılan ön testlerde doğal liflerle üretilen plakaların maksimum çekme dayanımı 137 MPa'dır. Kenaf ve jüt liflerle üretilen plakalar jüt halatlarla üretilen plakalara göre daha yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülüne sahiptir. Betonarme kiriş testlerinde modifikasyon işlemi uygulanmamış kenaf, jüt ve jüt halatlarla üretilen plakalar kontrol kirişine göre sırasıyla %35, %36 ve %34 dayanım artışı sağlamıştır. Modifikasyon işlemi uygulanan kenaf, jüt ve jüt halatlarla üretilen plakalarda ise kontrol kirişine göre sırasıyla %10, %23 ve %31 dayanım artışı elde edilmiştir. Doğal liflere güçlendirilen betonarme elemanlarda CFRP ile güçlendirilen elemanlara göre daha yüksek kırılma yükü ve sünekliğe sahip olduğu bulunmuştur.

Zhou vd. (2019), yaptığı çalışmada 5 adet 370×200×2400mm boyutlarında betonarme kiriş kesme açıklığı birbirine eşit iki tekil yük altında test edilmiştir. Kesit özellikleri Şekil 1.1’de verilen kirişin kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı ( $a/d$ ) 2, paspayı 30 mm’dir.



Şekil 1.1 Betonarme kiriş kesit ve boy kesiti (Zhou vd., 2019)

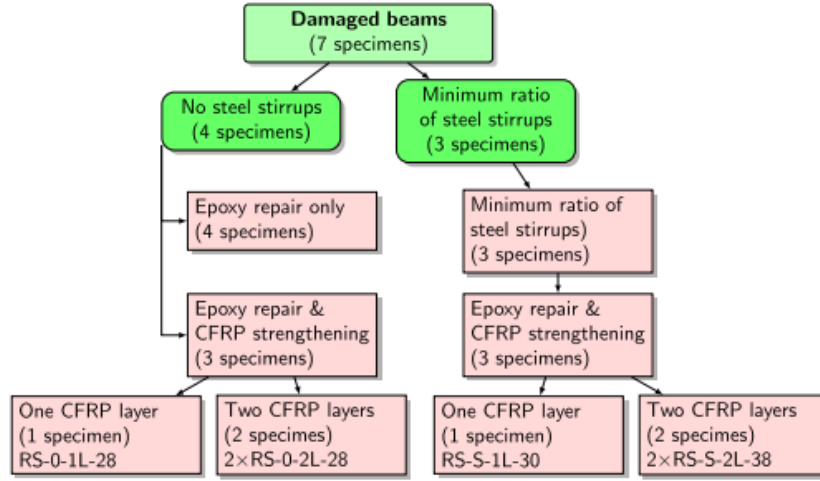
Testlerdeki değişken CFRP şeritlerinin bağlanma şeklidir. Aynı geometriye sahip kirişlerden bir adet kontrol kirişi, bir kiriş karbon fiber polimer malzemesinin U şeklinde dıştan yapıştırılmasıyla ve kalan üç kiriş de CFRP şeritlerinin sırasıyla 3,6,12 Nm tork altında mekanik ankrajlanmasıyla güçlendirilmiştir. Deney sonrasında bütün kirişler eğilme kapasitesine ulaşmadan kesme kırılmasından geçmiştir. 12 Nm tork uygulanarak güçlendirilen kiriş CFRP malzemesinin koptuğu gözlemlenirken diğer kirişlerde güçlendirme malzemesinin sıyrıldığı gözlemlenmiştir. Yapılan deney sonuçlarına göre güçlendirilen kirişlerin kesme dayanımlarında %9,2-%43,9 arasında artış olduğu gözlemlenmiştir. Kesme dayanımındaki en büyük artışın mekanik ankraj sisteminin 12 Nm torkla sıkılması sonucu olduğu gözlemlenmiş ve bu parametrenin kiriş dayanımı ve davranışını etkileyen bir değişken olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Fayed, Basha, ve Hamoda (2019), yaptığı çalışmada 1800 mm uzunluğunda, 100×200mm boyutlarında 24 adet betonarme kirişe dört noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Tekil yüklerin mesnetlere olan uzaklıkları ve birbirine uzaklıkları eşit ve 566.7 mm’dir. Kirişlerin sol mesnetten itibaren ilk 2/3’lük kısmında Ø8/81 mm ve son 1/3’lük kısmı boyunca kesme kırılmasına yönlendirmek amacıyla Ø6/188.9 mm etriye kullanılmıştır. Betonarme kirişler 28 günlük standart küp numune beton basınç dayanımları sırasıyla 27,6 MPa ve 20,5 MPa olan iki farklı beton karışımı ile üretilmiştir. Aynı kesit özelliklerine sahip betonarme kirişler 5 gruba ayrılmıştır. İlk 4

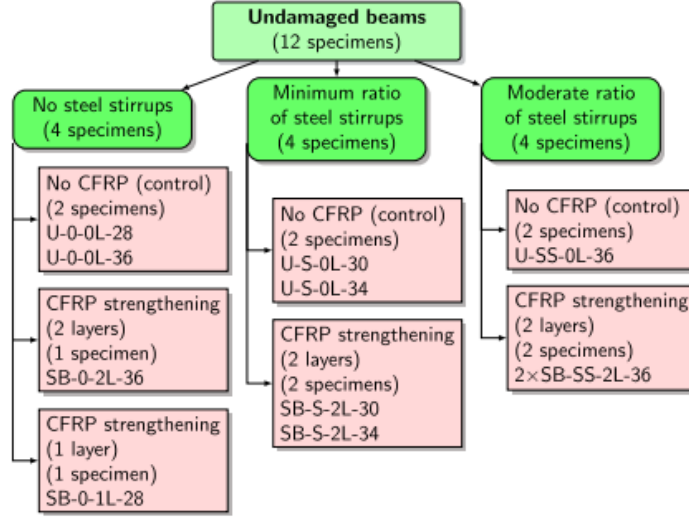
grupta 27,6 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanılırken son grupta 20,5 MPa beton basınç dayanımına sahip beton kullanılmıştır. Güçlendirilen bütün kirişlerde kullanılan alüminyum plaka kalınlığı 1,12 mm'dir. 1. Grupta bir adet kontrol kirişi ve altı adet güçlendirilen kiriş olmak üzere toplam yedi kiriş kullanılmıştır. Bu grupta plaka yüksekliği (100 mm, 150 mm, 180 mm) plaka genişliği (15 mm veya 30 mm) ve plakalar arasındaki uzaklık (67 mm veya 32,5 mm) test değişkeni olarak belirlenmiş ve tüm plakalar kiriş yüzeyine dik olarak yerleştirilmiştir. 2. Grupta bir adet kontrol kirişi ve 4 adet güçlendirilen kiriş olmak üzere toplam beş kiriş kullanılmıştır. Bu grupta bütün alüminyum plakalar kiriş yüzeyine yatay eksenle 45 derece açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu grupta test değişkenleri olarak alüminyum plaka sayısı (9 veya 18 adet) ve boyutları (30×100 mm, 30×150 mm, 15×100 mm, 15×150 mm) seçilmiştir. 3. Grupta bir adet kontrol kirişi ve 4 adet güçlendirilen kiriş olmak üzere toplam beş kiriş kullanılmıştır. Bu grupta bütün alüminyum plakalar kiriş yüzeyine yatay eksenle 45 derece açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu grupta alüminyum plaka genişliği (15 mm veya 30 mm), alüminyum plaka adedi (1 veya 2) ve alüminyum plakanın kirişe güçlendirme tipi (ankraj veya ankraja ek olarak epoksi yapıştırıcı) test değişkeni olarak belirlenmiştir. Bütün plakaların uzunluğu 525 mm'dir. 4. Grupta bir adet kontrol kirişi ve 4 adet güçlendirilen kiriş olmak üzere toplam beş kiriş kullanılmıştır. Bu grupta bütün alüminyum plakalar kiriş yüzeyine yatay olarak yerleştirilmiştir. Bu gruptaki bütün plakaların uzunluğu 566,7 mm'dir. Bu grupta alüminyum plaka sayısı (1 veya 2), alüminyum plaka genişliği (30 mm veya 15 mm) ve alüminyum plakanın kirişe yapıştırılma şekli (ankraj veya ankraja ek olarak epoksi yapıştırıcı) test değişkeni olarak belirlenmiştir. 5. Grupta bir adet kontrol kirişi ve 3 adet güçlendirilen kiriş olmak üzere toplam dört kiriş kullanılmıştır. Bu grupta üretilen betonarme kirişlerin beton dayanımları 20,5 MPa'dır. Bu gruptaki güçlendirme şekilleri önceki gruplarda kullanılan güçlendirme şekilleriyle aynıdır. Bu grupta yapılan testlerin temel amacı farklı güçlendirme şekillerinin düşük beton sınıfına sahip betonarme kirişlerin kesme dayanımına katkısını incelemektir. Yapılan test sonuçlarında 2. Grupta yer alan 30×100 mm boyutlarında 9 adet alüminyum plaka kullanılan ve 30×150 mm boyutlarında 9 adet kullanılarak güçlendirilen kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin eğilmeden göçtüğü görülmüştür. Yapılan testlerde diğer kirişler kesme kırılmasından göçmüştür. Yapılan testlerde alüminyum

plakalarla farklı konfigürasyonlarda yapılan güçlendirme tiplerinin kesme dayanımına katkısı %76,8'e kadar çıkmıştır.

Leblouba, Toubat, Al, ve Maalej (2019), yaptığı çalışmada toplam 2700 mm uzunluğunda, 390×230 mm kesit boyutlarında toplam 19 adet betonarme kiriş test edilmiştir. Betonarme kirişlerin kesme açıklığı 1150 mm ve faydalı yüksekliği 330 mm'dir. Kirişlerden 12 tanesi ön hasarsız kalan 7 tanesi ön hasarlı olarak test edilmiştir. Ön hasarlı kirişlerden 4 tanesinde etriye kullanılmayıp kalan 3 kirişte ACI 318 standartlarına göre minimum etriye oranı kullanılarak üretilmiştir. Etriye kullanılarak üretilen ön hasarlı kirişlerden 1 tanesi sadece epoksi reçine kullanılarak onarılmıştır, kalan 3 kiriş ise epoksi reçineyle onarılmaya ek olarak bir veya iki katman CFRP şerit kullanılarak güçlendirilmiştir. 12 adet ön hasarsız kirişler etriye oranına göre etriyesiz, minimum etriye oranı ve minimum etriye oranının yaklaşık iki katı etriye kullanılarak üretilmesi suretiyle 3 gruba ayrılmıştır. Her grupta toplam 4 adet kiriş bulunurken bunlardan 2'ser tanesi kontrol kirişi olarak test edilmiştir. Kalan kirişler CFRP şeritleri kullanılarak bir veya iki katman olarak güçlendirilmiştir. Ön hasarlı ve hasarsız kirişlerin akış şeması Şekil 1.2'de gösterilmiştir.



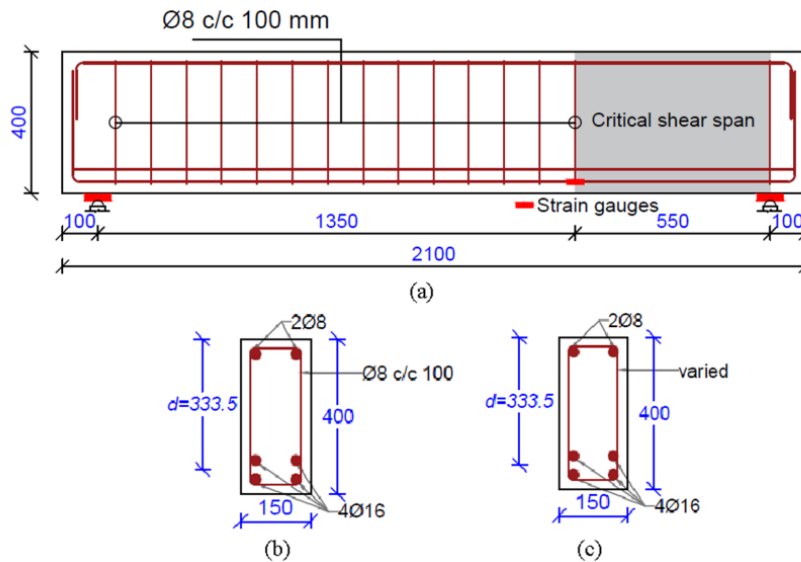
(a)



Şekil 1.2 Betonarme kiriş akış şeması (Leblouba vd., 2019)

Yapılan testler sonucunda güçlendirme sonrası elemanların kesme dayanımlarında referans elemanlara göre %24-%104 arasında dayanım artışı gözlemlenmiştir. Ön hasarlı betonarme kirişlerde onarılma işlemi sonrası yapılan testlerde kesme dayanımında başarılı sonuçlar gözlemlenmiştir. Minimum etriye oranıyla iki katman olarak güçlendirilen kirişlerin betonun ezilmesi ve eğilmeden göçtüğü gözlenmiştir. Yapılan testler betonarme kirişlerde CFRP malzemesi ile kesme donatısı sayısında etkileşim olduğunu göstermiştir. Bu etkileşim betonarme kirişteki kesme donatısı sayısının artışıyla CFRP malzemesinin kesme kapasitesine katkısının ters orantılı olduğunu göstermiştir.

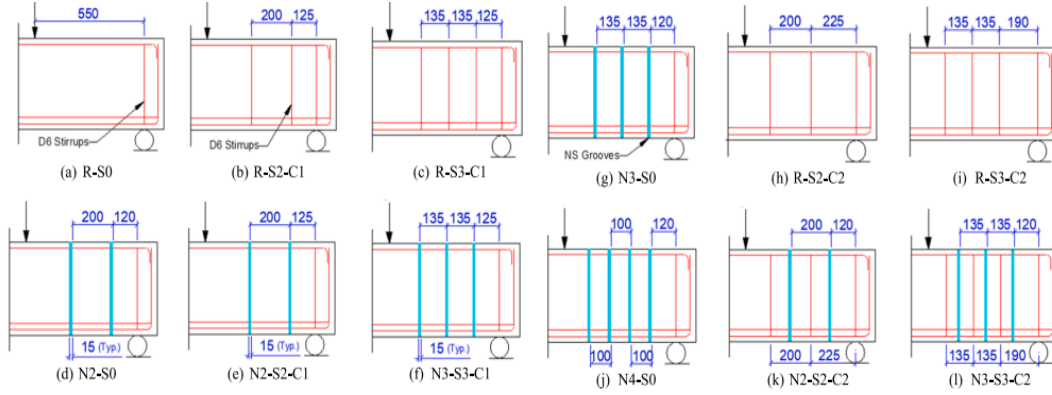
Ibrahim, Wakjira, ve Ebead (2020), yaptıkları çalışmada karbon ve cam fiberle oluşturulmuş hibrit polimerlerin kesme dayanımı yetersiz dikdörtgen enkesitli derin kirişlere yakın yüzey tekniğiyle (NSM) uygulanmasının kesme dayanımına katkısını incelenmiştir. Çalışma kapsamında beş adet güçlendirilmemiş ve yedi adet güçlendirilmiş kiriş test edilmiştir. Kirişler 28 günlük standart silindir basınç dayanımı 40 MPa olarak beton kullanılarak üretilmiştir. 2100 mm uzunluğunda, 150×400 mm boyutlarında 12 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş mesnetten 550 mm uzaklıktaki tekil yük uygulanarak test edilmiştir. Yükleme monotonik olarak gerçekleştirilmiştir. Betonarme kirişin a/d oranı (kesme açıklığı/faydalı yükseklik) 1.65'tir. Temiz açıklığı 1900 mm olan kirişin 1350 mm uzunluğundaki kısmında  $\Phi 8/100$  mm aralıkla etriye kullanılırken kalan 550 mm olan kısmında etriye kullanılmamıştır (Şekil 1.3).



Şekil 1.3 Kiriş kesit ve boy kesiti (Ibrahim vd., 2020)

Araştırmada değişken olarak kritik kesme açıklığında kullanılan çelik etriye sayısı (üç, iki ve sıfır adet), NSM-FRP şerit sayısı (dört, üç ve sıfır adet) ve FRP/etriye konfigürasyonları (hızalı ve hizasız) olarak belirlenmiştir. Kullanılan etriyelerin ve NSM-FRP şeritlerin konfigürasyonları Şekil 1.4'te gösterilmiştir. Şekil 1.4'te gösterilen isimlendirmelerde R referans elemanı, S kritik kesme açıklığında kullanılan etriye sayısını (sıfır, iki veya üç), N NSM-FRP sayısını (iki, üç veya dört), C1 ve C2

ise güçlendirilen kirişlerdeki FRP ve etriyelerin sırasıyla hizalanıp hizalanmadığını göstermektedir.



Şekil 1.4 NSM-FRP ve etriye konfigürasyonları (İbrahim vd., 2020)

Hibrit karbon/cam NSM-FRP ile güçlendirilen kirişlerin tamamı eğilme kapasitesine ulaşmadan kesme kırılmasından göçmüştür. Güçlendirme işlemi kirişlerin yük taşıma kapasitelerini %28,8-%55,8 arasında artırmıştır. Yakın yüzey tekniğiyle (NSM) güçlendirilen kirişlerin maksimum yükteki çatlak genişliğini önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Çelik etriye kullanılan ve kullanılmayan kirişlerde çatlak genişliği sırasıyla %45 ve %36 oranında azalmıştır. FRP ve çelik etriyeler hizalanmadan güçlendirilen kirişlerde hizalanan kirişlere göre nispeten daha iyi performans göstermiştir. Bu davranış hizalanmadan güçlendirilen kirişlerde etriye açıklığının azalmasından kaynaklanmaktadır.

Zheng vd. (2020), yaptığı çalışmada 6 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş testi yapmıştır. Güçlendirme malzemesi ızgara şeklinde Bazalt Fiber Takviyeli Polimerin Çimento Esaslı Kompozitin birleştirilmesiyle üretilmiştir. Deney programında bir adet referans ve beş adet kesme bölgesi güçlendirilmiş betonarme kiriş test edilmiştir. Test edilen kirişler 200×300 mm kesitlerinde ve referans kiriş dahil olmak üzere dört adet kiriş 1800 mm bir adet kiriş 2200 mm ve bir adet kirişin ise 2700 mm uzunluğundadır. Betonarme kirişleri test sırasında kesme kırılmasına yönlendirmek amacıyla 6 mm kalınlığındaki etriyeler 200 mm arayla kullanılmıştır. BFRP ızgara takviye oranının kesme dayanımına katkısını araştırmak amacıyla farklı kalınlıklarda BFRP ızgaraları

kullanılmıştır (1mm, 3mm, 5mm). Buna ek olarak kontrol kirişi dahil olmak üzere dört kirişin a/d oranı 2,40, bir kiriş 3,28 ve bir adet kirişin ise 4,37'dir (Tablo 1.1).

Tablo 1.1 Deney elemanı detayları (Zheng vd., 2020)

Kiriş	Güçlendirme Tipi	FRP ızgara oranı [%] (kalınlık [mm])	FRP ızgara çekme dayanımı (MPa)	Kesme açıklığı (mm)	Kiriş açıklık uzunluğu (mm)	Kesme açıklığı oranı (mm)
SB0	-	-	-	575	1700	2,40
SB1	BFRP-ECC kompozit tabakası	0,03 (1)	357	575	1700	2,40
SB2		0,12 (3)	386	575	1700	2,40
SB3		0,20 (5)	416	575	1700	2,40
SB4		0,12 (3)	386	786	2000	3,28
SB5		0,12 (3)	386	1048	2500	4,37

Test edilen kirişlerin beton sınıfı C30'dur. Yapılan test sonuçlarına göre a/d oranı 4,37 ve BFRP ızgara kalınlığı 3 mm olan kiriş basınç bölgesindeki betonun ezilmesinden dolayı, a/d oranı 2,40 ve BFRP ızgara kalınlığı sırasıyla 1 mm, 3 mm, 5 mm olan kirişler kesme kırılmasına ek olarak güçlendirme malzemesinde kısmi olarak sıyrılmaya sonuca geçmiştir. Referans kirişe ek olarak a/d oranı 3,28 ve BFRP ızgara kalınlığı 3 mm olan kirişler kesme kırılmasından geçmiştir. Yapılan testlerde betonarme kirişlerin kesme kapasitelerinde %27-%59 arasında artış gözlemlenmiştir.

Yang, Gao, Dai, ve Lu (2020), yaptığı çalışmada 1500 mm veya 1900 mm uzunluğunda, 150×300 mm boyutlarında 12 adet betonarme kirişe üç noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Tekil yük kiriş ortasından uygulanmıştır. Uygulanan yükün sağ tarafında etriye kullanılırken sol tarafında etriye kullanılmamıştır. Etriye kullanılmayan tarafın kesme açıklığı 600 mm veya 800 mm uzunluğundadır. Betonarme kirişlerin a/d oranları sırasıyla 2,26 ve 3,02'dir. Deney programında çimento matris tipi (ECC veya PMM), FRP ızgara malzemesi (CFRP veya BFRP), betonarme kiriş hazırlama metodu (prefabriğe veya yerinde döküm) ve a/d oranı (kesme açıklığı 600 mm olan kirişlerde 2,26 kesme açıklığı 800 mm olan kirişler için 3,02) Tablo 1.2'de gösterildiği gibi test değişkenleri olarak belirlenmiştir. 12 adet betonarme kiriş a, b ve c olmak üzere üç seriye ayrılmıştır. Bu bağlamda a serisinde a/d oranı 2,26 olan 4 kiriş test edilmiştir. Bu seride bir adet kiriş güçlendirilmeden test edilirken kalan kirişler ECC çimento matrisiyle güçlendirilmiştir. B serisinde ise a serisi ile aynı a/d oranına sahip 4 adet betonarme kiriş test edilmiştir. A serisinden

farklı olarak b serisinde BFRP veya CFRP malzemesinden üretilen ızgaralar güçlendirmede kullanılmıştır. C serisinde a/d oranı 3,02 olan dört kiriş test edilmiştir. Matris tipi olarak ECC malzemesi kullanılırken bir kirişte matrise ek olarak güçlendirme malzemesi olarak CFRP ızgarası kullanılmıştır.

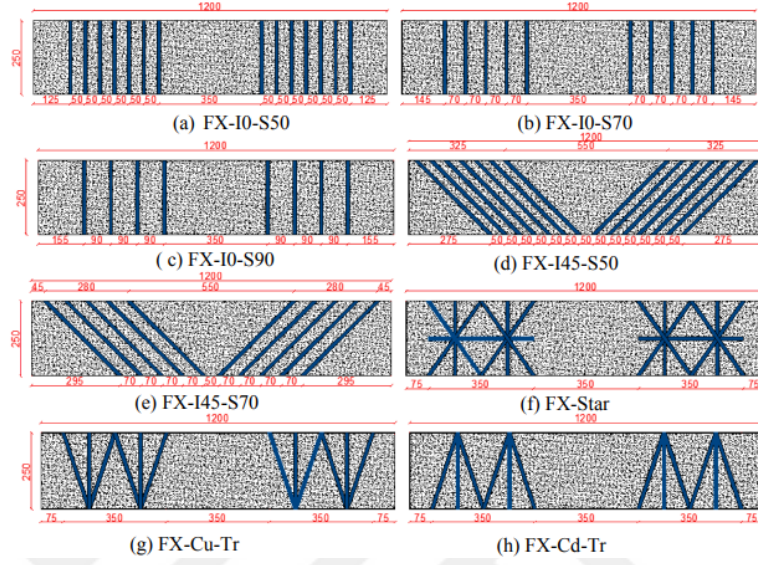
Tablo 1.2 Test edilen kirişlerin tasarım parametreleri (Yang vd., 2020)

Seriler	Numune kodu	Kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı	Matris tipi	FRP ızgara tipi	FRP ızgara güçlendirme oranı (%)	Beton döküm şekli
a	a-0	2,26	-	-	-	-
	a-N-E-Cast		ECC	-	-	Yerinde döküm
	a-N-E-Pre		ECC	-	-	Prefabrik
	a-N-M-Pre		PMM	-	-	Prefabrik
b	b-B-E-Cast	2,26	ECC	BFRP	1,69	Yerinde döküm
	b-B-E-Pre		ECC	BFRP	1,69	Prefabrik
	b-C-E-Pre		ECC	CFRP	3,52	Prefabrik
	b-B-M-Pre		PMM	BFRP	1,69	Prefabrik
c	c-0	3,02	-	-	-	-
	c-N-E-Cast		ECC	-	-	Yerinde döküm
	c-N-E-Pre		ECC	-	-	Prefabrik
	c-C-E-Pre		ECC	CFRP	3,52	Prefabrik

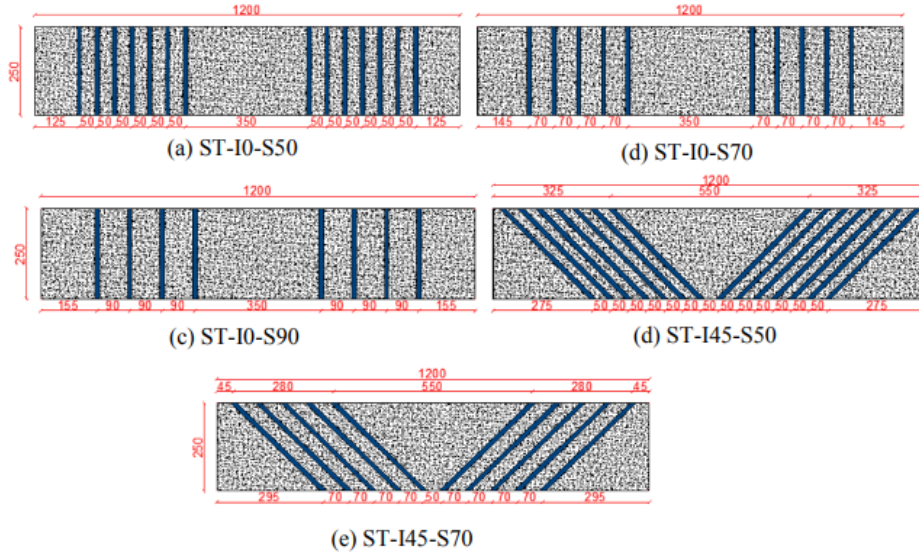
Yapılan testlerde FGREM kompozitlerin kesme kapasitesine önemli ölçüde katkıda bulunduğu görülmüştür. Referans kirişlere göre güçlendirilen betonarme kirişlerin kesme dayanımında %51-%160,9 arasında artış elde edilmiştir. Test sonuçları FGREM kompozitlerde BFRP ızgaralarının kesme dayanımına katkısının CFRP kompozitlere göre daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Saadah, Ashteyat, ve Murad (2021), yaptığı çalışmada 1200 mm uzunluğunda, 150×250 mm boyutlarında 15 adet kiriş simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. İki tekil yük sırasıyla sol mesnetten 400 mm ve 700 mm uzaklıktadır. Betonarme kirişlerin 28 günlük standart silindir numune basınç dayanımı 20 MPa'dır. Test numunelerini kesme kırılmasına yönlendirmek amacıyla 8 mm çapındaki etriyeler 400 mm arayla konulmuştur. Güçlendirme malzemesi olarak CFRP çubuk veya şeritler kullanılmıştır. Deney programında CFRP malzemesinin kirişe uygulanma açısı, CFRP malzemesi arasındaki boşluklar, şerit veya çubuk kullanımı ve farklı güçlendirme

konfigürasyonları değişken olarak belirlenmiştir. Yakın yüzey tekniğiyle (NSM) güçlendirilen kirişlere uygulanan CFRP çubuk ve şeritlerin konfigürasyonları sırasıyla Şekil 1.5 ve Şekil 1.6’da gösterilmektedir.



Şekil 1.5 CFRP çubuk konfigürasyonları (Saadah vd., 2021)



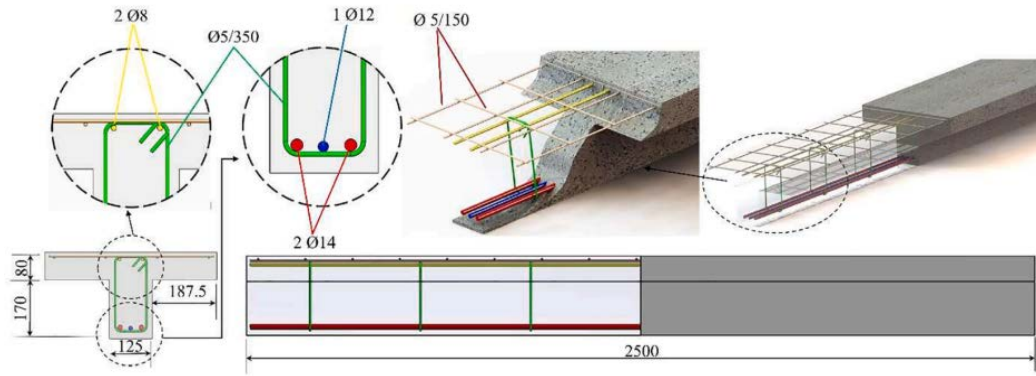
Şekil 1.6 CFRP şerit konfigürasyonları (Saadah vd., 2021)

Test sonuçlarına göre CFRP malzemesinin eğimli yerleştirilmesiyle güçlendirilen kirişlerin yük taşıma kapasiteleri %150-%170 arasında artış gözlemlenmiştir. Eğimli

uygulanarak güçlendirilen kirişlerde CFRP çubuk veya şeritler arasındaki mesafenin azaltılması yük taşıma kapasitesini %24 oranında arttırmıştır.

Tanarşlan, Yalçınkaya, Alver, ve Karademir (2021), yaptığı çalışmada 6 adet betonarme kirişi simetrik iki tekil yük altında test etmiştir. 3200 mm uzunluğundaki betonarme kirişlerin kesit boyutları 150×250 mm boyutlarındadır. Kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) 4,55'dir. Betonarme kirişlerin beton dayanımları ortalama 20,3 MPa'dır. Betonarme kirişler kesme dayanımı yetersiz olarak tasarlanmıştır. Temiz açıklık ve yükler arasındaki mesafe sırasıyla 3000 mm ve 700 mm'dir. Güçlendirme malzemesi olarak ultra yüksek performanslı fiber takviyeli beton (UHPFRC) kullanılmıştır. Deney programında Kiriş-1 referans kiriş olarak belirlenmiştir ve güçlendirilmeden test edilmiştir. Kiriş-2 30 mm kalınlığında ve 250×1000 mm boyutlarındaki UHPFRC plakaların kirişin kesme açıklıklarına epoksi malzemesiyle yapıştırılmasıyla güçlendirilmiştir. Kiriş-3 ise Kiriş-2 ile aynı boyutlara sahip UHPFRC plakaların kirişlere mekanik ankrajlanmasıyla güçlendirilmiştir. Kiriş-4 50 mm kalınlığında, 250×1000 mm boyutlarındaki UHPFRC plakaların epoksi malzemesiyle yapıştırılarak güçlendirilmiştir. Kiriş-5 ise Kiriş-4 ile aynı boyutlara sahip UHPFRC plakaların betonarme kirişe mekanik ankrajlanmasıyla güçlendirilmiştir. Kiriş-6 30 mm kalınlığında, 100×250 mm boyutlarındaki UHPFRC şeritlerin 50 mm arayla kirişin kesme açıklıklarına epoksi malzemesi kullanılarak yapıştırılmasıyla güçlendirilmiştir. Test sonuçlarında referans kirişe göre güçlendirilen kirişlerin kesme dayanımlarında %26-%47 arasında artış olduğu bulunmuştur. UHPFRC lamine kalınlığı 30 mm'den 50 mm'ye çıkarıldığında davranışın kesmeden eğilmeye yöneldiği görülmüştür. Kalınlık artışı epoksiyle yapıştırılan kirişlerde %7 dayanım artışı sağlarken mekanik ankrajla yapıştırılan kirişlerde %22 dayanım artışı sağlamıştır.

Arşlan vd. (2022), yaptığı çalışmada 9 adet T kesitli betonarme kiriş testi yapmıştır. T kesitli betonarme kirişlere birbirine simetrik iki noktadan tekdüze yükleme gerçekleştirilmiştir. Kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) 3 olarak belirlenmiştir. Kesit detayları Şekil 1.7'de gösterilen T kesitli betonarme kirişlerin toplam uzunluğu 2500 mm ve diğer kesit özellikleri Şekil 1.7'de gösterilmiştir.



Şekil 1.7 T kiriş kesit detayı (Arslan vd., 2022)

Üretilen betonarme kirişin 28 günlük beton basınç dayanımı yaklaşık 29 MPa'dır. Yapılan çalışmada CFRP malzemesinin T kesitli betonarme kirişlere farklı konfigürasyonlarda uygulanmasının kirişlerin kesme dayanımına katkısı incelenmiştir. Bu bağlamda bir adet kontrol kirişi dışında a) 70×295 mm boyutlarında U şeklinde simetrik CFRP şeritler kullanılarak b) 70×465 mm boyutlarında U şeklinde simetrik CFRP şeritler kullanılarak c) 70×840 mm boyutlarında U şeklinde simetrik CFRP şeritler kullanılarak d) 70×750 mm boyutlarında döşemenin kırılıp CFRP şeritlerin tam sarılması ve ardından yüksek dayanımlı harçla kapatılması suretiyle e) 70×840 mm boyutlarında U şeklinde simetrik CFRP şeritlerin kirişe iki taraftan 90 derece açı yapacak şekilde fan tipi CFRP ankrajlarıyla f) 70×840 mm boyutlarında U şeklinde simetrik CFRP şeritlerin kirişe iki taraftan 45 derece açı yapacak şekilde fan tipi CFRP ankrajlarıyla ve g) 790×840 mm boyutlarında U şeklinde simetrik CFRP şeritler kullanılarak güçlendirilmesiyle elde edilen kirişler test edilmiştir. Test edilen bütün kirişler gevrek kesme kırılmasından göçmüştür. Ancak yapılan test sonuçlarına göre kesme dayanımında %23,5-%56,9 arasında artış gözlemlenmiştir. Kesme dayanımına en yüksek katkı 790×840 mm boyutlarında CFRP malzemesinin kiriş kesme bölgesine U şeklinde sürekli olarak sarılmasıyla elde edilmiştir. CFRP malzemesinin şerit şeklinde sarılmasıyla elde edilen sonuçlar arasında kesme dayanımında en yüksek artış (%53,8) CFRP malzemesinin fan tipi 45 derece ankrajlanmasıyla güçlendirilen kirişte gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlar CFRP malzemesinin kirişe uygulanma tekniğinin ve sürekliliğinin betonarme kirişin kesme dayanımına katkısını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

Qasim, Lee, ve Zhang (2023), yaptığı çalışmada 3500 mm uzunluğunda, 200×325 mm boyutlarında 1 adet referans ve SPH-ECC katmanlarıyla farklı konfigürasyonlarda güçlendirilen 50 mm kalınlığında 3 adet betonarme kiriş test etmiştir. Kirişlerin yeterli kesme dayanımına sahip olmasını sağlamak amacıyla 12 mm çapındaki etriyeler kesme ve eğilme açıklıklarında sırasıyla eksenden eksene 100 mm ve 125 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Yükleme birbirine simetrik iki tekil yük altında gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler sonucunda güçlendirilen betonarme kirişlerin eğilme dayanımları kontrol kirişe göre %125 ile %210 seviyelerine kadar arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan testler sonucunda SPH-ECC malzemesinin arayüzeyden sıyrılma davranışının güçlendirme konfigürasyonuna oldukça bağımlı olduğu görülmüştür. Yapılan testlerde kesme açıklığı 1000 mm olarak belirlenmiştir. Çalışmada CB kodlu kiriş referans kiriş olmak üzere SB1, SB2, SB3 kirişleri sırasıyla kirişin alt yüzeyinden, kirişin yan yüzeylerinden ve kirişi U şeklinde saracak şekilde yapıştırılmasıyla güçlendirilmiştir. Yapılan test sonuçlarına göre SB1, SB2, SB3 kirişleri kontrol kirişe göre sırasıyla %26,6, %185 ve %210 dayanım artışı göstermiştir. SB1 kirişinin diğer kirişlere göre daha az dayanım göstermesinin temel sebebi SB1 kirişi ile SPH-ECC malzemesinin kiriş arayüzeyinden erken sıyrılmasıdır. SB3 kirişinin SB2 ve diğer kirişe göre daha fazla dayanım artışı sağlamanın temel sebebi daha yüksek ve derin kiriş kesiti sağlamanın yanında U şeklinde sarılarak güçlendirildiği için kiriş ve SPH-ECC malzemesi arasında daha fazla temas alanı sağlayarak arayüzey gerilimlerini azalmasını sağlamıştır.

#### **1.4 Literatürün Tartışılması**

Yapılan araştırmalarda güçlendirme malzemesinin oryantasyon açısı, katman sayısı, şerit veya plaka genişliğinin yanı sıra malzemenin genel olarak yakın yüzey güçlendirme tekniği (NSM), ankraj veya el yatırma yöntemi ile kirişe yapıştırılması test değişkenleri olarak belirlenmiştir. Kullanılan malzemelerin ise genellikle karbon, cam veya çelik levha arasında değişkenlik gösterdiği son 15 yılda betonarme kiriş güçlendirmesinde yeni, çevre dostu ve/veya ekonomik malzemenin bulunmayıp kullanılan malzemelerin sürekli kendini tekrar etmesi dikkat çekmektedir. Bu nedenle

son yıllarda yeni malzemelerin betonarme kiriş güçlendirmesinde kazandırılarak bu eksikliğin giderilmesi araştırmacılar için oldukça önemlidir.

Günümüzde sanayileşmenin hızla artması, tarımda kimyasal madde kullanımı, sanayi atıklarının bilinçsizce bertaraf edilmesi sonucu toprak, hava ve su kirliliği oluşmaktadır. Doğaya doğrudan atılarak çevreye zarar veren ve/veya doğal kökenli malzemelerin ekonomiye tekrar kazandırılması hem çevre kirliliğinin azalmasına hem de ekonomiye katkı sağlayacaktır. Bu malzemelerin inşaat sektörüne kazandırılması son derece önem taşımaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda bu alana yönelik çalışmaların çok kısıtlı olduğu görülmüştür.

Farklı malzemelerin kendi içinde kimyasal tepkimeye girmeden birleştirilerek mekanik özellikleri geliştirilmiş yeni malzemeye kompozit malzeme denmektedir. Geçmişten günümüze çeşitli kompozit malzeme üretim teknikleri bulunmaktadır. 2000’li yılların başında makine endüstrisinde kullanılmaya başlayan ve günümüzde popüleriğini kaybetmeyen üretim yöntemlerinden birisi de vakum infüzyon yöntemidir. Bu yöntemde reçineye emdirilen malzemede hava kabarcıkları boşaltıldığı için daha yüksek dayanımlı kompozit üretimini mümkün kılmaktadır.

Yapılan araştırmalarda yenilikçi bir yöntem olan vakum infüzyon yöntemiyle üretilerek kesme dayanımı yetersiz betonarme kiriş güçlendirmesinde kullanılan güçlendirme malzemesinin olmadığı görülmüştür. Bu yöntemle üretilen malzemeler kesme dayanımı yetersiz betonarme kiriş güçlendirmesinde ilk kez bu çalışmada kullanılmıştır. Bu nedenle bu çalışma literatüre önemli bir katkı sağlarken inşaat sektörü için de önemli bir başlangıç olacaktır.

## BÖLÜM İKİ

### POLİMER KOMPOZİT ÜRETİMİ

#### 2.1 Genel

Mevcut betonarme yapılarda tasarım veya işçilik hatalarından dolayı eğilme ve kesme sorunları meydana gelmektedir. Eğilme yetersizliği olan kirişler deprem yükleri altında beklenenden daha düşük bir davranış sergilemektedir. Kesme kırılması ise betonarme yapılar için daha kritik sonuçlara neden olmaktadır. Kesme yetersizliğine sahip betonarme yapı elemanlarında sünek davranış gözlenmeden ani olarak göçme gerçekleşmekte ve gevrek kırılmaktadır. Ayrıca mevcut birçok betonarme yapı elemanında, donatıda oluşan paslanma veya yapıya gelen yüklerin artması gibi nedenlerden dolayı eğilme veya kesme yetersizlikleri ortaya çıkmaktadır.

Betonarme elemanların, sürdürülebilir atık ve/veya doğal lif takviyeli polimer kompozitler kullanılarak güçlendirilmesi literatürde son yıllarda dikkat çeken bir araştırma konusudur (Karalar vd., 2022; Tran vd., 2022). Atık ve/veya doğal malzemelerin kullanımı ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için bilimsel çalışmalar son yıllarda artış göstermiştir (Ramezani & Esfahani, 2023). Bu nedenle bu çalışma kapsamında kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin atık ve/veya doğal lif takviyeli polimer kompozit kullanılarak mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi konusu incelenmiştir.

#### 2.2 Malzemeler

Polimer kompozit üretimi sırasında epoksi reçine, atık cam lifleri, jüt kumaş ve kenevir lifli dokuma kumaş kullanılarak farklı katman sayıları ve konfigürasyonlara sahip kompozitler üretilmiştir. Üretimde kullanılan malzemeler ve özellikleri bu başlık altında açıklanmaktadır.

### 2.2.1 Epoksi Reçine

Vakum infüzyon yöntemiyle kompozit üretiminde literatürde önceki çalışmalarda kullanılan ve pozitif katkı elde edildiği görülen epoksi bazlı bir reçinenin kullanılmasına karar verilmiştir. Buna göre, lif takviyeli polimer kompozitlerin üretiminde matris malzemesi olarak ARALDİTE LY 1564 SP ticari koduna sahip bir epoksi reçine kullanılmıştır (Şekil 2.1). Düşük viskoziteli ve yüksek esneklik özelliği olan bu epoksi reçine, sertleştirici oranı değiştirilerek ihtiyaca uygun olarak hazırlanabilmektedir.

Çalışmalarda ARADUR 3487 BD ticari kodlu sertleştirici kullanılmıştır. Epoksi'nin sertleştiriciye karıştırma oranı ağırlıkça 3:1'dir. Kullanılan epoksi reçinenin üretici tarafından sunulan özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1 Fibermak F-1564 epoksi reçine ve sertleştirici (Kişisel arşiv, 2023)

Tablo 2. 1 Epoksi reçinenin bazı özellikleri

Fibermak F-1564 Epoksi Reçine			
Görünüm	Berrak-Sıvı	Karışım Oranı	A (reçine) : B (sertleştirici)=3:1
Renk	Şeffaf	Çekme Dayanımı	70 - 74 MPa
Viskozite (25 °C)	1200-1400 MPa.s	Eğilme Dayanımı	118 - 130 MPa
Yoğunluk	1,15 g/cm <sup>3</sup>	Elastisite Modülü	2860 - 3000 MPa
Kür Sıcaklığı	80 °C	Kırılma Tokluğu K1C	0,95 – 1,05 MPa√m

### 2.2.2 Atık Cam Lifleri

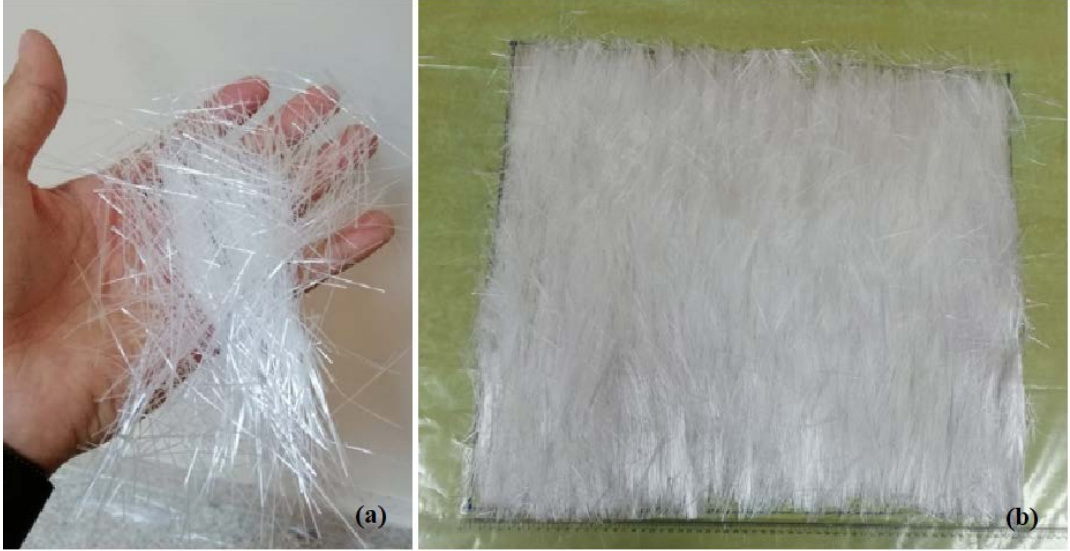
Cam esaslı atıklar genellikle farklı sektörlerde malzemelerin şekillendirilmesinde, son ürün elde edilirken yapılan kesim işlemlerinde çeşitli boyutlarda ortaya çıkmaktadır. Bu atıklar genellikle yakılarak veya toprağa gömülerek yok edilmektedir. Yakılarak bertaraf esnasında karbon monoksit gibi kanserojen olabilen gazlar ve küresel ısınmaya yol açan karbondioksit gazı atmosfere verilmektedir. Gömme işlemi ise toprağın kirlenmesine sebep olmaktadır (Karaağaç, H., 2018). Tüm bu nedenlerden dolayı bu atıkların ekonomiye kazandırılması son derece önemlidir. Bu bağlamda çalışma kapsamında atık cam lifleri kullanılmıştır.

Şekil 2.2 a’da gösterildiği gibi oldukça girift ve düzensiz bir şekilde dağılmış olan atık cam lifleri doğrudan vakum infüzyon yöntemiyle kullanılmasının kompozit üretimine uygun olmadığı ön çalışmalarda tespit edilmiştir. Bunun sebebi kompozit üretimi esnasında epoksi reçinenin dağılmaya başlamasıyla liflerin dağılımının değişmesi ve belirli bölgelerde topaklanmasıdır. Atık cam lifleri epoksi akışı sırasında dağılmayacak şekilde mat hale getirilmiştir. Aşağıda liflerin mat hale getirilme adımları ve nihai halleri sunulmuştur.

Şekil 2.2 a’da verilen düzensiz ve dağınık haldeki atık cam lifleri metrekareye 400 veya 200 gram gelecek şekilde hassas terazi ile tartılıp, sınırları belirlenen alana düzgün bir şekilde yerleştirilmiştir. Lif yönleri mümkün olduğunca tek yönde (çekme testi için yükleme doğrultusunda) üretilmeye çalışılmıştır. Bu doğrultu kesme güçlendirilmesinde kiriş eksenine dik olacak şekilde konumlandırılmıştır. Böylelikle

malzemenin çekme dayanımının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Daha sonra vakum infüzyon yöntemiyle kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.2 b).

Liflerin mat hale getirilmesi işlemi için spreyci yapıştırıcı olarak 3M™ Super 77™ kullanılmıştır. Belirli bir yükseklikten yüzeyi kaplayacak şekilde püskürtülerek Şekil 2.2 b’de gösterildiği gibi lifler bir araya getirilmiştir.



Şekil 2.2 Atık cam lifleri (a) ve mat hale getirilen atık cam lifleri (b) (Kişisel arşiv, 2023)

Spreyci yapıştırıcının satın alınan firmadan alınan özellikleri Tablo 2.2’de verilmektedir. Birleştirme işlemi sonrasında liflerde gözle görülür bir bozulma görülmemiştir ancak mikro ölçekte gözlem yapılmamıştır. Kompozit üretimi sonrası nihai ürün olan mat atık cam Şekil 2.3’te verilmiştir. Çalışmanın devamında atık cam liflerinin mat hale getirilmesiyle üretilen bütün numunelerde mat atık cam terimi kullanılmıştır.

Tablo 2.2 Sprey yapıştırıcı 3M™ Super 77™ özellikleri

Sertleşme Süresi	1-15 dk
Isı Dayanımı	65 °C
Katı Ağırlık Yüzdesi	%25
Yapıştırıcı Tipi	Sentetik Elastomer
Kullanım Alanı	Kağıt, karton, cam kumaş, plastik, metal vb.



Şekil 2.3 Mat atık cam (Kişisel arşiv, 2023)

### 2.2.3 Jüt Kumaş

Jüt kumaş günümüzde ambalaj, çuval bezi ve halı tabanı yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.4 a'da gösterilen jüt kumaş doğada tamamen bozunur özelliğe sahip bir malzemedir. Sürdürülebilir, çevre dostu ve ekonomik oluşu jüt kumaşı ön plana çıkaran başlıca özellikleridir. Bu çalışma kapsamında 4 farklı jüt kumaş incelenmiştir. Alınan kumaşlar Şekil 2.4 b'de gösterildiği gibi kumaş çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Ortalama 19,1 MPa, 10,1 MPa, 24,6 MPa ve 21 MPa çekme gerilmelerine ulaştıkları bulunmuştur. Bu numuneler arasında en yüksek çekme gerilmesine sahip malzeme özellikleri Tablo 2.3 'de sunulan kumaş seçilerek kompozit üretimlerine bu kumaşla devam edilmiştir.



Şekil 2.4 Jüt kumaş (a) ve jüt kumaş çekme deneyi (b) (Kişisel arşiv, 2023)

Tablo 2. 3 Jüt kumaş malzemesi özellikleri

Dokuma Jüt Kumaş	
Ağırlık	270 g/m <sup>2</sup>
Yoğunluk	1,5 g/cm <sup>3</sup>
Çekme Dayanımı	24,6 MPa
Dokuma Tipi	Çift Yönlü

### 2.2.3.1. Jüt Kumaşlar İçin Modifikasyon Çalışmaları

Jüt kumaşların yüzey pürüzlülüğünü artırarak kompozit üretimi sırasında epoksi malzemesi ile daha iyi aderans sağlaması için jüt kumaşlara modifikasyon işlemleri uygulanmıştır (Cai, Takagi, Nakagaito, Li, ve Waterhouse, 2016; Gunti, Ratna Prasad, ve Gupta, 2016; Sever, Sarikanat, Seki, Erkan, ve Erdoğan, 2010; Sudha ve Thilagavathi, 2016) Modifikasyon işlemleri ön temizleme, alkali ön işlem ve silan bağlayıcı maddesi ile muamele olmak üzere üç aşamada gerçekleşmektedir.

Ön temizleme aşamasında jüt kumaşlar yaklaşık 80 °C sıcaklıktaki saf suda 1 saat kadar bekletilmiştir. Ön temizleme işlemi sonrası numuneler 24 saat etüvde kurularak modifikasyon işlemlerine hazır hale getirilmiştir. Ön temizleme sonrası jüt kumaşlara alkali ön işlem uygulanmıştır. Alkali ön işlem için kumaşlar sodyum hidroksitin %2'lik sulu çözeltisinde oda sıcaklığında 1 saat bekletilmiştir. İşlem sonrası saf suda durulanıp etüvde kurumaya bırakılmıştır Alkali işlemlerden sonra

kumaşlar silan bağlayıcı maddesi ile modifikasyon işlemi yapılmıştır. 3-Aminopropyl-triethoxy-silan bağlayıcı maddesi hacimce %1 oranında saf suya eklenmiş ve çözeltinin pH'ı 4,5 olacak şekilde asetik asit ikamesi yapılarak ayarlanmıştır. Çözeltinin homojenliğinin sağlanması amacıyla hazırlanan çözelti 15 dakika manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. İşlem sonrası jüt kumaşlar hazırlanan çözeltide 1 saat oda sıcaklığında bekletilmiş ve saf su ile durulandıktan sonra 60 °C sıcaklıktaki etüvde 24 saat kurumaya bırakılmıştır. Modifikasyon işlemi uygulandıktan sonra kumaşlar yaklaşık 25×25 cm boyutlarında kesilerek kompozit üretimine hazır hale getirilmiştir.

#### **2.2.4 Kenevir Lifli Dokuma Kumaşlar**

Çalışmada Şekil 2.5'te gösterilen dokuma kenevir malzemesi MERT İPEK Tic. Ltd. Şti. tarafından temin edilmiştir. Dokuma kenevir (Dken) malzemesinin satın alınan firma tarafından sunulan mekanik özellikleri Tablo 2.4'te verilmektedir.



Şekil 2.5 Dokuma kenevir kumaş (Kişisel arşiv, 2023)

Tablo 2.4 Kenevir kumaş malzemesi özellikleri

Kenevir Kumaş (Dken)	
Ağırlık	161,4 g/m <sup>2</sup>
Yoğunluk	1,5 g/cm <sup>3</sup>
Çekme Dayanımı	73,1MPa
Dokuma Tipi	Çift Yönlü

## 2.3 Lif Takviyeli Polimer Kompozitlerin Hazırlanması

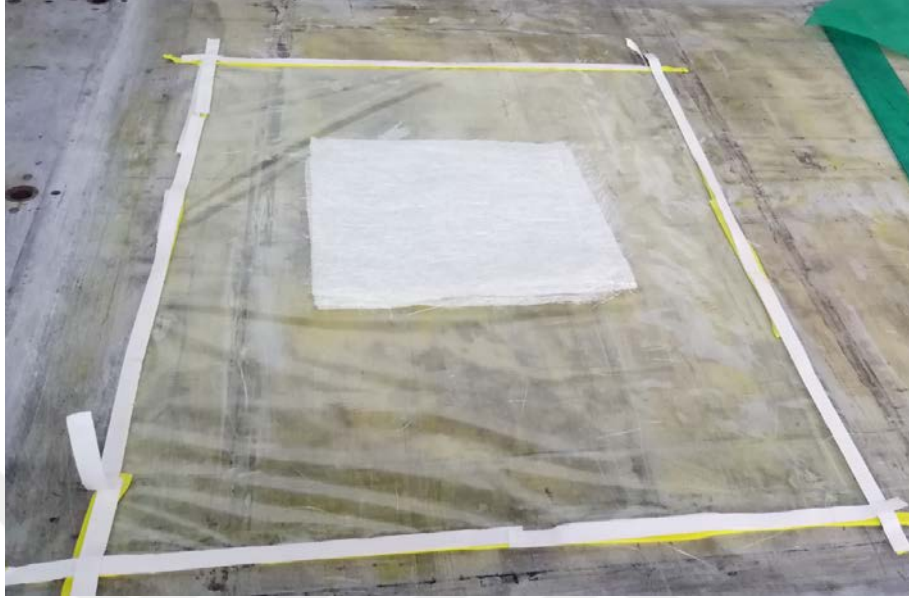
### 2.3.1 Farklı Düzendeki Polimer Matrisli Lif Takviyeli Kompozitlerin Üretimi

Malzemeler bölümünde özellikleri verilen malzemeler kullanılarak güçlendirmeye esas kompozitler üretilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılacak lif takviyeli polimer kompozitler vakum infüzyon tekniği kullanılarak üretilmiştir. Vakum infüzyon, üretilecek olan malzemelerin vakum infüzyon masasına uygun şekilde yerleştirildikten sonra reçinenin belirli basınçla malzemelere aktarıldığı ve böylece kompozitin oluşturulduğu sisteme verilen isimdir. Bu yöntemde matrisi oluşturan reçine lamine yapının içine aktarıldıktan sonra 80 °C ila 90 °C sıcaklıkta kürlenme işlemi uygulanmış ve nihai lamineler elde edilmiştir.

Sever (2009) 'un, yaptığı çalışmalarda epoksi matris malzemesini ve 300 g/m<sup>2</sup> örgülü kumaş formunda cam elyafını %39,8±1,5 hacimsel oranında kullanarak yaklaşık 245,95±11,00 MPa çekme dayanımına ve 481,54±14,20 MPa eğilme dayanımına ulaşılmıştır. Bu çalışmada kompozit üretimi tekniği olarak el yatırma yöntemi kullanılmıştır. Yapılan araştırmalar vakum infüzyon yönteminde epoksi kullanımı sonucunda hava boşluklarının daha az olduğunu göstermiştir (Abdurohman, Satrio, Muzayadah, ve Teten, 2018). Bu nedenle bu çalışmada ana matris bağlayıcı olarak epoksi reçine kullanılmıştır.

Vakum infüzyon yönteminde, vakum infüzyon masasının üzerine üretilecek kompozit malzemenin kenar boyutlarından 50'şer cm fazla olacak şekilde vakum torbası kesilmiştir. Hem kompozitin hem de epoksinin masaya yapışmaması için

kenarlarından hava kaçırmayacak şekilde Şekil 2.6’da gösterildiği gibi sızdırmazlık bandı ile masaya yapıştırılmıştır.



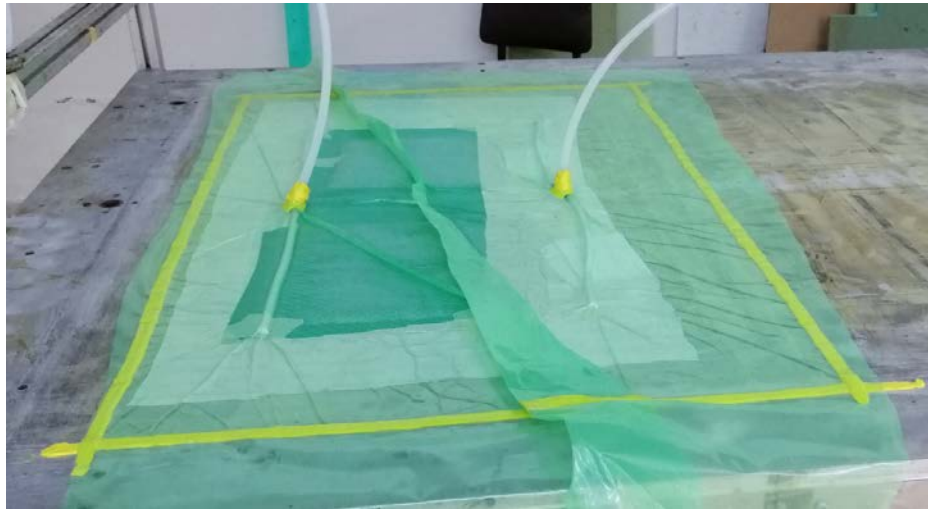
Şekil 2.6 Masaya yapıştırılmış vakum torbası (Kişisel arşiv,2023)

Daha sonra üretilcek kumaşlar, hazırlanan vakum torbasının üzerine yerleştirilmiş, ardından kompozit üst yüzeyinin pürüzsüz olması için kompozitlerin üzerine “peel ply” ismi verilen malzeme serilmiştir. Peel ply malzemesinin üzerine reçinenin kumaşa daha iyi yayılmasına katkıda bulunan infüzyon filesi yerleştirilmiştir. İnfüzyon filesi, epoksinin verildiği tarafında numunelerle aynı hizada olmasına karşın numunenin vakum yapılan tarafında kumaş bitiminden yaklaşık 10 cm kısa olacak şekilde Şekil 2.7’de gösterildiği gibi serilmiştir. Bunun sebebi infüzyon filesinin epoksi girişinin olduğu kısımda epoksinin yayılmasını sağlarken kumaş bitiminde alt katmanlara da epoksinin ilerlemesine katkıda bulunmasını sağlamaktır. İnfüzyon filesinin üzerine, üretilcek olan kompozitin başına ve sonuna spiral borular yerleştirilmiştir. Üretim esnasında basınç etkisiyle yerinden oynamamaları için infüzyon filesi ve spiral borular Şekil 2.7’de gösterildiği gibi peel ply malzemesine yapıştırılmıştır.



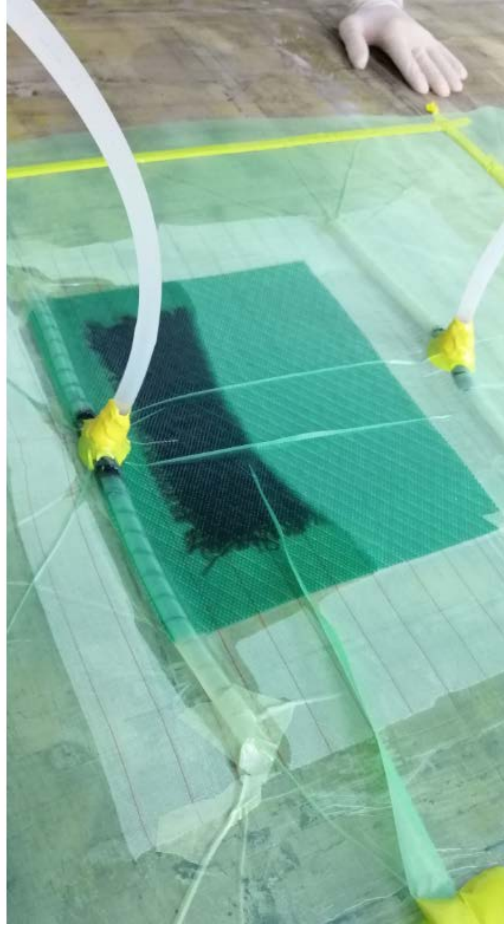
Şekil 2.7 Peel ply malzemesi ve epoksi filesinin sisteme yerleştirilmesi (Kişisel arşiv, 2023)

Bu işlemlerden sonra en üst bölgeye Şekil 2.8’de gösterilen yeşil vakum torbaları, sınırları belirlenen sızdırmazlık bantları ile yapıştırılmıştır. Bu işlem sırasında bazı kenarlardan pay bırakılmış ve vakum sırasında oluşacak gerilmenin torbaya zarar vermesi engellenmiştir. Spiral borular ve infüzyon boruları arasındaki birleşim bölgesinde hava giriş-çıkışı olmaması için o bölge sızdırmazlık bantlarıyla kapatılmıştır. Torba hazırlandıktan sonra vakum makinesi çalıştırılmış ve basınç belli bir değere geldikten sonra makine durdurulmuştur. Bir gün kadar beklendikten sonra vakum basıncında bir değişme yoksa kalıp işleme hazır hale gelmektedir. Bu hazırlıkların ardından kullanılan reçineye göre reçine-sertleştirici karışımı oranı 3:1 olarak kullanılmıştır.



Şekil 2.8 Vakum torbasının sisteme yerleştirilmesi (Kişisel arşiv, 2023)

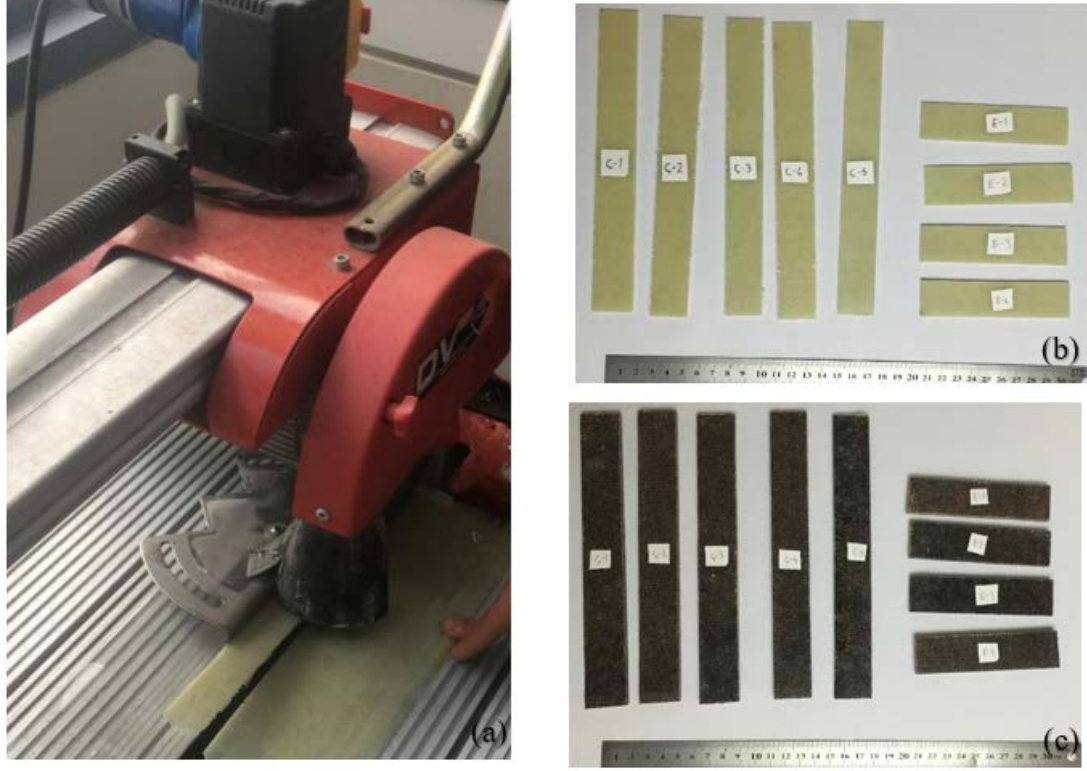
Reçine akışını sağlayan borunun ucu reçineye daldırılmış ve borudaki kilit dikkatli bir şekilde çıkartılmıştır. Reçine, kalıp içine akarak tamamen tükenene kadar bu işlem sürdürülmüştür (Şekil 2.9). Kabın içerisindeki reçinenin bitmesine yakın boru yine dikkatli bir şekilde katlanmış ve kilit tekrar boruya takılmıştır. Son olarak kullanılan reçinenin kurlenme süresi geçtikten sonra ayırma filesinden itibaren her şey kalıptan sökülerek kompozit elde edilmiştir.



Şekil 2.9 Reçine yayılma anı (Kişisel arşiv, 2023)

Üretimi tamamlanan kompozit plakalardan  $19,5 \text{ mm} \times 2,5 \text{ cm}$  ebatlarında beş adet çekme testi numunesi ve  $10 \text{ cm} \times 2,5 \text{ cm}$  ebatlarında dört adet eğilme numunesi sulu hızar kesim makinesi kullanılarak hazırlanmıştır. Bu kesim ebatları *ASTMD 790 (Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials 1, t.y.)* ve *ASTMD 3039 (Standard Test*

*Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials 1*, t.y.)'a göre belirlenmiştir. Sulu kesim sonrası deneye hazır hale getirilmiş numuneler Şekil 2.10'da verilmektedir.



Şekil 2.10 Sulu hızar kesim makinası (a), kesim sonrası elde edilen kompozitler (b), (c) (Kişisel arşiv, 2023)

Üretilen kompozitlere yapılan kupon testleri sonucunda dayanım ve maliyet kriterleri göz önüne alınarak gerçek kiriş boyutlarında üretilecek lamineye karar verilmiştir. Seçilen lamine konfigürasyonu çalışmanın asıl hedefi olan betonarme kiriş güçlendirmesinde kullanılmak üzere gerçek kirişlere uygun olarak üretilmiştir.

### 2.3.2 Gerçek Boyutlu Laminelerin Üretilmesi

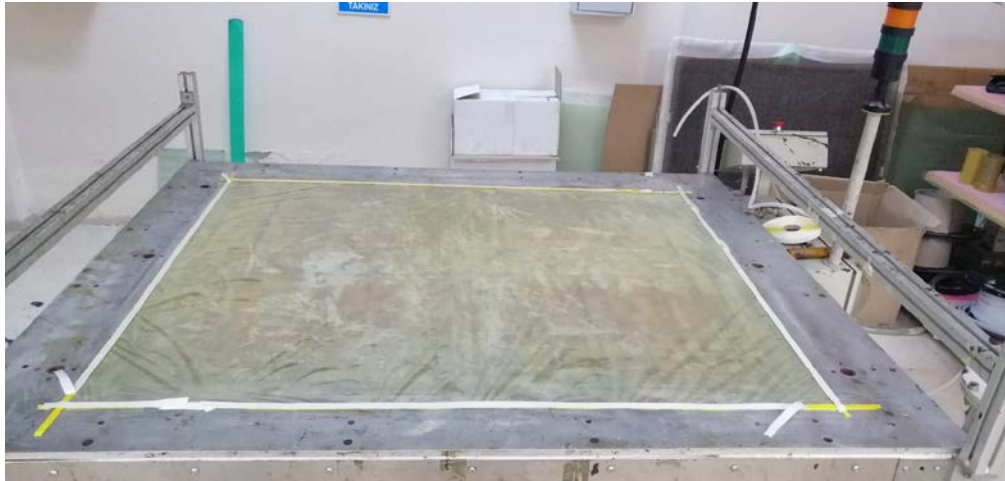
Çekme ve eğilme testleri yapılarak kiriş kesme ve eğilme güçlendirmesi yapılacak kompozitlere karar verildikten sonra kiriş güçlendirilmesinde kullanılacak gerçek boyutlu lamineler üretilmeye başlanmıştır. Güçlendirme malzemesi olarak

kullanılacak kesme ve eğilme numuneleri ayrı ayrı üretilecek olup öncelikle kesme güçlendirmesinde kullanılacak gerçek boyutlu lamine üretimi gerçekleştirilmiştir.

Gerçek boyutlu lamine üretiminde küçük boyutlardaki numuneler için daha önce açıklanan uygulama adımlarının aynısı izlenmiştir. Ek olarak üretilen numune boyutları yaklaşık 125×75 cm boyutlarında seçilmiştir. Kompozit boyutlarının büyümesi ve vakumun küçük numunelere göre daha zor olması nedeniyle vakum, kısa yönde uygulanmıştır.

Numune üretimi adımları Şekil 2.11, Şekil 2.12, Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'te sunulmuştur. Gerçek boyutlu lamine üretiminde boyutların büyümesinden kaynaklı herhangi bir problemle karşılaşılmamıştır.

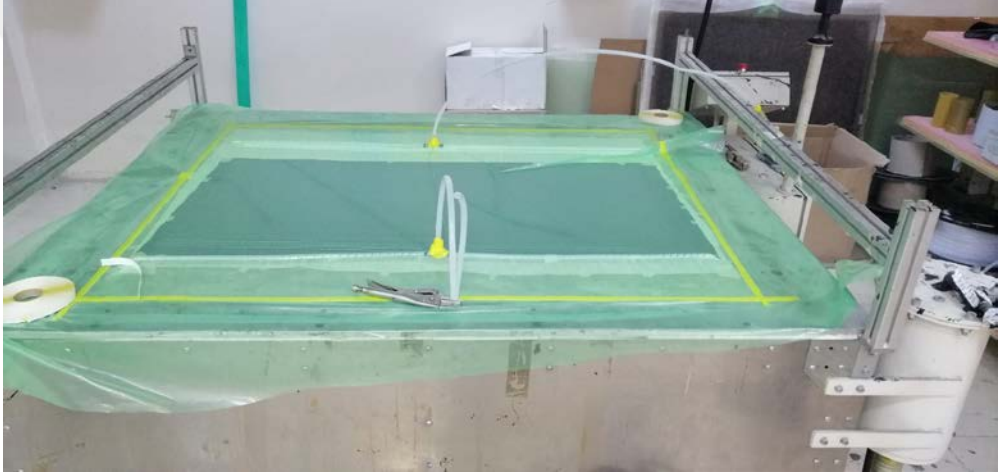
Gerçek boyutlu lamine üretimi boyutuna karar verilirken bir üretimden birden fazla güçlendirme plakası ve mekanik test numunesi çıkacak şekilde lamine genişliği belirlenmiştir. Bu bağlamda ilk üretim boyutu olarak 125×75 cm seçilmiştir. Kompozit üretimi tamamlandıktan sonra elde edilen plaka, sulu kesim ile kesilerek kesme güçlendirmesinde kullanıma uygun hale getirilmiştir.



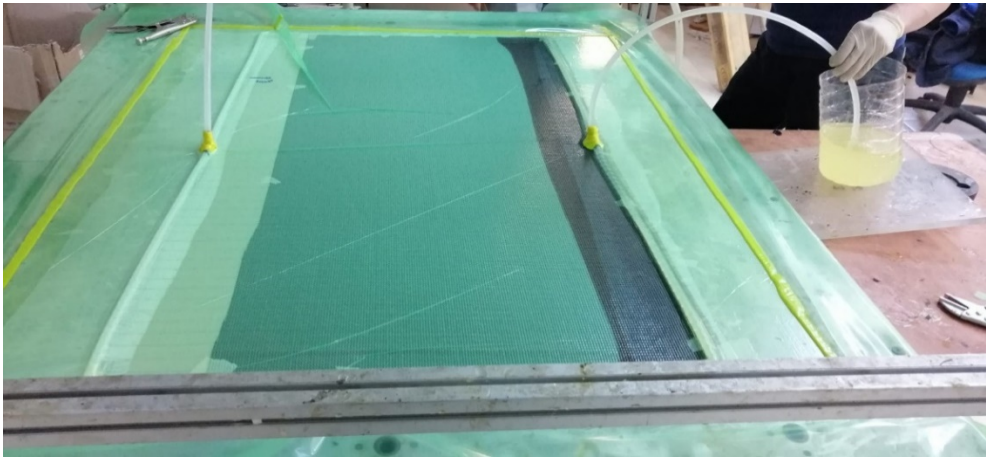
Şekil 2.11 Masaya yapıştırılmış vakum torbası (Kişisel arşiv, 2023)



Şekil 2.12 Peel ply malzemesi ve epoksi filesinin sisteme yerleştirilmesi (Kişisel arşiv, 2023)



Şekil 2.13 Vakum torbasının sisteme yerleştirilmesi (Kişisel arşiv, 2023)



Şekil 2.14 Reçine yayılma anı (Kişisel arşiv, 2023)

Üretimi tamamlanan gerçek boyutlu kompozitlerin numune kalınlığı 30×30 cm ebatlarında kesilen numunelerle benzer değerde kalınlık elde edilmiştir. Gerçek kiriş boyutlarında üretilen kompozitler daha sonra güçlendirme biçimine uygun şekilde kesilerek güçlendirme işlemi yapılmıştır.



## BÖLÜM ÜÇ

### LAMİNE KONFİGÜRASYONLARI VE MEKANİK PERFORMANS

#### 3.1 Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Üretimi gerçekleştirilen laminelerin eğilme ve çekme dayanımını belirlemek için yapılan mekanik testler İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Makine Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Lamine testlerinde Shimadzu Autograph AGS-X marka mekanik test presi kullanılmıştır. Şekil 3.1’de kullanılan test cihazını görülmektedir.

Yapılan testlerde cihaz yazılımı kopma uzamasındaki yük, çekme ve eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve malzemenin akma noktası gibi çeşitli mekanik değerlerin ortalaması, standart sapması gibi istatistiksel sonuçları verebilir. Buna ek olarak cihaz saniyede 1000 veri alma kapasitesine sahiptir.



Şekil 3.1 Shimadzu Autograph AGS-X mekanik test cihazı (Kişisel arşiv, 2023)

Kompozit üretim tekniğinin doğası gereği katman sayısı arttıkça numune kalınlıkları artmıştır. Tek ve üç katman üretilen numune kalınlıkları çok ince ve oldukça düşük rijitliğe sahip oldukları için kullanılan eğilme deney aletinin hassasiyetinin altında kalmıştır. Bu nedenle tek ve üç katman numunelerde eğilme deneyi yapılamamıştır.

### 3.1.1 Çekme Deneyleri

ASTMD 3039 (*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials 1*, t.y.)'a göre çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deney, Şekil 3.2'de verilen aparatlarla gerçekleştirilmiştir. Yükleme hızı 2 mm / dakika ve başlıklar arasındaki uzunluk 100 mm'dir. Numune kırıldığında test sonlandırılmıştır. Her polimer kompozit için beş numune test edilmiştir. Çekme testi sonucunda; çekme dayanımı, çekme tokluğu, kopma uzama oranı ve çekmede elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. Çekme dayanımı, çekme testi sırasında maksimum yükün, numunenin test öncesi ölçülen enkesit alanına bölünmesiyle elde edilmiştir. Çekme tokluğu, yük deplasman eğrisinde kopma anına kadar olan kapalı alanının hesaplanmasıyla elde edilmiştir. Kopma uzama oranı, numunenin deney sonundaki uzama miktarının başlıklar arasındaki örselenmemiş ilk uzunluğa bölünmesiyle elde edilmiştir.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.1)$$

Çekmede elastisite modülünün bulunmasında (1)'de verilen denklem çekme gerilmesi-birim uzama grafiğinde maksimum gerilmenin %20-%40 aralığı için hesaplanmıştır. Burada elastisite modülü E, gerilme değeri  $\sigma$ , birim şekil değiştirme  $\varepsilon$  ile gösterilmektedir



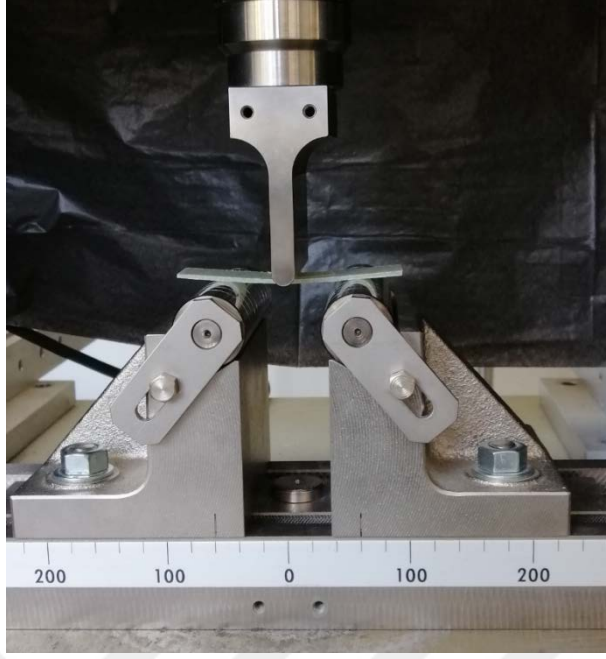
Şekil 3.2 Çekme testi (Kişisel arşiv, 2023)

### 3.1.2 Eğilme Deneyleri

Eğilme dayanımı testleri ASTM D 790 (*Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials 1*, t.y.)'a göre yapılmıştır. Üç noktalı eğilme deneyi, Şekil 3.3'te gösterilen test aparatı ile gerçekleştirilmiştir. Her polimer kompozit için 4 numuneye eğilme testi uygulanmıştır. Test yükleme hızı 1,3 mm/dak ve mesnet açıklığı 60 mm'dir. Numunenin taşıdığı yük, tepe yükünün %30'una düştüğünde deney sonlandırılmıştır. Her polimer kompozit için dört numune test edilmiştir. Yapılan bu deney sonucunda; eğilme dayanımı ve eğilme tokluğu değerleri hesaplanmıştır. Eğilme dayanımı, eğilme testi sırasında elde edilen aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte uygulanan maksimum kuvvet P, mesnetler arası uzaklık L, kompozit numunenin genişliği b ve kompozit numunenin kalınlığı d ile gösterilmektedir. Eğilme tokluğu, eğilme deneyi sırasında maksimum dayanım değerinin %30'una düştüğü ana kadar eğrinin altındaki alanın hesaplanmasıyla bulunmuştur.



Şekil 3.3 Eğilme testi (Kişisel arşiv, 2023)

### 3.2 Lamine Konfigürasyonları ve Mekanik Performans

Yapılan deneysel çalışmada, betonarme elemanlarda güçlendirme için kullanılacak olan en uygun kompozit lamineler belirlenmek istenmektedir. En uygun kompozit lamineleri belirlemek için önce her malzemenin tek katmanlı üretimleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre daha sonra üç katmanlı, altı katmanlı ve/veya dokuz katmanlı lamineler üretilmiştir. Atık ve doğal malzemelerin hibrit kullanımı ile üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri test edilmiştir. Atık cam liflerinin mat hale getirilmesiyle üretilen laminelerin bazı konfigürasyonlarında test sonuçlarına göre metrekareye düşen atık cam lifi miktarı yarıya düşürülerek ( $200 \text{ g/m}^2$ ) üretilen lamineler test edilmiştir. Test sonuçlarını kıyaslamak amacıyla yalın epoksi ile üretilen numune de test edilmiştir. Yalın epoksiyle üretilen liffsiz numunelerin ortalama çekme dayanımı 88 MPa bulunmuştur.

Hibrit olarak üretilecek kompozitlerin katmanları birbirlerine göre farklılık göstermektedir. Test edilen kompozitlerin katman değişimlerini daha iyi anlatabilmek için Tablo 3.1’de Hibrit Lamine Detayları resim olarak sunulmuştur. Aynı tabloda her bir hibrit laminenin deney numarası ve üretim sonrası ölçülen lamine kalınlığı da

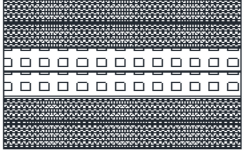
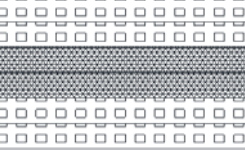
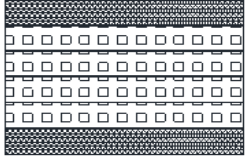
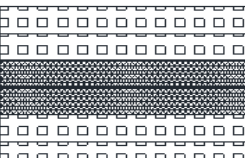
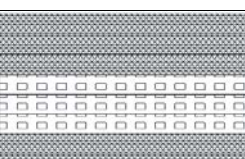
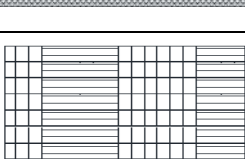
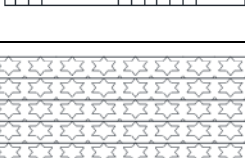
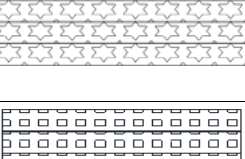
verilmiştir. Atık cam lif miktarı yarıya düşürülerek (200 g/m<sup>2</sup>) kullanılan konfigürasyonlarda numune gösteriminin sonuna -v2 işareti eklenmiştir. Tablo 3.1’de numune gösterimde kullanılan kısaltmaların açılımları “*DJ: Dokuma Jüt Kumaş; MAC: Atık Cam Liflerinden Üretilen Mat Atık Cam; DKEN: Kenevir Lifinden Üretilen Dokuma Kenevir*” şeklindedir.



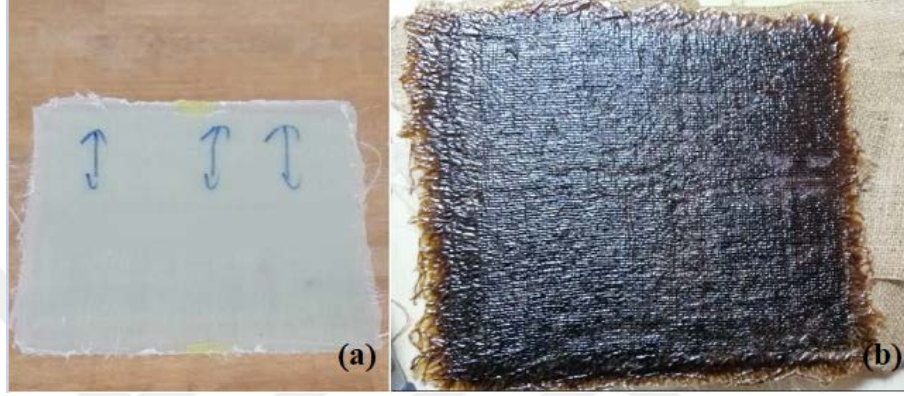
Tablo 3.1 Lamine detayları ve gösterimleri

Deney Elemanı No	Numune Gösterim	Ölçülen Kalınlık (mm)	Hibrit Lamine Detayı
1	Saf epoksi	1,20	
2	DJ	1,00	
3	DJ (Sılanlı)	1,1	
4	Dken	0,4	
5	MAC	0,50	
6	3MAC	1,0	
7	MAC+DKEN+MAC	0,6	
8	6DJ	3,90	
9	6DJ (Sılanlı)	5,80	
10	6MAC	2,2	
11	6DKEN	1,9	

Tablo 3.1 devamı

12	2DKEN+2MAC+2DKEN	2,2	
13	2MAC+2DKEN+2MAC	2,5	
14	DKEN+4MAC+DKEN	2,8	
15	2MAC+2DKEN+2MAC-v2	1,2	
16	3DKEN+3MAC+3DKEN	3,5	
17	9DJ	4,40	
18	9DJ (Sılanlı)	6,2	
19	9MAC	3,9	

Tablo 3.1’de katman ve kalınlık özellikleri verilen kompozitlerin her biri için ayrı ayrı nihai fotoğraf sunulmamıştır. Bunun yerine numuneler için örnekleme yoluna gidilmiştir. Aşağıda üretimi gerçekleştirilmiş altı katmanlı 2MAC+2DKEN+2MAC: Mat Atık Cam ve Dokuma Kenevir Malzemesinden Hibrit Şekilde Elde Edilen Kompozit ve 6DJ: Dokuma Jüt Malzemesinin Kullanımıyla Elde Edilen Plaka Şekil 3.4’te verilmiştir.

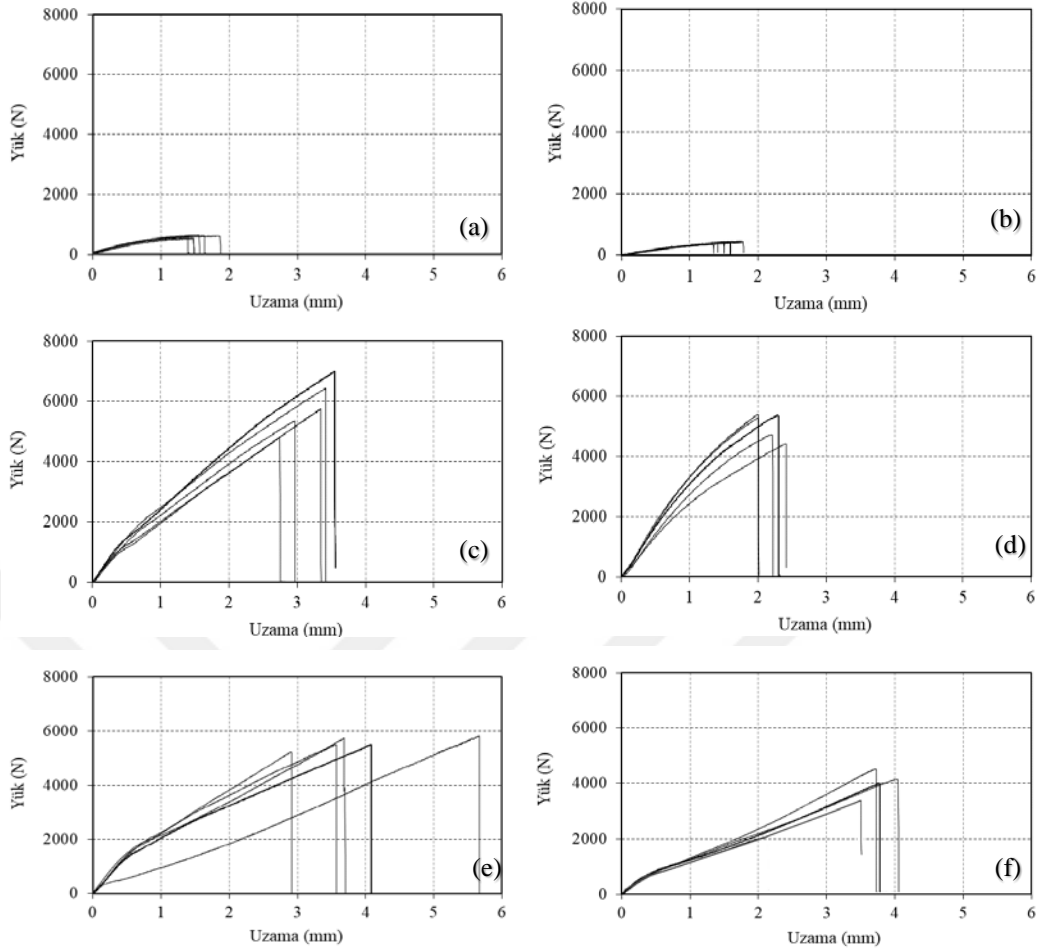


Şekil 3.4 Dokuma kenevir ve atık cam liflerinden hibrit şekilde oluşturulan plaka (a), dokuma jüt kumaş malzemesi kullanılarak oluşturulmuş plaka (b) (Kişisel arşiv, 2023)

### 3.2.1 Laminelerin Çekme Yükleri Altındaki Performansı

#### 3.2.1.1 Katmanlarında Dokuma Jüt Elyaf Bulunan Kompozitlerin Çekme Performansı

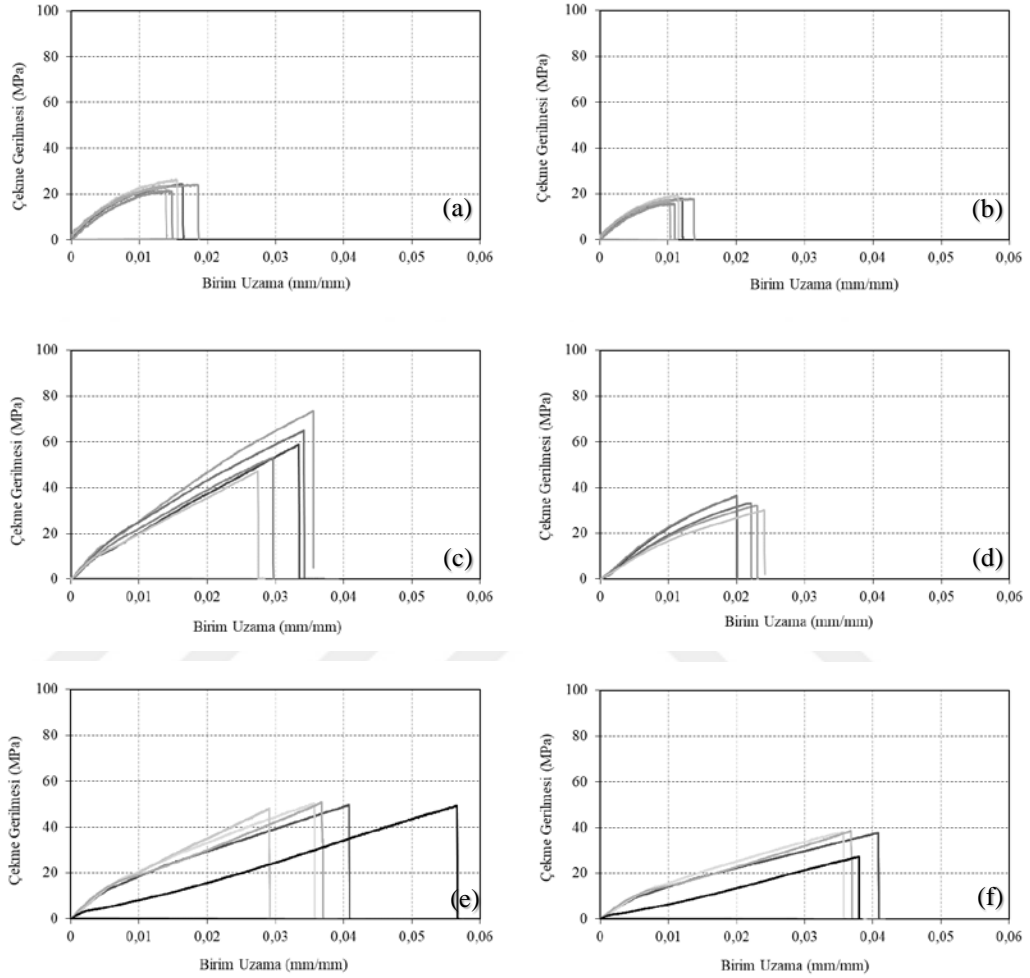
Tek, altı ve dokuz katmanlı dokuma jüt takviyeli (DJ) kompozitlerin çekme yükü – uzama grafikleri Şekil 3.5’te sunulmaktadır. Kompozitlerin maksimum çekme yüklerine ulaşıldığında ani şekilde makro çatlak gelişmekte ve numuneler kopmaktadır. Numunenin kırılma enkesiti incelendiğinde liflerin koptuğu görülmüştür. Silanla kaplanmış deney elemanları, işlem görmemiş deney elemanlarına göre daha düşük yük değerlerine ulaşmaktadır. Bunun nedeni silan işlemi sonrasında takviye malzemesinde meydana gelen dayanım kaybı olarak açıklanabilir. Katman sayısının artışıyla kompozitlerin düktilitesi artmaktadır.



Şekil 3.5 Deney elemanı 2 (a), deney elemanı 3 (b) deney elemanı 8 (c), deney elemanı 9 (d), deney elemanı 17 (e) ve deney elemanı 18 (f) için çekme yükü – uzama grafikleri

Dokuma jüt takviyeli kompozitlerin çekme gerilmesi – birim uzama grafikleri Şekil 3.6’da verilmektedir. Deney elemanı 2,3, 8, 9, 17 ve 18 için sırasıyla 24,1 MPa, 17,5 MPa, 72,4 MPa, 33,5 MPa, 49,6 MPa, ve 28,1 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir (Tablo 3.2). Silan işlemini görmüş bütün deney elemanlarında silan işlem görmemiş deney elemanlarına göre çekme dayanımında düşüş gözlenmiştir. Dokuma jüt malzemesiyle oluşturulmuş tek, altı ve dokuz katmanlı numunelerde silan işlemi sonrası çekme dayanımı sırasıyla %27, %54 ve %43 oranında düşmüştür. Silan işlemini görmüş deney elemanları işlem görmemiş deney elemanlarına göre daha düşük bir kalınlığa sahiptir. Bunun nedeni silan işlemi görmüş jüt kumaşın yapısında meydana gelen değişikliklerdir. Katman sayısının artışıyla kopma birim uzamaları ve tokluk değerleri artmaktadır. Bu nedenle birim numune kalınlığı başına hesaplandığında toklukta 6 katmana kadar belirgin, 6 katmandan sonra ise çok düşük

bir artış görülmektedir. Dokuz katmana çıkıldığı zaman çekme altındaki elastisite modüllerinin diğer serilere göre azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi 9 katmanda birim takviye yüzeyi başına düşen matris miktarının kritik değerin altında kalması olabilir.



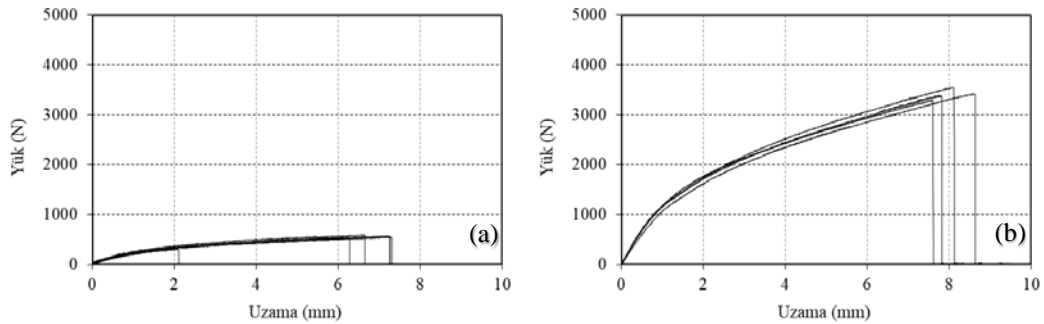
Şekil 3.6 Deneysel elemanı 2 (a), deneysel elemanı 3 (b), deneysel elemanı 8 (c), deneysel elemanı 9 (d), deneysel elemanı 17 (e) ve deneysel elemanı 18 (f) için çekme gerilmesi – birim uzama grafikleri

Tablo 3.2 Katmanlarında dokuma jüt elyaf bulunan kompozitlerin çekme testi sonuçları

Deney Elemanı No	Numune Gösterim	Kalınlık (mm)	Ortalama Kopma Uzaması (mm)	Ortalama Elastisite Modülü (GPa)	Ortalama Maksimum Kuvvet (N)	Tokluk (N. mm)	Ortalama Çekme Dayanımı (MPa)
2	DJ	1,0	1,6	2,6	611,3	659,6	24,1 ± 1,8
3	DJ (Sılanlı)	1,1	1,5	2,5	451,2	499,5	17,5 ± 0,7
8	6DJ	3,9	3,4	2,0	7070,8	12166,1	72,4 ± 7,1
9	6DJ (Sılanlı)	5,8	2,2	2,2	5044,4	6397,1	33,5 ± 2,6
17	9DJ	4,4	4,0	1,4	5561,3	12202,6	49,6 ± 1,0
18	9DJ (Sılanlı)	6,2	2,8	1,4	4221,9	8489,0	28,1 ± 1,5

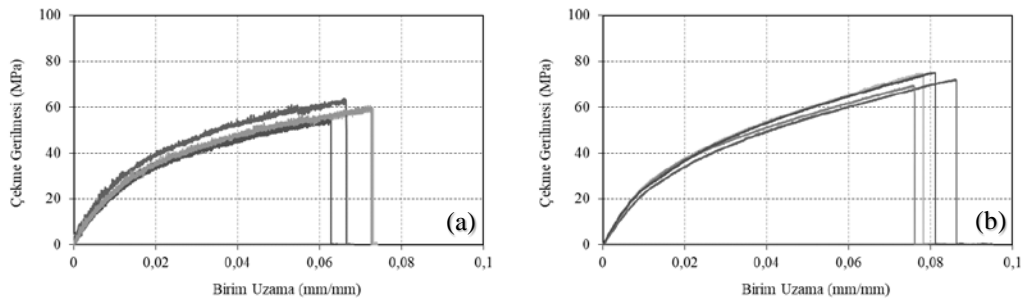
### 3.2.1.2 Katmanlarında Kenevir Lif Bulunan Kompozitlerin Çekme Performansı

Tek katman dokuma kenevir (deney elemanı 4) ve altı katman dokuma kenevir (deney elemanı 11), kompozitlerinin çekme yükü – uzama grafikleri Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Deney elemanı 4 ve deney elemanı 11 için maksimum yüke ulaşıldığı anda kopma gerçekleşmiştir. Katman sayısının altı katmana çıkarılması maksimum kuvvet değerini yaklaşık 5,7 kat artmıştır. Altı katman numunelerin ortalama tokluk değeri tek katman numunelere göre yaklaşık 7,3 kat daha fazladır (Tablo 3.3). Bu durum katman sayısının artışının numunenin enerji yutma kapasitesine önemli katkı sağladığını göstermektedir.



Şekil 3.7 Deney elemanı 4 (a) ve deney elemanı 11 (b) için çekme yükü-uzama grafikleri

Tek katman dokuma kenevir (deney elemanı 4) ve altı katman dokuma kenevir (deney elemanı 11), kompozitlerinin çekme gerilmesi – birim uzama grafikleri Şekil 3.8’de verilmektedir. Deney elemanı 4 ve 11 için sırasıyla 53,4 MPa ve 72,8 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir. Katman sayısının artışıyla kopma birim uzamaları ve tokluk değerleri artmaktadır. Numune üretim tekniğinin doğası gereği katman sayısı arttıkça numune kalınlıkları da artmaktadır. Ayrıca katman sayısının altı katmana çıkarılması sonucu ortalama çekme dayanımındaki saçılımların azaldığı görülmektedir.



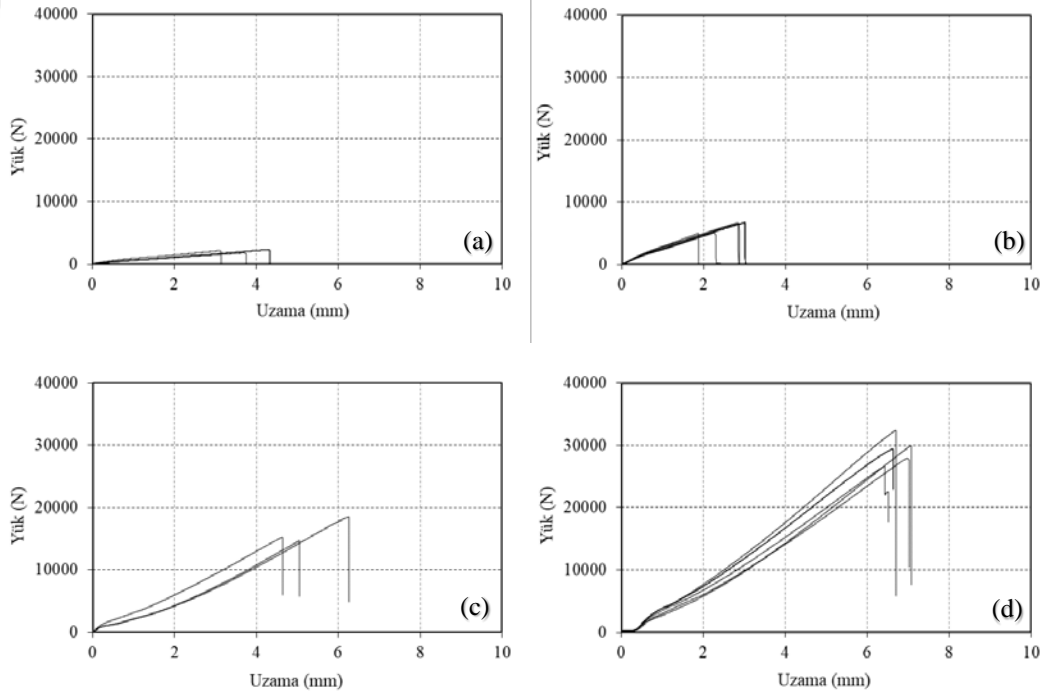
Şekil 3.8 Deney elemanı 4 (a) ve deney elemanı 11 (b) için çekme gerilmesi-birim uzama grafikleri

Tablo 3. 3 Katmanlarında dokuma kenevir kumaş bulunan kompozitlerin çekme testi sonuçları

Deney Elemanı No	Numune Gösterim	Kalınlık (mm)	Ortalama Kopma Uzaması (mm)	Ortalama Elastisite Modülü (GPa)	Ortalama Maksimum Kuvvet (N)	Tokluk (N. mm)	Ortalama Çekme Dayanımı (MPa)
4	Dken	0,4	6,8	1,8	512,5	2205,0	53,4 ± 11,1
11	6Dken	1,9	8,0	1,8	3417,9	18185,8	72,8 ± 2,2

### 3.2.1.3 Katmanlarında Mat Atık Cam Bulunan Kompozitlerin Çekme Performansı

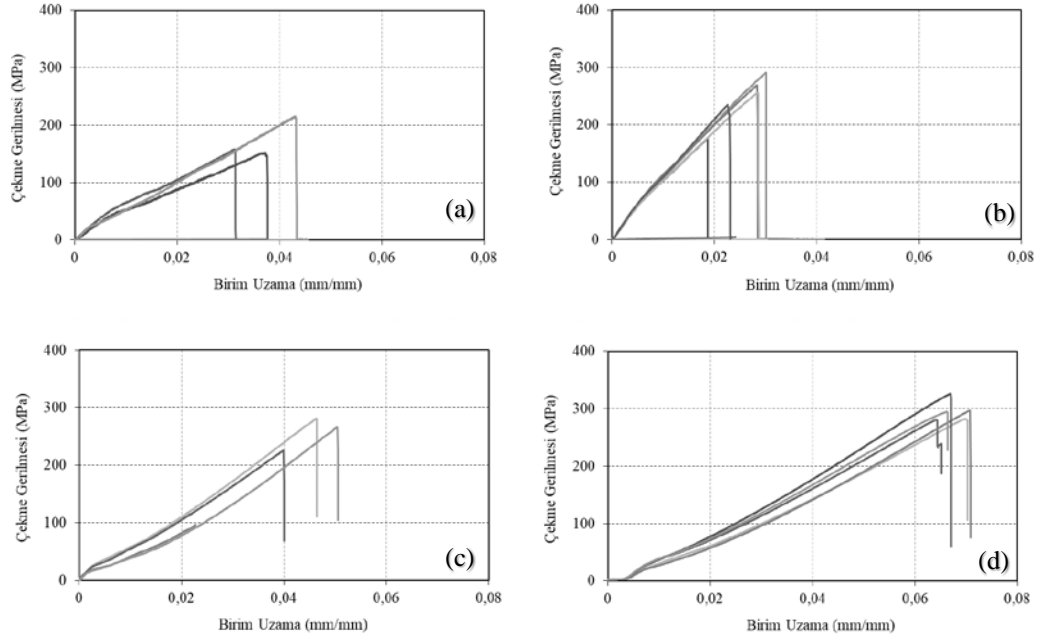
Tek katman (deney elemanı 5), üç katman (deney elemanı 6), altı katman (deney elemanı 10) ve dokuz katman (deney elemanı 19) mat atık cam takviyeli kompozitlerin çekme yükü – uzama grafiği Şekil 3.9’da sunulmaktadır. Çekme deneyi sırasında maksimum yüke ulaşıldığında yük taşıma kapasitesinin ani bir şekilde düştüğü görülmüştür. Kırılma enkesiti incelendiğinde liflerin koptuğu görülmüştür. Ayrıca deney elemanı 10’da deney elemanı 6’ya göre kopma uzaması değerinde artış görülmektedir (Tablo 3.4). Katman sayısının artmasıyla birlikte deney elemanlarının uzama ve tokluk değerlerinde artış görülmüştür.



Şekil 3.9 Deney elemanı 5 (a), deney elemanı 6 (b), deney elemanı 10 (c) ve deney elemanı 19 (d) için çekme yükü-uzama grafikleri

Tek katman, üç katman, altı katman ve dokuz katman mat atık cam takviyeli kompozitin gerilme – birim uzama grafiği Şekil 3.10’da verilmektedir. Tek katman, üç katman, altı katman ve dokuz katman kullanımıyla çekme dayanımında yalın epoksi reçineye göre sırasıyla %99, %178, %202, %237’luk (Şekil 3.10) bir dayanım artışı elde edilmiştir (Tablo 3.4). Deney elemanı 5, 6, 10 ve 18 için sırasıyla 175,1 MPa 245,3 MPa 266,3 MPa ve 296,3 MPa çekme dayanımı elde edilmiştir. Elde edilen

tatminkar sonuçlar ışığında atık malzemenin yeniden değerlendirilmesi ve inşaat sektörüne kazandırılması sürdürülebilirliğe pozitif yönde katkı sağlarken çevre kirliliğinin de azalmasına destek olacaktır.



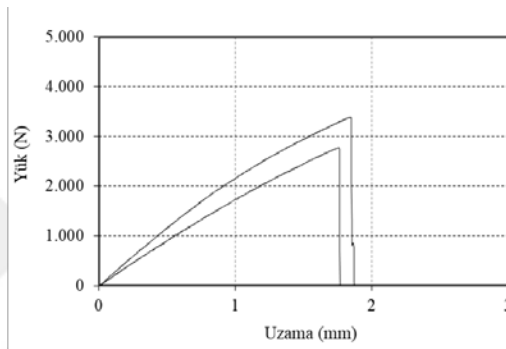
Şekil 3.10 Deneysel elemanı 5 (a), deneysel elemanı 6 (b), deneysel elemanı 10 (c) ve deneysel elemanı 19 (d) için çekme gerilmesi-birim uzama grafikleri

Tablo 3.4 Katmanlarında mat atık cam bulunan kompozitlerin çekme testi sonuçları

Deneysel Elemanı No	Numune Gösterim	Kalınlık (mm)	Ortalama Kopma Uzaması (mm)	Ortalama Elastisite Modülü (GPa)	Ortalama Maksimum Kuvvet (N)	Tokluk (N. mm)	Ortalama Çekme Dayanımı (MPa)
5	MAC	0,5	3,7	5,5	2065,6	3078,6	175,1 ± 35
6	3MAC	1,0	2,6	10,0	6215,6	9032,8	245,3 ± 39,2
10	6MAC	2,2	4,6	5,8	14205,0	32368,5	266,3 ± 54
19	9MAC	3,9	6,3	4,2	29286,2	91120,0	296,3 ± 16,3

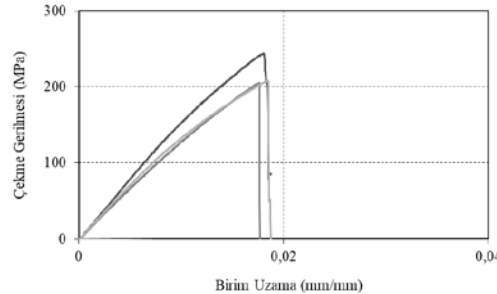
### 3.2.1.4 Katmanlarında Dokuma Kenevir ve Mat Atık Cam Bulunan Hibrit Kompozitlerin Çekme Performansı

3.2.1.4.1 Üç Katmanlı Kompozitler. Üç katmanlı dokuma kenevir ve mat atık cam takviyeli kompozitlerin çekme yükü-uzama grafikleri Şekil 3.11’de verilmektedir. Kompozitlerin çekme testi sırasında çoklu çatlak davranışı sergilemediği gözlemlenmiştir. Bütün numunelerin maksimum yüke ulaştıklarında ani olarak koptuğu ve yük taşıma kapasitelerini kaybettikleri görülmektedir.



Şekil 3.11 Deney elemanı 7 için çekme yükü-uzama grafikleri

Üç katmanlı dokuma kenevir ve mat atık cam takviyeli kompozitlerin çekme gerilmesi-birim uzama grafiği Şekil 3.12’de sunulmuştur. Deney Elemanı-7 için çekme dayanımı 219,3 MPa elde edilmiştir (Tablo 3.5). Dokuma kenevir ve mat atık cam ile yapılan üç katmanlı numunelerin hedeflenen dayanım mertebesinin (280 MPa) altında olduğu görülmektedir.

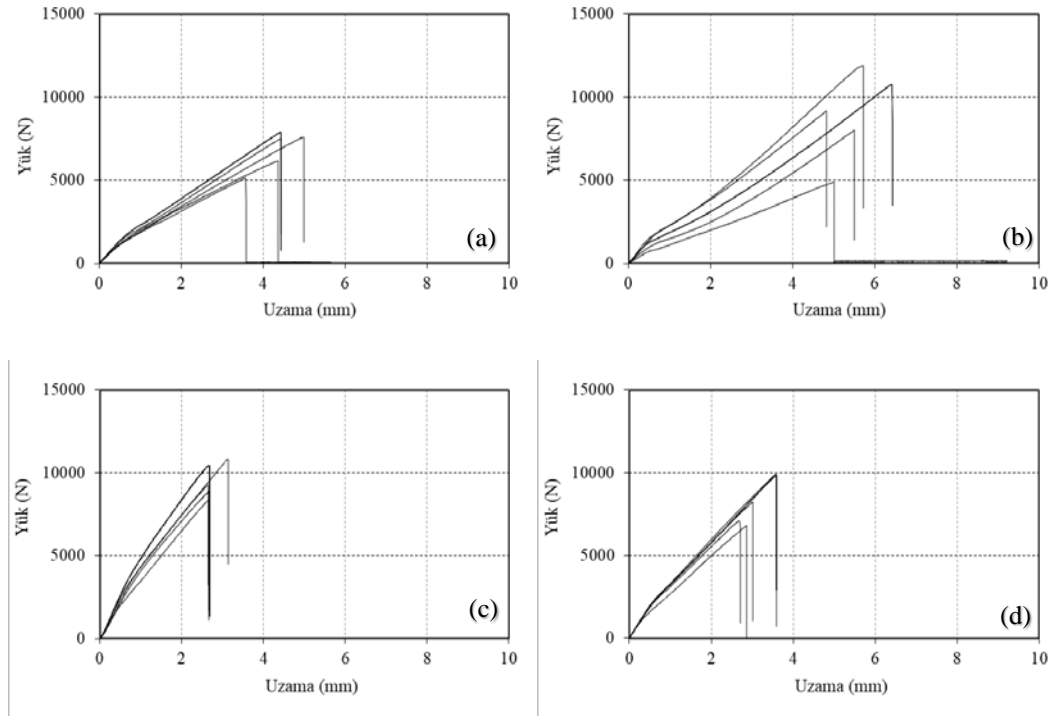


Şekil 3.12 Deney elemanı 7 için çekme gerilmesi-birim uzama grafikleri

Tablo 3.5 Katmanlarında mat atık cam ve dokuma kenevir kumaş bulunan üç katmanlı kompozitlerin çekme testi sonuçları

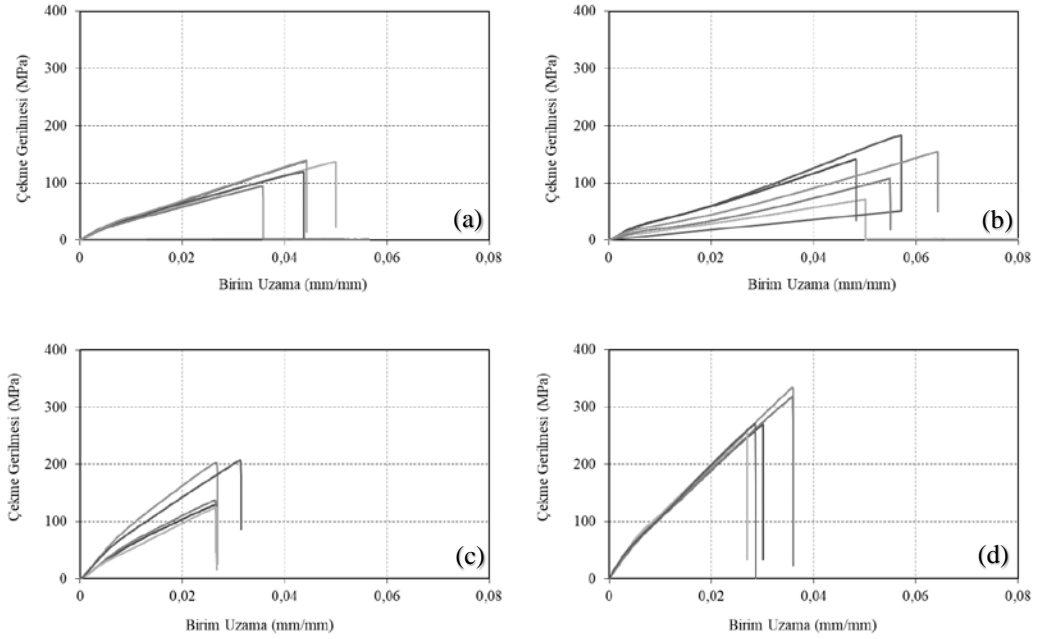
Deney Elemanı No	Numune Gösterim	Kalınlık (mm)	Ortalama Kopma uzaması (mm)	Ortalama Elastisite Modülü (GPa)	Ortalama Maksimum Kuvvet (N)	Tokluk (N. mm)	Ortalama Çekme Dayanım (MPa)
7	MAC+DKEN+MAC	0,6	1,6	14,4	3212,5	3358,6	219,3 ± 46,4

3.2.1.4.2 *Altı Katmanlı Kompozitler.* Altı katmanlı dokuma kenevir ve mat atık cam takviyeli farklı konfigürasyonlara sahip epoksi matrisli kompozitlerin çekme yükü-uzama grafikleri Şekil 3.13'te sunulmuştur. Kompozitlerin maksimum yüke ulaşana kadar çoklu çatlak davranışı sergilemediği gözlemlenmiştir. Maksimum yüke ulaşıldığında bütün numunelerin ani olarak koptuğu ve yük taşıma kapasitelerini kaybettikleri görülmektedir. Kırılma sonrası numuneler incelendiğinde liflerin bir kısmının koptuğu, bir kısmının ise matristen sıyrıldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.13 Deney elemanı 12 (a), deney elemanı 14 (b), deney elemanı 13 (c) ve deney elemanı 15 (d) için çekme yükü-uzama grafikleri

Altı katmanlı dokuma kenevir ve mat atık cam takviyeli farklı konfigürasyonlara sahip epoksi matrisli kompozitlerin çekme gerilmesi-birim uzama grafiği Şekil 3.14'te sunulmuştur. Dış yüzeylerde bulunan dokuma kenevir hacminin azaltılıp ara katmanlardaki mat atık cam hacminin artırılması (Deney Elemanı 14) çekmede daha yüksek dayanım elde edilebilmesine olanak sağlamıştır. Deney Elemanı 12, 14, 13 ve 15 için çekme dayanımları sırasıyla 125,6 MPa 131,3 MPa, 160,4 MPa ve 289,7 MPa elde edilmiştir (Tablo 3.6). Aynı katman dizilimine sahip kompozitlerde kullanılan atık cam lif malzemesinin  $400 \text{ g/m}^2$ 'den  $200 \text{ g/m}^2$ 'ye düşürülmesi çekme dayanımını yaklaşık %50 oranında artırmıştır. Atık cam lif oranının  $200 \text{ g/m}^2$  seviyesine düşürülmesi kompozitin çekme dayanımını 289,7 MPa seviyesine çıkarmıştır. Bu durumun sebebi mat atık cam numunelerinde kullanılan atık cam lif miktarının  $200 \text{ g/m}^2$  seviyesinde kullanımının birim takviye yüzeyi başına düşen matris miktarının kritik değere yakın olması olabilir.

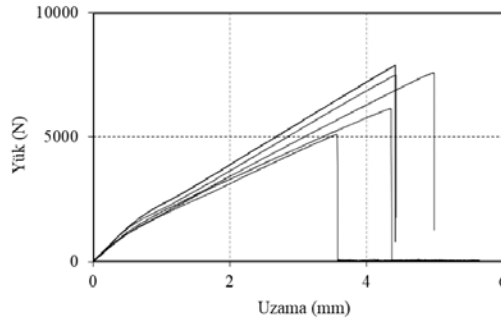


Şekil 3.14 Deney elemanı 12 (a), deney elemanı 14 (b), deney elemanı 13 (c) ve deney elemanı 15 (d) için çekme gerilmesi-birim uzama (mm/mm) grafikleri

Tablo 3.6 Katmanlarında mat atık cam ve dokuma kenevir kumaş bulunan altı katmanlı kompozitlerin çekme testi sonuçları

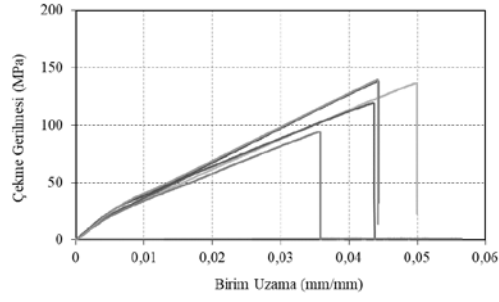
Deney Elemanı No	Numune Gösterim	Kalınlık (mm)	Ortalama Kopma uzaması (mm)	Ortalama Elastisite Modülü (GPa)	Ortalama Maksimum Kuvvet (N)	Tokluk (N. mm)	Ortalama Çekme Dayanım (MPa)
12	2Dken+2MAC+2Dken	2,2	4,4	2,7	6855,6	16406,4	125,6 ± 17,4
14	Dken+4MAC+Dken	2,8	6,6	2,0	8948,8	24588,1	131,3 ± 38,7
13	2MAC+2Dken+2MAC	2,5	2,8	6,8	9551,9	14553,9	160,4
15	2MAC+2Dken+2MAC -V2	1,2	3,2	9,4	8376,3	14469,5	289,7

3.2.1.4.3 Dokuz Katmanlı Kompozitler. Dokuz katmanlı dokuma kenevir ve mat atık cam takviyeli deney elemanı 16'nın çekme yükü-uzama grafikleri Şekil 3.15'te sunulmuştur. Kompozitlerin maksimum yüke ulaşana kadar çoklu çatlak davranışı sergilemediği gözlemlenmiştir. Maksimum yüke ulaşıldığında bütün numunelerin ani olarak koptuğu ve yük taşıma kapasitelerini kaybettikleri görülmektedir.



Şekil 3.15 Deney elemanı 16 için çekme yükü- uzama grafikleri

Deney elemanı 16'nın çekme gerilmesi-birim uzama grafiği Şekil 3.16'da sunulmuştur. Deney Elemanı 16 için çekme dayanımı 149,1 MPa elde edilmiştir (Tablo 3.7). Dokuma kenevir ile mat atık camlı hibrit kompozitlerde kenevir kumaş dayanımda azaltıcı etkide bulunmuştur. Deney elemanı 19 (9MAC)'un çekme dayanımı değeri deney elemanı 16'nın çekme dayanımı değerinin yaklaşık iki katıdır.



Şekil 3.16 Deney elemanı 16 için çekme gerilmesi-birim uzama grafikleri

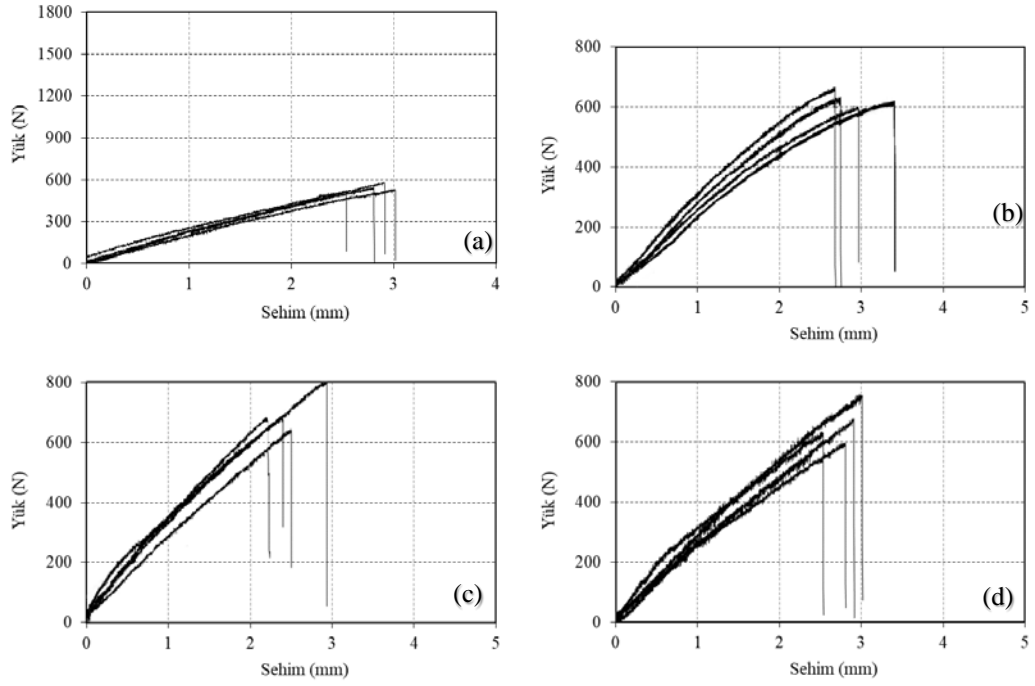
Tablo 3.7 Katmanlarında mat atık cam ve dokuma kenevir kumaş bulunan dokuz katmanlı kompozitlerin çekme testi sonuçları

Deney Elemanı No	Numune Gösterim	Kalınlık (mm)	Ortalama Kopma uzaması (mm)	Ortalama Elastisite Modülü (GPa)	Ortalama Maksimum Kuvvet (N)	Tokluk (N. mm)	Ortalama Çekme Dayanımı (MPa)
16	3Dken+3MAC+3Dken	3,5	5,5	2,3	13280,6	40048,2	149,1 ± 7,2

### 3.2.2 Laminelerin Eğilme Yükleri Altındaki Performansı

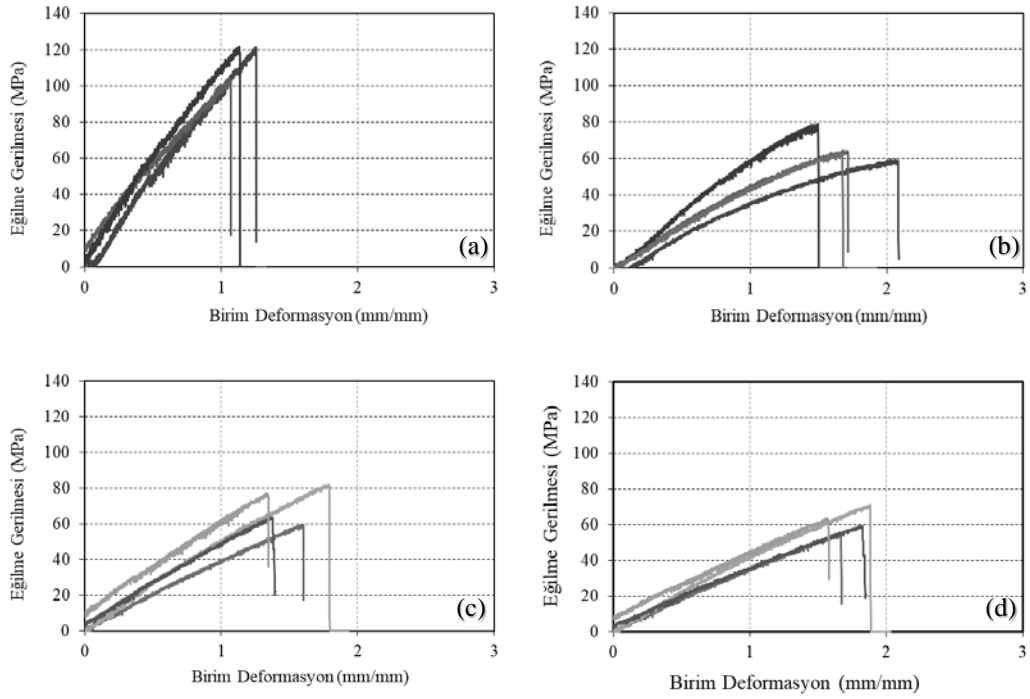
#### 3.2.2.1 Katmanlarında Dokuma Jüt Elyaf Bulunan Kompozitlerin Eğilme Performansı

Altı (deney elemanı 8 ve 9) ve dokuz (deney elemanı 17 ve 18) katmanlı dokuma jüt takviyeli (DJ) kompozitlerin eğilme yükü – sehim grafikleri Şekil 3.17’de sunulmaktadır. Eğilme testindeki ortalama maksimum kuvvet değeri altı katman jüt kumaşlı kompozitlerde silan işleminin uygulanması sonucu artışa neden olsa da kumaşın yapısında meydana gelen değişikliklerden dolayı kalınlığı da artmaktadır. Dokuz katmanlı jüt kompozitlerde ise silan işlemi sonrası ortalama kuvvet değerinin düştüğü görülmektedir. Ortalama tokluk değeri incelendiğinde 6DJ (Silanlı) hariç bütün kompozitler benzer tokluk değerine sahip olduğu görülmektedir (Tablo 3.8). Eğilme tokluğu değerindeki azalmanın nedeni silan işlemi sonrası jüt kumaşa meydana gelen dayanım kaybı ile açıklanabilir. Dokuz katmanda ise takviye malzemesi artmasına rağmen eğilme tokluğunda önemli bir artış görülmemiştir.



Şekil 3.17 Deney elemanı 8 (a), deney elemanı 9 (b), deney elemanı 17 (c) ve deney elemanı 18 (d) için yük – sehim grafikleri

Altı (deney elemanı 8 ve 9) ve dokuz (deney elemanı 17 ve 18) katmanlı dokuma jüt takviyeli (DJ) kompozitlerin eğilme gerilmesi – birim deformasyon grafikleri Şekil 3.18’de sunulmaktadır. Deney elemanı 8, 9, 17 ve 18 için eğilme dayanımları sırasıyla 114,7 MPa, 66,6 MPa, 70,6 MPa ve 65,4 MPa elde edilmiştir (Tablo 3.8). Silan işlem görmemiş numunelerde katman sayısının 6’nın üzerine çıkması (9 katman) durumunda %38,4’lük bir dayanım düşüşü oluşmuştur. Altı katmanda silan işlemi sonrasında ise %41,9’luk bir dayanım azalması olmuştur. Dokuz katmanda ise bu dayanım kaybı %8’dir. Silan işlemi, kompozitin performansını olumsuz etkilemektedir. Direkt çekme yükleri altındaki performansa paralel olarak altı katmanlı ve modifikasyon işlemi görmemiş deney elemanı 8’in eğilme altında da en yüksek performansı sergilediği belirlenmiştir.



Şekil 3.18 Deney elemanı 8 (a), deney elemanı 9 (b), deney elemanı 17 (c) ve deney elemanı 18 (d) için eğilme gerilmesi – birim deformasyon grafikleri

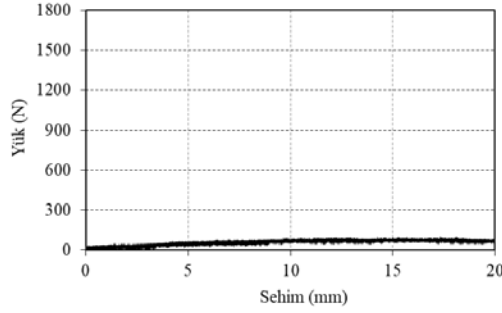
Tablo 3.8 Katmanlarında dokuma jüt bulunan kompozitlerin eğilme testi sonuçları

Deney Elemanı No	Numune Gösterim	Kalınlık (mm)	Ortalama Maksimum Kuvvet (N)	Ortalama Tokluk (N. mm)	Ortalama Eğilme Dayanım (MPa)
8	6DJ	4,1	544,5	1047,6	114,7 ± 8,6
9	6DJ(silanlı)	5,8	632,8	840,5	66,6 ± 8,5
17	9DJ	6,0	706,3	1019,6	70,6 ± 10,6
18	9DJ(Silanlı)	6,2	667,4	1051,7	65,4 ± 4,8

### 3.2.2.2 Katmanlarında Dokuma Kenevir Bulunan Kompozitlerin Eğilme Performansı

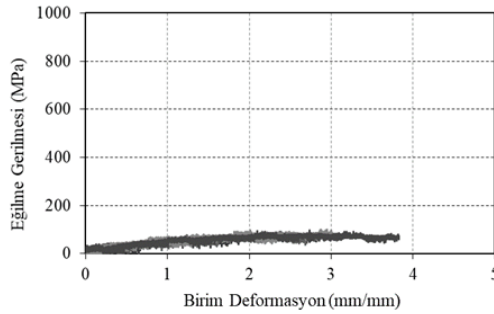
Tek katmanlı dokuma kenevir malzemesi lamineler çok ince ve oldukça düşük rijitliğe sahip oldukları için kullanılan eğilme deney aletinin hassasiyetinin altında kalmıştır. Bu nedenle tek katman numunelerde eğilme deneyi yapılamamıştır. Altı katmanlı dokuma kenevir ile üretilen (deney elemanı 11) kompozitlerin yük-sehim

grafikleri Şekil 3.19’da sunulmuştur. Elde edilen test sonuçlarına göre altı katmanlı kenevir önemli bir eğilme yükü taşımamıştır. Numuneler oldukça elastik bir davranış göstermiştir ve limit sehim değerine kadar göçme oluşmamıştır.



Şekil 3.19 Deneysel eleman 11 için yük-sehim grafikleri

Altı katmanlı takviye malzemesi olarak dokuma kenevir kullanılan kompozitin eğilme gerilmesi-birim deformasyon grafiği Şekil 3.20’de sunulmuştur. Deneysel eleman 11’in eğilme dayanımı 94,2 MPa bulunmuştur (Tablo 3.9).



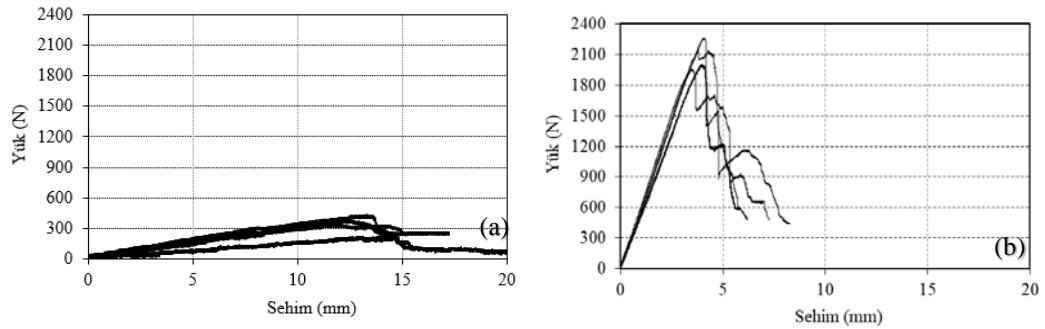
Şekil 3.20 Deneysel eleman 11 için eğilme gerilmesi-birim deformasyon grafikleri

Tablo 3.9 Katmanlarında dokuma kenevir bulunan kompozitlerin eğilme testi sonuçları

Deneysel Eleman No	Numune Gösterim	Kalınlık (mm)	Ortalama Maksimum Kuvvet (N)	Ortalama Tokluk (N.mm)	Ortalama Eğilme Dayanım (MPa)
11	6Dken	1,9	96,1	1117,1	94,2 ± 3,1

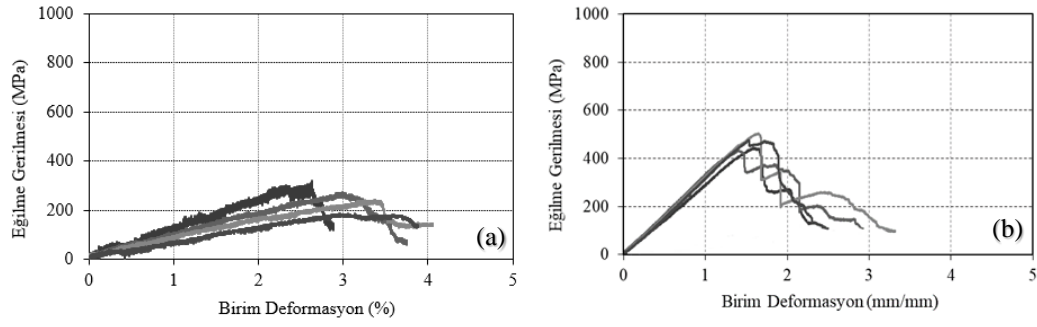
### 3.2.2.3 Katmanlarında Mat Atık Cam Bulunan Kompozitlerin Eğilme Performansı

Dokuz ve altı katmanlı takviye malzemesi olarak mat atık cam lif oluşturulan kompozitlerin yük-sehim grafikleri Şekil 3.21’de sunulmuştur. Üç katmanlı kompozitlerin kalınlıkları test cihazının hassasiyetinin altında kaldığı için eğilme testi yapılamamıştır. Grafikler, taşınan yük maksimum yükün %30’una düştüğü deplasman değerine kadar sunulmuştur. Dokuz katman numunelerin grafikleri incelendiğinde kompozitler maksimum yüke ulaştıktan sonra taşınan yük miktarında ani düşüşlerin ardından kısmen bir artış ve tekrar ani düşüşler görülmektedir. Bu durum her bir katmandaki mat atık cam malzemesi yük taşıma kapasitesini kaybettikten sonra kompozitteki bütün liflerin kopmayıp çekme bölgesindeki diğer bir katmanın yükü taşımaya devam etmesi ile açıklanabilir. Bu davranışın sonucunda malzemenin enerji yutma kapasitesi oldukça yüksek değerlere ulaşmıştır. Altı katman numuneler incelendiğinde ise maksimum yüke ulaşıldıktan sonra numunenin yük taşıma kapasitesinde düşüşler görülse de ani kırılma görülmemiş ve numune yük taşımaya devam etmiştir. Katman sayısının altı katmandan dokuz katmana çıkarılması numunelerin enerji yutma kapasitesini %135 artırmıştır.



Şekil 3.21 Deney elemanı 10 (a) ve deney elemanı 19 (b) için yük-sehim grafikleri

Dokuz ve altı katmanlı takviye malzemesi olarak mat atık cam ile üretilen kompozitlerin eğilme gerilmesi-birim deformasyon grafikleri Şekil 3.22’de sunulmuştur. Deney Elemanı 10 ve 19’un eğilme dayanımları sırasıyla 255,8 MPa ve 463,5 MPa bulunmuştur (tablo 3.10). Katman sayısının altı katmandan dokuz katmana çıkarılması numunenin eğilme dayanımını yaklaşık %81 artırmıştır.



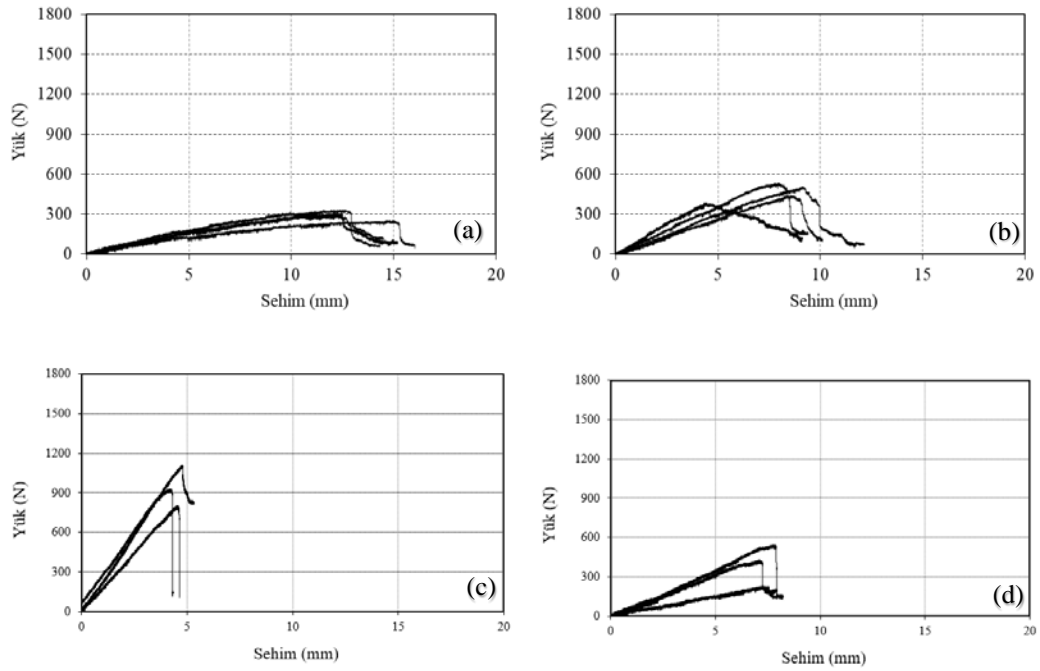
Şekil 3.22 Deney elemanı 10 (a) ve deney elemanı 19 (b) için eğilme gerilmesi-birim deformasyon grafikleri

Tablo 3.10 Katmanlarında mat atık cam bulunan kompozitlerin eğilme testi sonuçları

Deney Elemanı No	Numune Gösterim	Kalınlık (mm)	Ortalama Maksimum Kuvvet (N)	Ortalama Tokluk (N. mm)	Ortalama Eğilme Dayanım (MPa)
10	6MAC	2,2	347,7	3262,1	255,8 ± 49,3
19	9MAC	3,9	2096,9	7696,9	463,5 ± 28,3

#### 3.2.2.4 Katmanlarında Dokuma Kenevir ve Mat Atık Cam Bulunan Bulunan Hibrit Kompozitlerin Eğilme Performansı

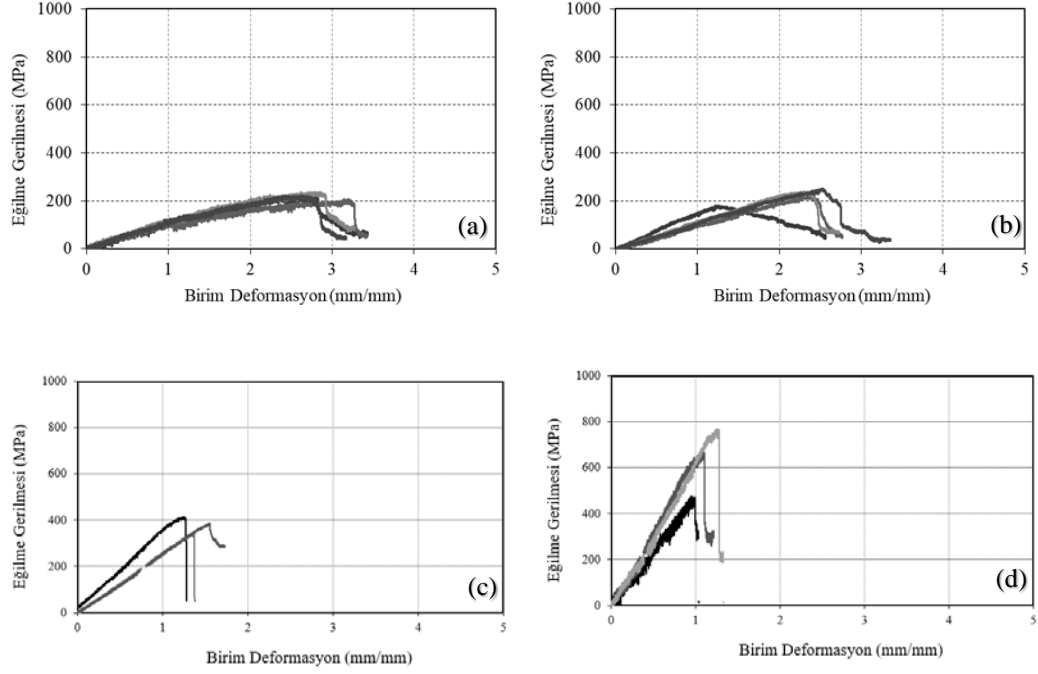
3.2.2.7.1 *Altı Katmanlı Kompozitler.* Altı ve dokuz katmanlı farklı konfigürasyonlara sahip takviye malzemesi olarak dokuma kenevir ve mat atık cam ile oluşan kompozitlerin yük-sehim grafikleri Şekil 3.23'te sunulmuştur. Grafikler, taşınan yükün maksimum yükün %30'una düştüğü deplasman değerine kadar sunulmuştur. Deney Elemanı-13'ün katmanlarındaki dokuma kenevir hacmi Deney Elemanı-12'nin yarısıdır ve buna karşılık katmanlarındaki atık cam lif hacmi aynı oranda daha fazladır. Ayrıca Deney Elemanı-13'ün dış katmanlarında mat atık cam ve ara katmanlarında dokuma kenevir malzemesi kullanılmıştır. Deney Elemanı 13'ün katmanlarındaki bu değişiklikler Deney Elemanı-12'ye göre ortalama maksimum kuvvet değerini %216 arttırmıştır.



Şekil 3.23 Deney elemanı 12 (a), deney elemanı 14 (b), deney elemanı 13 (c) ve deney elemanı 15 (d) için yük-sehim grafikleri

Altı ve dokuz katmanlı farklı konfigürasyonlara sahip, takviye malzemesi olarak dokuma kenevir ve mat atık camdan oluşan kompozitlerin eğilme gerilmesi-birim deformasyon grafikleri Şekil 3.24'te sunulmuştur. Deney elemanı 12, 14, 13 ve 15'in eğilme dayanımları sırasıyla 222,2 MPa, 223,1 MPa, 381,0 MPa ve 642,4 MPa olarak bulunmuştur (Tablo 3.11). Deney Elemanı-12 ve Deney Elemanı-14 kıyaslandığında çekme bölgelerindeki dokuma kenevir hacminin artırılıp ara katmanlardaki mat atık cam hacminin azaltılması ortalama eğilme dayanımında minör bir düşüşe (1,2 MPa) neden olmuştur. Deney Elemanı-12 ve Deney Elemanı-14 kıyaslandığında çekme bölgelerindeki dokuma kenevir hacminin artırılıp ara katmanlardaki mat atık cam hacminin azaltılması ortalama eğilme dayanımında minör bir düşüşe (1,2 MPa) neden olmuştur. Deney Elemanı-12 ve Deney Elemanı-13 kıyaslandığında çekme bölgelerinde dokuma kenevir yerine mat atık cam kullanılması ve buna karşılık ara katmanlarda da mat atık cam yerine dokuma kenevir kullanımı eğilme dayanımını değerini %71 oranında arttırmıştır. Deney Elemanı-13 ve Deney Elemanı-15 kıyaslandığında ise tek katmanda kullanılan atık cam lif hacminin  $400\text{g/m}^2$  yerine  $200\text{g/m}^2$  kullanılması ortalama eğilme dayanımı değerini %67 arttırmıştır. Bu

durumun sebebi tek katmanda 200 g/m<sup>2</sup> atık cam lif kullanımının kritik değere yakın olması olabilir.

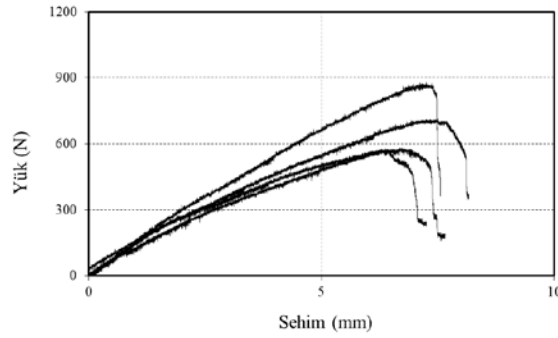


Şekil 3.24 Deneysel eleman 12 (a), deneysel eleman 14 (b), deneysel eleman 13 (c) ve deneysel eleman 15 (d) için eğilme gerilmesi-birim deformasyon grafikleri

Tablo 3.11 Katmanlarında dokuma kenendir kumaş ve mat atık cam bulunan altı katmanlı kompozitlerin eğilme testi sonuçları

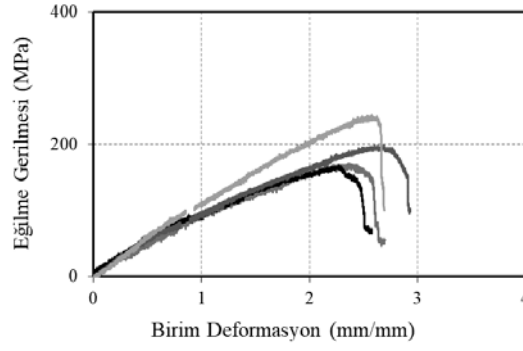
Deneysel Eleman No	Numune Gösterim	Kalınlık (mm)	Ortalama Maksimum Kuvvet (N)	Ortalama Tokluk (N. mm)	Ortalama Eğilme Dayanım (MPa)
12	2Dken+2MAC+2Dken	2,2	299,2	2553,3	222,2 ± 10,5
14	Dken+4MAC+Dken	2,8	468,8	2493,2	223,1 ± 26,3
13	2MAC+2DKEN+2MAC	3,0	946,9	2340,6	381,0 ± 28,3
15	2MAC+2DKEN+2MAC-V2	1,5	398,9	1576,2	642,4 ± 122,7

3.2.2.7.2 *Dokuz Katmanlı Kompozitler*. Dokuz katmanlı takviye malzemesi olarak dokuma kenevir ve mat atık camdan oluşan kompozitlerin yük-sehim (mm) grafikleri Şekil 3.25'te sunulmuştur. Deney Elemanı 16, takviye malzemesi olarak aynı malzemelerden oluşan altı katmanlı Deney Elemanı 12 ile kıyaslandığında katmanlarındaki dokuma kenevir miktarı ve mat atık cam miktarı %50 artırıldığında tokluk ve maksimum kuvvet değerlerinde sırasıyla %35 ve %130'luk bir artış bulunmuştur (Tablo 3.12). Deney Elemanı 16, takviye malzemesi olarak aynı malzemelerden oluşan altı katmanlı Deney Elemanı 14 ile kıyaslandığında katmanlarındaki dokuma kenevir miktarı %200 artırılıp mat atık cam miktarı %75 oranında azaltıldığında ise tokluk ve maksimum kuvvet değerlerinde sırasıyla %38 ve %47'lik bir artış bulunmuştur.



Şekil 3.25 Deney elemanı 16 için yük-sehim grafikleri

Dokuz katmanlı takviye malzemesi olarak dokuma kenevir ve mat atık camdan oluşan kompozitlerin eğilme gerilmesi-sehim (mm) grafikleri Şekil 3.26'da sunulmuştur. Deney Elemanı 16'nın eğilme dayanımı yaklaşık 194,4 MPa bulunmuştur (Tablo 3.12). Deney Elemanı 16 maksimum eğilme gerilmesi değerine ulaştıktan sonra taşıma gücünde ani düşüş gözlemlenmiş ancak belirli bir değerden sonra kompozit yük taşımaya devam etmiştir.



Şekil 3.26 Deney elemanı 16 için eğilme gerilmesi-birim deformasyon grafikleri

Tablo 3.12 Katmanlarında dokuma kenevir kumaş ve mat atık cam bulunan dokuz katmanlı kompozitlerin eğilme testi sonuçları

Deney Elemanı No	Numune Gösterim	Kalınlık (mm)	Ortalama Maksimum Kuvvet (N)	Ortalama Tokluk (N. mm)	Ortalama Eğilme Dayanım (MPa)
16	3Dken+3MAC+3Dken	3,54	689,1	3456,3	194,4 ± 30,7

### 3.3 Sonuçlar

Mekanik deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 3.13'te sunulmuştur. Toplam 19 farklı konfigürasyona sahip kompozit üretilmiştir. Üretilen kompozitlere çekme ve eğilme testleri yapılarak mekanik performansları belirlenmiştir.

- Kompozit üretiminde atık cam lifleri, dokuma jüt kumaş, kenevir lifli dokuma kumaş ve epoksi reçine kullanılmıştır.
- Yapılan testlerde 17,5 MPa ile 296,3 MPa arasında çekme dayanımı elde edilmiştir.
- Yapılan testlerde 65,4 MPa ile 642,4 MPa arasında eğilme dayanımı elde edilmiştir.
- Dokuma jüt kumaş ile oluşturulan kompozitler yalnızca epoksi ile oluşturulan numune dayanımından daha düşük çekme dayanımına ulaşmıştır.
- Katmanlarında atık ve doğal lif içeren hibrit kompozitler arasında en yüksek çekme dayanımı seviyesine 289,7 MPa çekme dayanımı ile 2MAC+2DKEN+2MAC-v2 ulaşmıştır.

- Katmanlarında sadece mat atık cam içeren kompozitler arasında en yüksek çekme dayanımı seviyesine 296,3 MPa çekme dayanımı ile 9MAC ulaşmıştır.
- Katmanlarında atık ve doğal lif içeren hibrit kompozitler arasında en yüksek eğilme dayanımı seviyesine 642,4 MPa eğilme dayanımı ile 2MAC+2DKEN+2MAC-v2 ulaşmıştır.
- Katmanlarında sadece mat atık cam içeren kompozitler arasında en yüksek eğilme dayanımı seviyesine 463,5 MPa eğilme dayanımı ile 9MAC ulaşmıştır.
- Katmanlarında takviye malzemesi olarak mat atık cam ve dokuma kenevir malzemesi kullanılan hibrit numunelerde mat atık camın içeriğindeki atık cam lif hacminin 400 g/m<sup>2</sup> den 200 g/m<sup>2</sup>'ye düşürülmesi (2MAC+2DKEN+2MAC-v2) çekme ve eğilme dayanımını sırasıyla %81 ve %69 oranında arttırmıştır.
- Atık cam liflerinin mat hale getirilmesiyle üretilen dokuz katmanlı mat atık cam (9MAC) en yüksek çekme dayanımına (296,3 MPa) ulaşmıştır.
- Dokuma kenevir kumaşı ve mat atık cam ile hibrit şekilde üretilen altı katmanlı 2MAC-2DKEN-2MAC-v2 kompoziti 9MAC kompoziti ile benzer çekme dayanımı (289,7) mertebesine ulaşmıştır.
- Dokuma kenevir kumaşı ve mat atık cam ile hibrit şekilde üretilen altı katmanlı 2MAC-2DKEN-2MAC-v2 kompoziti tatminkâr çekme dayanımı sonucu sergilerken en yüksek eğilme dayanımına sahip olması nedeniyle gerçek boyutlu numune üretiminde kullanılmak üzere bu kompozit belirlenmiştir.

Tablo 3. 13 Lamine çekme ve eğilme testi sonuçları

Deney No	Numune Gösterim	Kalınlık (mm)	Ortalama Kopma Uzaması (mm)	Çekmede Elastisite Modülü (GPa)	Çekme Tokluğu (N.mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)
1	Saf epoksi	1,20	5	1,9	9032,5	88,0 ± 1,2	-
2	DJ	1,00	1,6	2,6	659,6	24,1 ± 1,8	-
3	DJ (Silanlı)	1,1	1,5	2,5	499,5	17,5 ± 0,7	-
4	Dken	0,4	6,8	1,8	2205,0	53,4 ± 11,1	-
5	MAC	0,50	3,7	5,5	3078,6	175,1 ± 35	-
6	3MAC	1,0	2,6	10,0	9032,8	245,3 ± 39,2	-
7	MAC+ DKEN+ MAC	0,6	1,6	14,4	3358,6	219,3 ± 46,4	-
8	6DJ	3,90	3,4	2,0	12166,1	72,4 ± 7,1	114,7 ± 8,6
9	6DJ (Silanlı)	5,80	2,2	2,2	6397,1	33,5 ± 2,6	66,6 ± 8,5
10	6MAC	2,2	4,6	5,8	32368,5	266,3 ± 54	255,8 ± 49,3
11	6DKEN	1,9	8	1,8	18185,8	72,8 ± 2,2	94,2 ± 3,1
12	2DKEN+ 2MAC +2DKEN	2,2	4,4	2,7	16406,4	125,6 ± 17,4	222,2 ± 10,5
13	2MAC+ 2DKEN+ 2MAC	2,5	2,8	6,8	14553,9	160,4 ± 36,7	381,0 ± 28,3
14	DKEN+ 4MAC+ DKEN	2,8	6,6	2,0	24588,1	131,3 ± 38,7	223,1 ± 26,3
15	2MAC+ 2DKEN+ 2MAC- v2	1,2	3,2	9,4	14469,5	289,7 ± 30,4	642,4 ± 122,7
16	3DKEN+ 3MAC+ 3DKEN	3,5	5,5	2,3	40048,2	149,1 ± 7,2	194,4 ± 30,7
17	9DJ	4,40	4	1,4	12202,6	49,6 ± 1,0	70,6 ± 10,6
18	9DJ (Silanlı)	6,2	2,8	1,4	8489,0	28,1 ± 1,5	65,4 ± 4,8
19	9MAC	3,9	6,3	4,2	91120,0	296,3 ± 16,3	463,5 ± 28,3

## BÖLÜM DÖRT

### BETONARME DENEY ELEMANLARI VE DENEY TEKNİĞİ

#### 4.1 Genel

Mevcut betonarme yapılarda tasarım ve/veya işçilik hatalarından dolayı kesme dayanımı yetersizliği görülebilmektedir. Kesme kırılması betonarme yapılar için oldukça tehlikeli bir kırılma türüdür. Kesme yetersizliğine sahip betonarme yapı elemanlarında sünek davranış gözlenmeden ani olarak göçme gerçekleşmekte ve eleman gevrek kırılmaktadır. Ayrıca mevcut birçok betonarme yapı elemanında, donatılarda oluşan paslanma veya elemanlara gelen yüklerin artması gibi nedenlerden dolayı kesme yetersizlikleri ortaya çıkmaktadır. Kesme yetersizliklerine sahip betonarme kirişlerin kesme kapasiteleri artırılarak kırılma şeklinin ani ve gevrek bir kırılma türü olan kesme kırılmasından eğilme kırılmasına yönlendirilmesi oldukça önemlidir. Bu tip yetersizliklere sahip betonarme elemanların güçlendirilmesinde çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemlerden bazıları elemanların mantolanması, elemanın kesitini büyütme, çelik veya karbon kumaşların çeşitli yapıştırıcılarla elemana yapıştırılması olarak sıralanabilir.

Bu çalışma kapsamında literatürde sıkça rastlanılan güçlendirme malzemelerinden farklı olarak sürdürülebilir atık ve/veya doğal lif takviyeli polimer kompozit kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Güçlendirmede kullanılacak polimer kompozit belirlenirken yapılan mekanik test sonuçlarına göre hem çekme hem de eğilme dayanımı üretilen diğer kompozitlere göre yüksek olması nedeniyle 2MAC-2DKEN-2MAC-v2 katman dizilimine sahip polimer kompozit seçilmiştir.

#### 4.2 Malzemeler

Betonarme deney elemanlarının üretilmesinde mekanik özellikleri Tablo 4.2’de verilen nervürlü donatı ve karışım oranları Tablo 4.1’de verilen beton kullanılmıştır. Donatı ve betonun mekanik özellikleri numunelere uygulanan çekme ve basınç

testleriyle belirlenmiştir. Deney elemanlarının aynı gün ve aynı karışımdan temin edilen betonla üretilmiştir. Ayrıca donatı tek seferde ve aynı üretimden temin edilerek kullanılmıştır.

#### 4.2.1 Beton

Betonarme kirişlerin beton dökümü hazır beton santralinde gerçekleştirilmiştir. ACI 440 (Alkhrdaji vd., 2006) epoksi ile yapıştırılarak güçlendirilecek elemanlarda (özellikle Fiber Donatılı Polimerler-FRP) en düşük beton basınç dayanımının 17 MPa olması gerektiğini vurgulamaktadır. Hem bu nedenle hem de deney elemanlarının, ülkemizde son 15-20 yıllık süreçte inşa edilmiş yapı stoğunu yansıtabilmesi amacıyla, deney elemanlarının karakteristik silindirik beton basınç dayanımı 20 MPa olarak belirlenmiştir (Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, 2018’de beton basınç dayanımının en az 25 MPa olabileceği belirtilmektedir). Ancak mevcut yapı stoğumuzda 7~10 MPa beton basınç dayanımına sahip betonarme elemanların güçlendirilmesi gerekliliği ile de çokça karşılaşılmaktadır.

Betonarme kirişlerde kullanılan betonun dozajı  $315 \text{ kg/m}^3$ ’tür. Portland Çimento (CEM I 42.5R) bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Kullanılan karışımda maksimum agrega çapı 16 mm olarak belirlenmiştir. Karışımda 0-5 mm ve 5-15 mm çapında kullanılan agregaların su emme oranı sırasıyla %2,86 ve %1,3, kuru yüzey doygun özgül ağırlıkları ise sırasıyla 2,80 ve 2,85’tir. Karışımın su/çimento oranı 0,70’tir. Karışımın slump değeri 150 mm’dir. C20 betonun karışım oranları Tablo 4.1’de sunulmuştur.

Tablo 4.1 Kiriş imalatında kullanılan betonun karışım oranları

Malzeme	Dozaj ( $\text{kg/m}^3$ )
Çimento (CEM-I 42,5 R)	274
Su	189
İnce agrega (0-4 mm)	918
İri agrega (4-11 mm)	459
İri agrega (11-22 mm)	459
Akışkanlaştırıcı	2,7

#### 4.2.2 Donatı

Betonarme kirişlerde boyuna donatı ve etriye üretiminde B420C donatı çelikleri kullanılmıştır. Kullanılan donatıların mekanik özellikleri Tablo 4.2’de sunulmuştur.

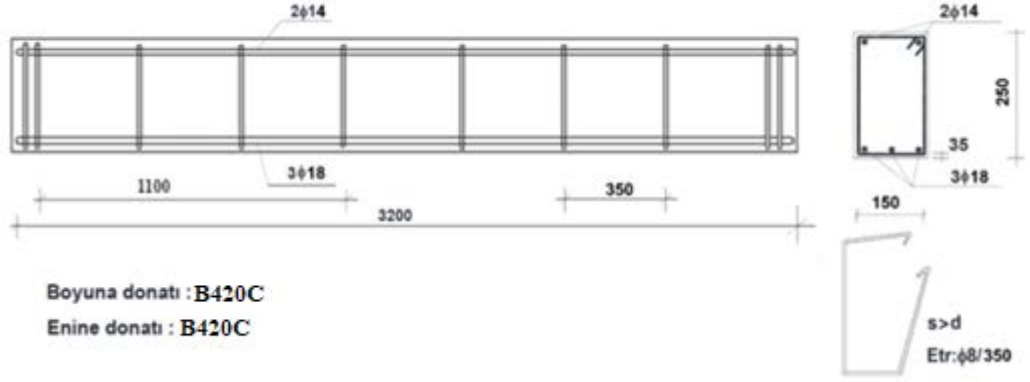
Tablo 4.2 B420C donatı çeliğinin mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	B420C
Minimum akma dayanımı $f_{yk}$ (MPa)	420
Minimum kopma dayanımı $f_{su}$ (MPa)	500
$\varnothing \leq 32$	
Minimum kopma uzaması $f_{su}$ (MPa)	12
$\epsilon_{su}$ (%)	
Minimum kopma uzaması $f_{su}$ (MPa)	10
$\epsilon_{su}$ (%)	
Elastisite Modülü (MPa)	200000

#### 4.3 Kesme Yetersizliği Gösteren Deney Elemanları

Deneyisel çalışmada kesme yetersizliğine sahip betonarme kirişlerin kesme dayanımını artırmak amacıyla güçlendirme malzemesi olarak kullanılan kompozitlerin sağlayacağı katkı incelenmiştir. Bu bağlamda güçlendirme malzemesinin betonarme kirişlerin kesme dayanımına katkısını daha iyi irdeleyebilmek için betonarme kirişler kesme dayanımı yetersiz olacak şekilde tasarlanmıştır.

Tez kapsamında 5 adet 150 × 200 mm kesit boyutlarında ve 3200 mm uzunluğunda kesme dayanımı yetersiz betonarme kiriş deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada atık ve/veya doğal liflerle üretilen kompozitlerin kesme dayanımına katkısı inceleneceği için kesme kapasitesi eğilme kapasitesine göre daha düşük olacak şekilde donatı düzeni oluşturulmuştur. Bu bağlamda 8 mm çapındaki etriyeler 350 mm aralıklarla yerleştirilmiş olup kirişin kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) 5,11’dir. Kirişlerde boyuna donatı olarak, kiriş alt yüzünde 3 adet 18 mm çapında, üst yüzünde ise 2 adet 14 mm çapında B420C donatı çeliği kullanılmıştır. Kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin boyutları ve donatı detayları Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Kesme yetersizliğine sahip 150×250 mm kesitli betonarme kiriş donatı planı (Tanarşlan ve diğer., 2021)

Çalışmada 1 adet referans deney elemanı ve 4 adet kesme dayanımı güçlendirilmiş betonarme kiriş birbirine paralel simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. Referans deney elemanı Kiriş-1, belirlenen kompozitin plaka şeklinde epoksi ile yapıştırılarak güçlendirilen deney elemanı Kiriş-2, belirlenen kompozitin şerit şeklinde epoksi ile yapıştırılarak güçlendirilen deney elemanı Kiriş-3, belirlenen kompozitin şerit şeklinde ankrajlanmasıyla güçlendirilen deney elemanı Kiriş-4 ve belirlenen kompozitin şerit genişliğinin 2 katına (100 mm) çıkarılması suretiyle güçlendirilen deney elemanı Kiriş-5 olarak isimlendirilmiştir.

#### 4.4 Deney Elemanlarının Üretilmesi

Deney elemanlarının üretiminde öncelikle çelik kalıp hazırlanmıştır. Çelik kalıp, kalıp yağıyla yağlandıktan sonra donatılar uygun şekilde bağlanarak kalıba yerleştirilmiştir. Pas payları da uygun şekilde bırakıldıktan sonra beton dökümü gerçekleştirilmiştir. Döküm sırasında kullanılan çelik kalıp Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 Çelik kalıp kesit detayı (Kişisel arşiv, 2023)

Şekil 4.3'te gösterildiği gibi alt ve üst donatılar uygun şekilde yerleştirildikten sonra kiriş etriyeleri boyunca donatıları saracak şekilde bağlanmıştır.



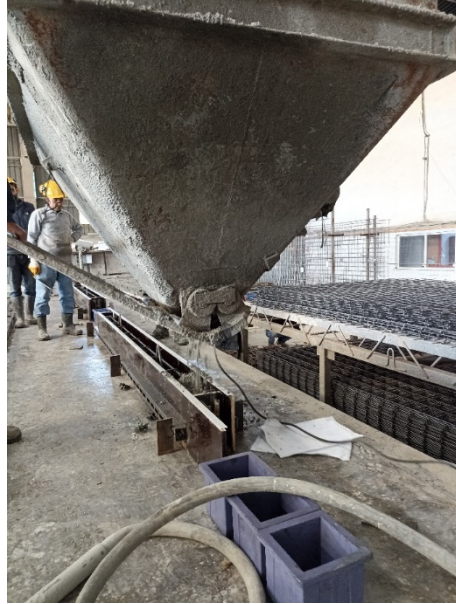
Şekil 4.3 Donatı bağlanması (Kişisel arşiv, 2023)

Çelik kalıp ve donatı kafesi uygun şekilde oluşturulduktan sonra Şekil 4.4'te gösterildiği gibi beton dökümüne hazır hale getirilmiştir.



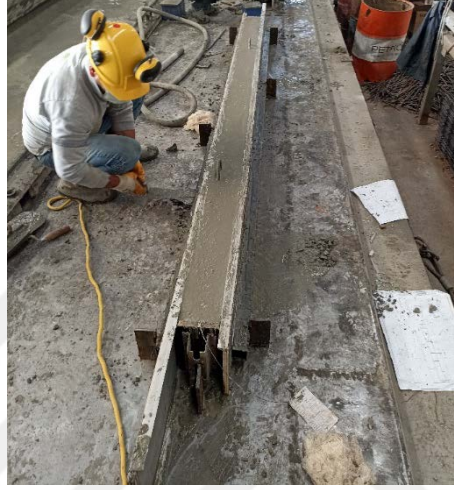
Şekil 4.4 Beton dökümüne hazır deney elemanları (Kişisel arşiv, 2023)

Deney elemanlarının çeşitli mekanik özellikleri birbirleriyle karşılaştırılacağı düşünüldüğünde kullanılan betonun özdeş olması büyük öneme sahiptir. Bunun nedenle beton dökümlerinin tamamında aynı agrega ve beton malzemeleri kullanılmıştır. Döküm aşamasına dair bir görüntü Şekil 4.5’te sunulmaktadır.



Şekil 4.5 Deney elemanları beton dökümü (Kişisel arşiv, 2023)

Betonarme kirişlerin üretiminde beton dökülürken betonun kalıba iyi yerleşmesi için vibratör kullanılmıştır. Yapılan dökümden üç adet standart silindir numunesi alınmıştır. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da betonarme kirişin beton dökümü anında çekilen görseller sunulmuştur. Beton dökümünün ardından betonarme kiriş ve standart silindir numuneler bir gün kalıpta bekletildikten sonra kalıptan alınarak düzenli olarak kürlenmiştir.



Şekil 4.6 Deneysel elemanların beton dökümü (Kişisel arşiv, 2023)

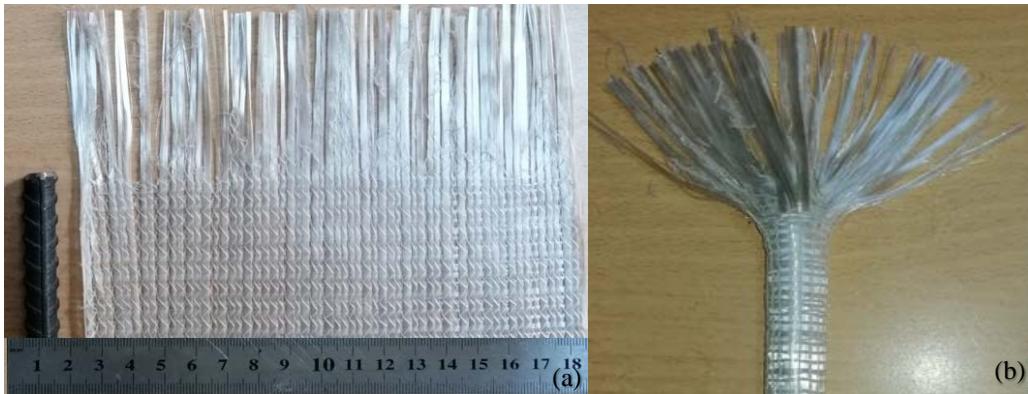
#### **4.5 Kiriş Yüzey Hazırlığı ve Fan Tipi Ankrajların Betonarme Kirişlere Uygulanması**

Çalışmada betonarme kirişlere güçlendirme uygulaması yapılmadan önce kiriş yüzeyi ile güçlendirme malzemesi arasındaki aderansı artırmak amacıyla kirişin güçlendirme uygulanacak yüzeylerine yüzey hazırlığı işlemleri yapılmıştır. Yüzey hazırlığı çalışmalarında kiriş yüzeyi metal disk ile zımparalanarak Şekil 4.7'de gösterildiği gibi pürüzlü hale getirilmiştir. Pürüzlendirilen yüzey hava üfleyici yardımıyla tozdan arındırılarak güçlendirme işlemine hazır hale getirilmiştir. Yüzey hazırlığı işlemi güçlendirme uygulanacak bütün kirişlerin güçlendirme malzemesiyle temas ettiği yüzeylere uygulanmıştır.



Şekil 4.7 Yüzey hazırlığı işlemi (Kişisel arşiv, 2023)

Çalışmada ankrajla güçlendirilen kirişte literatürde yaygın olarak kullanılan fan tipi ankraj metodu uygulanmıştır (Esmaeeli & Shadan, 2023; Ghoroubı vd., 2022; Zhang & Smith, 2012). Fan tipi ankrajlar ACI Committee 355 (*Evaluating the Performance of Post-Installed Mechanical Anchors in Concrete*, 2002) standardına uygun olarak hazırlanmış ve uygulanmıştır. Bu bağlamda ankrajların hazırlanmasında Şekil 4.8 (a)'da gösterilen 8 mm çapında ve 50 mm uzunluğa sahip B420C nervürlü betonarme donatı ve 150×100 mm boyutlarındaki cam fiber kumaş kullanılmıştır. Cam fiber kumaşın satın alınan firma tarafından sunulan teknik özellikleri Tablo 4.3'te verilmiştir. Cam fiber kumaş ve donatı Şekil 4.8 (b)'de gösterildiği gibi sarılarak fan tipi ankraj elde edilmiştir.



Şekil 4.8 Donatı ve cam lifli kumaş (a), fan tipi ankraj (b) (Kişisel arşiv, 2023)

Tablo 4.3 Cam fiber kumaşın mekanik özellikleri

Cam Fiber Kumaş	
Ağırlık	330 g/m <sup>2</sup>
Poisson Oranı	0,21
Kayma Modülü	30 GPa
Çekme Dayanımı	1950 MPa
Elastisite Modülü	72 GPa
Atkı Yönü Elyaf	283 g/m <sup>2</sup>
Çözümlü Yönü Elyaf	37 g/m <sup>2</sup>
Dikiş	10 g/m <sup>2</sup>
Dokuma Tipi	Tek Yönlü

Fan tipi ankrajlar hazırlandıktan sonra yüzey hazırlığı yapılan betonarme kirişe, etriye ve boy donatısıyla temas etmeyecek şekilde çapı ve derinliği sırasıyla 12 mm ve 50 mm olan ankraj delikleri açılmıştır (Şekil 4.9 (a)). Ankraj deliklerinin kiriş alt ve üst kenarına olan mesafesi 60 mm ve delikler şerit şeklinde uygulanacak polimer kompozitlere simetrik olacak biçimde hazırlanmıştır. Ankraj deliklerinin açılmasının ardından delikler ve betonarme kiriş yüzeyi hava tabancası yardımıyla tozdan arındırılmıştır. Şekil 4.9 (b)'de gösterildiği gibi güçlendirmeye hazır hale gelen betonarme kirişe Şekil 4.9 (c)'de gösterildiği gibi hem güçlendirme malzemesi ile betonarme kiriş yüzeyi arasına hem de ankraj deliklerine Sikadur 31 epoksi malzemesi uygulanarak ankrajlar yerleştirilmiştir. Ankrajlar ve şeritler kirişe tatbik edildikten sonra fan tipi ankrajın kiriş dışında kalan kumaşı 360 derece fan şeklinde açılarak kirişe epoksiyle yapıştırılmış ve 21 gün yaklaşık 20 derece laboratuvar koşullarında kür edilmiştir.



Şekil 4.9 Ankraj deliklerinin açılması (a), ankraj deliklerinin temizlenmesi (b), fan tipi ankraj yöntemiyle betonarme kirişlerin güçlendirilmesi (c) (Kişisel arşiv, 2023)

## BÖLÜM BEŞ

### POLİMER KOMPOZİTLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞ TESTLERİ

#### 5.1 Giriş

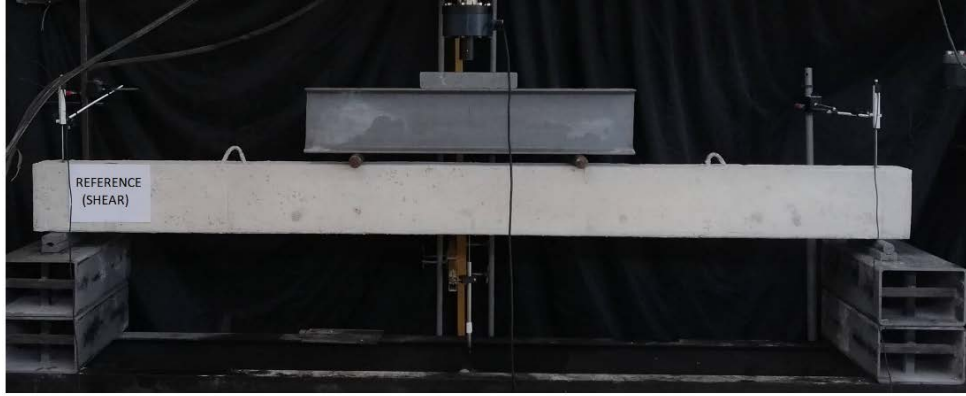
Bu bölümde kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin polimer kompozitlerle güçlendirilmesinin ve farklı uygulama yöntemlerinin kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin dayanım ve davranışına katkısı ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Yapılan kompozit testleri sonucunda dayanım ve maliyet açısından en uygun 2MAC+2DKEN+2MAC-v2 katman dizilimine sahip polimer kompozit güçlendirme malzemesi olarak seçilmiştir. Bütün kirişlerde kullanılan kompozitler altı katmanlı ve aynı konfigürasyona sahiptir. Vakum infüzyon yöntemiyle üretilen kompozitlerde ikişer katman dokuma kenevir malzemesi dış katmanlara, atık cam liflerinin mat hale getirilmesiyle üretilen mat atık cam malzemesi ara katmana yerleştirilmiştir.

Betonarme kiriş testlerinde bir adet referans kiriş ve dört adet güçlendirilmiş kiriş birbirine simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. Literatürde kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin şerit şeklinde güçlendirmesinde şerit genişliği genellikle 50 mm seçilmektedir (Tanarşlan vd., 2021; Saadah vd., 2021). Bu nedenle şerit şeklinde güçlendirilen betonarme kirişlerin sıklıkla tercih edilen şerit genişliğini ve bu genişliğin iki katına çıkarılmasının kiriş dayanım ve davranışına katkısını araştırmak amacıyla şerit genişliği 50 mm ve 100 mm olarak belirlenmiştir. Güçlendirme malzemeleri kesme bölgesine plaka, 50 mm şerit epoksi ile, 50 mm şerit ankraj ve 100 mm şerit şeklinde epoksi ile yapıştırılmak suretiyle kirişlere uygulanmıştır. Güçlendirme malzemeleri a/d oranı 5,11 olan betonarme kirişlerin kesme bölgesine yapıştırılmıştır.

Her deney elemanı için yük-deplasman grafikleri sunulmuş, test esnasında oluşan çatlaklar ve kırılma şekilleri detaylarıyla ele alınarak sunulmuştur.

## 5.2 Kiriş-1

Kiriş-1 referans kesme deney elemanıdır. Kiriş-1 kesme kırılmasına maruz kalacak şekilde tasarlanmıştır. Test birbirine simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir (Şekil 5.1). Yapılan testlerde kesme açıklığı 1100 mm'dir. Deney elemanında artan yükler altında kırılma meydana geldikten sonra maksimum yük yaklaşık %30 oranında düşüncüye kadar teste devam edilmiştir.



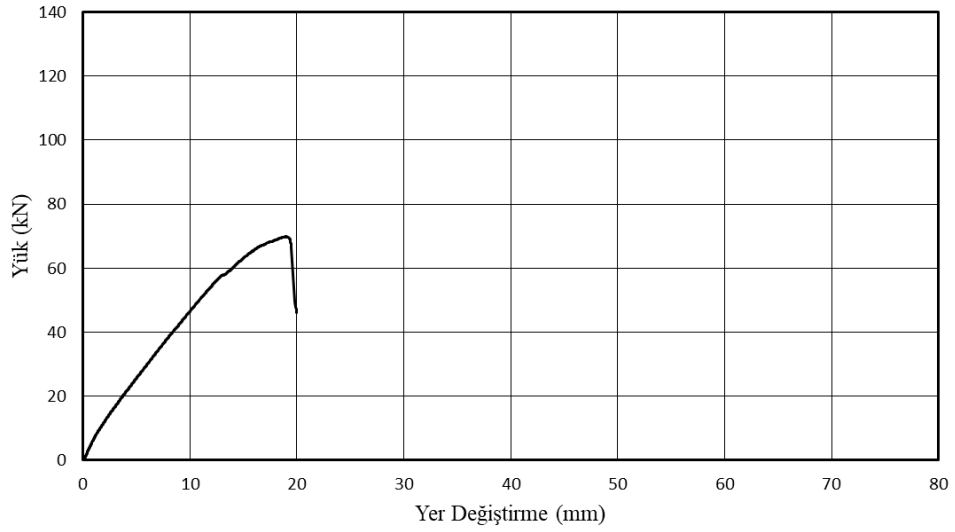
Şekil 5.1 Yüklemeye öncesi referans kesme deney elemanı (Kişisel arşiv, 2023)

DeneySEL çalışma kapsamında test edilen referans kesme elemanında ilk eğilme çatlakları yaklaşık 19,14 kN yük ve 3,73 mm deplasman değerinde oluşmuştur. İlk eğilme çatlakları maksimum yükün %27'sine ulaştığında gerçekleşmiştir. İlk eğilme çatlakları oluştuğundan sonra ikinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci eğilme çatlakları sırasıyla 48,26 kN, 52,17 kN, 54,24 kN ve 54,66 kN seviyelerinde oluşmuş ve çatlak sayısında artış devam etmiştir. Sırasıyla yük 68,50 kN ve 64,27 kN seviyesine ulaştığında birinci ve dördüncü eğilme çatlaklarında kiriş eksenine dik yönde genişleme gözlemlenmiştir. Yük 69,83 kN'ye ve deplasman 19,31 mm'ye ulaştığında deney elemanı ani olarak kesmeden göçmüştür (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 Yükleme sonrası referans deney elemanı (Kişisel arşiv, 2023)

Yapılan testte kesme dayanımı yetersiz olacak şekilde tasarlanan kiriş eğilme kapasitesine ulaşmadan ani olarak kesmeden göçmüştür. Şekil 5.3 incelendiğinde göçme sonrası deney elemanı rijitliğini ani bir şekilde kaybetmiş ve yük taşıyamaz hale gelmiştir.

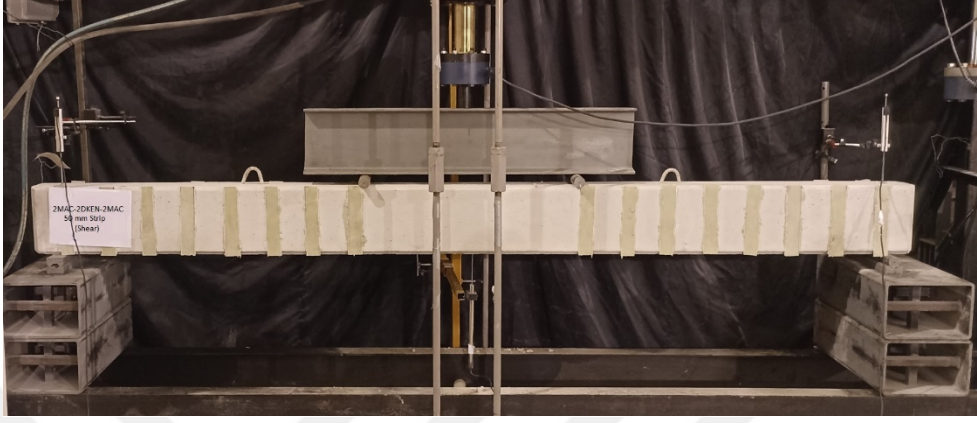


Şekil 5.3 Kiriş-1 yük-deplasman grafiği

### 5.3 Kiriş-2

Kiriş-2 altı katmanlı vakum infüzyon yöntemiyle hazırlanan 2MAC-2DKEN-2MAC-v2 dizilimine sahip polimer kompozitin kiriş kesme bölgesine 50 mm şerit şeklinde yapıştırılmasıyla güçlendirilmiştir. Test birbirine simetrik iki tekil yük altında

test edilmiştir (Şekil 5.4). Yapılan testlerde kesme açıklığı 1100 mm'dir. Deney elemanında artan yükler altında kırılma meydana geldikten sonra maksimum yük yaklaşık %30 oranında düşünceye kadar teste devam edilmiştir.



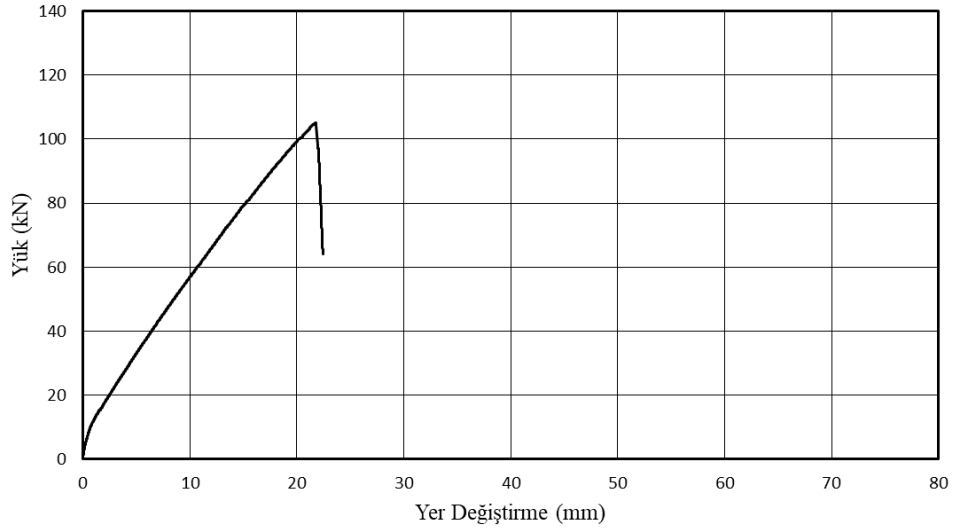
Şekil 5.4 Yükleme öncesi güçlendirilmiş deney elemanı (Kişisel arşiv, 2023)

Deneyel çalışma kapsamında test edilen deney elemanında ilk eğilme çatlakları yaklaşık 29,93 kN yük ve 5,01 mm deplasman değerine ulaştığında oluşmuştur. İlk eğilme çatlakları maksimum yükün %28'ine ulaşıldığında gerçekleşmiştir. İlk eğilme çatlakları oluştuğundan sonra ikinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci eğilme çatlakları sırasıyla 31,50 kN, 34,20 kN, 36,65 kN ve 38,92 kN seviyelerinde oluşmuş ve çatlak sayısında artış devam etmiştir. Sırasıyla yük 62,22 kN ve 63,38 kN seviyesine ulaştığında birinci ve ikinci eğilme çatlaklarında kiriş eksenine dik yönde genişleme gözlemlenmiştir. Yük 73,81 kN mertebesine geldiğinde ilk kesme çatlakları oluşmuştur ancak çatlak şerit şeklinde güçlendirilen plakanın arkasından aniden ilerleyemediği için kırılma tam anlamıyla gerçekleşmemiş, çatlak ilerlerken kiriş yük taşımaya devam etmiştir. Yük 105,25 kN ve 22,43 mm deplasman seviyesine ulaştığı sırada oluşan kesme çatlakları şerit plakanın diğer tarafına yaklaşık 45° açı ile ilerleyerek plakanın sıyrılmasına neden olmuştur ve deney elemanı ani olarak kesmeden göçmüştür (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 Yükleme sonrası güçlendirilmiş deney elemanı (Kişisel arşiv, 2023)

Yapılan testte 50 mm şerit şeklinde güçlendirilen kiriş eğilme kapasitesine ulaşmadan ani olarak kesmeden göçmüştür. Şekil 5.6 incelendiğinde göçme sonrası deney elemanı rijitliğini ani bir şekilde kaybetmiş ve yük taşıyamaz hale gelmiştir. 50 mm şerit şeklinde güçlendirilen deney elemanı referans elemanla benzer davranış gösterse de maksimum yük değerinde yaklaşık %51 artış gözlenmiştir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 Kiriş-2 yük-deplasman grafiği

### 5.4 Kiriş-3

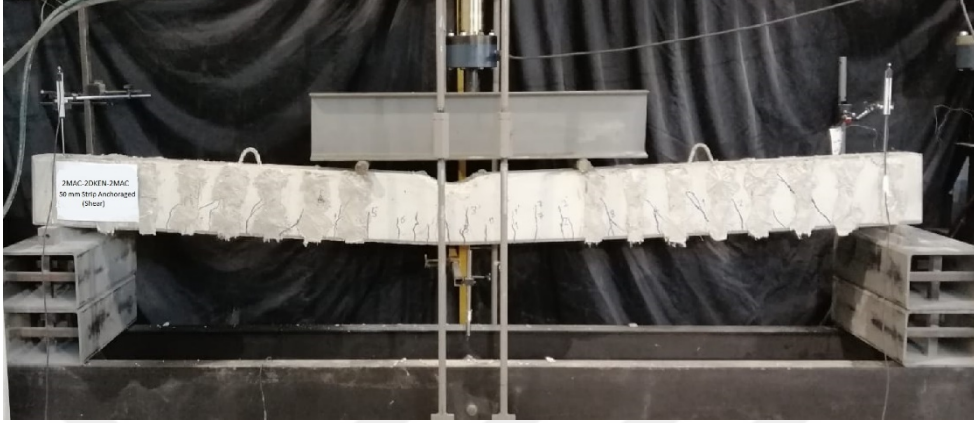
Kiriş-3 altı katmanlı vakum infüzyon yöntemiyle hazırlanan 2MAC-2DKEN-2MAC-v2 dizilimine sahip polimer kompozitin kiriş kesme bölgesine 50 mm şeritlerin ankraj şeklinde yapıştırılmasıyla güçlendirilmiştir. Test birbirine simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir (Şekil 5.7). Yapılan testlerde kesme açıklığı 1100 mm'dir. Deney elemanında artan yükler altında kırılma meydana geldikten sonra maksimum yük yaklaşık %30 oranında düşüncüye kadar teste devam edilmiştir.



Şekil 5.7 Yükleme öncesi güçlendirilmiş deney elemanı (Kişisel arşiv, 2023)

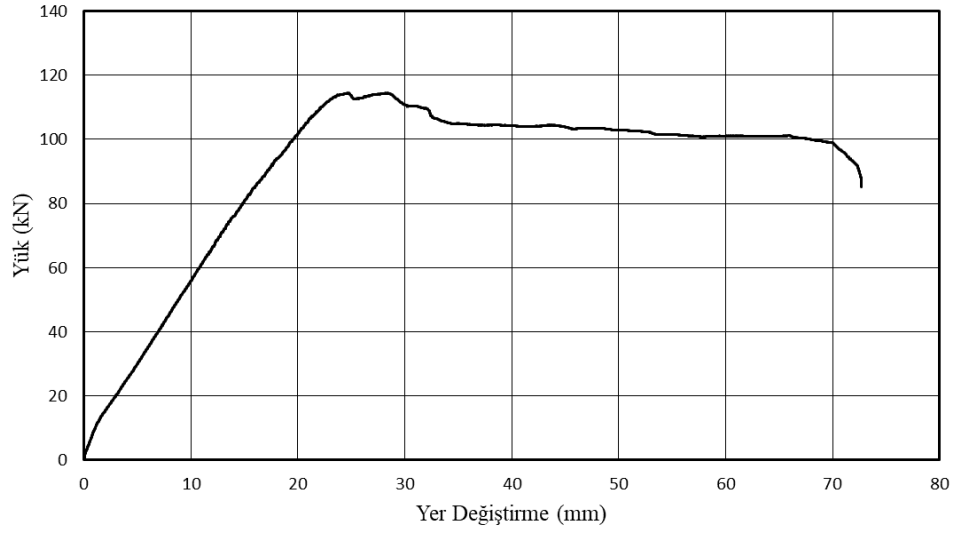
Deneysel çalışma kapsamında test edilen deney elemanında ilk eğilme çatlakları yaklaşık 31,70 kN yük ve 5,30 mm deplasman değerine ulaşıldığında oluşmuştur. İlk eğilme çatlakları maksimum yükün %28'ine ulaşıldığında gerçekleşmiştir. İlk eğilme çatlakları oluşuktan sonra ikinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci eğilme çatlakları sırasıyla 34,52 kN, 37,84 kN, 46,21 kN ve 49,52 kN seviyelerinde oluşmuş ve çatlak sayısında artış devam etmiştir. Sırasıyla yük 78,81 kN, 77,09 kN ve 82,41 kN seviyesine ulaştığında birinci, ikinci ve üçüncü eğilme çatlaklarında kiriş eksenine dik yönde genişleme gözlemlenmiştir. Yük 60,92 ve 62,52 kN mertebelerine geldiğinde kirişin kesme bölgelerinde kesme çatlakları oluşmaya başlamıştır. Oluşan kesme çatlakları şerit şeklinde ankrajla güçlendirilen plakaların arkasından aniden ilerleyemediği için beton basınç bölgesine kadar ulaşamamış ve güçlendirme malzemesi kesme kırılması sonucu ani göçmeyi engellemiştir. Yük 113,57 kN ve deplasman 23,60 mm seviyesine ulaştığı sırada kiriş boyuna donatısı akma dayanımına ulaşmıştır. Deney elemanı beton

basınç bölgesinde ezilme ve dayanım yaklaşık %30 oranında düşüncüye kadar test sürdürülmüştür (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 Yükleme sonrası güçlendirilmiş deney elemanı (Kişisel arşiv, 2023)

Yapılan testte 50 mm şeritlerin ankrāj şeklinde yapıştırılmasıyla güçlendirilen kiriş boyuna donatısı akma dayanımına ulaşmıştır. Şekil 5.9 incelendiğinde kirişin boyuna donatısı akma dayanımına ulaştıktan sonra taşınan yükte bir miktar azalma görülse de ani göçme olmamış kiriş yük taşımaya devam ederek sünek davranış göstermiştir. 50 mm genişlikli şerit kompozitlerin ankrājla tatbik edilmesi sayesinde referans elemana göre yük taşıma kapasitesinde %63 artış sağlanmıştır (Şekil 5.9). Kiriş-2 elemanına göre tatbik yöntemi ankrāj olarak değiştirilen Kiriş-3 deney elemanı Kiriş-2 deney elemanına göre %8 daha fazla yük taşımıştır.



Şekil 5.9 Kiriş-3 yük-deplasman grafiği

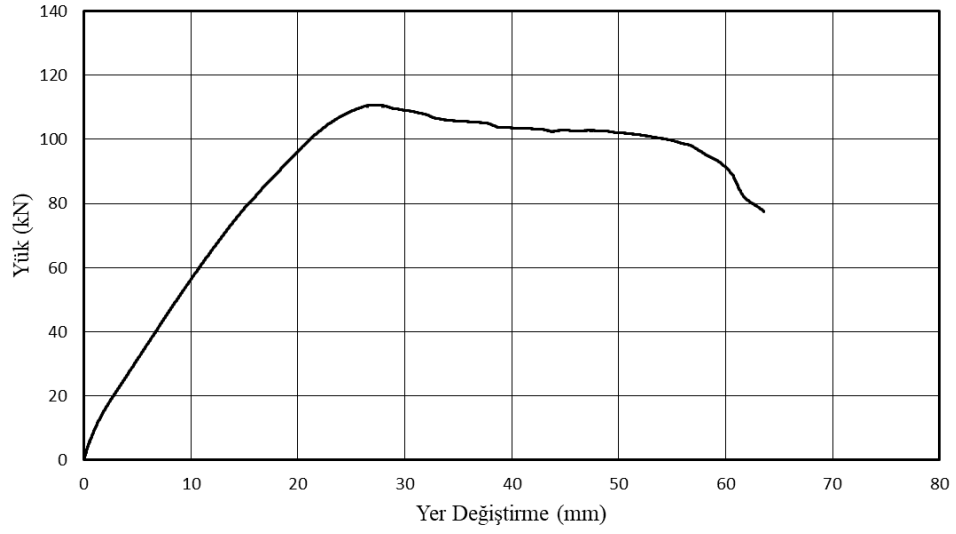
### 5.5 Kiriş-4

Kiriş-4 altı katmanlı vakum infüzyon yöntemiyle hazırlanan 2MAC-2DKEN-2MAC-v2 dizilimine sahip polimer kompozitin kiriş kesme bölgesine 100 mm şerit şeklinde yapıştırılmasıyla güçlendirilmiştir. Test birbirine simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir (Şekil 5.10). Yapılan testlerde kesme açıklığı 1100 mm'dir. Deney elemanında artan yükler altında kırılma meydana geldikten sonra maksimum yük yaklaşık %30 oranında düşüncüye kadar teste devam edilmiştir.



Şekil 5.10 Yükleme öncesi güçlendirilmiş deney elemanı (Kişisel arşiv, 2023)

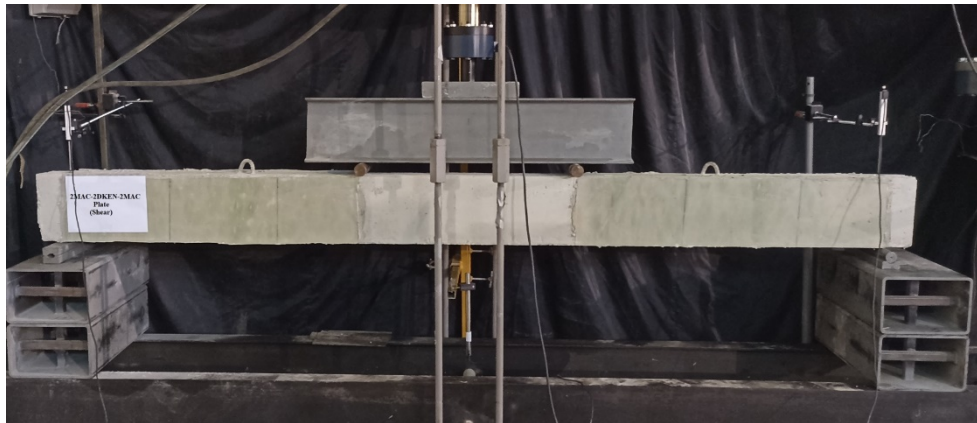




Şekil 5.12 Kiriş-4 yük-deplasman grafiği

## 5.6 Kiriş-5

Kiriş-5 altı katmanlı vakum infüzyon yöntemiyle hazırlanan 2MAC-2DKEN-2MAC-v2 dizilimine sahip polimer kompozitin kiriş kesme bölgesine plaka şeklinde yapıştırılmasıyla güçlendirilmiştir. Test birbirine simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir (Şekil 5.13). Yapılan testlerde kesme açıklığı 1100 mm'dir. Deney elemanında artan yükler altında kırılma meydana geldikten sonra maksimum yük yaklaşık %30 oranında düşüncüye kadar teste devam edilmiştir.



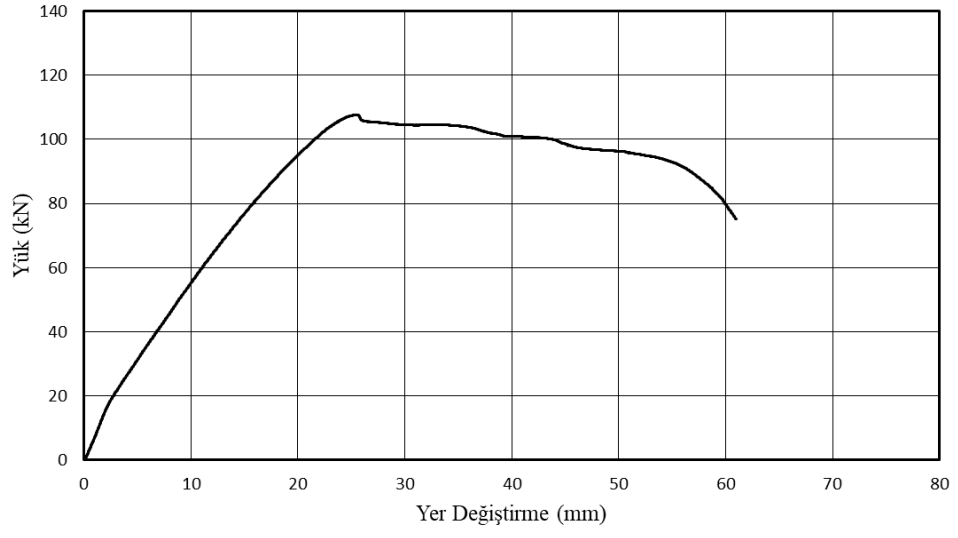
Şekil 5.13 Yükleme öncesi güçlendirilmiş deney elemanı (Kişisel arşiv, 2023)

Deneysel çalışma kapsamında test edilen deney elemanında ilk eğilme çatlakları yaklaşık 36,18 kN yük ve 5,75 mm deplasman değerine ulaştığında oluşmuştur. İlk eğilme çatlakları maksimum yükün %34'üne ulaştığında gerçekleşmiştir. İlk eğilme çatlakları oluştuğundan sonra ikinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci ve altıncı eğilme çatlakları sırasıyla 44,20 kN, 46,32 kN, 54,09 kN, 60,38 kN ve 63,25 kN seviyelerine ulaştığında oluşmuş ve çatlak sayısında artış devam etmiştir. Artan yük artışıyla birlikte eğilme çatlak sayısında ve genişliğinde artış gözlemlenmiştir. Test sırasında kesme çatlakları oluşmamıştır. Yük 107,67 kN ve 25,75 mm deplasman seviyesine ulaştığı sırada deney elemanının beton basınç bölgesinde ezilme oluşmuştur. Deney elemanı dayanım yaklaşık %30 oranında düşünceye kadar test edilmeye devam edilmiştir (Şekil 5.14).



Şekil 5.14 Yükleme sonrası güçlendirilmiş deney elemanı (Kişisel arşiv, 2023)

Yapılan testte güçlendirme malzemesinin plaka şeklinde yapıştırılmasıyla güçlendirilen kiriş boyuna donatısı akma dayanımına ulaşmıştır. Şekil 5.15 incelendiğinde kirişin boyuna donatısı akma dayanımına ulaştıktan sonra dayanımda azalma görülse de ani göçme olmamış kiriş yük taşımaya devam ederek sünek davranış göstermiştir. Plaka şeklinde güçlendirilen deney elemanı referans elemana göre maksimum yük değerinde %54 artış gözlemlenmiştir (Şekil 5.15).



Şekil 5.15 Kiriş-5 yük-deplasman grafiği

## BÖLÜM ALTI

### DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde elde edilen deney sonuçları dayanım ve davranış, süneklik, enerji tüketimleri ve rijitlik gibi parametreler kullanılarak detaylı bir şekilde karşılaştırılarak irdelenmiştir. Test sonuçları kullanılan malzemelerin uygulama şekline göre şerit, plaka ve ankrajla güçlendirmenin dayanıma katkısı incelenmiştir. Şerit şekline güçlendirmede şerit genişliğinin değişiminin dayanıma olan katkısı detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir.

#### 6.1 Dayanım ve Davranış

Dayanım, betonarme kiriş güçlendirilmesinde güçlendirme malzemesinin etkisini belirlemek için önemli bir ölçüt olarak kullanılır. Çalışmada deney elemanlarının kesme dayanımlarını belirlemek ve kıyaslamak amacıyla yük-deplasman grafikleri kullanılmıştır. Dayanıma ek olarak tüm deney elemanlarının maksimum yükleri ve bu yük değerlerindeki deplasmanları da kıyaslanmıştır. Yapılan testlerde güçlendirme malzemesinin farklı şekillerde kullanımı ve uygulama türü test değişkenleri olarak belirlenmiştir.

Çalışmada güçlendirilen tüm elemanlarda ilk çatlak orta açıklıkta eğilme çatlakları olarak ortaya çıkmıştır. Kontrol numunesi olan Kiriş-1 69,83 kN yük seviyesinde kritik kesme çatlaklarının yayılması nedeniyle ani bir şekilde kesme kırılması sonucu göçmüştür (Şekil 6.1).

Kiriş-2 ve Kiriş-4 aynı katman dizilimine ve kalınlığa sahip kompozitlerin sırasıyla 50 mm ve 100 mm şerit şeklinde kullanılmasıyla güçlendirilmiştir. 50 mm kompozit genişliğine sahip güçlendirilen Kiriş-2 deney elemanında ilk çatlak eğilme bölgesinde ve 29,93 kN yük, 5,01 mm deplasman değerinde kiriş eksenine dik yönde oluşmuştur. Yük 73,81 kN mertebesine ulaştığında ilk kesme çatlakları oluşmuş ancak çatlak şeritlerin arkasından aniden ilerleyemediği için ani göçme oluşmamış ve kiriş yük taşımaya devam etmiştir. Artan yükler altında çatlak 50 mm şerit plakaların arkasından

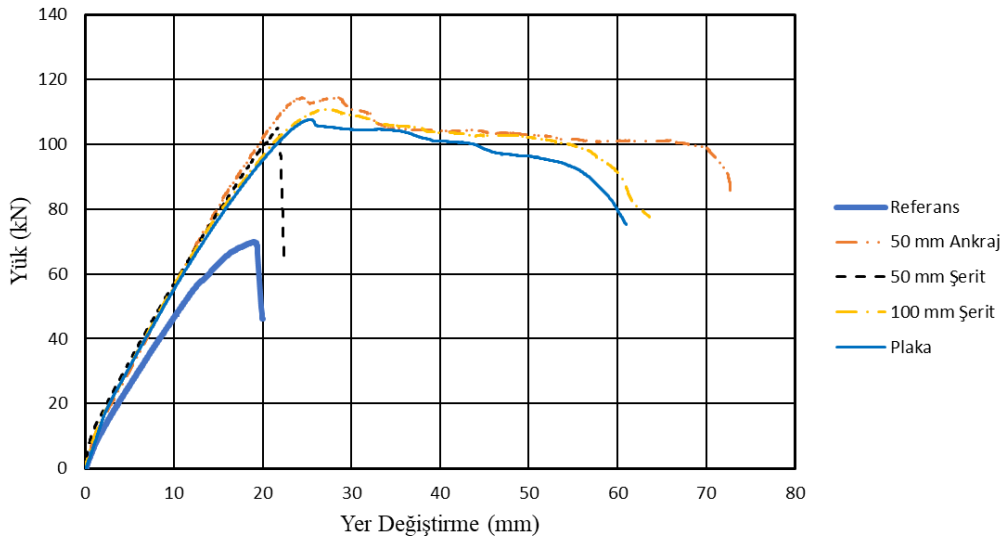
ilerlemiş ve yük 105,25 kN seviyelerine ulaştığında 50 mm şerit beton yüzeyinden aniden sıyrılmış ve kiriş yük taşıma kapasitesini kaybederek kesmeden göçmüştür. 100 mm genişlikteki kompozitlerle güçlendirilen Kiriş-4 deney elemanı ise ilk çatlak yine eğilme bölgesinde ve 33,46 kN yük 5,57 mm deplasman değerinde kiriş eksenine dik yönde oluşmuştur. Yük 90 kN mertebelerine ulaştığında kesme çatlakları oluşmaya başlamış ancak şeritlerin arkasından ilerleyemediği için ani göçme oluşmamıştır (Şekil 6.1).

Test değişkeni olarak şerit genişlikleri belirlenen Kiriş-2 ve Kiriş-4 deney elemanlarında şerit genişliğinin iki katına çıkarılması dayanımı ve davranışı önemli ölçüde etkilediği gözlenmiştir. 50 mm şeritlerle güçlendirilen Kiriş-2’de şeritlerin aniden sıyrılmaması sonucu kiriş kesmeden göçerken şerit genişliğinin iki katına çıkarılmasıyla güçlendirilen Kiriş-4 deney elemanında kesme çatlakları gözlenirse de sıyrılmama gözlenmemiş ve şeritler çatlak ilerleyişini engellemiştir.

Kiriş-2 ve Kiriş-3 deney elemanları ise aynı katman dizilimine ve kalınlığa sahip kompozitlerin 50 mm şerit şeklinde fakat farklı uygulama şekliyle güçlendirilmiştir. Kiriş-2 deney elemanı 50 mm şeritlerin epoksi malzemesiyle güçlendirilirken Kiriş-3 deney elemanı ise 50 mm şeritlerin kirişe ankrajlanmasıyla güçlendirilmiştir. Kiriş-2 deney elemanında 50 mm şeritler her ne kadar kesme çatlaklarının ilerleyişini engelleyerek kirişin yük taşıma kapasitesine katkı sağlasa da deney sonunda şeritlerin sıyrılarak kirişin aniden göçmesini engelleyememiştir. Kiriş-4 deney elemanında ise aynı şerit genişliğine sahip kompozitlerin kirişe fan tipi ankrajlarla uygulanarak test sırasında sıyrılmama davranışının engellenmesi amaçlanmıştır. Kiriş-3 deney elemanında ilk çatlak eğilme bölgesinde ve 31,70 kN yük 5,30 mm deplasman seviyesinde gözlenmiştir. Artan yükler altında eğilme bölgesindeki çatlaklarda artış gözlenmiştir. Yük 60,92 kN ve 62,52 kN mertebelerine ulaştığında eğilme çatlaklarına ek olarak kirişte kesme çatlakları da oluşmuş ancak şeritler çatlak ilerlemesini engellediği için ani göçme olmamıştır. Yük 113,57 kN seviyesine ulaştığında kiriş boyuna donatısı akma dayanımına ulaşmıştır. Yer değiştirme 54,22 mm’ye ulaştığında beton basınç bölgesi ezilmeye başlamıştır. Yer değiştirme 72,71 mm’ye ulaştığında beton tamamen ezilip kiriş nihai kapasitesine ulaşmıştır (Şekil 6.1).

Kiriş-3 ve Kiriş-4 deney elemanlarında betonarme kirişler nihai kapasitelerine ulaşırken Kiriş-2 deney elemanında kiriş nihai kapasitesine ulaşmadan kesmeden göçmüştür. Bu durum şerit genişliğinin 50 mm'den 100 mm çıkarılmasının ve/veya şerit genişliği 50 mm'de sabit tutulurken uygulamanın fan tipi ankrajlarla gerçekleştirilmesinin kiriş davranışına pozitif yönde katkı sağladığı ve davranışı gevrek kırılmadan sünek kırılmaya yönlendirdiği görülmüştür.

Kiriş-5 deney elemanında polimer kompozitler betonarme kirişin kesme bölgesine plaka halinde epoksi yapıştırıcısı ile uygulanmıştır. Yapılan testte ilk çatlak 36,18 kN yük 5,75 mm deplasman seviyesinde oluşmuştur. Yük 107,67 kN ve 25,75 mm deplasman seviyesinde kiriş boyuna donatısı akma dayanımına ulaşmıştır (Şekil 6.1). Güçlendirme malzemesi olarak kullanılan plakalar çatlakları gizlediği için kesme çatlakları görsel olarak incelenememiştir. Kirişin boyuna donatısı akma dayanımına ulaştıktan sonra dayanımda azalma görülse de ani göçme olmamış kiriş yük taşımaya devam ederek sünek davranış göstermiştir.



Şekil 6.1 Betonarme deney elemanlarının yük-yer değiştirme grafikleri

Yapılan testlerde deney elemanlarının maksimum yük değerlerindeki artış %51-%63 arasında değişirken maksimum yer değiştirme değerlerindeki artış %27-%282 arasında değişmektedir. Yapılan testlerde maksimum yük ve yer değiştirme oranında

en büyük artışı sırasıyla %63 ve %377 oranındaki artışla Kiriş-3 sergilemiştir (Tablo 6.1).

Tablo 6.1 Betonarme kiriş testlerinden elde edilen deneysel sonuçlar

	Kiriş-1	Kiriş-2	Kiriş-3	Kiriş-4	Kiriş-5
<b>Çatlama yükü (kN)</b>	19,14	29,93	31,70	33,46	36,18
<b>Akma yükü (kN)</b>	-	-	113,57	110,80	107,67
<b>Maksimum yük (kN)</b>	69,83	105,25	113,57	110,80	107,67
<b>Kırılma yükü (kN)</b>	69,83	105,25	85,14	77,56	75,10
<b>Akma dayanımındaki yer değiştirme (mm)</b>	-	-	23,60	27,44	25,75
<b>Kırılma yükündeki yer değiştirme (mm)</b>	19,31	22,43	72,71	63,53	60,98
<b>Başlangıç rijitliği (kN/mm)</b>	5,13	5,97	5,98	6,01	6,29
<b>Akmadaki rijitlik (kN/mm)</b>	-	-	4,81	4,04	4,18
<b>Süneklik oranı</b>	-	-	3,08	2,32	2,37
<b>Maksimum yükteki artış</b>	-	1,51	1,63	1,59	1,54
<b>Maksimum yer değiştirmedeki artış</b>	-	1,16	3,77	3,29	3,16
<b>Kırılma türü</b>	Kesme	Kesme	Eğilme	Eğilme	Eğilme

## 6.2 Süneklik ve Enerji Tüketimi

Süneklik yapısal bir elemanın göçmeden taşıyabileceği yük veya yutabileceği enerji olarak tanımlanmaktadır. Kesme kırılması son derece tehlikeli ve ani gerçekleşen bir kırılma şeklidir. Bu nedenle yapının sünek davranışını kabiliyetini yani enerji yutabilme kapasitesine son derece negatif etki eder. Buna ek olarak betonarme kirişin deprem enerjisini engelleyebilmesi için mafsallar geliştirerek emmesi gerekir bu durumda yapısal elemanın sünek olması son derece önemlidir. Bu bağlamda yapılan güçlendirme uygulaması başarılı olabilirse yapısal elemanı kesme kırılmasından eğilme kırılmasına yönlendirecektir bu da elemanın ani göçmesini engelleyerek enerji yutabilme kapasitesini artıracaktır.

Yapılan testlerde elde edilen yük-yer değiştirme grafiklerinin altında kalan kapalı alanlar hesaplanarak deney elemanlarının enerji tüketimleri elde edilmiş ve Şekil 6.2'de sunulmuştur. Deneysel çalışmadan 6 katmanlı polimer kompozitlerle güçlendirilen deney elemanlarında Kiriş-3 deney elemanı 5943,40 kN.mm enerji tüketmiştir. Bu değer referans numunesinin yaklaşık 6,91 katıdır ve en çok enerji tüketen numunedir. Kiriş-3 elemanı 50 mm şeritlerin elemana ankrajlanmasıyla elde edilmiştir.

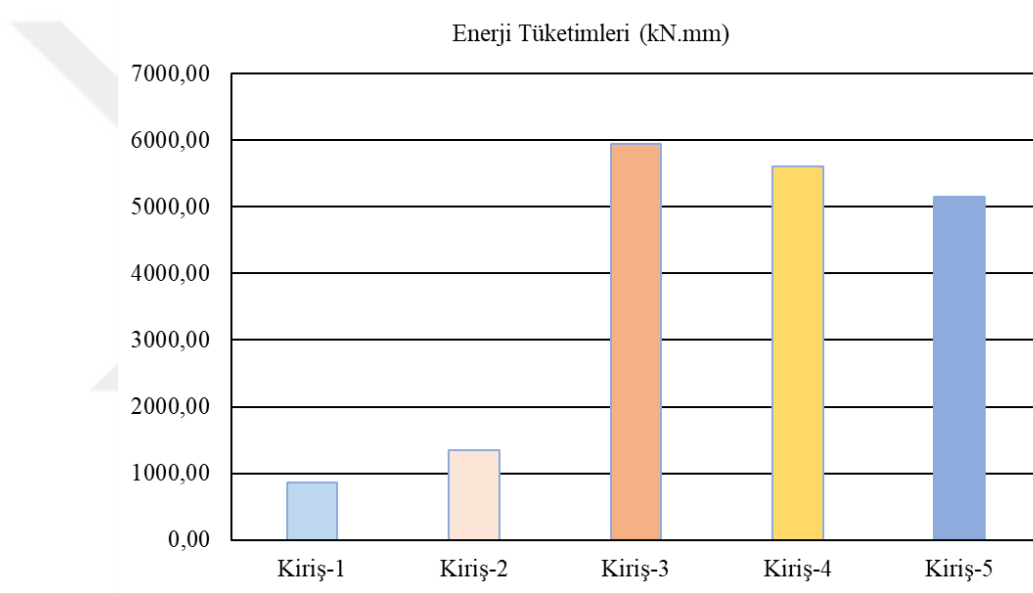
Kiriş-2 deney elemanı 1343,71 kN.mm enerji tüketmiştir. Bu değer referans elemanın 1,56 katıdır. Güçlendirilen elemanlarda diğer elemanlara kıyasla en az enerji tüketimi Kiriş-2 elemanında gerçekteşmiştir. Kiriş-2 deney elemanında 50 mm şeritler epoksi ile kirişeye uygulanmıştır. Test sırasında şeritlerin kirişten sıyırılması sonucu kiriş kesmeden göçmüştür.

Kiriş-2 ve Kiriş-3'ün deney sonuçları kıyaslandığında test değişkeni olarak aynı genişlik ve kalınlıktaki şeritlerin uygulama şeklinin farklı olduğu görülmektedir. Bu durum epoksi veya ankraj kullanımının enerji yutma kapasitesine önemli ölçüde etki ettiğini göstermektedir. Epoksi ve ankrajla güçlendirilen numunelerin her ikisinde de güçlendirilen malzeme ve kiriş ara yüzeyinde artan yükler altında gerilmeler oluşmaktadır. 50 mm şeritlerin epoksi ile kirişeye uygulanması durumunda artan yükler altında kiriş ile güçlendirme malzemesi arasında oluşan arayüzey dayanımının yetersiz kalması sonucu şerit sıyırılmış ve kesme kırılmasını engelleyememiştir. Buna karşılık ankrajla güçlendirilen kirişte şerit-kiriş arasında oluşan yüzeye ek olarak fan tipi ankraj-kiriş arasında da yüzey oluşturularak aderans artırılmış ve şeritlerin kirişten ayrılması engellenerek güçlendirme malzemesinin tam kapasite çalışması sağlanmıştır.

Kiriş-4 deney elemanı 5606,13 kN.mm enerji tüketmiştir. Bu değer referans elemanın 6,52 katıdır. Kiriş-4 deney elemanında 100 mm şeritler kirişeye epoksi ile yapıştırılarak güçlendirilmiştir. Kiriş-2 deney elemanına göre şerit genişliği 2 katına çıkarılan Kiriş-4'te kırılma türü kesmeden eğilmeye yönlendirilmiş ve şeritler kirişten sıyırılmayarak tam kapasite çalışmıştır. Kiriş-4'te kiriş-şerit arasındaki yüzey alanının

artması sonucu arayüzey dayanımı artmış ve sıyrılma engellenerek güçlendirme malzemesi tam kapasite çalışmıştır.

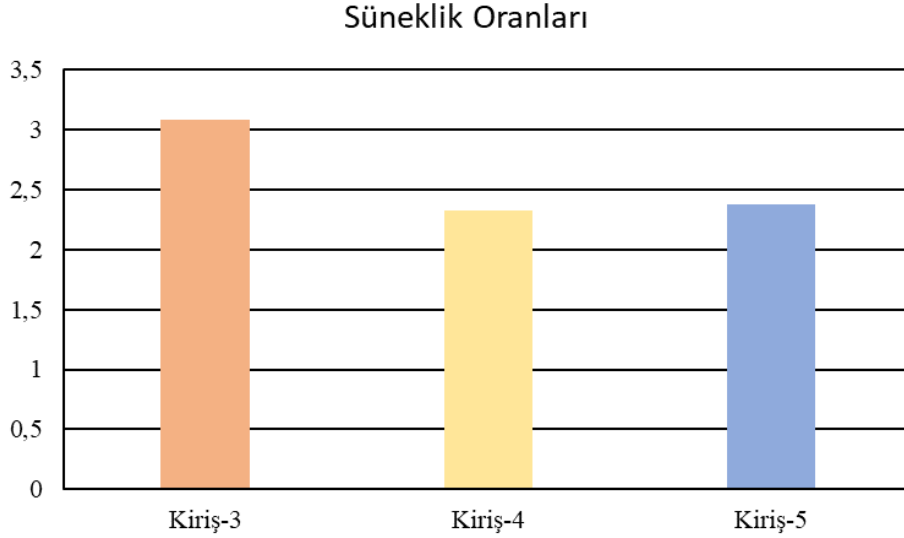
Kiriş-5 deney elemanı 5157,52 kN.mm enerji tüketmiştir. Bu değer referans elemanın 6,00 katıdır. Kiriş-5 deney elemanında polimer kompozitler betonarme kirişe plaka şeklinde epoksi ile yapıştırılmıştır. Şerit uygulamasında plaka uygulamasına göre daha az rijit kesme açıklığı oluşmaktadır. Bu durumda da şeritler arasında daha fazla enerji tüketimine neden olan daha fazla kesme çatlağı oluşur. Bu nedenle Kiriş-4 deney elemanı Kiriş-5'e göre daha yüksek enerji sönümlenmiştir.



Şekil 6.2 Betonarme deney elemanlarının enerji tüketim seviyeleri

Nihai davranışın incelenmesinde deney elemanlarının enerji yutma kapasitelerine ek olarak süneklik oranları da belirlenmiştir. Bütün deney elemanlarının yük- yer değiştirme grafikleri maksimum yük %30 oranında azaldığı noktada sonlandırılmıştır. Bu bağlamda kırılma yükündeki yer değiştirmenin akma anındaki yer değiştirmeye oranı esas alınarak numunelerin süneklik oranları belirlenmiştir (Şekil 6.3). Kiriş-3 deney elemanının maksimum yer değiştirme değeri 72,71 mm'dir ve deney programındaki en yüksek yer değiştirme değerine sahip numunedir. Buna karşılık deplasman süneklik oranı 3,08 olarak belirlenmiştir. Kiriş-4 ve Kiriş-5'in maksimum

yer değiştirmeleri sırasıyla 63,53 mm ve 60,98 mm'dir. Buna karşılık Kiriş-4 ve Kiriş-5'in deplasman suneklik oranları sırasıyla 2,32 ve 2,37'dir. 50 mm ankrajla guctlendirilen Kiriş-3'ün deplasman suneklik oranı Kiriş-4 ve Kiriş-5'e gcre sırasıyla %33 ve %30 daha fazladır.



şekil 6.3 Betonarme deney elemanları suneklik oranları

### 6.3 Rijitlik

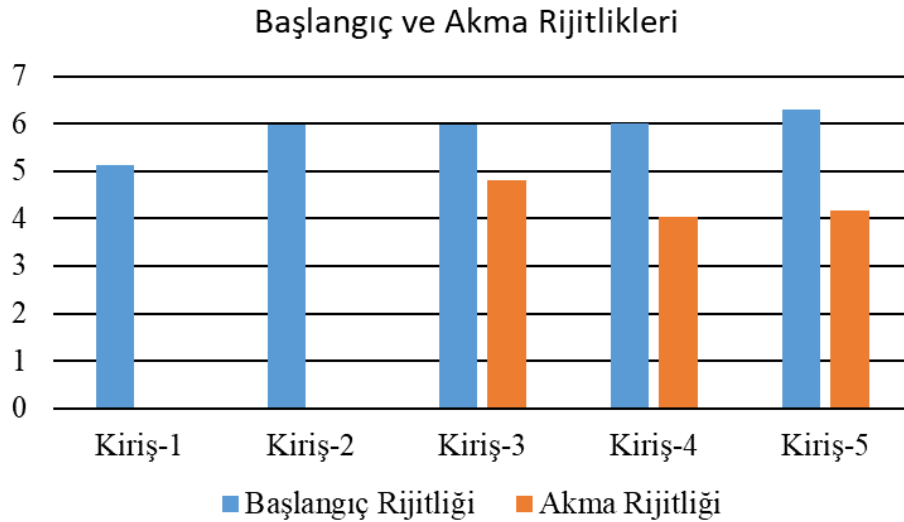
Deney elemanlarının sergiledikleri başlangıç ve akma rijitlikleri kullanılan guctlendirme malzemesinin kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlere katkısının belirlenmesi için önemlidir. Deney elemanlarının rijitlikleri yük-deplasman eğrileri kullanılarak belirlenmiştir. Başlangıç rijitlik değerleri belirlenirken ilk kırılma yükü ve bu yüke karşılık gelen yer değiştirme noktasından orijine çizilen doğrunun eğimi bulunarak hesaplanmıştır. Akma rijitliği de benzer şekilde akma yükü ve bu yüke karşılık gelen yer değiştirme noktasından orijine çizilen doğrunun eğimi bulunarak hesaplanmıştır.

Yapılan testlerde guctlendirilen numunelerin başlangıç rijitlikleri dikkate alındığında Kiriş-1 en düşük başlangıç rijitliğine sahiptir. Numunenin başlangıç rijitliği 5,13 kN/mm'dir. Bu değerin düşük olması testin ilk etabında bu numunede diğer deney elemanlarına kıyasla daha fazla çatlak oluşacağını göstermektedir. Kiriş-

5 ise 6,29 kN/mm değeriyle en yüksek başlangıç rijitliğine sahip deney elemanıdır. Güçlendirilen numunelerde başlangıç rijitlikleri referans kirişin 1,16 ile 1,23 katı arasında değişmektedir. Bu durum polimer kompozitlerle güçlendirilen betonarme kirişlerin uygulama yöntemi veya yapıştırma şeklinden bağımsız olarak elemanın başlangıç rijitliğine önemli katkı sağladığını göstermektedir.

Referans kiriş akma dayanımına ulaşamadan aniden kesmeden göçtüğü için güçlendirilen ve akma dayanımına ulaşan kirişlerin referans kiriş ile kıyaslanması mümkün değildir. Buna karşılık numuneler birbirleri ile kıyaslandığında akma rijitlikleri birbirine yakın olduğu görülmektedir (şekil 6.4). Uygulanan güçlendirme tekniği numunelerin akma kapasitesine ulaşmasına katkı sağladığı açıkça görülmektedir.

Kiriş-2 akma dayanımına ulaşamadan kesmeden göçmüştür. Bu nedenle Kiriş-2’de karşılaştırmak için başlangıç rijitliği dikkate alınmıştır. Sonuç olarak uygulama şekli veya kırılma türünden bağımsız bir şekilde polimer kompozitlerle güçlendirilen betonarme kirişlerin başlangıç ve akma rijitlikleri önemli ölçüde artmıştır.



şekil 6.4 Betonarme deney elemanları başlangıç ve akma rijitlikleri

## BÖLÜM YEDİ

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Betonarme yapıların işçilik hataları, uygun olmayan beton ve/veya donatı kullanımı, tasarım hataları ve deprem etkisiyle betonarme elemanlarda oluşan hasarlar gibi birçok nedenden dolayı taşıma kapasiteleri düşmektedir. Taşıma kapasitesi düşen betonarme yapılar çeşitli güçlendirme yöntemleri ve malzemeler kullanılarak güçlendirilmekte ve taşıma kapasiteleri yeterli seviyeye getirilmektedir.

Yapılan tez çalışmasında vakum infüzyon yöntemi kullanılarak farklı katman diziliminde ve konfigürasyona sahip doğal ve/veya atık malzemeler kullanılarak kompozit malzemeler üretilmiş ve mekanik testleri yapılmıştır. Yapılan test sonuçlarına dayanım ve ekonomik yönden en uygun altı katmanlı kompozit malzeme seçilerek gerçek kiriş boyutlarında üretilmiş ve betonarme kirişlere uygulanmıştır. Araştırmada iki değişken ele alınmıştır. Bu değişkenler polimer kompozitlerin kirişlere uygulanma şekli ve yapıştırma biçimidir.

Deneyel çalışma kapsamında 150×200 mm kesit boyutlarında ve 3200 mm uzunluğunda 5 adet betonarme kiriş test edilmiştir. Kullanılan malzemenin kirişin kesme dayanımına katkısını incelemek amacıyla betonarme kirişler kesme dayanımı yetersiz olacak şekilde tasarlanmıştır. Deney programında 1 adet betonarme kiriş referans eleman olarak seçilmiş ve güçlendirilmeden test edilmiştir.

- Kompozit üretimlerinde üretim yönteminin doğası gereği farklı malzeme konfigürasyonlarına ve katman sayılarına bağlı olarak farklı kalınlıklarda kompozitler elde edilmiştir. Tek ve üç katman oluşturulan numunelerde numune kalınlığı çok düşük olduğundan test presinin hassasiyet sınırları altında kalınmış ve bu nedenle eğilme deneyleri gerçekleştirilememiştir.
- Dört farklı jüt malzemesine lif çekme testleri yapılmıştır ve bunlar arasında en yüksek çekme dayanımına sahip numune kompozit üretiminde kullanılmıştır.

- Dokuma jüt malzemesi üzerine yapılan modifikasyon işlemleri, üretilen kompozitlerin dayanımını olumsuz yönde etkilemiştir. Bu nedenle kompozit üretimlerine modifikasyon işlem görmemiş jüt malzemesiyle devam edilmiştir.
- Dokuma jüt malzemesiyle üretilen kompozitlerin betonarme kiriş güçlendirmesi için yetersiz dayanıma sahip olması nedeniyle hibrit üretimi yapılmamıştır.
- Yapılan kompozit çekme ve eğilme testleri sonucunda dayanım ve maliyet açısından en uygun 2MAC+2DKEN+2MAC-v2 katman dizilimine sahip polimer kompozit belirlenmiştir ve kiriş güçlendirmesi için bu kompozit seçilmiştir.
- Atık cam lifleri kompozit üretimi için yapılan vakum infüzyon yöntemi esnasında liflerin topaklanması nedeniyle infüzyon başarısız olmuştur. Bu yüzden spreyleme yöntemiyle lifler önce mat haline getirilip daha sonra kompozit üretimi yapılmıştır.
- Eğilme deneylerinde kullanılan malzemelerin dizilimleri ve çekme bölgesine konulan malzemenin özellikleri sonuçlar üzerinde baskın rol oynamıştır.
- Yapılan testlerde bütün deney elemanlarında ilk çatlak kiriş eğilme bölgesinde oluşmuştur.
- Çalışmada dokuma kenevir ve mat atık cam ile oluşturulan 6 katmanlı polimer kompozitler ilk kez bu çalışmada kullanılmıştır ve son derece tatminkâr sonuçlar elde edilmiştir.
- 50 mm şerit şeklinde güçlendirilen Kiriş-2, 50 mm şeritlerin kirişten sıyrılması sonucu kesmeden göçse de maksimum yük değerinde yaklaşık %51 artış gözlenmiştir.
- Kiriş-3, Kiriş-4, Kiriş-5 deney elemanları taşıma kapasitelerine ulaşmıştır. Basınç bölgesindeki beton ezilene kadar teste devam edilmiş ve maksimum yük %30 oranında azalınca kadar teste devam edilmiştir.
- 50 mm şeritlerin kirişe ankrajlanmasıyla güçlendirilen Kiriş-3'ün maksimum yük değeri referans elemana göre %63 artmıştır.
- 100 mm şeritlerin kirişe epoksiyle yapıştırılmasıyla güçlendirilen Kiriş-4'ün maksimum yük değeri referans elemana göre %59 artmıştır.

- Plaka şeklinde güçlendirilen Kiriş-5'in maksimum yük değeri referans elemana göre %54 artmıştır.
- Yapılan testlerde Kiriş-3 en fazla enerji yutma kapasitesine sahiptir. Referans elemanın 6,91 katı enerji tüketmiştir.
- Yapılan testlerde Kiriş-2 en az enerji yutma kapasitesine sahiptir. Referans elemanın 1,56 katı enerji tüketmiştir.
- Yapılan testlerde epoksi veya ankrajla kullanımının kirişlerin enerji yutma kapasitelerine önemli etki ettiği gözlenmiştir.
- Güçlendirilen numunelerde başlangıç rijitlikleri referans kirişin 1,16 ile 1,23 katı arasında değişmektedir.



## KAYNAKLAR

- Alam, M. A., & Al Riyami, K. (2018). Shear strengthening of reinforced concrete beam using natural fibre reinforced polymer laminates. *Construction and Building Materials*, 162, 683-696.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.011>
- Alkhrdaji, T., Fyfe, E. R., Korff, J., Schupack, M., Bakis, C. E., Gentry, T. R., Lee, M. W., Scott, D. W., Balaguru, P. N., Gergely, J., Levar, J., Sen, R., Bank, L. C., Gold, W. J., Mahfouz, I. M., Soudki, K. A., Belarbi, A., Grace, N. F., Marshall, O. S., ... Busel, J. P. (2006). *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*.
- Al-Shamayleh, R., Al-Saoud, H., Abdel-Jaber, M., & Alqam, M. (2022). Shear and flexural strengthening of reinforced concrete beams with variable compressive strength values using externally bonded carbon fiber plates. *Results in Engineering*, 14, 100427. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2022.100427>
- Al-Tersawy, S. H. (2013). Effect of fiber parameters and concrete strength on shear behavior of strengthened RC beams. *Construction and Building Materials*, 44, 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.007>
- Arslan, M. H., Yazman, Ş., Hamad, A. A., Aksoylu, C., Özkılıç, Y. O., & Gemi, L. (2022). Shear strengthening of reinforced concrete T-beams with anchored and non-anchored CFRP fabrics. *Structures*, 39, 527-542.  
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.03.046>
- Balbay, Ş., Sarıhan, A., & Avşar, E. (2021). Dünyada ve Türkiye’de “Döngüsel Ekonomi / Endüstriyel Sürdürülebilirlik” Yaklaşımı. *European Journal of Science and Technology*. <https://doi.org/10.31590/ejosat.971172>
- Baraghith, A. T., Mansour, W., Behiry, R. N., & Fayed, S. (2022). Effectiveness of SHCC strips reinforced with glass fiber textile mesh layers for shear strengthening of RC beams: Experimental and numerical assessments. *Construction and Building Materials*, 327, 127036.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127036>

- Cai, M., Takagi, H., Nakagaito, A. N., Li, Y., & Waterhouse, G. I. N. (2016). Effect of alkali treatment on interfacial bonding in abaca fiber-reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 90, 589-597. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2016.08.025>
- Cousins, D. S., Suzuki, Y., Murray, R. E., Samaniuk, J. R., & Stebner, A. P. (2019). Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades. *Journal of Cleaner Production*, 209, 1252-1263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.286>
- Dokuz Eylül Üniversitesi. (2023). 06 Şubat 2023, 4:17, Mw=7.7, h=9 km Pazarcık (Kahramanmaraş) Deprem 06 Şubat 2023, 13:24, Mw=7.6, H=7 Km Elbistan (Kahramanmaraş) Depremi 20 Şubat 2023, 20:04, Mw=6.4, H=22 Km Defne (Hatay) Depremi Deprem Raporu.
- Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. (2018).
- Ersoy, U., Özcebe, G., & Canbay, E. (2019). Betonarme: Davranış ve Hesap İlkeleri. <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/70405>
- Esmaceli, E., & Shadan, P. (2023). Effectiveness of Fan Anchors in Preventing Debonding in FRP-Strengthened Steel Members. *International Journal of Steel Structures*, 23(1), 96-119. <https://doi.org/10.1007/s13296-022-00681-4>
- Evaluating the Performance of Post-Installed Mechanical Anchors in Concrete, Reported by ACI Committee 355; ACI 355.2-01; ACI: Farmington Hills, MI, USA, 2002.
- Fayed, S., Basha, A., & Hamoda, A. (2019). Shear strengthening of RC beams using aluminum plates: An experimental work. *Construction and Building Materials*, 221, 122-138. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.068>
- Ferdous, W., Manalo, A., Siddique, R., Mendis, P., Zhuge, Y., Wong, H. S., Lokuge, W., Aravinthan, T., & Schubel, P. (2021). Recycling of landfill wastes (tyres, plastics and glass) in construction – A review on global waste generation, performance, application and future opportunities. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105745>

- Galvão, N., Matos, J. C., Oliveira, D. V., & Hajdin, R. (2022). Human error impact in structural safety of a reinforced concrete bridge. *Structure and Infrastructure Engineering*, 18(6), 836-850. <https://doi.org/10.1080/15732479.2021.1876105>
- Ghoroubi, R., Mercimek, Ö., Sakin, S., & Aml, Ö. (2022). Novel bond-slip model between concrete and angular CFRP fan type anchored CFRP strip. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(11), 5404-5427. <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1899990>
- Gunti, R., Ratna Prasad, A. V., & Gupta, A. V. S. S. K. S. (2016). Preparation and properties of successive alkali treated completely biodegradable short jute fiber reinforced PLA composites. *Polymer Composites*, 37(7), 2160-2170. <https://doi.org/10.1002/pc.23395>
- Hamrat, M., Bouziadi, F., Boulekbache, B., Daouadji, T. H., Chergui, S., Labeled, A., & Amziane, S. (2020). Experimental and numerical investigation on the deflection behavior of pre-cracked and repaired reinforced concrete beams with fiber-reinforced polymer. *Construction and Building Materials*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118745>
- Ibrahim, M., Wakjira, T., & Ebead, U. (2020). Shear strengthening of reinforced concrete deep beams using near-surface mounted hybrid carbon/glass fibre reinforced polymer strips. *Engineering Structures*, 210. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110412>
- İstanbul Teknik Üniversitesi. (2023). 04.17 Mw 7,8 Kahramanmaraş (Pazarcık, Türkoğlu), Hatay (Kırıkhan), ve 13.24 Mw 7,7 Kahramanmaraş (Elbistan/Nurhak-Çardak) Depremleri Ön İnceleme Raporu.
- Karaca Uğural, B. (2022). Gürültü Bariyeri için Çevre Dostu Alternatif: Doğal Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler. *European Journal of Science and Technology*. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1039332>
- Karalar, M., Özkılıç, Y. O., Deifalla, A. F., Aksoylu, C., Arslan, M. H., Ahmad, M., & Sabri, M. M. S. (2022). Improvement in Bending Performance of Reinforced Concrete Beams Produced with Waste Lathe Scraps. *Sustainability* (Switzerland), 14(19). <https://doi.org/10.3390/su141912660>

- Karzad, A. S., Leblouba, M., Toubat, S. Al, & Maalej, M. (2019). Repair and strengthening of shear-deficient reinforced concrete beams using Carbon Fiber Reinforced Polymer. *Composite Structures*, 223.  
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110963>
- Kim, G., Sim, J., & Oh, H. (2008). Shear strength of strengthened RC beams with FRPs in shear. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1261-1270.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.021>
- Orta Doğu Teknik Üniversitesi. (2023). Preliminary Reconnaissance Report on February 6, 2023, Pazarcık Mw=7.7 and Elbistan Mw=7.6, Kahramanmaraş-Türkiye Earthquakes.
- Qasim, M., Lee, C. K., & Zhang, Y. X. (2023). Flexural strengthening of reinforced concrete beams using hybrid fibre reinforced engineered cementitious composite. *Engineering Structures*, 284.  
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115992>
- Ramezani, A., & Esfahani, M. R. (2023). Shear strengthening of RC beams using FRCM system made with industrial wastes. *Structures*, 48, 1833-1847.  
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.01.078>
- Ratnawati, B., Yani, M., Suprihatin, S., & Hardjomidjojo, H. (2023). Waste processing techniques at the landfill site using the material flow analysis method. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 9(1), 73-86. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2023.01.06>
- Saadah, M., Ashteyat, A., & Murad, Y. (2021). Shear strengthening of RC beams using side near surface mounted CFRP ropes and strips. *Structures*, 32, 380-390.  
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.038>
- Sever, K. (2009). Graduate school of natural and applied sciences the role of interfaces on the mechanical performance of fiber reinforced polymer composites.

- Sever, K., Sarikanat, M., Seki, Y., Erkan, G., & Erdoğan, Ü. H. (2010). The mechanical properties of  $\gamma$ -methacryloxypropyltrimethoxy silane-treated jute/polyester composites. *Journal of Composite Materials*, 44(15), 1913-1924. <https://doi.org/10.1177/0021998309360939>
- Siddika, A., Mamun, M. A. Al, Alyousef, R., & Amran, Y. H. M. (2019). Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites: A review. *Journal of Building Engineering*, 25. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2019.100798>
- Sinh, L. H., Komuro, M., Kawarai, T., & Kishi, N. (2022). Failure Modes of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Flexure with Externally Bonded Aramid Fiber-Reinforced Polymer Sheets under Impact Loading. *Buildings*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/buildings12050584>
- Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials 1. (t.y.). [https://doi.org/10.1520/D3039\\_D3039M-17](https://doi.org/10.1520/D3039_D3039M-17)
- Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials 1. (t.y.). <https://doi.org/10.1520/D0790-17>
- Sudha, S., & Thilagavathi, G. (2016). Effect of alkali treatment on mechanical properties of woven jute composites. *Journal of the Textile Institute*, 107(6), 691-701. <https://doi.org/10.1080/00405000.2015.1061736>
- Tanarslan, H. M., Yalçınkaya, Ç., Alver, N., & Karademir, C. (2021). Shear strengthening of RC beams with externally bonded UHPFRC laminates. *Composite Structures*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113611>
- Tran, N. P., Gunasekara, C., Law, D. W., Houshyar, S., Setunge, S., & Cwirzen, A. (2022). Comprehensive review on sustainable fiber reinforced concrete incorporating recycled textile waste. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 11(1), 41-61. <https://doi.org/10.1080/21650373.2021.1875273>

- Wakjira, T. G., & Ebead, U. (2018). FRCM/internal transverse shear reinforcement interaction in shear strengthened RC beams. *Composite Structures*, 201, 326-339. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.034>
- Yang, X., Gao, W. Y., Dai, J. G., & Lu, Z. D. (2020). Shear strengthening of RC beams with FRP grid-reinforced ECC matrix. *Composite Structures*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112120>
- Zhang, H. W., & Smith, S. T. (2012). Influence of FRP anchor fan configuration and dowel angle on anchoring FRP plates. *Composites Part B: Engineering*, 43(8), 3516-3527. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.11.072>
- Zheng, Y. Z., Wang, W. W., Mosalam, K. M., Fang, Q., Chen, L., & Zhu, Z. F. (2020). Experimental investigation and numerical analysis of RC beams shear strengthened with FRP/ECC composite layer. *Composite Structures*, 246. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112436>
- Zhou, Y., Guo, M., Sui, L., Xing, F., Hu, B., Huang, Z., & Yun, Y. (2019). Shear strength components of adjustable hybrid bonded CFRP shear-strengthened RC beams. *Composites Part B: Engineering*, 163, 36-51. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.020>
- Zhu, Y., Zhang, Y., Hussein, H. H., & Chen, G. (2020). Flexural strengthening of reinforced concrete beams or slabs using ultra-high performance concrete (UHPC): A state of the art review. *Engineering Structures*, 205. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.110035>