

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DÜŞÜK VE NORMAL DAYANIMLI BETONLARIN FARKLI LİF KATKILARI VE
SARGI TİPLERİ İLE EĞİLME DAYANIMININ İYİLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YUSUF BATUHAN APTİ

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. ÖZLEM ÇALIŞKAN

BİLECİK, 2026
10711243

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DÜŞÜK VE NORMAL DAYANIMLI BETONLARIN FARKLI LİF KATKILARI VE
SARGI TİPLERİ İLE EĞİLME DAYANIMININ İYİLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YUSUF BATUHAN APTİ

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. ÖZLEM ÇALIŞKAN

BİLECİK, 2026

10711243

BEYAN

Düşük ve Normal Dayanımlı Betonların Farklı Lif Katkıları ve Sargı Tipleri ile Eğilme Dayanımının İyileştirilmesi adlı yüksek lisans tezimin hazırlık ve yazım sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallarına tam olarak uyduğumu, başkalarının çalışmalarından yararlandığım bölümlerde ilgili kaynaklara bilimsel kurallara uygun şekilde atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezimin herhangi bir bölümünün Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir yükseköğretim kurumunda daha önce sunulmuş bir tez çalışması olmadığını, aksi bir durumun tespiti halinde doğabilecek tüm hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve sunduğum bilgilerin doğruluğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlar tarafından desteklenmesi durumunda; destekleyen kurumun adı ve proje numarası ile birlikte belirtilmesi gerekmektedir. Ayrıca, ETİK KURUL onayı alınmışsa, etik kurulun adı, karar tarihi ve karar sayısı açık bir şekilde beyan edilmelidir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	X
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Desteğin Türü		Proje Numarası	
1-BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2-TÜBİTAK			
Diğer;			
ETİK KURUL onayı var ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı			

Yusuf Batuhan APTİ

Tarih

İmza

ÖN SÖZ

Tez çalışmam süresince bilgisini ve desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen; yol gösterici, teşvik edici ve öğretici yaklaşımıyla bana rehberlik eden değerli danışmanım Doç. Dr. Özlem ÇALIŞKAN’a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımda büyük katkıları bulunan Öğr. Gör. Ahmet Ferdi ŞENOL’a ve Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca her türlü desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyerek yanımda olan çok kıymetli aileme sonsuz teşekkür ederim.

Yusuf Batuhan APTİ

2026

ÖZET

DÜŞÜK VE NORMAL DAYANIMLI BETONLARIN FARKLI LİF KATKILARI VE SARGI TİPLERİ İLE EĞİLME DAYANIMININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Yeryüzünde en çok kullanılan yapı malzemelerinden biri olan beton; mühendislik özellikleri, kolay ulaşılabilirliği, ekonomik oluşu ve farklı yapı uygulamalarında geniş kullanım alanına sahip olması nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak beton, gevrek bir malzeme olduğundan, çeşitli katkı malzemeleriyle desteklenerek sünek hale getirilmesi gerekmektedir. Farklı lif katkıları ve sargı tipleri kullanılarak betonun basınç dayanımı ile eğilme dayanımının iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Betonun mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla çelik ve polipropilen liflerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Kaplama amacıyla kullanılan elyaf liflerinin, kesitteki çatlak gelişimini önemli ölçüde engellediği ve sünekliği artırdığı çeşitli çalışmalarla ortaya konmuştur. CFRP ve TRM gibi kompozit malzemelerin kullanımı ise; hafif olmaları, kolay uygulanabilirlikleri, korozyona karşı dayanıklı olmaları ve yüksek mukavemet sağlamaları nedeniyle artış göstermektedir. Bu bağlamda, lifli betonların ve farklı sargı türlerinin normal ve düşük dayanımlı betonlarda eğilme dayanımına etkisinin hangi faktörlere bağlı olduğu ve bu faktörlerden hangilerinin daha belirleyici olduğu büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, düşük ve normal dayanımlı betonların farklı lif katkıları ve sargı tipleriyle eğilme dayanımlarının iyileştirilmesi deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada iki farklı beton sınıfı (C16 ve C30) kullanılmıştır. Bu amaçla, 100×100×500 mm boyutlarında toplam 52 adet kiriş numunesi üretilmiştir. Çelik ve polipropilen lifler, beton hacmi oranında her lif türü için %0.3 ve %0.6 oranlarında kullanılmıştır. Sargı malzemesi olarak karbon lif takviyeli polimer kumaş (CFRP) ve tekstil takviyeli harç (TRM) seçilmiş; kirişler dört farklı sargılama yöntemiyle (alt yüzey, yan yüzeyler, U tipi ve tam sargılama) kaplanmıştır. Üretilen kiriş numuneleri, üç nokta eğilme testine tabi tutulmuştur. Maksimum yük, maksimum yükte deplasman, maksimum deplasman, rijitlik, enerji yutma kapasitesi ve eğilme dayanımı değerleri elde edilmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu veriler doğrultusunda, deneysel çalışma kapsamında incelenen değişkenlerin betonun eğilme dayanımını iyileştirme üzerindeki etkileri ve geliştirilen detayların performansları değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Beton, Eğilme Dayanımı, Çelik Lif, Polipropilen Lif, CFRP, TRM

ABSTRACT

IMPROVEMENT OF FLEXURAL STRENGTH OF LOW AND NORMAL STRENGTH CONCRETES USING DIFFERENT FIBER ADDITIVES AND CONFINEMENT TYPES

Concrete, which is one of the most widely used construction materials in the world, is extensively preferred due to its engineering properties, accessibility, cost-effectiveness and wide range of use in different structural applications. However, since concrete is a brittle material, it must be supported with various additives to be made ductile. It is aimed to improve the compressive strength and flexural strength of concrete by using different fiber additives and wrapping types. The use of steel and polypropylene fibers is becoming increasingly common to improve the mechanical properties of concrete. Various studies have demonstrated that fiber fibers used for coating significantly inhibit crack propagation in the section and increase ductility. The use of composite materials such as CFRP and TRM is increasing due to their lightweight nature, ease of application, corrosion resistance and high strength. In this context, it is of great importance to determine which factors influence the effect of fiber-reinforced concretes and different wrapping types on the flexural strength of normal and low-strength concretes and which of these factors are more decisive.

In this study, the improvement of the flexural strength of low and normal strength concretes with different fiber additives and wrapping types was experimentally investigated. Two different concrete classes (C16 and C30) were used in the experimental study. For this purpose, a total of 52 beam specimens with dimensions of 100×100×500 mm were produced. Steel and polypropylene fibers were used at ratios of 0.3% and 0.6% by volume of concrete for each fiber type. Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) fabric and textile reinforced mortar (TRM) were selected as wrapping materials; the beams were coated using four different wrapping methods (bottom surface, side surfaces, U-wrap and full wrap). The produced beam specimens were subjected to three-point bending tests. Maximum load, displacement at maximum load, maximum displacement, stiffness, energy dissipation capacity and flexural strength values were obtained and comparisons were conducted. In accordance with these data, the effects of the variables examined within the scope of the experimental study on the improvement of the flexural strength of concrete and the performances of the developed details were evaluated and interpreted.

Keywords: Concrete, Flexural Strength, Steel Fiber, Polypropylene Fiber, CFRP, TRM

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
3. LİFLER VE SARGI TİPLERİYLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER	16
3.1. Lif Çeşitleri.....	16
3.2. Çelik Lif Takviyeli Beton	16
3.3. Polipropilen Lifli Beton.....	17
3.4. Lifli Polimer Kumaşlar	18
3.4.1. Karbon lif takviyeli polimer kumaş	20
3.5. Tekstil Takviyeli Harç.....	21
4. MATERYAL VE METOT	23
4.1. Beton Üretiminde Kullanılan Malzemeler	23
4.2. Beton Üretimi.....	23
4.3. Lifli Betonlarda Kullanılan Malzemeler	26
4.4. Sargılama İçin Kullanılan Malzemeler.....	26
4.4.1. CFRP ve epoksi	26
4.4.2. TRM ve harç.....	27
4.5. Deney Elemanlarının Özellikleri.....	28
4.6. Numune Üretimi	31
4.6.1. CFRP ile sargılanan numunelerin hazırlanması.....	32
4.6.2. TRM ile sargılanan numunelerin hazırlanması	33
4.6. Eğilme Deneyi	35
4.7. Performans İndeksleri.....	36
5. DENEY SONUÇLARI.....	37
5.1. Maksimum Yük Performansı	38
5.1.1. Çelik lifli numunelerde maksimum yük performansı	38

5.1.2. Polipropilen lifli numunelerde maksimum yük performansı	39
5.1.3. TRM ile sargılanan numunelerde maksimum yük performansı.....	39
5.1.4. CFRP ile sargılanan numunelerde maksimum yük performansı.....	40
5.2. Rijitlik Performansı.....	41
5.2.1. Çelik Lifli numunelerde rijitlik performansı	41
5.2.2. Polipropilen lifli numunelerde rijitlik performansı.....	41
5.2.3. TRM ile sargılanan numunelerde rijitlik performansı	42
5.2.4. CFRP ile sargılanan numunelerde rijitlik performansı	43
5.3. Enerji Yutma Kapasitesi.....	44
5.3.1. Çelik lifli numunelerde enerji yutma kapasitesi	44
5.3.2. Polipropilen lifli numunelerde enerji yutma kapasitesi	44
5.3.3. TRM ile sargılanan numunelerde enerji yutma kapasitesi.....	45
5.3.4. CFRP ile sargılanan numunelerde enerji yutma kapasitesi	46
5.4. Eğilme Dayanımı Değerleri.....	47
5.4.1. Çelik lifli numunelerin eğilme dayanımı değerleri	47
5.4.2. Polipropilen lifli numunelerin eğilme dayanımı değerleri	47
5.4.3. TRM ile sargılanan numunelerin eğilme dayanımı değerleri.....	48
5.4.4. CFRP ile sargılanan numunelerin eğilme dayanımı değerleri	49
5.5. Numunelerin Deney Sonrası Görüntüleri	49
5.5.1. Referans numunelerin deney sonrası görüntüleri	49
5.5.2. Çelik lifli numunelerin deney sonrası görüntüleri.....	50
5.5.3. Polipropilen lifli numunelerin deney sonrası görüntüleri.....	50
5.5.4. TRM ile sargılanan numunelerin deney sonrası görüntüleri	50
5.5.5. CFRP ile sargılanan numunelerin deney sonrası görüntüleri	51
6. DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI VE YORUMLANMASI	52
6.1. Maksimum Yüklerin Karşılaştırılması.....	52
6.1.1. Düşük dayanımlı numunelerde maksimum yük değerleri.....	52
6.1.2. Normal dayanımlı numunelerde maksimum yük değerleri.....	53
6.1.3. Genel değerlendirme: maksimum yük.....	54
6.2. Rijitlik Değerlerinin Karşılaştırılması.....	55
6.2.1. Düşük dayanımlı numunelerde rijitlik değerleri	55
6.2.2. Normal dayanımlı numunelerde rijitlik değerleri	55
6.2.3. Genel değerlendirme: rijitlik	57
6.3. Enerji Yutma Kapasitelerinin Karşılaştırılması	57
6.3.1. Düşük dayanımlı numunelerde enerji yutma kapasiteleri.....	58

6.3.2. Normal dayanımlı numunelerde enerji yutma kapasiteleri.....	58
6.3.3. Genel değerlendirme: enerji yutma kapasitesi.....	59
6.4. Maksimum Yükte Deplasman Değerlerinin Karşılaştırılması.....	60
6.4.1. Düşük dayanımlı numunelerde maksimum yükte deplasman.....	60
6.4.2. Normal dayanımlı numunelerde maksimum yükte deplasman.....	61
6.4.3. Genel değerlendirme: maksimum yükte deplasman	62
6.5. Maksimum Deplasman Değerlerinin Karşılaştırılması	63
6.5.1. Düşük dayanımlı numunelerde maksimum deplasman	63
6.5.2. Normal dayanımlı numunelerde maksimum deplasman	64
6.5.3. Genel değerlendirme: maksimum deplasman.....	65
6.6. Eğilme Dayanımı Değerlerinin Karşılaştırılması	66
6.6.1. Düşük dayanımlı numunelerde eğilme dayanımı.....	66
6.6.2. Normal dayanımlı numunelerde eğilme dayanımı.....	67
6.6.3. Genel değerlendirme: eğilme dayanımı	68
7. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	70
7.1. Sonuçlar	70
7.2. Karşılaştırmalı Tablo	70
7.3. Öneriler.....	71
KAYNAKÇA	72
EKLER.....	79
EK-1: ÇELİK LİFLİ NUMUNELERİN DENEY SONRASI GÖRÜNTÜLERİ	80
EK-2: PROPİLEN LİFLİ NUMUNELERİN DENEY SONRASI GÖRÜNTÜLERİ	81
EK-3: TRM NUMUNELERİN DENEY SONRASI GÖRÜNTÜLERİ	82
EK-4: CFRP NUMUNELERİN DENEY SONRASI GÖRÜNTÜLERİ	83

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1. Farklı Türdeki Liflere Ait Teknik Özellikler	16
Tablo 3.2. FRP Türlerinin Mekanik Özellikleri	20
Tablo 3.3. Tekstil Lif Türlerinin Mekanik Özellikleri	22
Tablo 4.1. Çalışma ile İlgili Bilgiler	23
Tablo 4.2. Beton Karışımlarının Üretiminde Kullanılan Malzeme Miktarları (kg/m ³)	25
Tablo 4.3. 28 Günlük Küp Numunelerin Basınç Dayanım Değerleri.....	25
Tablo 4.4. Polipropilen ve Çelik Liflerin Özellikleri.....	26
Tablo 4.5. CFRP Kumaş Performans Özellikleri.....	26
Tablo 4.6. Epoksi Reçinenin Özellikleri (Sika, 2020a)	27
Tablo 4.7. TRM Tekstilin Özellikleri.....	27
Tablo 4.8. TRM Sargısı İçin Kullanılan Harcın Mekanik Özellikleri (Sika, 2020b).....	28
Tablo 4.9. Deney Elemanlarının Özellikleri	29
Tablo 4.10. Referans, Çelik ve Polipropilen Lifli Numunelerin Detayları.....	30
Tablo 4.11. TRM ile Sargılanan Numunelerin Detayları.....	30
Tablo 4.12. CFRP ile Sargılanan Numunelerin Detayları.....	31
Tablo 5.1. Deney Sonuçları (Normalize Değerler)	37
Tablo 7.1. Performans Parametrelerinin Görelî Değişimlerinin Karşılaştırılması	71

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1. FRP Kumaş Türleri: a) CFRP; b) GFRP; c) BFRP; d) AFRP	20
Şekil 3.2. Yapay Lifli Tekstiller: a) Karbon, b) Bazalt, c) Cam d) Çelik	22
Şekil 4.1. Kiriş ve Alınan Küp Numuneler	25
Şekil 4.2. Deney Elemanlarının Geometrik Boyutları (mm)	29
Şekil 4.3. Hazırlanan Numuneler	32
Şekil 4.4. Kirişlerin CFRP ile Sargılanması.....	33
Şekil 4.5. Kirişlerin TRM ile Sargılanması.....	34
Şekil 4.6. Deney Numunesinin Yükleme Düzeneği.....	35
Şekil 4.7. Performans İndeksleri İçin Kullanılan Yaklaşım	36
Şekil 5.1. Referans ve Çelik Lifli Numunelerde Maksimum Yük Değerleri.....	38
Şekil 5.2. Referans ve Polipropilen Lifli Numunelerde Maksimum Yük Değerleri.....	39
Şekil 5.3. Referans ve TRM Sargılanan Numunelerde Maksimum Yük Değerleri	40
Şekil 5.4. Referans ve CFRP ile Sargılanan Numunelerde Maksimum Yük Değerleri	40
Şekil 5.5. Referans ve Çelik Lifli Numunelerde Rijitlik Değerleri	41
Şekil 5.6. Referans ve Polipropilen Lifli Numunelerde Rijitlik Değerleri	42
Şekil 5.7. Referans ve TRM ile Sargılanan Numunelerde Rijitlik Değerleri.....	42
Şekil 5.8. Referans ve CFRP ile Sargılanan Numunelerde Rijitlik Değerleri.....	43
Şekil 5.9. Referans ve Çelik Lifli Numunelerde Enerji Yutma Kapasitesi Değerleri	44
Şekil 5.10. Referans ve Polipropilen Lifli Numunelerde Enerji Yutma Kapasitesi Değerleri .	45
Şekil 5.11. Referans ve TRM ile Sargılanan Numunelerde Enerji Yutma Kapasitesi Değerleri	45
Şekil 5.12. Referans ve CFRP ile Sargılanan Numunelerde Enerji Yutma Kapasitesi Değerleri	46
Şekil 5.13. Referans ve Çelik Lifli Numunelerde Eğilme Dayanımı Değerleri	47
Şekil 5.14. Referans ve Polipropilen Lifli Numunelerde Eğilme Dayanımı Değerleri	48

Şekil 5.15.	Referans ve TRM ile Sargılanan Numunelerde Eğilme Dayanımı Değerleri.....	48
Şekil 5.16.	Referans ve CFRP ile Sargılanan Numunelerde Eğilme Dayanımı Değerleri.....	49
Şekil 5.17.	Referans Numunelerin Deney Sonrası Görüntüleri	50
Şekil 6.1.	Düşük Dayanımlı Kirişlerin Maksimum Yük Değerleri.....	52
Şekil 6.2.	Normal Dayanımlı Kirişlerin Maksimum Yük Değerleri	53
Şekil 6.3.	Maksimum Yük Değerlerinin Referans Numuneye Göre Normalize Değerleri.....	54
Şekil 6.4.	Düşük Dayanımlı Kirişlerin Rijitlik Değerleri	56
Şekil 6. 5.	Normal Dayanımlı Kirişlerin Rijitlik Değerleri.....	56
Şekil 6.6.	Tüm Numunelerin Rijitlik Değerleri	57
Şekil 6.7.	Düşük Dayanımlı Kirişlerin Enerji Yutma Kapasitesi Değerleri	58
Şekil 6.8.	Normal Dayanımlı Kirişlerin Enerji Yutma Kapasitesi Değerleri	59
Şekil 6.9.	Tüm Numunelerin Enerji Yutma Kapasitesi Değerleri	60
Şekil 6.10.	Düşük Dayanımlı Kirişlerin Maksimum Yükte Deplasman Değerleri.....	61
Şekil 6.11.	Normal Dayanımlı Kirişlerin Maksimum Yükte Deplasman Değerleri	62
Şekil 6.12.	Tüm Numunelerin Maksimum Yükte Deplasman Değerleri	62
Şekil 6.13.	Düşük Dayanımlı Kirişlerin Maksimum Deplasman Değerleri	64
Şekil 6.14.	Normal Dayanımlı Kirişlerin Maksimum Deplasman Değerleri.....	64
Şekil 6.15.	Tüm Numunelerin Maksimum Deplasman Değerleri	66
Şekil 6.16.	Düşük Dayanımlı Kirişlerin Eğilme Dayanımı Değerleri	67
Şekil 6.17.	Normal Dayanımlı Kirişlerin Eğilme Dayanımı Değerleri.....	67
Şekil 6.18.	Tüm Numunelerin Eğilme Dayanımı Değerleri	68
Şekil 6.19.	Eğilme Dayanımı Değerlerinin Referans Numuneye Göre Normalize Değerleri .	69

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

AFRP:	Aramid Lif Takviyeli Polimer
BFRP:	Bazalt Lif Takviyeli Polimer
b:	Deney numunesinin genişliği, (mm)
C:	Beton Dayanım Sınıfı
CFRP:	Karbon Lif Takviyeli Polimer
ÇL:	Çelik Lif
d:	Deney numunesinin kalınlığı, (mm)
D:	Düşük Dayanım
D_{kopma}:	Maksimum Deplasman, (mm)
D_{maks.}:	Maksimum Taşıma Gücünde Deplasman, (mm)
E:	Enerji Yutma Kapasitesi, (kN.mm)
FEA:	Sonlu Elemanlar Analizi
FRC:	Lif Takviyeli Beton
FRCM:	Kumaş Donatılı Çimento Esaslı Harç
FRP:	Lif Takviyeli Polimer
GFRP:	Cam Lif Takviyeli Polimer
HPFRCC:	Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozit
K:	Rijitlik, (kN/mm)
KYB:	Kendiliğinden Yerleşen Beton
L:	Deney numunesinin mesnetler arasındaki mesafesi, (mm)
N:	Normal Dayanım
P:	Kırılmaya neden olan yük, (N)
PBO:	Poliparafenilen Benzobisoksazol Kumaş
PL:	Polipropilen Lif

P_{maks.}:	Maksimum Taşıma Gücü, (kN)
PVA:	Polivinil Alkol
SP:	Süper Akışkanlaştırıcı
TRM:	Tekstil Takviyeli Harç
TS:	Türk Standardı
UYPLB:	Polipropilen Lifli Ultra Yüksek Beton
σ_c:	Kiriş Eğilme Dayanımı, (N/mm ²)

1. GİRİŞ

Son yıllarda meydana gelen depremler, düşük ve orta dayanımlı betonarme elemanların deprem yükleri altındaki performansını artırmaya yönelik malzeme geliştirme çalışmalarını ve bu malzemelerin kullanımının yaygınlaşmasını teşvik etmiştir. Günümüzde yapı mühendisliğinde; yapıların dayanımını artırmak, mekanik performanslarını iyileştirmek, maliyet etkinliği sağlamak, güvenliği artırmak ve farklı yaklaşımlar geliştirmek önemli hedefler arasında yer almaktadır. Bu doğrultuda, çeşitli lif katkıları, farklı kompozit kaplama yöntemleri ve yenilikçi yapısal sistemlerin kullanımı önerilmiş ve bu yaklaşımlar deneysel çalışmalarla değerlendirilmiştir. Günümüzde betonda yaygın olarak kullanılan lifler arasında cam, çelik ve polimer esaslı lifler bulunmaktadır (Topçu vd., 2017). Bu lifler, betonun geçirimsizliğini azaltarak dayanıklılığını artırmakta; darbe etkilerine karşı direncini güçlendirmekte ve çekme dayanımını iyileştirmektedir (Kozak, 2013). Ayrıca, donatıların paslanmasını ve korozyona uğramasını önleyici özellikleri sayesinde betonun servis ömrünü uzatmaktadır. Lif takviyesi, betonun bütünlüğünü koruyarak parçalanmasını engellemekte ve depremler sırasında oluşabilecek hasarları azaltarak yapıların göçme riskini düşürmektedir. Lifler, kendi çekme dayanımlarına ulaşıncaya kadar betonun maruz kaldığı basınç ve çekme gerilmeleri nedeniyle oluşabilecek kılcal çatlakların oluşumunu en aza indirmektedir. Kaplama amacıyla kullanılan elyaf lifleri, kesitte meydana gelen çatlak oluşumunu önemli ölçüde sınırlayarak sünekliği artırmakta ve çekme dayanımını belirgin şekilde iyileştirmektedir (Kurt, 2006). Yapılan araştırmalar, bu tür lif takviyelerinin beton üzerindeki olumlu etkilerini açıkça ortaya koymuştur. Depreme dayanıklı yapı tasarımı ve mevcut yapıların güçlendirilmesi için geliştirilen yöntemler arasında karbon lif takviyeli polimerler (CFRP) ve tekstil takviyeli harçlar (TRM), hafif yapıları, kolay uygulanabilir olmaları, korozyona karşı dirençleri ve yüksek mukavemet ile sertlik sağlamaları nedeniyle öne çıkan yenilikçi çözümler arasındadır (Akbaş ve Çalışkan, 2024a). Betonarme kirişler, deprem sırasında yoğun yüklemeye, yüksek iç kuvvetlere ve büyük deformasyonlara maruz kalmaktadır. Bu tür zorlayıcı koşullara karşı elyaf takviyeli kompozit malzemeler; üstün mekanik özellikleri, uzun ömürlü yapıları ve düşük ağırlıkları sayesinde yapıya ek yük getirmeden etkin bir güçlendirme çözümü sunmaktadır (Sarıbyık, 2018).

Bu çalışmada amaçlanan temel tasarım yaklaşımı; düşük ve normal basınç dayanımına sahip beton ile betonarme elemanların eğilme dayanımını artırmaya yönelik olarak, çelik ve polipropilen liflerin yanı sıra karbon lif takviyeli polimer (CFRP) ve tekstil takviyeli harç (TRM) içeren farklı sargı tiplerinin etkilerinin incelenmesidir.

Çalışma kapsamında iki farklı beton sınıfı (C16 ve C30) kullanılmıştır. Bu doğrultuda, boyutları 100×100×500 mm olan toplam 52 adet kiriş numunesi üretilmiş; bunların 4'ü güçlendirilmemiş referans elemanı olarak belirlenmiştir. Çelik ve polipropilen lifler, beton hacmi esas alınarak her bir lif türü için %0.3 ve %0.6 oranlarında kullanılmıştır. Sargı malzemesi olarak karbon lif takviyeli polimer (CFRP) kumaş ve tekstil takviyeli harç (TRM) kaplama tercih edilmiş; kirişler dört farklı sargılama yöntemiyle (alt yüzey, yan yüzeyler, U tipi ve tam sargılama) kaplanmıştır. Üretilen kiriş numuneleri, üç nokta eğilme testine tabi tutulmuştur. Deney elemanlarının; maksimum yük taşıma kapasitesi, rijitlik, maksimum yükte deplasman, maksimum deplasman, enerji yutma kapasitesi ve eğilme dayanımı değerleri belirlenmiştir. Bu veriler doğrultusunda, deneysel çalışma kapsamında incelenen değişkenlerin betonun eğilme dayanımını iyileştirme üzerindeki etkileri ile geliştirilen detayların performansları yorumlanmış ve karşılaştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Acun (2000), mevcut doğal ve yapay lif türlerinin kullanım alanlarını incelemiş; ayrıca betonda kullanılan liflerin, betonun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkilerini normal beton (C30) ile karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Çalışmasında, hacimce %0.5, %1 ve %1.5 oranlarında çelik lif; %0.06, %0.08 ve %0.09 oranlarında ise polipropilen lif kullanmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre, betona ilave edilen çelik liflerin hacim oranını artırdığında betonun işlenebilirliğini azalttığını ancak, eğilme altında çekme dayanımını yaklaşık iki kat ve elastiklik modülünü dört kat artırdığını gözlemlemiştir. Polipropilen lifli betonun, normal betonlara göre elastiklik modülünü 3 kat, eğilme altındaki çekme dayanımını ise 1.5 kat artırdığını belirlemiştir.

Aydöner (2002), çalışmasında, farklı türde çelik lif takviyeli betonların mekanik özelliklerini incelemiştir. Üç farklı çelik tel içeriği ve ayrıca üç farklı narinlikteki çelik tel takviyeli betonların kırılma davranışını elde etmek için üç noktalı eğilme ve yarma deneyleri kullanarak, çelik tel takviyeli betonların mekanik ve kırılma davranışları üzerinde çelik tel içeriği ile narinliğinin birlikte etkisini araştırmıştır. Deney sonuçlarına göre, çelik lif takviyeli betonlarda çelik tel içeriği arttıkça yarma çekme dayanımında belirgin bir artış olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca, narinliğin artmasıyla genel olarak dayanımda artış eğilimini tespit etmiştir. Net eğilme dayanımı da çelik lif içeriğiyle birlikte artış göstermiş; özellikle yüksek lif içeriğine sahip betonlarda narinliğin bu artış üzerinde etkili olduğunu belirlemiştir. Elde ettiği verilerin, çelik lif takviyeli betonlarda kırılma enerjisinin, normal betonun kırılma enerjisinin 40 katına kadar ulaşabildiğini gözlemlemiştir.

Koç (2004), çalışmasında karbon lif takviyeli polimer malzemeler (CFRP) ile güçlendirilmiş düşük ve normal dayanımlı beton elemanların mekanik davranışlarını incelemiştir. Bu amaçla düşük ve normal dayanımlı numunelere 1, 3 ve 5 kat CFRP kumaş uygulamıştır. Çalışmaları sonucunda, CFRP tabaka sargı kalınlığının gerek düşük gerekse normal dayanımlı beton elemanların davranışını önemli ölçüde etkilediğini belirtmiştir. Sargı tabaka kalınlığının artmasının numunelerin dayanım ve şekil değiştirebilme yeteneğini artırdığını, bu durumun beton basınç dayanımı görece düşük elemanlarda çok daha belirgin olduğunu gözlemlemiştir. Orijinal durumla karşılaştırıldığında güçlendirilmiş numunelerin enerji yutma kapasitelerinde çok büyük artış sağlandığını, enerji yutma kapasitesinde elde edilen bu artış dayanım ve şekil değiştirme yeteneğinde sağlanan artışın sonucu olduğunu belirlemiştir.

Yaprak vd. (2004), yaptıkları çalışmada betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla uçucu kül ve çelik lif içeren beton karışımlarına farklı oranlarda cam lif (0.5, 0.75, 1.0 ve 1.25 kg/m³) ilave ederek, betonun basınç ve çekme dayanımındaki değişimlerini incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, cam lif oranının artmasına bağlı olarak taze betonun işlenebilirliğinde azalma gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, cam lifin çelik lif ile kullanılması durumunda, betonun basınç dayanımı ve yarma çekme dayanımında olumlu katkılar sağladığını belirlemişlerdir.

Özcan (2005), eğilme yükleri altındaki dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin eğilme davranışının iyileştirilmesine yönelik deneysel bir araştırma gerçekleştirmiştir. Bu kapsamda, hasarsız betonarme kirişlerin güçlendirilmesi amacıyla iki farklı miktarda lif takviyeli polimer (FRP) uygulamıştır. Kontrol ve güçlendirilmiş kirişler üzerinde yapılan deneylerde; kırılma mekanizmaları, kırılma yükü, yer değiştirme ve şekil değiştirme değerleri belirlemiştir. Çalışması sonucunda, fiber takviyeli polimer ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kırılma şekillerinin, kirişin alt yüzeyindeki fiber takviyeli polimer liflerinin kopması ve üst bölgedeki betonun ezilmesi şeklinde gerçekleştiğini gözlemlemiştir. Sonuç olarak, betonarme kirişin çekme bölgesine uygun şartlarda ve doğru şekilde uygulanan fiber takviyeli polimer lifleri ile kirişin eğilme dayanımının, diğer bir ifadeyle moment kapasitesinin artırılmasının mümkün olduğunu belirtmiştir.

Önal vd. (2006), çalışmalarında çelik lif katkılı ve katkısız C20 beton ile S420 çeliği kullanarak imal edilen, 2 m açıklığa ve 25×35 cm kesit boyutlarına sahip betonarme kirişlerin statik yükler altındaki davranışlarını deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle incelemişlerdir. Çalışmaları kapsamında, çelik lif katkısı ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen yer değiştirme ve gerilme değerlerinin, deneysel sonuçlarıyla oldukça yakın olduğunu belirlemişlerdir. Kirişlerin hesaplanan kırılma yükleri ve çatlak oluşum mekanizmalarının deneysel bulgularla birebir örtüştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca, çelik lif katkısının, katkısız betonarme kirişlere kıyasla kiriş davranışını önemli ölçüde etkilediği sonucuna ulaşmışlardır.

Kurt (2006), çalışmasında cam lifi katkılı betonlarda su/çimento oranı ile lif miktarındaki değişimin betonun mekanik davranışına etkilerini incelemiştir. Bu doğrultuda sekiz farklı tipte beton üretmiş; karışımlarda hacimce %0, %2, %4 ve %6 oranlarında, minimum 10 µm çapında ve 12 ile 20 mm boylarında alkali ortama dayanıklı cam lifler kullanmıştır. Numunelere kırılma enerjisi deneyleri, silindir basınç deneyleri ve disk yarma deneyleri uygulamıştır. Çalışma sonucunda, cam lifi takviyeli betonlarda lif kullanımının, malzemenin

kırılma sırasında gevrek davranış göstermesini engellediğini, cam lifi içermeyen numunelerin gevrek şekilde kırıldığı, cam lifi içeren numunelerin ise yüksek miktarda enerji yutarak kontrollü ve uzun sürede kırıldığı gözlemlemiştir. Lif içeriğine bağlı olarak; kırılma enerjisinin yalın betona kıyasla 109 kat, net eğilme dayanımının 5 kat ve karakteristik boyun ise 33 kat kadar arttığını belirlemiştir.

Berbergil (2006), çalışmasında üç farklı yeni nesil süper akışkanlaştırıcı katkı kullanarak kendiliğinden yerleşen beton üretmiştir. Tüm karışımlarda 350 kg/ m³ çimento, 150 kg/ m³ uçucu kül ve sabit su miktarı kullanmış; bu sabit bileşenlere farklı oranlarda çelik lif ilave etmiştir. Her katkı türüyle birlikte, 1 m³ beton için sırasıyla 30 kg, 45 kg ve 60 kg çelik lif içeren numuneler ile hiç lif içermeyen kontrol numuneleri hazırlamış; toplamda 12 farklı beton karışımı elde etmiştir. Deney sonuçlarına göre, yeni nesil süper akışkanlaştırıcılar kullanılarak üretilen kendiliğinden yerleşen betonlara çelik lif ilave edilmesi ve lif miktarının artırılması, betonun basınç dayanımında anlamlı bir değişikliğe neden olmadığını belirtmiştir. Ancak, çelik lif katkısının betonun eğilme dayanımını önemli ölçüde artırdığını gözlemlemiştir.

Sarı (2008), çalışmasında üç farklı boya sahip ancak aynı narinlikteki kancalı uçlu çelik liflerin farklı içeriklerde kullanılmasıyla C25 ve C80 beton sınıflarının mekanik özellikleri ile kırılma enerjileri üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, yalın beton ile çelik lif donatılı betonların basınç dayanımları karşılaştırıldığında anlamlı bir fark gözlemlenmemiştir. Normal dayanımlı betona 57 kg/m³ oranında çelik lif ilave edilmesi durumunda eğilme dayanımında %62'ye varan bir artış elde etmiştir. Yüksek dayanımlı betonlarda ise bu artışın %146 seviyesine ulaştığını tespit etmiştir.

Topçu ve Uğurlu (2008), çalışmalarında çelik lifli betonlar için şantiye uygulamalarında karşılaşılan güçlükler nedeniyle uygulanması zor olan deney yöntemleri ile geleneksel akışkanlık testleri arasındaki ilişkileri araştırmışlardır. Araştırmaları sonucunda, betona çelik lif ilave edilmesinin taze betonun kıvamında belirgin azalmaya neden olduğunu gözlemlemiştir. Kıvam azalmasının, karışımdaki lif hacmi ile lifin boy/çap oranı gibi parametrelerden önemli ölçüde etkilendiğini tespit etmişlerdir. Bu bulguların, lifli betonların taze haldeki işlenebilirliğini değerlendirirken lif geometrisinin ve miktarının dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

Hsie (2008), çalışmasında polipropilen hibrit elyaf takviyeli betonun mekanik özelliklerini araştırmıştır. Çalışmasında, monofilament ve staple fiber olmak üzere iki farklı türde polipropilen elyaf kullanmıştır. Monofilament elyaflar 3 kg/m³, 6 kg/m³ ve 9 kg/m³

oranlarında; staple fiber ise 0.6 kg/m^3 oranında beton karışımlarına dahil etmiştir. Çalışması sonucunda, kullanılan polipropilen liflerin çatlak oluşumunu engelleme konusunda oldukça başarılı performans sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, hibrit polipropilen elyaf takviyeli betonun basınç dayanımı, çekme dayanımı ve eğilme özelliklerinin, yalnızca monofilament elyaf içeren betonlara kıyasla daha üstün olduğunu tespit etmiştir.

Bedirhanoglu ve İlki (2009), çalışmalarında düşük dayanımlı betonarme elemanların deprem yükleri altındaki davranışlarını iyileştirmek amacıyla kullanılabilecek bir malzemenin geliştirilmesini hedeflemişlerdir. Bu doğrultuda, farklı özelliklere sahip yüksek performanslı lif donatılı çimento esaslı kompozit numunelerin mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Standart silindir ve disk yarma-çekme deneyleri sonucunda, sıcak kür uygulamasının çekme dayanımını gözle görülür şekilde artırdığını tespit etmişlerdir. Liflerin az miktarda korozyona uğratılmasının ise mekanik özellikler üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Çelik lif oranındaki artışın, çekme dayanımı, süneklik ve tokluk gibi mekanik özellikleri olumlu yönde etkilediğini; buna karşın, basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerinde pozitif bir etkisinin bulunmadığını belirlemişlerdir. Eğilme deneyleri sonucunda, çelik lif oranının %4'e çıkarılmasıyla birlikte, lifsiz numunelere kıyasla tokluğun çok yüksek oranlarda ve net eğilme dayanımının yaklaşık altı kat arttığını gözlemlenmiştir.

Okay ve Engin (2009), çalışmalarında betonun çekme dayanımına olumlu etkisi bilinen farklı boyutlardaki çelik lifler kullanarak, normal dayanımlı beton ile üretilmiş betonarme kirişlerin burulma dayanımı ve çatlak dağılımındaki olası farklılıkları araştırmışlardır. Bu kapsamda, beton kalitesi sabit tutularak dört farklı çelik lif tipi ve iki farklı lif içeriği kullanılmış; toplamda dokuz adet normal dayanımlı betonarme kiriş üretilmiştir. Üretilen numuneler, düzenli artan burulma yüklemesi altında test edilmiş ve her bir numune için burulma momenti–birim dönme açısı eğrileri oluşturmuşlardır. Yükleme sırasında oluşan çatlak sayısı ve ortalama çatlak genişliklerinin, lif ilavesiyle belirgin şekilde değiştiğini gözlemlenmiştir. Çalışmaları sonucunda, çelik lif oranı arttıkça çatlak sayısının arttığını, buna karşılık ortalama çatlak genişliklerinin azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, betonarme kirişlerin burulma altındaki enerji yutma kapasitelerinin çelik lif ilavesiyle önemli ölçüde arttığını belirlemişlerdir.

Bahadır (2010), çalışmasında polipropilen liflerin betonun mekanik özelliklerine etkisini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada çimento dozajı 300 kg/m^3 olarak belirlenmiş ve 0.40, 0.50 ve 0.60 olmak üzere üç farklı su/çimento oranı kullanmıştır. Hazırlanan bu karışımlara, 0.9 ve 1.8 kg/m^3 oranlarında üç farklı polipropilen lif ilave etmiştir. Deneyler sonucunda, monofilament polipropilen liflerin betonun çekme dayanımını önemli ölçüde

artırdığı; elyafımsı polipropilen liflerin ise betonun boşluk oranını azalttığı ve dayanıklılığını artırdığını gözlemlemiştir.

Martinola vd. (2010), çalışmalarında yüksek performanslı fiber takviyeli betonun betonarme kirişlerdeki katkısını ve bu katkının eğilme dayanımı üzerindeki etkisini ortaya koymayı amaçlamışlardır. Betonarme kirişlere, yük altında sünek davranış sergileyebilen fiber takviyeli beton ile 40 mm kalınlığında mantolama uygulamış ve bu mantoları doğrudan kiriş yüzeylerine yerleştirmişlerdir. Çalışmaları kapsamında, kirişlerin hem onarımı hem de güçlendirilmesini değerlendirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, güçlendirme uygulamasının ardından çatlakların küçüldüğü ve uygulanan yüksek performanslı fiber takviyeli beton matrisinin yoğunluğunun, yapı mukavemetini artırmada etkili bir yöntem olarak kullanılabileceği gözlemlemiştir.

Al-Zadjali (2011), çalışmasında tekstil takviyeli harç (TRM) kullanarak betonarme kirişlerin eğilme dayanımının güçlendirilmesini hedeflemiştir. Bu amaçla epoksi ve çimento esaslı harç bağlayıcı malzemeler kullanarak kirişleri tek, iki ve üç katmanlı tekstil lifleri ile güçlendirmiştir. Çalışması sonucunda, numuneler arasında epoksi ile doyurulmuş tekstillerin dayanım açısından ortalama %10-17 arasında eğilme dayanımında artış olduğunu ve artan tekstil lifi katman sayısı ile birlikte U-şekilli şeritler kullanıldığında hem eğilme dayanımında hem de süneklikte artış olduğunu gözlemlemiştir.

Özyüksel (2012), çalışmasında çelik levha ve CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme davranışlarını araştırmış ve bu iki güçlendirme yöntemi sonuçlarını birbiriyle karşılaştırmıştır. Bu amaçla, 7 adet 25x15x150 cm boyutlarında C25 beton sınıfında kiriş üretmiştir. Çalışması sonucunda, CFRP ve çelik levha ile güçlendirilen kirişlerin referans kirişine oranla ortalama sırasıyla %60 ve %46.5 daha fazla yük taşıdığını gözlemlemiştir. Hem dayanım artırmadaki başarısı hem de uygulandığındaki kolaylığı nedeniyle CFRP kumaş ile güçlendirme yöntemini daha uygun bir yöntem olarak önermiştir.

Açıkgenç vd. (2012), çalışmalarında polipropilen liflerin betonun taze ve sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Bu amaçla, beton içerisine hacimce %1 ve %2 oranlarında polipropilen lif eklenmiş; plastik ve akıcı kıvamına sahip, 300, 350 ve 400 dozlu lifli beton karışımları tasarlamışlardır. Deneyler sonucunda, lif oranı arttıkça betonun dayanım özelliklerinin iyileştiğini gözlemlemiştir. Polipropilen liflerin, özellikle akıcı kıvamdaki betonlarda çökme miktarını azalttığını tespit etmişlerdir. Bu durum, işlenebilirlik açısından olumsuz bir etki gibi görünse de taze betonun kohezyonunu artırması bakımından önemli bir

avantaj olarak değerlendirmişlerdir. Ayrıca, polipropilen liflerin betonun mekanik özelliklerini genel olarak olumlu yönde etkilediği sonucuna ulaşmışlardır. Özellikle eğilme altında çekme dayanımını artırıcı etkileri nedeniyle, polipropilen liflerin çekme dayanımının kritik olduğu taşıyıcı elemanlarda kullanılabilir olduğu ifade etmişlerdir.

Elsanadedy vd. (2013), çalışmalarında betonarme kirişlerin eğilme dayanımını artırmada bazalt tekstil takviyeli harç (TRM) ve karbon fiber takviyeli polimerin (CFRP) etkinliğini deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Bu amaçla, altı adet kiriş üretmiş ve bu numuneleri dört noktalı eğilme düzeneği altında test etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda; bazalt esaslı TRM sisteminin, CFRP kompozitlere kıyasla eğilme dayanımını artırma hususunda bir miktar daha düşük performans sergilediğini, ancak bazalt tekstil takviyeli harç kullanımının referans numuneye kıyasla kirişlerin eğilme kapasitesinde %31 oranında bir artış sağladığını gözlemlemişlerdir.

Dvorkin vd. (2013), çalışmalarında tekstil takviyeli kumaşların çimento esaslı tamir harcıyla uygulandığı çift ve tek yönlü tekstil kumaşların mekanik performansını belirlemeyi hedeflemişlerdir. Bu amaçla, çift ve tek yönlü tekstil kumaşlara çekme ve sıyrılma testi uygulamışlardır. Çalışmaları sonucunda, çift yönlü tekstil kumaş kompozitinin tek yönlü kaplamasız kumaş kompozitine göre çok daha iyi mekanik performans gösterdiğini, karbon tekstil kumaş kullanımının betonun çekme performansını kontrol numunesine kıyasla; çift yönlü tekstil kumaşta %43, tek yönlü tekstil kumaşta ise %22 oranında artırdığını gözlemlemişlerdir. Tek yönlü kumaşta liflerin birbirinden ayrılmış olduğunu bunun da kumaşın daha düşük çekme davranışına neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Mardani-Aghabaglou vd. (2013), çalışmalarında çeşitli lif türlerinin kendiliğinden yerleşen beton (KYB) üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırmada, liflerin KYB'nin taze hal özellikleri olan yayılma çapı, L-kutusu geçiş oranı ve hava içeriği üzerindeki etkilerinin yanı sıra, 28 günlük basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ultrasonik geçiş hızı ve dinamik elastik modül gibi sertleşmiş hal özelliklerini de değerlendirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, lifin kullanım oranı, narınlığı ve çekme dayanımının KYB'nin hem taze hem de sertleşmiş hal özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini belirlemişlerdir. Lif içeren numunelerin eğilme ve doğrudan çekme dayanımlarının, lif içermeyen numunelere kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlemişlerdir. Özellikle iki ucu kancalı, pirinç kaplı çelik lif içeren KYB numunelerinin en yüksek eğilme ve doğrudan çekme dayanımını gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Tokgöz ve Dündar (2014), çalışmalarında betonarme kirişlerin eğilme etkisiyle çekme gerilmelerinin olduğu alt yüzeylerde ve kesme gerilmelerinin meydana geldiği L/4 mesafesindeki yan yüzeylerde karbon lif takviyeli polimer (CFRP) tekstilleri ile güçlendirme amacıyla sarılma uygulamaları gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarında toplam 9 adet betonarme kiriş deney elemanı üretmiş ve bu elemanların yük-deplasman davranışları, sünelikleri ile enerji tüketim kapasitelerini incelemişlerdir. Kesme yönünden yetersiz olarak tasarlanan üçer adet kirişin kesme bölgelerine, 90° ve 45° açılarla CFRP tekstilleri yapıştırılarak güçlendirme uygulamışlardır. Çalışmaları sonucunda, güçlendirilen kirişlerin artan yükler altında gevrek kesme kırılması şeklinde göçmeye ulaştığı gözlemlenmiştir. Tüm kirişlerde göçmenin, eğilme gerilmesinin en fazla olduğu tahmin edilen orta noktada gerçekleştiğini belirlemişlerdir. 90° açıyla uygulanan CFRP tekstilleriyle güçlendirilen kirişlerin, kontrol grubu elemanlarına kıyasla ortalama %60 daha fazla yük taşıma kapasitesi olduğunu gözlemlenmiştir. Bu oranın 45° açıyla güçlendirilen elemanlarda %50 seviyesinde kaldığını belirlemişlerdir.

Sen ve Reddy (2014), çalışmasında ısıtma işlemi uygulanmış sisal liflerinin betonarme kirişlerin güçlendirilmesindeki etkinliğini, karbon (CFRP) ve cam (GFRP) lif takviyeli polimerler ile karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Bu amaçla, numunelere dört noktalı eğilme deneyi uygulamışlardır. Çalışmaları sonucunda; sisal FRP kompozitlerin eğilme dayanımını önemli ölçüde artırdığını, ancak karbon ve cam FRP'ye kıyasla sırasıyla %78 ve %48 daha düşük dayanım göstererek bu malzemelerin gerisinde kaldığını belirtmişlerdir. Tüm güçlendirilmiş kirişlerin eğilme dayanımının, FRP'nin genişliği arttıkça arttığını gözlemlenmiştir. Şerit sargının, tam sargıya göre daha düşük yük taşıma kapasitesi gösterdiğini; bu nedenle dokuma sisal kumaş FRP'nin, özellikle betonarme yapıların eğilme dayanımının güçlendirilmesi için uygun bir güçlendirme malzemesi olduğunu ifade etmişlerdir.

Türker vd. (2016), çalışmasında kolay uygulanabilir ultra yüksek performanslı lifli beton (UYPLB) üretimi gerçekleştirmişler ve bu betonla imal edilen betonarme kirişlerin eğilme davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca, UYPLB kirişlerin eğilme kapasitelerinin belirlenmesine yönelik sayısal bir yöntem önermiş ve bu yöntemin sonuçlarını, deneysel veriler ile literatürdeki yaklaşımlar kullanılarak karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, tüm kirişlerde beklendiği üzere çekme donatısı oranı arttıkça çatlamış kesitin eğilme rijitliğinin arttığını belirlemişlerdir. Eğilme rijitliği, lifsiz kirişlere kıyasla polipropilen lif içeren UYPLB kirişlerde: 1.15 ila 2.15 kat, karma lif içeren

kirişlerde: 1.03 ila 1.79 kat arasında artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, donatı oranı arttıkça liflerin eğilme rijitliğine katkısının azalma eğilimi gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Kaya vd. (2017), çalışmalarında betonun basınç ve eğilme dayanımlarına olan etkisini deneysel olarak gözlemlemişlerdir. Çalışmada, 28 günlük basınç dayanım değeri 30 MPa olan beton kirişler üretmişlerdir. Üretilen kirişlerin çekme yüzeylerinin merkezlerine CFRP şeritleri farklı genişlikte ve uzunluklarda hazırlanan numuneleri yapıştırıp kirişleri güçlendirmişlerdir. Üretilen kiriş numunelerini dört nokta eğilme testine tabii tutmuşlardır. Çalışmaları sonucunda, CFRP ile güçlendirilen serilerden elde edilen eğilme dayanım değerlerinin referans değere oranla %11-300 arasında katkı sağladığı sonucuna ulaşmışlardır.

Cazacu vd. (2017), çalışmalarında karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ile farklı desenlerle güçlendirilmiş kirişlerin eğilme davranışını incelemişlerdir. Bu amaçla CFRP kumaşlarla güçlendirilmiş dört adet kirişe eğilme testi uygulamışlardır. Çalışmaları sonucunda; betonarme kirişlerin çekme yüzeyine yapıştırılan CFRP kumaş ve plakaların, herhangi bir yük seviyesinde sehimleri önemli ölçüde azalttığını ve bunun da güçlendirilmiş kirişlerin rijitliğini artırdığını belirtmişlerdir. Güçlendirilmiş betonarme kirişlerin güçlendirme desenlerinin kirişlerin yapısal performansını etkilediğini, yük taşıma kapasitesini ve eğilme dayanımını artırdığını belirtmişlerdir. Güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kontrol numunesine kıyasla eğilme dayanımını %30 ile %40 oranında artırdığını gözlemlemişlerdir.

Raouf ve Bournas (2017), çalışmalarında tekstil takviyeli harç (TRM) ve karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozit sistemleri ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme davranışlarını oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklık koşulları altında deneysel olarak inceleyerek karşılaştırmışlardır. Araştırmada tekstil malzemesi olarak; karbon, cam ve bazalt esaslı tekstil kumaşlar kullanılarak toplam 23 adet kiriş üzerinde test gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, yüksek sıcaklığa maruz kalan kirişlerin eğilme kapasitesini artırmada karbon esaslı TRM sisteminin, CFRP'ye kıyasla çok daha yüksek bir etkinlik sergilediğini tespit etmişlerdir. TRM sisteminin oda sıcaklığındaki performansının yaklaşık %55'ini koruduğunu, CFRP sisteminin ise bu koşullarda etkinliğini tamamen yitirdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca, normal sıcaklık ortamında katman sayısındaki artışın her iki sistemde de eğilme kapasitesini artırdığını ve en yüksek eğilme dayanımına 3 katmanlı TRM uygulanan numunelerde ulaşıldığını belirtmişlerdir.

Ebead vd. (2017), çalışmalarında betonarme kirişlerin eğilme dayanımı ve deformasyon kapasitelerinin iyileştirilmesinde kumaş donatılı çimento esaslı harç (FRCM) sistemlerinin

etkinliğini araştırmışlardır. Güçlendirme aşamasında; karbon lif takviyeli tekstil harç (TRM) ve poliparafenilen benzobisoksazol kumaş (PBO) olmak üzere iki farklı kumaş tipi kullanmışlardır. Deney programı kapsamında; iki adet referans (güçlendirilmemiş) numunenin yanı sıra, bir, iki ve üç katmanlı karbon TRM ile dıştan güçlendirilmiş altı kiriş ve bir ile iki katmanlı PBO ile güçlendirilmiş dört kirişi test etmişlerdir. Tüm numuneleri dört noktalı eğilme yüklemesi altında göçme anına kadar incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, güçlendirilmiş kirişlerin eğilme dayanım kapasitesinin referans numunelere kıyasla en çok artıran numunelerin; üç katmanlı TRM sisteminde %77, iki katmanlı PBO sisteminde ise %27 oranında artırdığını gözlemlemişlerdir.

Khandekar ve Pol (2018), çalışmalarında eğilme yetersizliği olan ve karbon fiber takviyeli polimer tabakalar ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme kapasitesinin artırılmasına yönelik deneysel bir çalışma için 18 adet numune üretmişlerdir. Bunların 6 adeti kontrol numunesi 3 adet CFRP ile sargılanmış ve diğer 9 adet numuneyi ise korozyona maruz bırakmışlardır. Bozulma sürecindeki numunelerin 3'üne CFRP sargı uygulamışlar ve tüm numuneleri dört noktalı eğilme testine tabii tutmuşlardır. Çalışmaları sonucunda; korozyona uğramış kirişin eğilme dayanımının, kontrol kirişine kıyasla %10 oranında azaldığını, CFRP uygulandıktan sonra ise eğilme dayanımının eskiye nazaran %40 artış gösterdiğini ve CFRP sargının kontrol kirişine uygulandıktan sonra eğilme dayanımını %40 artırdığı sonucuna ulaşmışlardır.

Hussien vd. (2018), çalışmalarında eğilme yüklerine karşı karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kompozitlerle güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışını Abaqus sonlu elemanlar programını kullanarak modellemişlerdir. Düşük dayanımlı beton ve yetersiz eğilme ile kesme donatısı kullanarak üretilen dikdörtgen kesitli betonarme kirişleri, tek yönlü karbon kumaşlar enine ve boyuna doğrultularda yönlendirilerek U şeklinde güçlendirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, lif takviyeli polimer sargı katmanı artırıldığında, kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin arttığını belirlemişlerdir. Ancak bu artışın, CFRP sargı katmanındaki artışla doğrusal orantılı olmadığı, sonlu elemanlar yöntemiyle de tespit etmişlerdir.

Alemdar ve İnkaya (2019), çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemiyle CFRP sisteminin kiriş performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu kapsamda, CFRP'nin genişliği, uygulanan karbon lifin kat adedi ve kiriş yan yüzeylerindeki sargı yüksekliği gibi değişkenleri dikkate almışlardır. Çalışmada, CFRP genişliğinin artması durumunda betondaki çekme gerilmesi değerinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Buna karşılık, lif kat adedinin ve yan yüzeylerde uygulanan CFRP yüksekliğinin artmasıyla çekme gerilmesi değerinin arttığını

belirlemişlerdir. Bu artışın, bazı durumlarda maksimum çekme kapasitesini aştığı, dolayısıyla kirişte çatlamlar ve parça kopmaları meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Elde edilen bulguların deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Çağlar vd. (2019), çalışmalarında çelik lifli betonların basınç ve eğilme dayanımları üzerine araştırmalar yapmışlardır. Deneysel çalışmalarda, katkısız beton ve çelik lifli beton olmak üzere iki farklı beton türü üretmişlerdir. Bu amaçla, $15 \times 15 \times 15$ cm boyutlarında üç adet küp numune ve $7.5 \times 7.5 \times 50$ cm boyutlarında dört adet prizmatik numune hazırlamışlardır. 28 günlük kür süresinin ardından, küp numuneler TS EN 12390-4 standardına uygun şekilde basınç dayanım cihazında test etmişlerdir. Prizmatik numuneler üzerinde ise eğilme çekme dayanım deneyi uygulanarak kırılma ve eğilme dayanımlarını belirlemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, çelik lifli beton numunelerde kırılma olayının, betonun yüksek enerji yutma kapasitesi nedeniyle daha uzun sürdüğünü gözlemlemişlerdir. Ayrıca, kirişlerde meydana gelen ve zamanla büyüyen çatlakların çelik lifler tarafından engellendiğini tespit etmişlerdir. Çelik lifli numunelerde sünek kırılma davranışı gözlemlenmiş ve bu durumun betonun mekanik performansını olumlu yönde etkilediği sonucuna ulaşmışlardır.

Kızılırmak vd. (2019), çalışmalarında çok kancalı yeni nesil liflerin dozajı ve narinlik (boy/çap) oranının, yüksek dayanımlı betonun statik ve darbe eğilme yükleri altındaki dayanımı ile kırılma enerjisi gibi özelliklerine etkilerini, geleneksel 3D liflerle karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, çelik lif hacmi, lif kanca sayısı ve narinlik oranının artışının, taze betonun işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir. Lif hacmindeki artışın, betonun taze haldeki yoğunluğunu ve basınç dayanımını bir miktar artırdığı, ayrıca lif ucu kanca sayısındaki artışın da basınç dayanımını olumlu yönde etkilediğini gözlemlemişlerdir.

Dalyan ve Doran (2021), çalışmalarında betonarme kirişlerin eğilme direncini artırmak için karbon elyaf takviyeli polimer levhaların alttan ve U tipinin 2 farklı deseniyle uygulandığı güçlendirme tekniğini araştırmışlardır. Bu amaçla, farklı CFRP konfigürasyonlarını dikkate alarak sekiz adet betonarme kiriş üretmişler ve dört noktalı eğilme yüklemesi altında test etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, 3 numaralı U tipi uygulanan numunenin en yüksek eğilme dayanımına, 1 numaralı alttan uygulanan numunenin ise en az eğilme dayanımı artışına sahip olduğunu belirtmişlerdir. 2 ve 3 numaralı güçlendirme yöntemlerinin, 1 numara ile kıyaslandığında daha iyi bir eğilme dayanımı performansı elde etmek için etkili ve başarılı bir metot olduğu sonucuna ulaşmışlardır. 3 numaralı güçlendirme yönteminde kullanılan malzeme

miktarı nedeniyle, bu yöntemin sağladığı artışın 2 numaralı ile kıyaslandığında daha düşük bir performans-maliyet değeri sunduğunu belirlemişlerdir.

Koutas ve Papakonstantinou (2021), çalışmalarında betonarme kirişlerin eğilme dayanımını artırmak amacıyla, dıştan yapıştırılmış bazalt ve cam elyaf lifli tekstil takviyeli harçların (TRM) katmanlarıyla güçlendirilmesine yönelik deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarının temel amacının, tekstil türü ve tekstil katman sayısı değiştirilerek, harç türünün TRM güçlendirme sisteminin performansına etkisini araştırmak olduğunu belirtmişlerdir. Deney çalışmaları için dokuz adet orta ölçekli betonarme kiriş üretilmiş, M1 ve M2 harçları arasındaki temel farkın; M1 harcında katkı maddesi olarak sentetik polimerlerin kullanılması olduğunu belirtmişlerdir. Numuneleri 4 noktalı eğilme altında test etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, TRM ile güçlendirilen tüm kirişlerin eğilme dayanımında, altı katmanlı bazalt kumaşa %7.4 ile altı katmanlı cam lifte ise %37.4 arasında değişen bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Sentetik polimerli çimento esaslı harcın (M1) kullanımının, sentetik polimer içermeyen çimento esaslı harç (M2) ile karşılaştırılan numunelere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek eğilme dayanımı artışı sağladığını gözlemlemişlerdir.

Kurban vd. (2022), çalışmalarında tekstil takviyeli beton üretiminde kullanımı uygun olan cam, bazalt ve karbon kumaşların kullanımının betonun performans özellikleri üzerine etkilerini karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Kullanılan kumaşların, ham ve epoksi reçine ile kaplı olarak iki farklı formda, numunede 10x50 tel ve 10x10 tel olacak şekilde iki farklı yüzey halinde ve beton numune içerisinde üç farklı oranda kullanarak beton performansı üzerine etkileri incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, her bir takviye bileşenin eğilme dayanımına katkı sağladığını, en fazla katkıyı karbon kumaş, en düşük katkıyı ise bazalt kumaştan üretilen yüzeylerin sağladığını belirtmişlerdir. Maksimum eğilme dayanımını, 3 mm takviyeli karbon kumaş numunesi için 23.7 MPa olarak elde etmişlerdir. Tekstil takviyesi numune tabanına yaklaştıkça, eğilme dayanımına daha fazla katkıda bulunduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Alhallaak (2022), çalışmasında yüksek, orta ve düşük dayanımlı beton numunelerini cam ve karbon lif takviyeli polimerler (GFRP ve CFRP) ile sargılamanın eğilme davranışı üzerindeki etkisini belirlemeyi hedeflemiştir. Bu doğrultuda; karbon ve cam lifli kumaşları epoksi vasıtasıyla, numunelerin alt yüzeylerindeki açıklığın 1/7 ve 4/7 oranlarındaki orta bölümlerine yapıştırarak güçlendirme yapmıştır. Çalışması sonucunda, tüm dayanım sınıflarında 4/7 oranında güçlendirilen numunelerin en yüksek eğilme dayanımı değerlerini sergilediği belirtmiştir. Düşük dayanımlı ve uzun açıklıklı karbon lifli numunenin, kontrol numunesine kıyasla eğilme dayanımında %153 artış gösterdiğini; bu artış oranının normal

dayanımlı numunede %200, yüksek dayanımlı numunede ise %73 olduğunu gözlemlemiştir. Cam lifli kumaş kullanımının yüksek artışlar sağlamasına rağmen, karbon lif takviyeli kumaşların gerisinde kaldığını ifade etmiştir.

Alav (2022), çalışmasında kesme kapasitesi yetersiz, denge altı dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin, farklı beton basınç dayanımları altında bölgesel olarak dıştan CFRP ile güçlendirilmesi durumunda, düşey yük altındaki davranışlarını deneysel olarak incelemiştir. Bu kapsamda, hedeflenen beton basınç dayanımları 5, 10, 20, 30, 40 ve 50 MPa olan betonlarla hazırlanan kirişleri değerlendirmiştir. Deneysel çalışmada, 1/3 ölçekli, 100×150×1000 mm boyutlarında toplam 35 adet betonarme kiriş numunesi hazırlamıştır. Kirişlerde boyuna donatılar 2Ø8 ve 2Ø10 olarak seçilmiş; kesme kapasitesinin yetersiz olması amacıyla, etriyeler yalnızca mesnet bölgelerinde ikişer adet ve orta açıklıkta beş adet olacak şekilde Ø6/50 mm aralığında yerleştirmiştir. Çalışma sonucunda, düşük dayanımlı (5–20 MPa arası) betonlara sahip kirişlerde tam sargılamanın mutlaka tercih edilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Ancak uygulamada kirişlerin tablalı olması, tam sargılamayı zorlaştıran önemli bir etken olarak değerlendirmiştir. Bu tür kirişlerde, tabla köşelerinden veya kiriş gövdesinden CFRP'nin betona spike ankrajlarla bağlanması, güçlendirilmiş kirişin davranışında tam sargılamaya yakın bir iyileştirme sağladığını belirtmiştir.

El-Abbasy (2023), çalışmasında ultra yüksek performanslı elyaf takviyeli betonun mekanik özelliklerini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Bu kapsamda; çekme dayanımı, eğilme dayanımı, darbe direnci ve kırılma davranışlarını değerlendirmiştir. Çalışması sonucunda, belirli geometrilere sahip çelik lifler gibi farklı lif türlerinin, ultra yüksek performanslı elyaf takviyeli betonun mekanik performansını artırmada önemli bir rol oynadığı gözlemlemiştir. Özellikle çelik liflerin dahil edilmesiyle, betonun: yarma çekme mukavemetini %228'e kadar, eğilme mukavemetini ise %180'e kadar artırılabilirdiğini gözlemlemiştir.

Abdel-Karim vd. (2023), çalışmalarında yapısal polipropilen liflerin hibrit bir kombinasyonunun (çelik, GFRP ve hibrit) betonarme kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. İncelenen başlıca parametreler arasında çekme takviye tipleri (çelik, GFRP ve hibrit), hibrit takviye oranları (%0.85, %1.26 ve %1.70), takviye hibritleştirme şemaları (hibrit-hibrit, hibrit-GFRP ve GFRP-çelik) ile hibrit lif oranları (%0.0, %1.0 ve %2.0) yer aldığını belirtmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre, hibrit çubukların eğilme performansını artırmada çelik ve cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) çubuklara kıyasla daha etkili olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, hibrit takviyeli elemanların yük taşıma kapasitesinin, GFRP elemanlara göre yaklaşık %15 oranında arttığı gözlemlemiştir.

Sharifi Ghalehnoei ve Behfarnia (2025), çalışmalarında betonarme kirişlerin eğilme dayanımını artırmak amacıyla, organik ve epoksi esaslı FRP sistemlerine sürdürülebilir alternatifler olarak sunulan inorganik ve çimento esaslı kompozitlere odaklanan mevcut araştırmaları incelemişlerdir. Bu kapsamda; kumaş donatılı çimento esaslı harçlardan (FRCM); tekstil donatılı harç (TRM), tekstil donatılı beton ve lif takviyeli beton (FRC) sistemlerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu kapsamda, kumaş donatılı çimento esaslı harcın genişliği, kullanılan tekstil türü, harç matrisi ve katman konfigürasyonu gibi değişkenleri dikkate almışlardır. Çalışmada, betonarme kirişlerin eğilme dayanımı; tekstil donatılı beton ile %77, TRM sistemleri ile %39-91 arasında, lif takviyeli betonda ise %19-27 seviyelerine kadar artırılabilirdiği sonucuna ulaşmışlardır.

Çalışkan ve Şenol (2025), çalışmalarında normal dayanımlı beton kirişlerin eğilme performansını iyileştirmek amacıyla yüksek fırın cürufu bazlı jeopolimer harcı ve çimento esaslı tamir harcı kullanarak ürettikleri tekstil donatılı harç (TRM) sistemlerinin etkinliğini incelemişlerdir. TRM uygulamalarını farklı desen ve kaplama oranlarıyla değerlendirmişler; ayrıca karşılaştırma amacıyla beton karışımlarına %0.3 ve %0.6 oranlarında çelik lif katkısı ilave etmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, yan yüzleri tamir harcı kaplı tekstil donatılı harcının eğilme dayanımında kontrol numunesine kıyasla %24 artış ile en yüksek eğilme dayanımına ulaştığını; jeopolimer harçlı G1 ve G3 numunelerinin bazı çimento esaslı numuneleri geride bırakarak, kontrol numunesine kıyasla sırasıyla %12 ve %14.4 oranında eğilme dayanımı artışı gösterdiğini ve jeopolimer harçların kısıtlı kaplama koşullarında bile etkili bir bağlayıcı olarak çalışabildiğini belirtmişlerdir.

Askar ve Al-Kamaki (2025), çalışmalarında düşük dayanımlı betonarme kirişlerin karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kullanarak eğilme dayanımını artırmaya yönelik deneysel çalışma yapmışlardır. Eğilme açısından kritik olan bu kirişleri, farklı CFRP uygulama düzenleri ile güçlendirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda, CFRP kumaşların, çekme bölgesinde ana donatı görevini üstlenip yükü etkili bir şekilde dağıtarak kirişlerin eğilme kapasitelerini %220'ye varan oranlarda artırdığını; aynı zamanda eğilme deformasyonlarını ve çatlak genişliklerini azaltarak yapısal sünekliği iyileştirdiğini, CFRP kompozit ile güçlendirilen eğilme açısından kritik tüm betonarme kirişlerde, süneklik ve elastik davranışın süneklik katsayısı bakımından %8 ile %43 oranında artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Güçlendirme uygulanan numunelerin eğilme mukavemetini önemli ölçüde artırdığını aynı zamanda çatlak genişliğini azaltarak yapının servis ömrünü de artırdığı sonucuna ulaşmışlardır.

3. LİFLER VE SARGI TİPLERİYLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER

Lifler, doğal kaynaklardan elde edilen veya sentetik olarak üretilen, yüksek çekme dayanımı, elastisite modülü ve yüzey özellikleriyle öne çıkan ince ve uzun yapıdaki malzeme bileşenleridir. İnşaat mühendisliği uygulamalarında lifler, özellikle betonun mekanik performansını iyileştirmek amacıyla kullanılır. Lif takviyesi, betonun çatlama direncini artırmakta, sünekliğini geliştirmekte ve darbe enerjisini absorbe etme kapasitesini yükseltmektedir. Liflerin geometrik özellikleri (boy/en oranı), malzeme türü (çelik, polimer, karbon, cam vb.), hacim oranı ve dağılım şekli, kompozit malzemenin davranışını doğrudan etkilemektedir. Lifler genel olarak doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Doğal lifler (elyaf), hayvan, bitki ve mineral gibi tabiat kaynaklarından elde edilen ve herhangi bir kimyasal işlem uygulanmadan kullanılan hammaddelerdir. Yapay lifler ise istenilen biçim ve özelliklerde, insan eliyle özel olarak üretilen sentetik hammaddelerdir (Acun, 2000).

3.1. Lif Çeşitleri

Farklı özellikleri ve kullanım alanları bakımından birçok doğal ve yapay lif türü bulunmaktadır. Günümüzde betonda yaygın olarak kullanılan lifler; çelik, polimer (polipropilen, PVA), cam ve karbon esaslıdır.

Betonun mekanik ve kimyasal özelliklerini iyileştirmek amacıyla çelik, polipropilen ve cam liflerin betona katılması giderek yaygınlaşmaktadır. Ancak liflerin geometrisi, narinliği ve boyutları, beton üzerindeki etkilerini farklı şekillerde belirlemektedir. Tablo 3.1’de farklı türdeki liflere ait teknik özellikler verilmiştir.

Tablo 3.1. Farklı Türdeki Liflere Ait Teknik Özellikler (Şenol, 2022)

Lif türü	Uzunluk (mm)	Çap (µm)	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
Polipropilen	6-50	15-20	0,91	270-700	3.0-3.5
Cam	3-50	11-40	2.3-2.7	1200-3400	72-87
Çelik	10-60	0.16-2.60	7.85	500-2000	200
Karbon	3-50	7-15	1.95	2200	390

3.2. Çelik Lif Takviyeli Beton

Çelik tel donatılı beton; agrega, çimento ve su gibi temel beton bileşenlerine, mineral veya kimyasal katkıların yanı sıra çelik telin eklenmesiyle elde edilen bir kompozit malzemedir. Çelik teller, yalın betonların ve betonarme elemanların performansını artırmak amacıyla kullanılmaktadır. Bilindiği üzere, geleneksel betonlar gevrek yapıdadır ve sünek olmayan bir

davranış sergilerler. Çelik lifler, düşük karbonlu çelikten üretilmekte olup, ortalama çekme dayanımları 1200 MPa'nın üzerinde olup elastik limitleri %0.2'nin altındadır (Topçu, 2008).

Çelik teller, şekillerine göre üç sınıfa ayrılmaktadır.

Sınıf A: Düz, pürüzsüz yüzeyli teller

Sınıf B: Bütün uzunluğunca deforme olmuş teller

a) Üzerinde girintiler ve çıkıntılar oluşturulmuş tel, b) Uzunluğu boyunca dalgalı teller, c) Ay biçimi teller

Sınıf C: Sonu kancalı teller

a) İki ucu kancalı teller, b) Bir ucu kancalı tel (Kozak, 2013).

Çelik lif katkılı betonlar, normal dayanımlı betonlara kıyasla sundukları üstün mekanik ve dayanıklılık özellikleri sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bu tür betonlar, özellikle çatlak kontrolü, süneklik artışı, darbe ve yorulma dayanımı gibi performans kriterlerinde belirgin iyileşmeler sağlar (Şenol, 2022). Liflerin beton içerisinde homojen şekilde dağılması, mikro çatlakların ilerlemesini engelleyerek yapının servis ömrünü uzatır. Ayrıca, geleneksel donatıya olan bağımlılığı azaltarak daha ekonomik ve hızlı uygulama imkânı sunar. Bu avantajlar doğrultusunda çelik lifli betonlar; yapı elemanlarında, püskürtme beton uygulamalarında, hidrolik yapılarda, endüstriyel zeminlerde, dış saha kaplamalarında ve prefabrik eleman üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır (Demiralp, vd., 2021).

3.3. Polipropilen Lifli Beton

Polipropilen lif, beton içerisine sonradan eklenen yapay bir malzemedir. Bu lifler, genel olarak iki farklı yapıda üretilmekte ve kullanılmaktadır. Bunlardan ilki, literatürde “monofilament” olarak adlandırılan, ince ve uzun yapıya sahip liflerdir. Bu lifler, şap yüzeyinde görünmedikleri için özellikle iç mekân şap uygulamalarında başarılı sonuçlar vermektedir. Diğer lif türü ise literatürde “staple fiber” olarak anılan, elyaf görünümlü, iplik kalınlığında çok ince ve kısa parçaların bir araya gelmesiyle oluşan yapılardır. Bu lifler, endüstriyel zemin uygulamaları ile ağır hizmet zeminlerinde, betonun dayanıklılık ve tokluk özelliklerinin ön planda olduğu durumlarda daha uygun bir çözüm sunmaktadır (Hsie, 2008).

Beton içerisinde kullanılan polipropilen lifler, belirli oranlarda karışıma dahil edilerek betonun performans özelliklerini artırmaktadır. Bu lifler, mikro lifler ve makro lifler olmak üzere iki grupta incelenmektedir (Banthia ve Gupta, 2006). Mikro lif yapısı, 1 m³ beton içerisine 0.60–0.90 kg lif eklenerek elde edilmekte olup, genellikle “staple fiber” olarak bilinen

elyafımsı liflerin kullanımıyla uygulanmaktadır. Makro lif yapısı ise 1 m³ beton içerisine 1.5–1.8 kg lif eklenerek oluşturulmakta; daha dayanıklı ve yüksek kenetlenme özelliğine sahip tekil liflerin kullanımıyla uygulama alanı bulmaktadır. Mikro lifler, özellikle beton dökümünden sonra erken dönemde oluşabilecek kılcal rötre çatlaklarının yanı sıra, yapının servis ömrü boyunca maruz kalabileceği dış etkenler nedeniyle meydana gelebilecek çatlakların önlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Bu sayede betonun dayanım kaybı engellenmiş olur (Türkmenoğlu ve Varol, 2014). Ayrıca, betonun ilk günlerinde kalıptan çıkarılması sırasında elemanın kenar ve köşelerinde oluşabilecek kırılma ve dökülmeleri önlemekte; beton elemanları arasında segregasyon oluşumuna da engel olmaktadır (Özalp, 2016). Makro lifler ise daha yoğun yapıları sayesinde, yapının servis ömrü boyunca karşılaşılabileceği yükler nedeniyle oluşabilecek çatlakların önlenmesinde kullanılmaktadır. Özetle, mikro lifler betonun fiziksel etkilerden korunmasını sağlayarak dayanıklılığını artırırken; makro lifler beton elemanının mekanik olarak korunmasına katkı sunarak dayanım kaybını engellemektedir (Bahadır, 2010).

Polipropilen lifli betonlar günümüzde; yol inşaatları, endüstriyel döşemeler, havaalanı pist kaplamaları, su yapıları, püskürtme beton uygulamaları, şev stabilitesi problemi bulunan yamaçlar, ince kabuk yapılar, beton borular, yüksek sıcaklığa maruz kalan yapılar, askeri yapılar, öngermeli yapılar ve dış cephe mantolama uygulamalarında kullanılan sıvalar gibi birçok farklı inşaat alanında yaygın olarak kullanılmaktadır (Kavas ve Sabah, 2001). Özellikle betonun içindeki boşlukları doldurmak, rötre ve büzülme çatlaklarını azaltmak, betonun darbeye karşı dayanımını artırmak gibi önemli avantajlar sağlaması nedeniyle, son yıllarda ülkemizde önde gelen beton üreticileri lifli beton üretimine yönelmiş ve bu alandaki üretimlerini artırmışlardır (Topçu vd., 2008).

3.4. Lifli Polimer Kumaşlar

Lifli polimer kumaşlar, betonun yanal deformasyonunu sınırlandırarak dayanım ve düktiliteyi önemli ölçüde artırır (Adıbelli ve Varışlı, 2017). Elyaf takviyeli kompozit (FRP) malzemeler, yorulma direnci, ağırlık azaltma, korozyon direnci ve yüksek mukavemet-ağırlık oranı sağladıkları için inşaat mühendisliği, havacılık, askeri ve otomotiv gibi çeşitli endüstrilerde giderek daha popüler bir malzeme seçeneği haline gelmektedir. Genellikle basınç dayanımına kıyasla çekme, eğilme ve çarpma dayanımları düşük olan veya zayıf yapılı, kırılğan malzemelerin bu dezavantajlarını gidermek amacıyla matris malzemesinin liflerle donatılmasıyla üretilen kompozitlerdir (Durmaz, 2018). Lifli polimer kumaşlar, reçine matrisi içerisine gömülmüş, yüksek dayanımlı liflerden oluşan kompozit malzemelerdir. Bu lifler,

oluşturulan kompozit malzemeye dayanım ve rijitlik sağlamakta ve genellikle yükün büyük bir kısmını taşımaktadır. Matris ise liflerin kenetlenmesinde görev yapmakta ve kesme gerilmeleri yoluyla liften life gerilme transferini sağlamaktadır. En yaygın kullanılan lifler arasında; cam, karbon, aramid ve bazalt lifler yer almaktadır (Yavuz, 2011). Beton yapı elemanlarında karşılaşılan gevreklik problemi, elemanların lif takviyeli polimerler (FRP) ile dıştan sarılmasıyla giderilebilmektedir.

Uygulamalarda en çok tercih edilen malzemelerin başında karbon lif takviyeli kumaşlar gelmektedir. Yüksek çekme dayanımına sahip tek doğrultulu karbon liflerle güçlendirilmiş polimerler (CFRP), FRP kompozitlerin önemli bir sınıfını oluşturmaktadır (Turgay vd., 2010). Çelikten çok daha yüksek bir elastisite modülüne sahip olan bu kompozitlerin dıştan sargı şeklinde uygulanması, betonarme elemana süneklik kazandırmanın yanı sıra betonun düşük çekme dayanımını da telafi etmektedir (Ustabas vd., 2020). CFRP'ler bu malzemeler arasında en yüksek çekme dayanımına sahip ve güçlendirmelerde en geniş kullanım alanına sahip olan kompozitlerdir (Maras, 2021).

Aramid lif takviyeli polimer (AFRP), orta derecede rijit polimer zincirlerinden üretilen; ısıya dayanıklı, yüksek performanslı ve oldukça güçlü sentetik liflerdir (Ammar, 2014). Aramid liflerine olan talep, özellikle koruyucu giysilerin ve kompozitlerin üretiminde, endüstriyel, havacılık, askeri ve sivil uygulamalarda hızla artmaktadır (Ertekin, 2017). Alkali ortamlara ve sülfat etkisine karşı yüksek direnç göstermesi nedeniyle, kompozit malzemeler arasında AFRP'ler bu alanlarda daha fazla tercih edilmektedir (Nakayama vd., 2008).

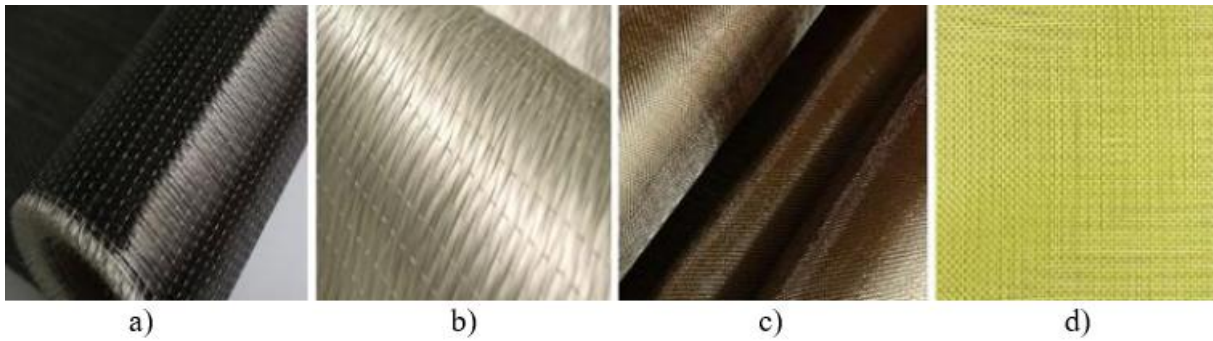
Yüksek mukavemetinin yanı sıra mükemmel ısı yalıtımı, yüksek ısı direnci ve düşük maliyet gibi avantajlara sahip olan cam lif takviyeli polimerler (GFRP); köprülerde, tarihi yapılarda ve betonarme yapı elemanlarında güçlendirme malzemesi olarak kullanılmaktadır (Dindar, 2020). Kompozit malzemeler arasında en düşük maliyetli seçenek olması, GFRP'nin uygulamada yaygın olarak tercih edilmesini sağlamaktadır (Maras, 2021).

Çapları yaklaşık 10 ile 20 µm arasında değişen ince tellerden oluşan bazalt lifleri, polimer matrislerle birleşerek Bazalt lif takviyeli polimer (BFRP) kompozitlerini oluşturur. BFRP, inşaat sektörü için yenilikçi bir alternatif olarak öne çıkan polimerik bir kompozittir (Sarasini vd., 2014). Bu kompozit malzeme; elemanın rijitliğini ve mukavemetini artırmasının yanı sıra düşük termal iletkenliğe sahip olup ısıya, korozyona, kimyasal ve fiziksel etkilere karşı yüksek dayanım gösterir. Ancak GFRP ile kıyaslandığında, BFRP'nin üretim kapasitesindeki kısıtlılıklar nedeniyle maliyeti nispeten daha yüksektir (Banibayat ve Patnaik, 2013).

Güçlendirme uygulamalarında yaygın olarak tercih edilen lif takviyeli polimer (FRP) kumaş türleri Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Bu kompozit sargıların, uygulandıkları elemanın davranışını doğrudan etkileyen mekanik özellikleri ise Tablo 3.2'de özetlenmiştir.

Tablo 3.2. FRP Türlerinin Mekanik Özellikleri (Ammar, 2014) (Adhikari, 2009)

FRP türü	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Kopma miktarı (%)
CFRP	3600	580	1.90
GFRP	710	46.4	1.50
BFRP	1350	52	2.80
AFRP	2800	123	2.00



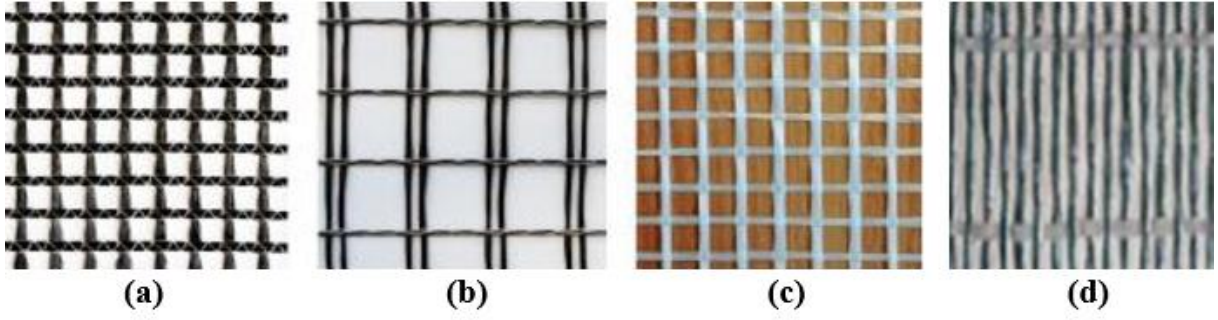
Şekil 3.1. FRP Kumaş Türleri: a) CFRP; b) GFRP; c) BFRP; d) AFRP (Maras, 2021)

3.4.1. Karbon lif takviyeli polimer kumaş

Karbon lif takviyeli polimer (CFRP) kumaşlar, yüksek çekme dayanımına sahip tek ve çift doğrultulu tekstil ürünleridir. İplik formundaki karbon liflerin dokunmasıyla elde edilen bu kumaşlar, kolaylıkla şekil alabilmekte ve özel epoksi reçineleri ile uygulandıklarında, uygulandıkları yapı elemanına rijitlik kazandırmaktadır (Sarıbiyık, 2018). CFRP kumaşlar; betonarme yapılarda, kirişlerin eğilme ve kesme dayanımlarının, döşemelerin ise eğilme dayanımı ve yük taşıma kapasitelerinin artırılmasında; kolonlara uygulandığında ise kesme ve basınç dayanımı ile sünekliğin iyileştirilmesinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca, tarihi veya ahşap yapılarda mevcut ahşap kirişlerin eğilmeye karşı güçlendirilmesinde, kâgir yapıların taşıyıcı sistemlerinin iyileştirilmesinde, yerinde döküm, prekast betonarme ve öngerilmeli beton elemanların yük taşıma kapasitelerinin artırılmasında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bunlara ek olarak, yapıların çeşitli dinamik etkiler sonucunda yapısal zarar görmesi durumunda, servis ömrünü uzatmak ve güvenli hizmet vermeye devam etmelerini sağlamak amacıyla da CFRP uygulamaları kullanılmaktadır (Akbaş ve Çalışkan, 2024b).

3.5. Tekstil Takviyeli Harç

Yapısal güçlendirme alanında kullanılmak üzere, fiber takviyeli polimerlere alternatif olarak çimento bazlı kompozit bir malzeme geliştirilmiştir. Tekstil takviyeli harçlar, genellikle polimerik bağlayıcılarla takviye edilmiş inorganik malzemelerin karışımını ifade etmektedir. Bu harçlar; bazalt, cam, karbon elyafı veya bazı doğal lifler gibi tekstil takviyeleri ile güçlendirilmekte olup, bu takviyeler sayesinde çekme dayanımları ve işlenebilirlikleri artarken, malzemenin ağırlığı azalmaktadır. Tekstil Takviyeli Harç (TRM) kompozitlerinin buhar geçirgenliği, uygulama kolaylığı, yangına dayanıklılığı, ekonomik oluşu, duvar ve beton yüzeylere uyumluluğu, tarihi yapılarda mevcut dokuyu bozmaması ve gerektiğinde kolaylıkla sökülebilmesi gibi birçok avantajı, bu kompozitleri dikkat çekici hale getirmiştir (Yüncüler ve Çalışkan, 2024). TRM, inorganik matrisi sayesinde betonla mükemmel uyum sağlarken, içindeki tekstil ağları sayesinde elemanın çekme dayanımını, sünekliğini ve enerji yutma kapasitesini belirgin şekilde iyileştiren, şekil değiştirme sertleşmesi gösteren bir kompozittir (Papanicolaou vd., 2007) (Bournas vd., 2007). Tekstil takviyeli harçlar; genellikle bazalt, cam, karbon elyafı veya bazı doğal lifler gibi tekstil takviyeleri ile güçlendirilirler. Bu takviyeler sayesinde çekme dayanıklılıkları ve işlenebilirlikleri artarken ağırlıkları azalır (Yüncüler ve Çalışkan, 2024). Tekstil takviyeli harçlar; karbon, bazalt veya cam gibi yüksek çekme dayanımına sahip liflerden ağ şeklinde örülmüş tekstillerin, yüksek basma dayanımına sahip çimento esaslı harçlarla birlikte kullanılmasıyla elde edilmektedir. Tekstil takviyeli harçlar, mevcut binalarda özellikle döşeme ve perde gibi geniş yüzeyli yapı elemanlarının güçlendirilmesinde tercih edilmektedir. Bu kompozit malzemeler, yapı elemanının dayanıklılığını artırarak çatlak oluşumunu engellemekte, mukavemetini yükseltmekte ve çevresel etkilere karşı direncini artırmaktadır (Aslan ve Erol, 2024). CFRP malzemeler yalnızca lif eksenine paralel çekme kuvvetlerini karşılayabildikleri için uygulama yönü büyük önem taşımaktadır. Buna karşın, tekstil takviyeli harç kaplamalar iki yönlü tabakalar halinde (yatay ve düşey doğrultuda) uygulanabildiğinde; kirişlerde eğilme ve kesme dayanımının, kolonlarda ise eğilme ve sargılama etkisiyle basınç dayanımının artırılması mümkündür. Tekstiller, çift doğrultuda çok sayıda filamentin enine ve boyuna ızgara sistem ya da birbirlerinin altından ve üstünden geçirilmesiyle oluşturulan dokuma sistem şeklinde meydana gelmektedir (Triantafillou ve Papanicolaou, 2006). Bu enine ve boyuna filamentler, sırasıyla çözgü ve atkı olarak adlandırılmaktadır. TRM tekstillerinde kullanılan lifli bazı tekstillere Şekil 3.2’de ve tekstil lif türlerinin mekanik özellikleri de Tablo 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.2. Yapay Lifli Tekstiller: a) Karbon, b) Bazalt, c) Cam d) Çelik (Raoof ve Bournas, 2017) (Koutas vd., 2019)

Tablo 3.3. Tekstil Lif Türlerinin Mekanik Özellikleri (Güneş, 2022)

Lif Türü	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Şekil Değiştirme (%)
Çelik	7.85	1200	200	3-4
Cam	2.78	2500	70	3.6
Bazalt	2.7	3000-4840	79.3-93.1	3.1
Karbon	1.60-1.95	3500-6000	230-600	1.5-2.0

4. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada düşük (C16/20) ve normal dayanımlı (C30/37) 100x100x500 mm boyutlarındaki donatısız betonların farklı lif katkısı (çelik-polipropilen) ve farklı sargı tipleriyle (CFRP-TRM) eğilme dayanımlarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çelik ve polipropilen lifler iki farklı oranda (%0.3 - %0.6) ve sargı tipleri de 4 farklı sarım şekliyle uygulanmıştır. Çalışma ile ilgili genel bilgiler Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Çalışma ile İlgili Bilgiler

Numune Sayısı	52 (Her numuneden 2 adet)
Beton Sınıfları	C16/20 Donatısız C30/37 Donatısız
Lif çeşidi	Çelik ve Polipropilen
Lif oranları	%0.3 ve %0.6
Sarım şekilleri (CFRP ve TRM için)	1- Alt yüzey kaplı 2- Yan yüzler kaplı 3- U şeklinde kaplı 4- Her yüzey kaplı
TRM için kullanılan harç	Sika Repair 645
CFRP için kullanılan epoksi	Sikadur 330 (iki bileşenli)

4.1. Beton Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Beton karışımlarının imalatında, CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu (özellik: 3.1 g/cm³) yerel bir firmadan temin edilmiştir. Karışımlarda kullanılan agregalar, kalker kökenli kırmataş agregası olup; ince agrega olarak 0–4 mm tane boyutuna sahip kırmataş kumu (2.60 g/cm³), iri agrega olarak ise 4–16 mm aralığında kırmataş agregası (2.67 g/cm³) kullanılmıştır. Karışımındaki kum ve kırmataş agregaları için 50:50 hacim oranı benimsenmiştir. Lifli betonların üretiminde ise yerel firmalardan temin edilen 60 mm uzunluğundaki kanca uçlu çelik lifler (ÇL) ve 18 mm uzunluğundaki polipropilen lifler (PL) tercih edilmiştir. Lifli beton karışımlarında kullanılan süper akışkanlaştırıcı (SP), CHRYSO firmasına ait Delta Prima 196 kodlu, polikarboksilat eter esaslı bir katkı malzemesidir (özellik: 1.06 g/cm³). Karıştırma ve kütleme için şebeke suyu kullanılmıştır.

4.2. Beton Üretimi

Çalışmada düşük ve normal dayanımlı olmak üzere iki sınıf beton üretilmiştir. Düşük dayanımlı beton (D), 28 günlük küp (150x150x150 mm) basınç dayanımının 20-22 MPa, normal dayanımlı beton (N) karışımının 37-45 MPa aralığında olması amacıyla TS 802 (2016) standardında belirtilen tipik kütle ve hacim oranları esas alınmıştır. Karışımlar; lif içermeyen

ve beton karışım hacminin %0.3 ve %0.6 oranlarında çelik veya polipropilen olmak üzere 10 farklı karışımda hazırlanmıştır. Karışımlardaki su/bağlayıcı oranı D serileri için 0.8 iken N serileri için 0.5 olarak sabit tutulmuştur. Çelik ve propopilen lifli beton karışımlarının, lifsiz kontrol betonlarıyla benzer işlenebilirliğe ulaşabilmesi amacıyla çimento ağırlığının belli oranlarında süper akışkanlaştırıcı ilave edilmiştir. Beton karışımlarında kullanılan malzeme miktarları Tablo 4.2’de sunulmuştur.

Çalışma kapsamında toplam 52 adet kiriş üretilmiştir. Bu kirişlerden 18’i C16 sınıfı lifsiz beton, 18’i C30 sınıfı lifsiz beton, kalan 16’sı ise her iki beton sınıfında %0.3 ve %0.6 oranlarında lifli beton olacak şekilde hazırlanmıştır (her oran için 2 adet numune). Beton dökümü, her iki dayanım sınıfına uygun olarak betoniyerde gerçekleştirilmiştir. Beton karışımları, pan tipi bir beton mikserinde (50 dm^3) hazırlanmıştır. Beton döküm işleminden önce kalıplar temizlenmiş ve yüzeylerine ince bir tabaka oluşturacak şekilde kalıp yağı uygulanmıştır. Lifli beton üretimi sırasında, betoniyerde önce agrega ve çimento 30 saniye süreyle karıştırılmış; ardından lifler, karışım üzerine homojen şekilde elle serpiştirilmiş ve karıştırma işlemi 60 saniye daha devam ettirilmiştir. Sonrasında, 20°C sıcaklığındaki karışım suyuna akışkanlaştırıcı ilave edilerek su ve katkı betoniye eklenmiş ve karıştırma işlemi tamamlanmıştır. Taze beton, kalıplara tam olarak doldurulduktan sonra boşluk oluşmaması amacıyla vibrasyon masasında 20 saniye süreyle sarsma işlemine tabi tutulmuştur. Vibrasyon sonrası oluşan boşluklar tekrar beton ile doldurulmuş ve yüzeyler mala yardımıyla düzeltilmiştir. Kalıplara yerleştirilen betonlar, sıcaklığı $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ve bağıl nemi $\%60 \pm 5$ olan laboratuvar ortamında 24 saat boyunca kalıp içinde bekletilmiş; ardından kalıptan çıkarılarak 20°C sıcaklığındaki su içeren kür havuzuna yerleştirilmiştir. Kür işlemi tamamlanan numuneler havuzdan çıkarılarak istiflenmiş ve sonraki işlemler için hazırlanmıştır. Deneysel çalışmadaki D ve N serisi beton basınç dayanımlarının basınç dayanımını belirlemek için üç adet $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ boyutlarında standart küp numuneleri de üretilmiştir. D ve N serilerine ait alınan üç küp numuneye ait beton basınç dayanım değerleri, ortalama değerleri ve TS 802 standardına uygun beton sınıfları Tablo 4.3’te verilmiştir. Dökülen kiriş numuneleri ve alınan küp numuneler Şekil 4.1’de verilmiştir.

Deneylerde kullanılan beton sınıflarının ortalama basınç dayanımları, her bir beton sınıfının üretimi sırasında alınan üçer adet küp numunesinin test edilmesiyle belirlenmiştir. Hedeflenen C16 beton sınıfı için 28. gün sonunda elde edilen ortalama küp basınç dayanımı 21.8 MPa ; C30 beton sınıfı için ise 42.7 MPa olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.2. Beton Karışımlarının Üretiminde Kullanılan Malzeme Miktarları (kg/m³)

Karışım	Seriler	Çimento (kg)	Su (kg)	SP (%)	ÇL (%)	PL (%)	Agregalar	
							0-4 mm (kg)	4-16 mm (kg)
1	D	300	240	-	-	-	850	861
2	DÇL03	300	240	0.3	0.3	-	847	858
3	DÇL06	300	240	0.3	0.6	-	844	855
4	DPL03	300	240	0.3	-	0.3	847	858
5	DPL06	300	240	0.3	-	0.6	844	855
6	N	375	187.5	-	-	-	888	899
7	NÇL03	375	187.5	0.5	0.3	-	885	896
8	NÇL06	375	187.5	0.8	0.6	-	882	893
9	NPL03	375	187.5	0.3	-	0.3	885	896
10	NPL06	375	187.5	0.6	-	0.6	882	893

**Şekil 4.1.** Kiriş ve Alınan Küp Numuneler**Tablo 4.3.** 28 Günlük Küp Numunelerin Basınç Dayanım Değerleri

Seriler	I (MPa)	II (MPa)	III (MPa)	Ortalama dayanım (MPa)	Beton sınıfı (TS802)
D	22.1	21.8	21.6	21.8	C16/20
N	42.7	42.5	43	42.7	C30/37

4.3. Lifli Betonlarda Kullanılan Malzemeler

Düşük ve normal beton sınıflarında dökülen betonların içine beton hacminin %0.3 ve %0.6 oranlarında çelik ve polipropilen lif eklenmiştir. Yerel firmalardan temin edilen polipropilen ve çelik lifin özellikleri Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Polipropilen ve Çelik Liflerin Özellikleri

Özellik	Polipropilen Lif	Çelik Lif
Resim		
Uzunluk (L), mm	18	60
Çap (d), mm	0.02	1.00
Özgül ağırlık, g/cm ³	0.91	7.81
Çekme dayanımı,	450-700	1200
Narinlik oranı (L/d)	900	60
Erime Sıcaklığı, °C	150-170	1450-1520

4.4. Sargılama İçin Kullanılan Malzemeler

Normal ve düşük dayanımlı beton sınıflarında dökülen referans beton numuneleri dört farklı sarım deseni olacak şekilde CFRP ve TRM ile sarılmıştır.

4.4.1. CFRP ve epoksi

Çalışmada kullanılan CFRP kumaşın performans özellikleri Tablo 4.5'te verilmiştir

Tablo 4.5. CFRP Kumaş Performans Özellikleri

Özellik	CFRP Kumaş
Resim	
Çekme Dayanımı (MPa)	4000-5000
Elastisite Modülü (GPa)	>235
Kopma Uzama (%)	~2
Birim Genişlikteki Rijitlik (kN/mm)	40
Alansal Ağırlık (g/m ²)	300
Kumaş Nominal Kalınlık (mm ² /mm)	0.168
Kimyasal Yapı	Lifli karbon kumaş
Renk	Siyah

CFRP kumaşların betona sarılmasında; iki bileşenli, tiksotropik özellikli epoksi esaslı doyurma reçinesi ve yapıştırıcı olan Sikadur 330 ürünü kullanılmıştır. Kullanılan ürünün teknik özellikleri Tablo 4.6’da verilmiştir.

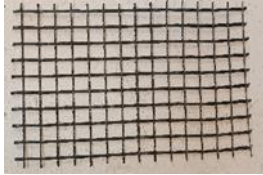
Tablo 4.6. Epoksi Reçinenin Özellikleri (Sika, 2020a)

Özellik	Reçine
Resim	
Kimyasal Yapı	Epoksi reçine
Çekme Dayanımı (N/mm ²) (7 gün)	~ 30
Elastisite Modülü (N/mm ²)	~ 4500
Kopmada Uzama (%)	0.9
Yoğunluk (g/cm ³)	300
Karıştırma Oranı (ağırlıkça)	A bileşeni: 4 B bileşeni: 1
Çekme Yapışma Dayanımı (N/mm ²)	> 4
Renk	A bileşeni: beyaz macun B bileşeni: gri macun A+B karışımı: açık gri macun

4.4.2. TRM ve harç

Çalışmada kullanılan tekstil takviyeli harç şeritlerin özellikleri Tablo 4.7’de ve şeritleri sabitlemek için kullanılan harcın özellikleri Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.7. TRM Tekstilin Özellikleri

Özellik	TRM Tekstil
Resim	
Ağırlık (gr/m ²)	370
Elastisite Modülü (GPa)	≥ 240
Çekme Dayanımı (MPa)	> 4300
Kopma Uzaması (%)	1.8
Mesh Boyutları (mm)	25 × 25

Tablo 4.8. TRM Sargısı İçin Kullanılan Harcın Mekanik Özellikleri (Sika, 2020b)

Özellik	Harç
Resim	
Eğilme Dayanımı (MPa)	>8
Yapışma Dayanımı (MPa)	>2
Basınç Dayanımı (MPa)	>60
Elastisite Modülü (GPa)	>20

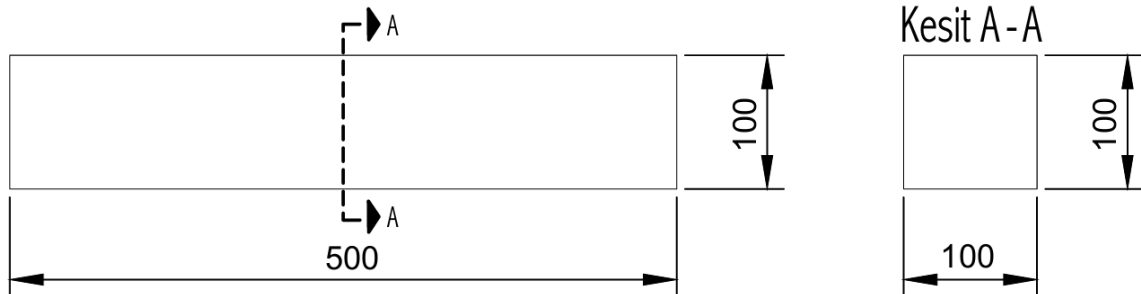
4.5. Deney Elemanlarının Özellikleri

Bu çalışmada, C16 ve C30 olmak üzere iki farklı beton dayanım sınıfı kullanılmıştır. Her bir beton sınıfında, çelik lif ve polipropilen lifler hacimce %0.3 ve %0.6 oranlarında karışıma dahil edilmiştir. Sargılama malzemesi olarak karbon lif takviyeli polimer (CFRP) kumaş ve tekstil takviyeli harç (TRM) kaplama kullanılmış; bu malzemeler dört farklı sargılama tipiyle uygulanmıştır. Düşük ve normal dayanımlı betonların, farklı lif katkı oranları ve sargılama tipleriyle çekme dayanımının iyileştirilmesine yönelik oluşturulan numune isimlendirmeleri Tablo 4.9’da verilmiştir.

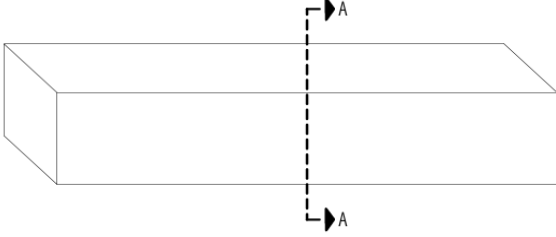
Deneyel çalışmada incelenen değişkenlerden biri, karbon lif takviyeli polimer (CFRP) ve tekstil takviyeli harç (TRM) kumaşların farklı beton dayanım sınıflarındaki kirişlerde uygulanma şeklidir. Bu kapsamda, tam yüzey, U tipi, yan yüzeyler ve tek yüzey olmak üzere dört farklı sargılama tipi kullanılmış; sargı şeklinin betonun eğilme dayanımına etkisi değerlendirilmiştir. Diğer bir değişken ise lif katkısıdır. Çelik ve polipropilen lifler, betonun hacimce %0.3 ve %0.6 oranlarında karışıma dahil edilerek farklı beton sınıflarında lif katkısının etkisi incelenmiştir. Deney elemanlarında, CFRP şeritlerin kiriş etrafında tam yüzey sargılamalarında, şeritler kiriş genişliği boyunca 25 mm üst üste yan yüzeyde bindirilerek ek yapılmıştır. Deney elemanları arasında yer alan 1 ve 2 numaralı örnekler referans numuneler olup, bu numunelere herhangi bir işlem uygulanmamıştır. Deney elemanlarının özellikleri sırasıyla Tablo 4.10, Tablo 4.11 ve Tablo 4.12’de verilmiştir.

Tablo 4.9. Deney Elemanlarının Özellikleri

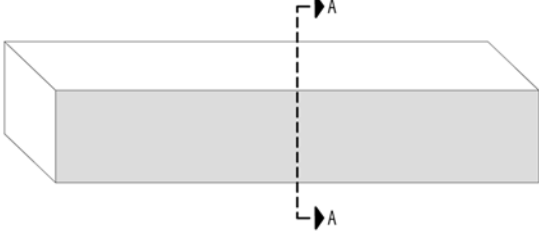
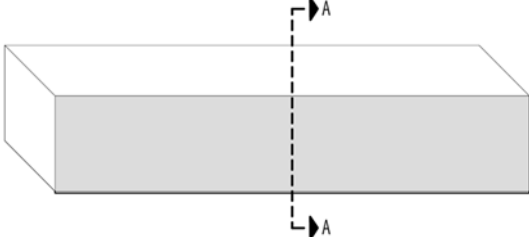
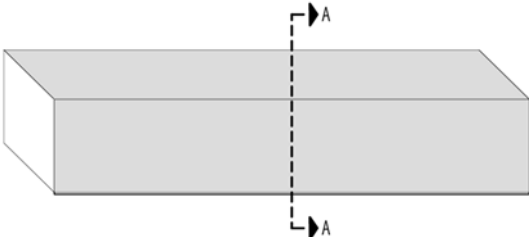
Numune No	Numune Adı	Beton Sınıfı	Lifli Beton	Sargı Malzemesi	Sargı şekli
1	D-Ref	C16/20	-----	-----	-----
2	N-Ref	C30/37	-----	-----	-----
3	D-ÇL-0.3	C16/20	Çelik lif-0.3	-----	-----
4	N-ÇL-0.3	C30/37	Çelik lif-0.3	-----	-----
5	D-ÇL-0.6	C16/20	Çelik lif-0.6	-----	-----
6	N-ÇL-0.6	C30/37	Çelik lif-0.6	-----	-----
7	D-PL-0.3	C16/20	Polipropilen lif-0.3	-----	-----
8	N-PL-0.3	C30/37	Polipropilen lif-0.3	-----	-----
9	D-PL-0.6	C16/20	Polipropilen lif-0.6	-----	-----
10	N-PL-0.6	C30/37	Polipropilen lif-0.6	-----	-----
11	D-TRM-1	C16/20	-----	TRM	1
12	N-TRM-1	C30/37	-----	TRM	1
13	D-TRM-2	C16/20	-----	TRM	2
14	N-TRM-2	C30/37	-----	TRM	2
15	D-TRM-3	C16/20	-----	TRM	3
16	N-TRM-3	C30/37	-----	TRM	3
17	D-TRM-4	C16/20	-----	TRM	4
18	N-TRM-4	C30/37	-----	TRM	4
19	D-CFRP-1	C16/20	-----	CFRP	1
20	N-CFRP-1	C30/37	-----	CFRP	1
21	D-CFRP-2	C16/20	-----	CFRP	2
22	N-CFRP-2	C30/37	-----	CFRP	2
23	D-CFRP-3	C16/20	-----	CFRP	3
24	N-CFRP-3	C30/37	-----	CFRP	3
25	D-CFRP-4	C16/20	-----	CFRP	4
26	N-CFRP-4	C30/37	-----	CFRP	4

**Şekil 4.2.** Deney Elemanlarının Geometrik Boyutları (mm)

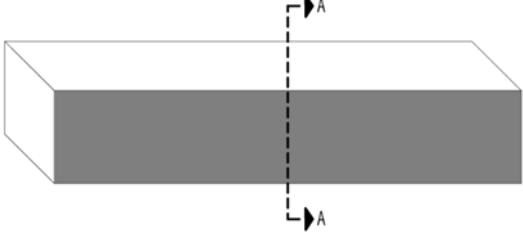
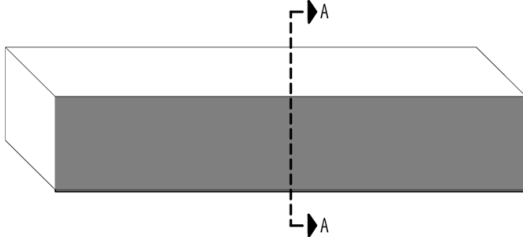
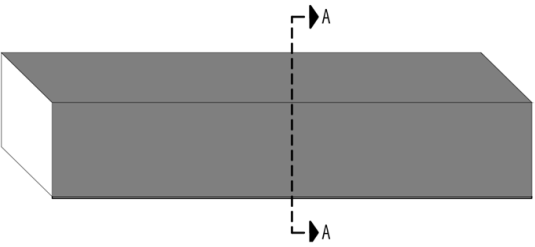
Tablo 4.10. Referans, Çelik ve Polipropilen Lifli Numunelerin Detayları

Numune İsimleri ve Detayları	Görsel
D-Ref / N-Ref D-ÇL-0.3 / N-ÇL-0.3 D-ÇL-0.6 / N-ÇL-0.6 D-PL-0.3 / N-PL-0.3 D-PL-0.6 / N-PL-0.6	 Kesit A - A 

Tablo 4.11. TRM ile Sargılanan Numunelerin Detayları

TRM Numune İsimleri ve Detayları	Görsel
D-TRM-1 N-TRM-1	 Kesit A - A 
D-TRM-2 N-TRM-2	 Kesit A - A 
D-TRM-3 N-TRM-3	 Kesit A - A 
D-TRM-4 N-TRM-4	 Kesit A - A 

Tablo 4.12. CFRP ile Sargılanan Numunelerin Detayları

CFRP Numune İsimleri ve Detayları	Görsel
D-CFRP-1 N- CFRP-1	 
D- CFRP-2 N- CFRP-2	 
D- CFRP-3 N- CFRP-3	 
D- CFRP-4 N- CFRP-4	 

4.6. Numune Üretimi

Çalışma kapsamında 52 adet 100*100*500 mm ölçülerine sahip kiriş üretilmiştir. İki farklı beton dayanım sınıfında üretilen bu numunelerin 4'ü referans olmak üzere 16'sı TRM ile ve 16'sı da CFRP ile sargılanmıştır. Sekiz tanesi çelik lif ve yine 8 tanesi de polipropilen lif katkılı olacak şekilde her numuneden ikişer adet üretilmiştir. Çalışma için hazırlanan kiriş numuneleri Şekil 4.3'te görülmektedir.



Şekil 4.3. Hazırlanan Numuneler

4.6.1. CFRP ile sargılanan numunelerin hazırlanması

Kalıplara yerleştirilen taze betonun sertleşmesinin ardından, düşük ve normal dayanımlı 16 adet kirişte beton sınıfı ve sargılama türü bilgileri kirişlerin sağ ve sol yüzeylerine işaretlenmiştir. Karbon lif takviyeli kumaş (CFRP) uygulamasından önce, kiriş yüzeylerinde kalan ince çimento tabakası temizlenmiştir. Tam, U tipi, iki yüzeyli ve tek yüzeyli sargılama yapılacak CFRP şeritleri, nemli bez yardımıyla tozdan arındırılmıştır. CFRP'yi yüzeye yapıştırmak için kullanılacak olan, iki bileşenden oluşan epoksi malzeme temiz bir kap içerisinde, üretici talimatlarına uygun şekilde karıştırılmıştır. Hazırlanan epoksi karışımı, spatula yardımıyla önceden hazırlanmış yüzeye uygulanmıştır. Daha önce kesilerek hazırlanan CFRP parçaları, uygulama doğrultusuna uygun şekilde yüzeye yerleştirilmiştir. Ardından, spatula lif doğrultusuna paralel olarak ileri geri hareket ettirilmiş ve epoksinin lifler arasından çıkması sağlanmıştır. CFRP'nin tüm üst yüzeyine epoksi yayıldıktan sonra ince tesviye işlemi yapılarak yüzey düzlenmiştir. Bu sayede beton ile CFRP arasında güçlü bir aderans sağlanmıştır. Tüm deney elemanları aynı yöntemle hazırlanmıştır. Yapıştırma işlemi tamamlanan elemanlar, oda sıcaklığında ve temiz bir ortamda kurumaya bırakılmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Kirişlerin CFRP ile Sargılanması

4.6.2. TRM ile sargılanan numunelerin hazırlanması

Kalıplara yerleştirilen taze betonun sertleşmesinin ardından, düşük ve normal dayanımlı 16 adet kirişte beton sınıfı ve sargılama türü bilgileri kirişlerin sağ ve sol yüzeylerine işaretlenmiştir. Tekstil takviyeli harç uygulaması öncesinde, kiriş yüzeylerinde kalan ince çimento tabakası temizlenmiş ve böylece uygulamaya engel olabilecek yüzey fazlalıkları giderilmiştir. Tam, U tipi, iki yüzeyli ve tek yüzeyli sargılama yapılacak olan tekstil takviyeli harç şeritleri, nemli bez yardımıyla tozdan arındırılmıştır. Sargı şekli ve kumaş türüne göre

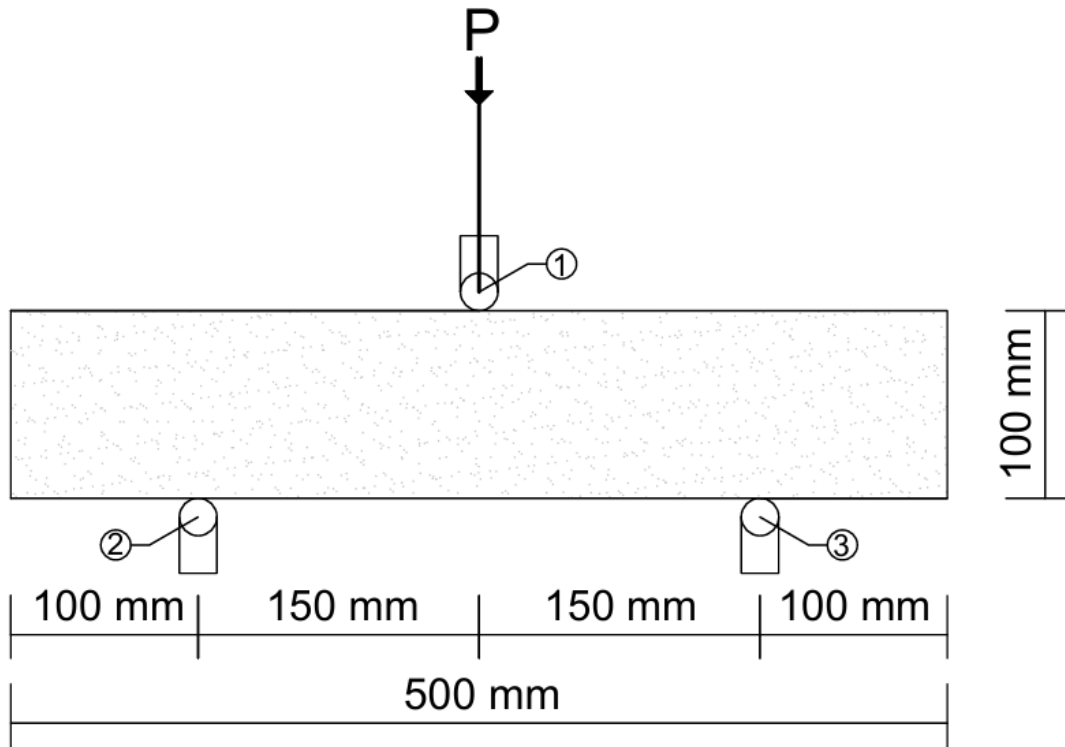
numaralandırılan kirişlerin temizlenmiş yüzeylerine, hazırlanan harç önce doğrudan uygulanmış; ardından tekstil takviyeli kumaş, harç içerisine baskı yapılarak yerleştirilmiştir. Son olarak, harç yüzeyi mala yardımıyla tesviye edilerek düzgün bir yüzey elde edilmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Kirişlerin TRM ile Sargılanması

4.6. Eğilme Deneyi

Üretimden itibaren 28 gün sonra, 100×100×500 mm boyutlarındaki prizmatik numunelere üç noktalı yükleme yöntemiyle eğilme deneyi uygulanmıştır. Deney sonucunda numunelere ait gerilme–şekil değiştirme eğrileri elde edilmiş ve kırılma enerjileri hesaplanmıştır. Bu sayede, farklı lif türlerinin eklenmesinin ve çeşitli sargı tiplerinin uygulanmasının malzemenin eğilme dayanımı ile kırılma enerjisi üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Betonun eğilme dayanımı tayini, TS EN 12390-5 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu deney metodunda, açıklığın orta noktasından yükleme yapılmış; lifli, lifsiz ve farklı sargı tipleri uygulanmış beton numunelerde basit kiriş yöntemiyle üç noktalı eğilme dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.6). Eğilme dayanımı Denklem 4.1 ile hesaplanmaktadır.



Şekil 4.6. Deney Numunesinin Yükleme Düzenegi (TS EN 12390 – 5)

Deney düzeneğinde: 1-Yükleme silindiri (dönebilen ve yana eğilebilen), 2-Mesnet silindiri, 3-Mesnet silindiri (dönebilen ve yana eğilebilen)

$$\sigma_c = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2} \quad (4.1)$$

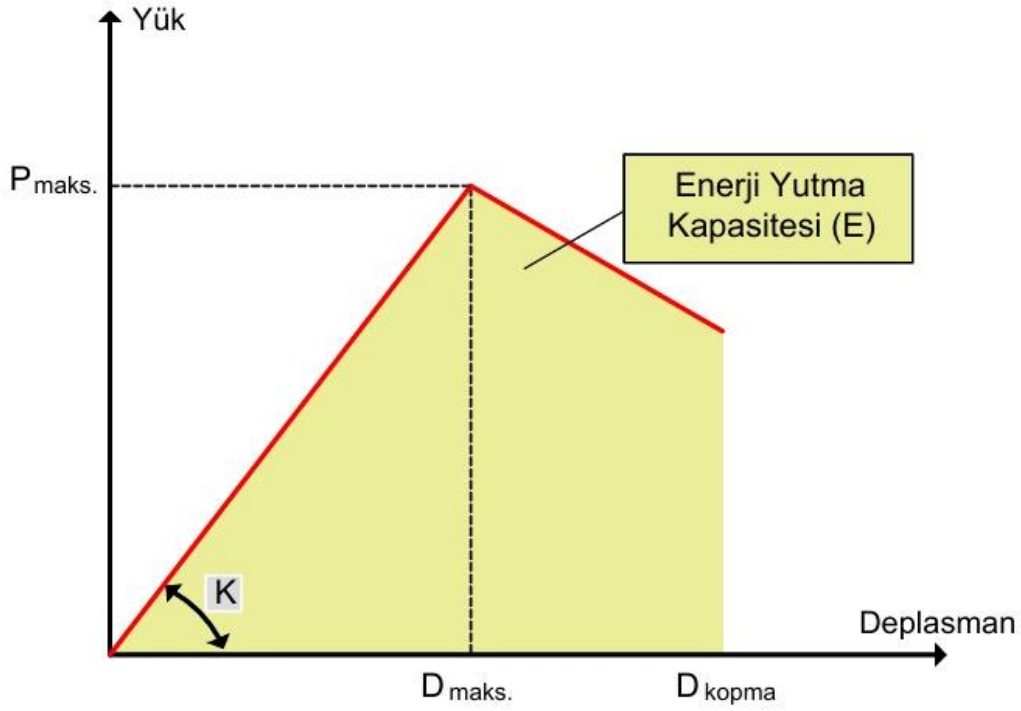
σ_c : Kirişin eğilme dayanımı (N/mm²), P: Kırılmaya neden olan yük (N)

L: Deney numunesinin mesnetler arasındaki mesafesi (mm), L=3d

b: Deney numunesinin genişliği (mm), d: Deney numunesinin kalınlığı, (mm)

4.7. Performans İndeksleri

Deneyssel çalışma kapsamında test edilen lif takviyeli ve sargılanmış beton kirişlerin yapısal davranışlarını sayısal olarak karakterize etmek ve numuneler arası karşılaştırmalı bir analiz sunmak amacıyla belirli performans indeksleri tanımlanmıştır. Hesaplamalarda esas alınan temel parametrelerin şematik gösterimi Şekil 4.7’de sunulmuştur. Bu bağlamda, numunenin deney süresince karşılayabildiği en yüksek yük değeri "maksimum taşıma gücü" ($P_{maks.}$) olarak tanımlanırken, bu tepe yük değerine ulaşıldığı andaki yer değiştirme miktarı ise "maksimum taşıma gücündeki deplasman" ($D_{maks.}$) parametresi olarak belirlenmiştir. Maksimum taşıma gücü değerine ulaşıldıktan sonra, numunenin taşıma kapasitesinde meydana gelen belirli orandaki düşüşün ardından kaydedilen uç deplasman değeri "maksimum deplasman" (D_{kopma}) olarak tanımlanmıştır. Elemanların yük-deplasman eğrisinin eğiminden "rijitlik" (K), numunelerin tokluk performansını ifade eden "enerji yutma kapasitesi" (E) ise yük-deplasman eğrisinin altında kalan alanın hesaplanmasıyla elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Performans İndeksleri İçin Kullanılan Yaklaşım (Erbaş, 2025)

5. DENEY SONUÇLARI

Bu çalışmada, 4 adet referans, 8 adet çelik lifli ve 8 adet polipropilen lifli, 16 adet farklı sarım desenlerinde CFRP ve 16 adet farklı sarım desenlerinde TRM ile sargılanan numune olmak üzere toplamda 52 adet kiriş numunesi üretilmiştir. Numunelere ait deney sonuçları ile sayısal ve gözlemsel veriler düzenlenmiş ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Her numuneden iki adet üretilmiş olup, ortalama değer alınmıştır. Numunelerin eğilme dayanımı, maksimum taşıma kapasitesi, maksimum deplasman, enerji yutma kapasitesi ve rijitlik değerleri belirlenmiş ve bu bölümde grafiklerle sunulmuştur. D ve N Referans numunelerine göre normalize edilmiş değerler de Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Deney Sonuçları (Normalize Değerler)

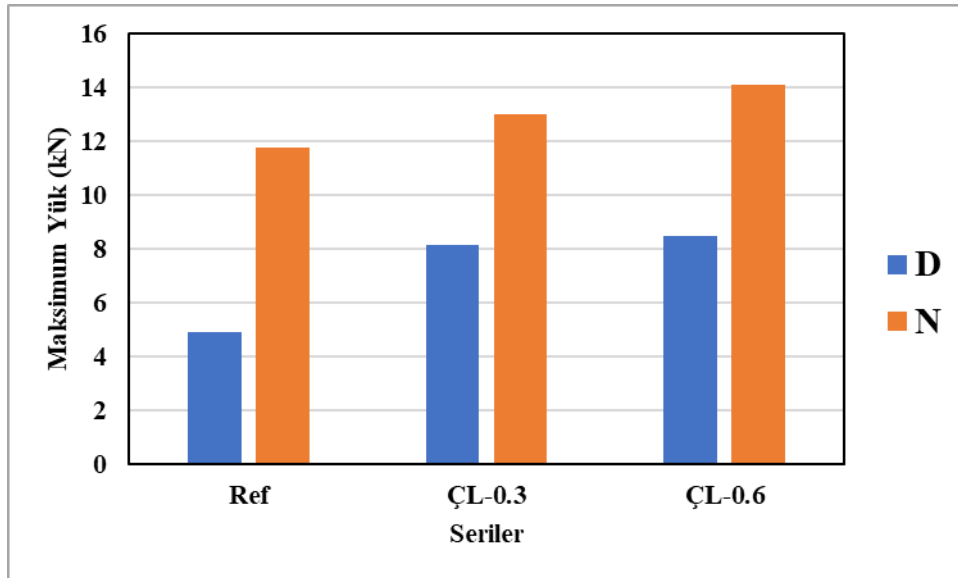
Numune Adı	Maksimum yük $P_{maks.}$ (kN)	Maksimum yükte deplasman $D_{maks.}$ (mm)	Rijitlik K (kN/mm)	Maksimum deplasman D_{kopma} (mm)	Enerji yutma kapasitesi E (kN.mm)	Eğilme Dayanımı σ (MPa)
D-Ref	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
D-ÇL-0.3	1.66	1.43	1.16	1.43	1.78	1.66
D-ÇL-0.6	1.73	2.65	0.65	6.22	16.66	1.73
D-PL-0.3	1.50	2.46	0.61	2.46	1.73	1.50
D-PL-0.6	1.56	0.41	3.83	0.42	1.19	1.56
D-TRM-1	1.04	3.34	0.31	3.40	1.42	1.04
D-TRM-2	1.42	3.14	0.45	3.12	2.63	1.42
D-TRM-3	1.45	2.23	0.65	2.22	1.74	1.45
D-TRM-4	2.04	2.90	0.71	2.90	4.35	2.04
D-CFRP-1	1.44	1.53	0.94	1.53	1.62	1.44
D-CFRP-2	1.70	1.94	0.88	1.96	2.25	1.70
D-CFRP-3	2.05	2.27	0.90	2.26	11.44	2.05
D-CFRP-4	3.78	4.91	0.77	5.32	5.71	3.78
N-Ref	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
N-ÇL-0.3	1.10	1.33	0.83	1.33	1.22	1.10
N-ÇL-0.6	1.20	4.23	0.28	9.01	7.86	1.20
N-PL-0.3	1.08	3.33	0.32	3.28	1.28	1.08
N-PL-0.6	1.16	3.32	0.35	3.27	1.27	1.16
N-TRM-1	1.04	4.07	0.26	4.01	1.09	1.04
N-TRM-2	1.30	4.32	0.30	4.25	2.56	1.30
N-TRM-3	1.21	2.22	0.55	2.19	2.41	1.21
N-TRM-4	1.19	3.60	0.33	3.53	2.27	1.19
N-CFRP-1	1.15	4.31	0.27	4.24	1.32	1.15
N-CFRP-2	1.38	4.40	0.31	4.34	2.60	1.38
N-CFRP-3	1.31	4.76	0.28	4.68	2.26	1.31
N-CFRP-4	1.77	2.42	0.73	2.41	3.98	1.77

5.1. Maksimum Yük Performansı

Beton sınıfı, çelik ve polipropilen lif oranlarının, TRM ve CFRP sargı desenlerinin değişken olduğu bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen eğilme deneyleri sonucunda elde edilen maksimum yük değerleri bu bölümde değerlendirilmiştir. Çelik ve polipropilen lifli, TRM ve CFRP ile farklı desenlerde sarılan kiriş numunelerinin maksimum yük değerleri, düşük ve normal dayanımlı referans kiriş numunelerinin maksimum yük değerleriyle birlikte verilmiş ve değerlendirmeler sunulmuştur.

5.1.1. Çelik lifli numunelerde maksimum yük performansı

Düşük ve normal dayanım sınıfları ile %0.3 ve %0.6 çelik lif oranlarına sahip kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen maksimum yük değerleri Şekil 5.1’de görülmektedir.

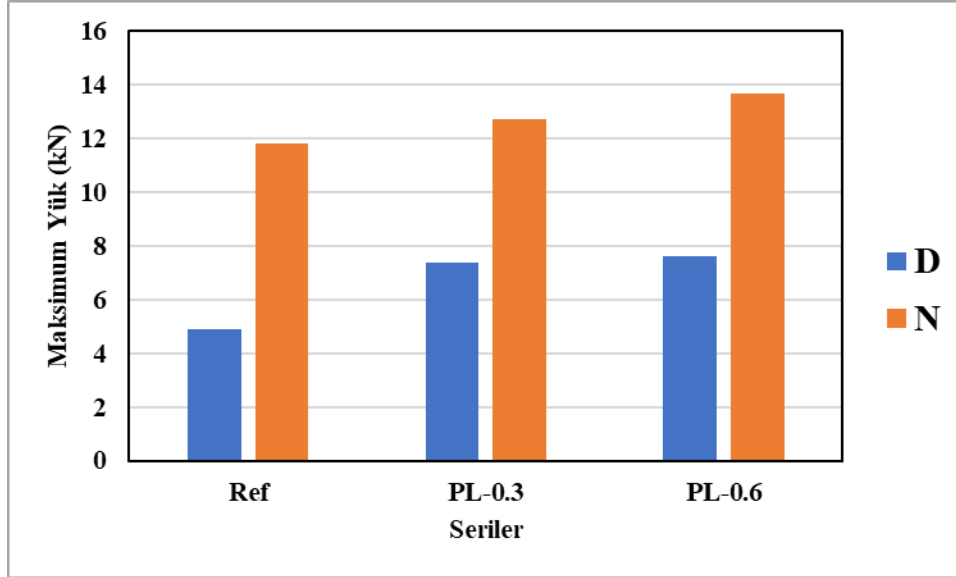


Şekil 5.1. Referans ve Çelik Lifli Numunelerde Maksimum Yük Değerleri

Deney sonuçlarına göre, beton sınıfı ve çelik lif kullanımı kirişlerin eğilme altındaki maksimum yük taşıma kapasitesini artırmıştır. Referans numunelerde N sınıfına ait normal dayanımlı betonun taşıma kapasitesi, D sınıfı düşük dayanımlı betona göre %140 daha yüksek çıkmıştır. Çelik lif ilavesi ile hem D hem de N sınıfı beton sınıflarında kapasite artışı gözlenmiştir. Özellikle %0.3 lif oranında D sınıfı beton kirişlerde artış (%65) daha belirgin olurken, %0.6 lif oranında her iki beton sınıfında da en yüksek (%73) değere ulaşılmıştır. Ancak lif oranı %0.3’ten %0.6’ya çıkarıldığında artış miktarı (%5-%8.5) azalmıştır. Bu durum, çelik lif miktarının artmasının belirli bir seviyeden sonra sınırlı ek katkı sağladığını göstermektedir. Genel olarak en yüksek eğilme yükü %0.6 çelik lif içeren normal dayanıma ait beton kirişlerde elde edilmiştir (14.1 kN).

5.1.2. Polipropilen lifli numunelerde maksimum yük performansı

Farklı beton sınıfları (D ve N) ile %0, %0.3 ve %0.6 polipropilen lif oranlarına sahip kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen maksimum yük değerleri Şekil 5.2’de verilmiştir.



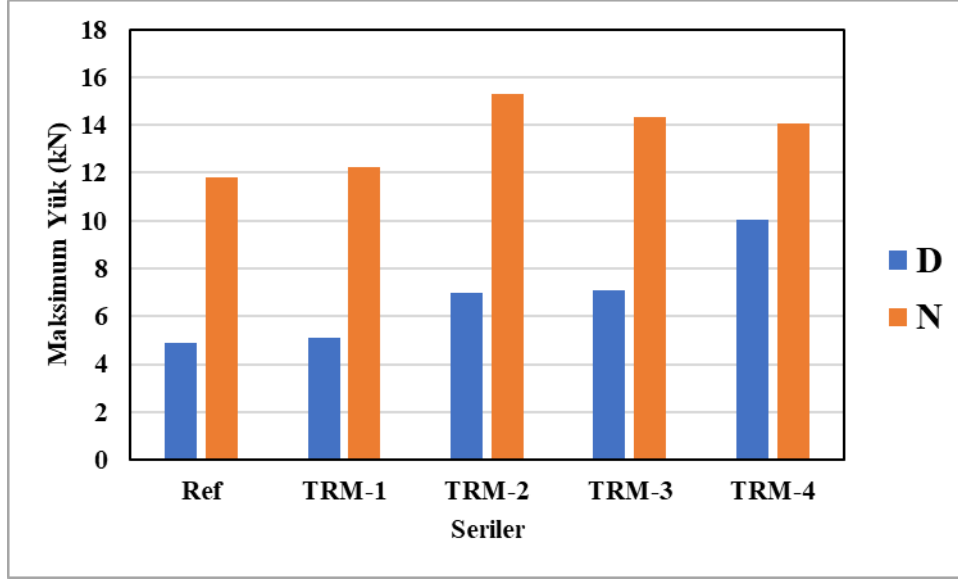
Şekil 5.2. Referans ve Polipropilen Lifli Numunelerde Maksimum Yük Değerleri

Şekil 5.2 incelendiğinde, polipropilen lif oranının %0’dan %0.3 ve %0.6’ya çıkarılmasıyla her iki beton sınıfında da yük kapasitesinde artış meydana geldiği görülmektedir. Lif katkısının özellikle düşük dayanımlı betonlarda daha belirgin bir iyileşme sağladığı (%0.3 oran için %51, %0.6 oran için %55) %0.3’ten %0.6’ya geçişte (D sınıfı için %3 ve N sınıfı için %8) artış miktarının sınırlı kaldığı görülmüştür.

5.1.3. TRM ile sargılanan numunelerde maksimum yük performansı

TRM malzemesi ile farklı sarım desenlerine (alt yüzey, yan yüzeyler, U şeklinde sarı ve her yüzey sargı) sahip kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen maksimum yük değerleri Şekil 5.3’te verilmiştir.

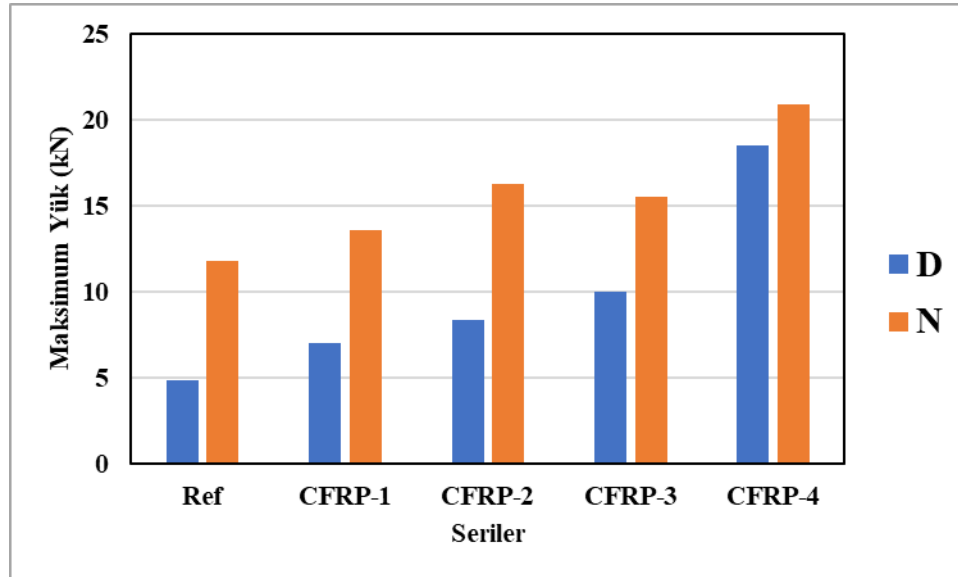
Şekil 5.3 incelendiğinde, TRM ile sarılan kirişlerin referans numunelere göre daha yüksek yük taşıma yük değerlerine ulaştığı görülmektedir. Sarım tipine bağlı olarak performansın değiştiği, özellikle TRM-2 ve TRM-4 numunelerinde belirgin artışlar olmuştur. TRM-1 (alt yüzey sargısı) numunesinin D ve N sınıfı beton dayanımına sahip referans numunelere göre artış oranları sırayla %4 ve %4, TRM-2 numunesi için %43 ve %30, TRM-3 numunesi için %45 ve %21, TRM-4 numunesi için de %104 ve %20 oranlarında artış görülmüştür.



Şekil 5.3. Referans ve TRM Sargılanan Numunelerde Maksimum Yük Değerleri

5.1.4. CFRP ile sargılanan numunelerde maksimum yük performansı

CFRP malzemesi ile farklı sarım desenlerine sahip kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen maksimum yük değerleri Şekil 5.4'te verilmiştir. Şekil 5.4 incelendiğinde, CFRP ile sarılan kirişlerin referans numunelere kıyasla %15 ve %278 aralığında daha yüksek taşıma kapasitesi değerlerine ulaştığı görülmektedir. Alt ve kısmi sarım desenlerinde (CFRP-1, CFRP-2 ve CFRP-3) artış gözlenmekle birlikte, kiriş yüzeyinin tamamının sarıldığı CFRP-4 numunelerinde performansın belirgin şekilde iyileştiği anlaşılmaktadır.



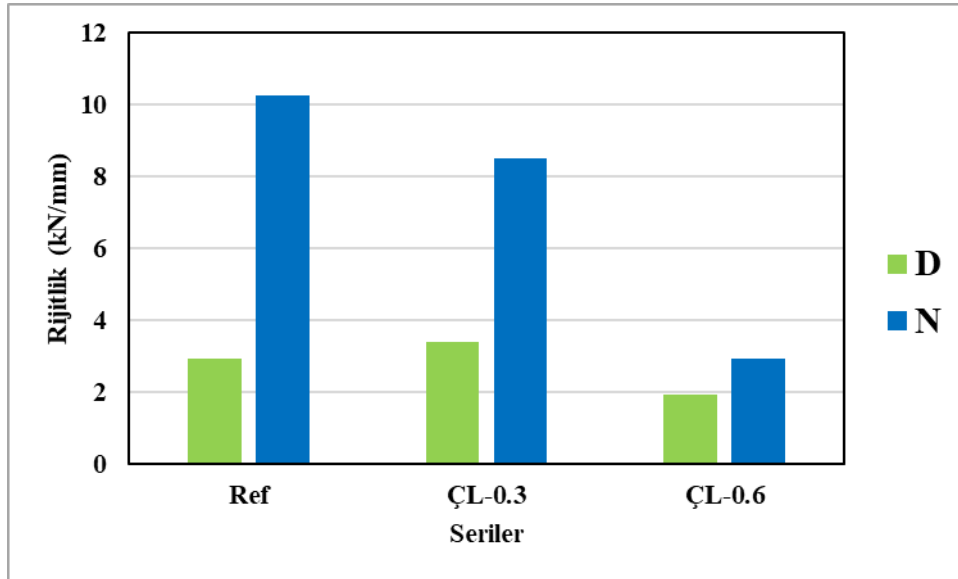
Şekil 5.4. Referans ve CFRP ile Sargılanan Numunelerde Maksimum Yük Değerleri

5.2. Rijitlik Performansı

Rijitlik, bir yapı elemanın uygulanan yük nedeniyle oluşan deplasmana direnci olarak tanımlanmakta olup, yük-deplasman eğrisinin eğiminden elde edilir. Bu kapsamda, çalışmada elde edilen rijitlik değerleri farklı beton sınıfları, çelik ve polipropilen lif oranları ile TRM ve CFRP sarım desenlerine göre incelenmiştir.

5.2.1. Çelik Lifli numunelerde rijitlik performansı

Farklı çelik lif oranlarına sahip kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen rijitlik değerleri referans numune değerleriyle birlikte Şekil 5.5'te verilmiştir. Şekil 5.5 incelendiğinde, çelik lif oranının artmasıyla kirişlerin rijitlik değerlerinde genel olarak bir azalma olduğu görülmektedir. Referans numunelerde en yüksek rijitlik değerleri elde edilirken, %0.3 çelik lif oranında değerler azalmış, %0.6 lif oranında ise daha belirgin bir azalma gözlenmiştir. Tüm seriler için normal beton dayanıma (N) sahip numunelerin düşük dayanımlı beton dayanımına (D) sahip numunelerden daha yüksek rijitlik değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

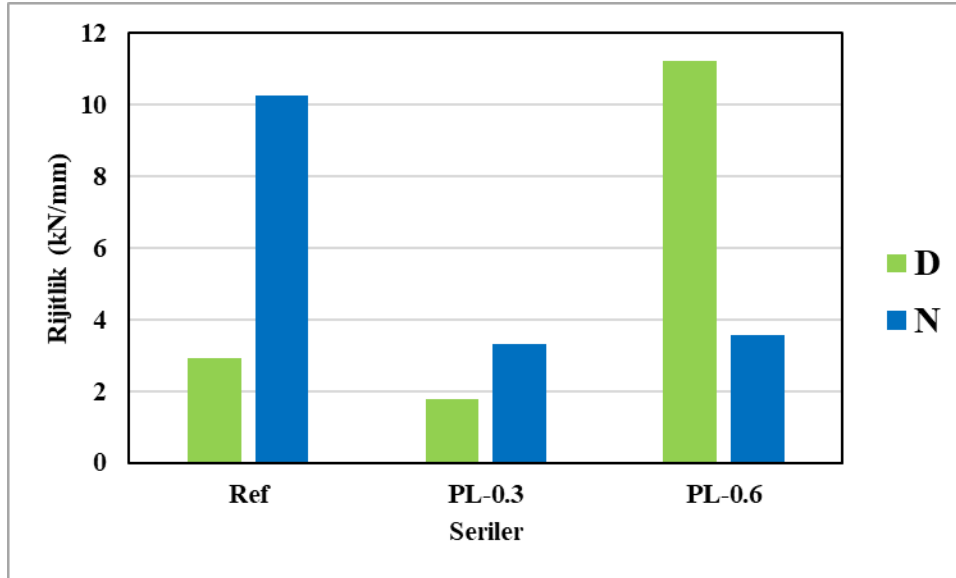


Şekil 5.5. Referans ve Çelik Lifli Numunelerde Rijitlik Değerleri

5.2.2. Polipropilen lifli numunelerde rijitlik performansı

Farklı polipropilen lif oranlarına sahip kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen rijitlik değerleri referans numune değerleriyle birlikte Şekil 5.6'da verilmiştir. Şekil 5.6 incelendiğinde, polipropilen lif oranının rijitlik üzerindeki etkisinin beton sınıfına bağlı olarak farklılık gösterdiği görülmektedir. Normal dayanıma sahip (N) kiriş numunelerinde lif oranının artmasıyla rijitlik değerlerinde belirgin şekilde azalma meydana gelmiştir. Düşük dayanıma sahip numunelerde ise %0.3 lif oranında rijitlikte düşüş olurken, %0.6 lif oranında önemli bir

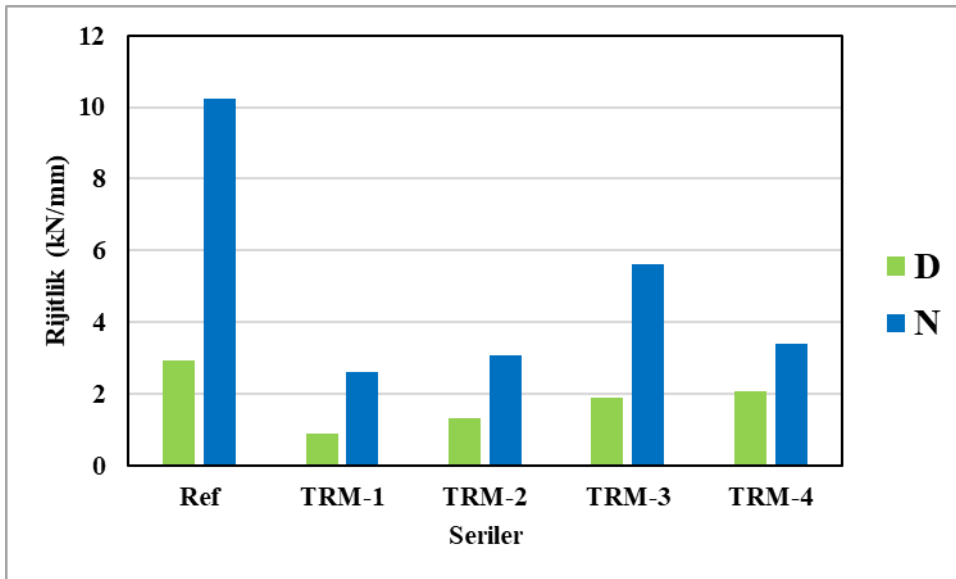
artış oluşmuştur. Bu durum yüksek lif oranlarında liflerin çatlak gelişimini etkin şekilde sınırlayarak düşük dayanımlı betonlarda rijitliği artırabileceğini göstermektedir. Genel olarak, lif katkısının rijitlik üzerindeki etkisinin doğrusal olmadığı ve beton sınıfı ile de ilgili olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.6. Referans ve Polipropilen Lifli Numunelerde Rijitlik Değerleri

5.2.3. TRM ile sargılanan numunelerde rijitlik performansı

TRM malzemesi ile farklı sarım desenlerine sahip kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen rijitlik değerleri referans numune değerleri ile birlikte Şekil 5.7’de verilmiştir.

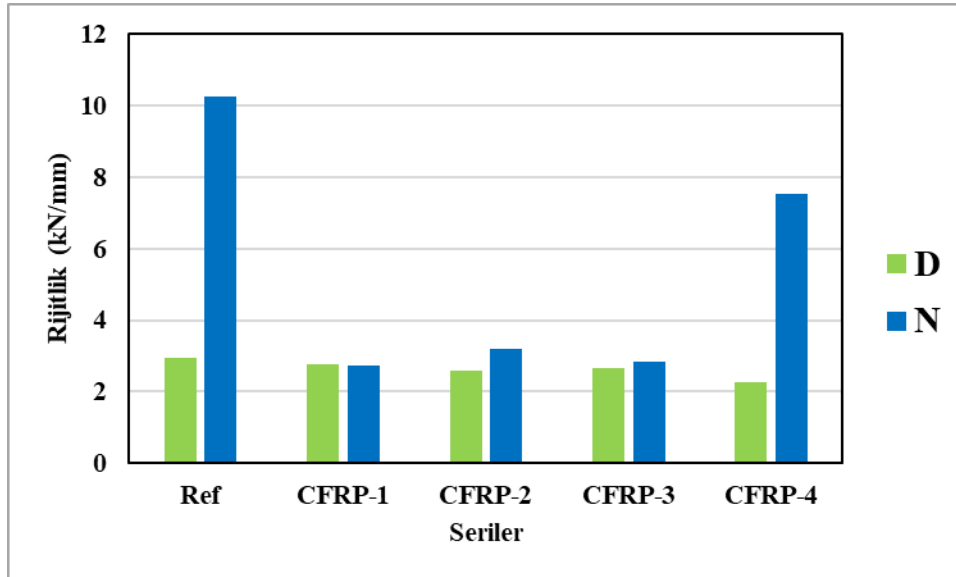


Şekil 5.7. Referans ve TRM ile Sargılanan Numunelerde Rijitlik Değerleri

Değerler incelendiğinde; TRM ile güçlendirilmiş kirişlerde rijitlik değerlerinin sarım desenine bağlı olarak değiştiği, referans numuneye kıyasla TRM uygulamalarında genel olarak rijitlikte azalma olduğu görülmektedir. Sarım desenleri açısından bakıldığında; sarım alanı arttıkça rijitlik değerlerinde kısmi bir iyileşme gözlenmiştir. Özellikle TRM-3 ve TRM-4 numunelerinde, diğer sarım desenlerine göre daha yüksek rijitlik değerleri elde edilmiştir. Normal dayanıma (N) sahip numunelerde düşük dayanıma (D) sahip numunelere göre daha yüksek rijitlik değerleri gözlenirken, sarım desenlerinin rijitlik üzerindeki etkisinin doğrusal olmadığı ve sarım desenlerine bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

5.2.4. CFRP ile sargılanan numunelerde rijitlik performansı

CFRP malzemesi ile farklı sarım desenlerine sahip kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen rijitlik değerleri referans numune rijitlik değerleri ile birlikte Şekil 5.8’de verilmiştir. Şekil 5.8 incelendiğinde, CFRP ile sargılanan kirişlerde rijitlik değerlerinin sarım deseni tipine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Referans numuneye göre CFRP uygulamalarında genel olarak rijitlikte azalma görülürken, sarım alanının artmasıyla bu etkinin biraz azaldığı görülmüştür. Normal beton dayanımına (N) sahip numunelerde düşük dayanımlı numunelere göre daha yüksek rijitlik değerleri elde edilmiştir. Bu sonuçlar, CFRP sargının rijitlik üzerindeki etkisinin sarım desenine bağlı olduğunu ve her yüzü kaplı durum için daha etkili bir performans sağladığını göstermiştir.

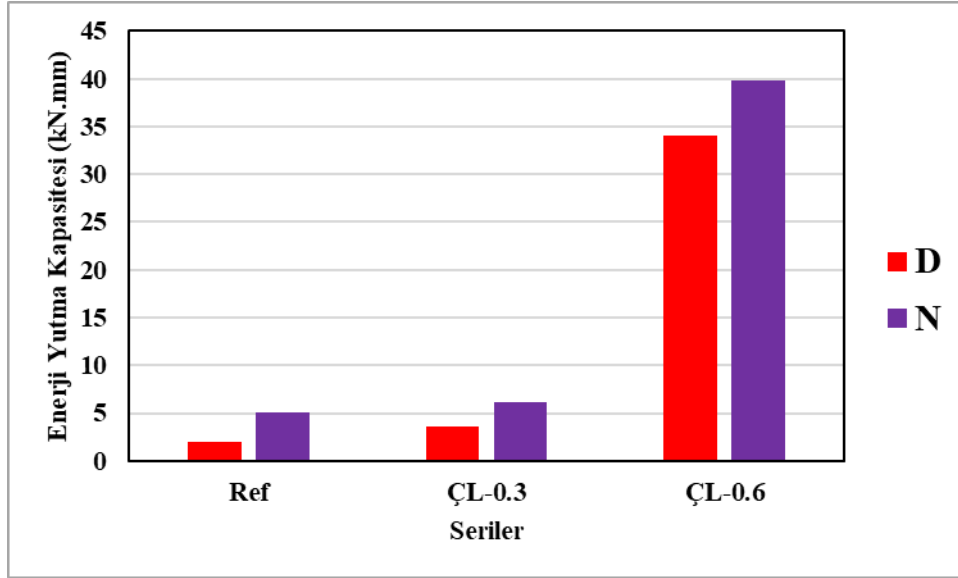


Şekil 5.8. Referans ve CFRP ile Sargılanan Numunelerde Rijitlik Değerleri

5.3. Enerji Yutma Kapasitesi

5.3.1. Çelik lifli numunelerde enerji yutma kapasitesi

Farklı çelik lif oranlarına sahip kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen enerji yutma kapasite değerleri referans numune değerleriyle birlikte Şekil 5.9’da verilmiştir.



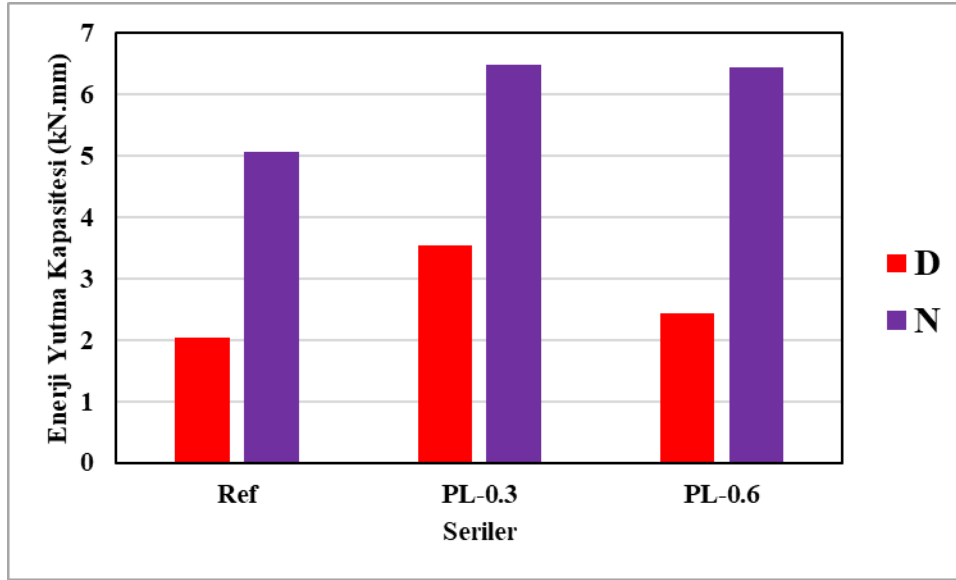
Şekil 5.9. Referans ve Çelik Lifli Numunelerde Enerji Yutma Kapasitesi Değerleri

Şekil 5.9 incelendiğinde, çelik lif oranının artmasıyla kirişlerin enerji yutma kapasitesinde belirgin bir artış olduğu görülmektedir. Referans numunelerde en düşük enerji yutma kapasitesi elde edilirken, %0.3 çelik lif oranında sınırlı bir artış (1.8 ve 1.2 kat), %0.6 çelik lif oranında ise enerji yutma kapasitesinde çok daha yüksek bir artış (16.7 ve 7.9 kat) gözlenmiştir. Bu durum, çelik liflerin çatlak ilerlemesini kontrol ederek kırılma sonrası davranışı iyileştirdiğini ve kiriş numunelerinin daha fazla enerji sönümleyebildiğini göstermektedir. Normal dayanımlı (N) kiriş numunelerinin enerji yutma kapasiteleri düşük dayanımlı (D) numunelerden daha yüksek (2.5, 1.7 ve 1.2 kat) enerji yutma kapasitesi değerlerine ulaşmıştır.

5.3.2. Polipropilen lifli numunelerde enerji yutma kapasitesi

%0.3 ve %0.6 oranlarında polipropilen life sahip kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen enerji yutma kapasitesi değerleri referans numune değerleriyle birlikte Şekil 5.10’da verilmiştir. Değerler incelendiğinde; polipropilen lif katkısının enerji yutma kapasitesi üzerinde olumlu bir etkisi olduğu görülmektedir. %0.3 lif oranında enerji yutma kapasitesi değerleri referans numuneye göre N beton sınıfı için 1.3 kat, D beton sınıfı için 1.7 kat artmıştır. Ancak %0.6 lif oranında kirişlerde, referans numunelere göre yüksek, %0.3 lif oranındaki kirişlere

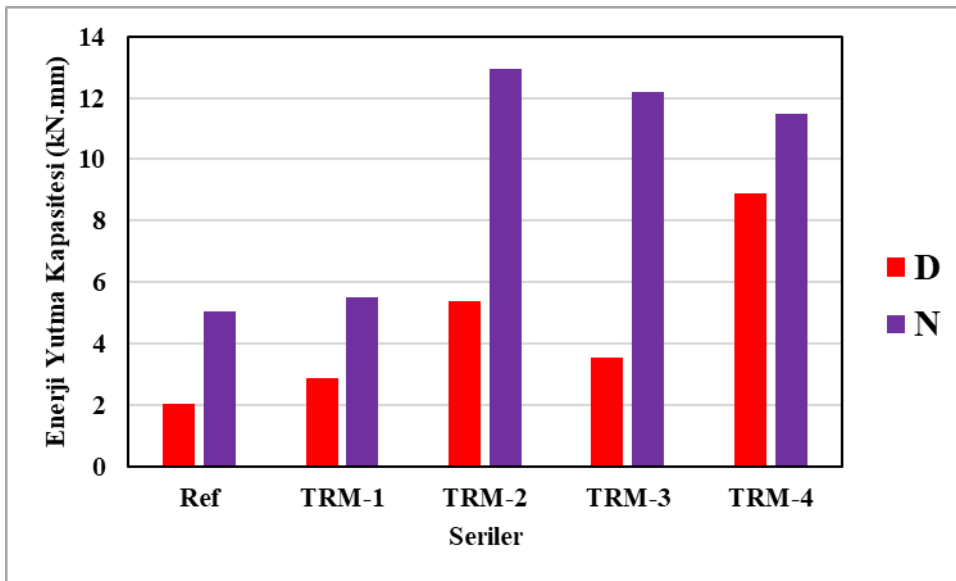
göre daha düşük enerji yutma kapasitesi değerleri elde edilmiştir. Bu durum, lif oranının artmasının her zaman doğrusal bir iyileşme sağlamadığını göstermiştir. Tüm serilerde normal dayanımlı (N) kiriş numuneleri, düşük dayanımlı (D) numunelerden daha yüksek (Ref için 2.5 kat; %0.3 için 1.8 kat; %0.6 için 2.6 kat) enerji yutma kapasitesi değerlerine sahip olmuştur.



Şekil 5.10. Referans ve Polipropilen Lifli Numunelerde Enerji Yutma Kapasitesi Değerleri

5.3.3. TRM ile sargılanan numunelerde enerji yutma kapasitesi

TRM malzemesi ile farklı sarım desenlerine sahip kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen enerji yutma kapasiteleri referans değerlerle birlikte Şekil 5.11’de verilmiştir.

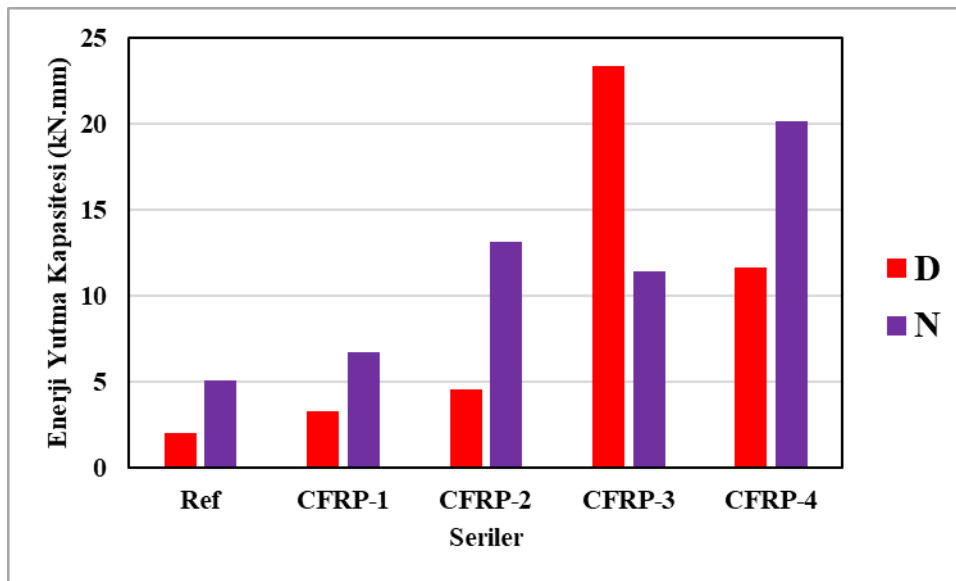


Şekil 5.11. Referans ve TRM ile Sargılanan Numunelerde Enerji Yutma Kapasitesi Değerleri

Şekil 5.11 incelendiğinde, TRM ile sargılanan kirişlerin enerji yutma kapasitelerinin referans numuneye göre önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Enerji yutma kapasitesi değerleri incelendiğinde; TRM ile sargılanan kirişlerin enerji yutma kapasitelerinin referans numunelere göre önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Sarım desenine bağlı olarak enerji yutma kapasite değerlerinde belirgin farklılıklar oluşmuş, özellikle TRM-2 ve TRM-4 numunelerinde yüksek değerler elde edilmiştir. TRM-3 numunesinde de artış gözlenmekle birlikte, diğer sarım desenlerine kıyasla daha sınırlı kaldığı görülmüştür. Genel olarak, kiriş yüzeyinin daha geniş bir kısmının sargılanmasıyla enerji yutma kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca tüm serilerde normal dayanıma (N) sahip kirişlerin düşük dayanımlı (D) kirişlere göre daha yüksek (1.3 ile 3.4 kat arası) enerji yutma kapasitesi gösterdiği görülmektedir.

5.3.4. CFRP ile sargılanan numunelerde enerji yutma kapasitesi

CFRP malzemesi ile farklı sarım desenlerine sahip kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen enerji yutma kapasitesi değerleri referans numune değerleri ile birlikte Şekil 5.12’de verilmiştir. Değerler incelendiğinde; CFRP ile farklı desenlerde sargılanan kirişlerin enerji yutma kapasitelerinin referans numune değerlerine göre belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Sarım desenine bağlı olarak enerji yutma kapasite değerlerinde önemli farklılıklar oluşmuş, özellikle CFRP-3 ve CFRP-4 numunelerinde yüksek değerler elde edilmiştir. Genel olarak, sargı alanının artmasıyla kirişlerin daha fazla enerji sönümleyebildiği ve kırılma sonrası davranışı iyileştirdiği görülmektedir. Beton sınıflarına göre bir değerlendirme yapıldığında N serisi numunelerin D serisi numunelere göre genel olarak arttığı ve bu artışın da 1.7 ile 2.9 kat arası olduğu belirlenmiştir.

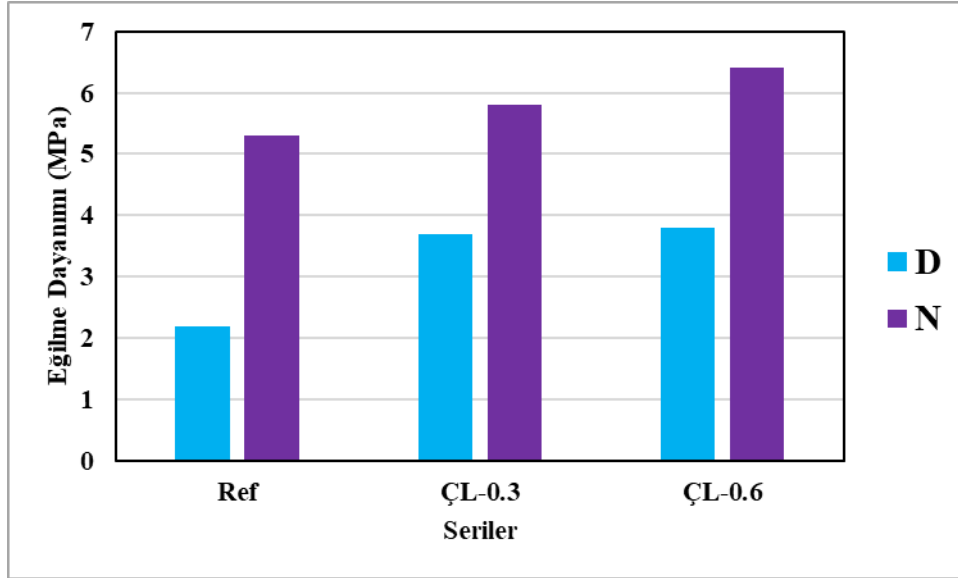


Şekil 5.12. Referans ve CFRP ile Sargılanan Numunelerde Enerji Yutma Kapasitesi Değerleri

5.4. Eğilme Dayanımı Değerleri

5.4.1. Çelik lifli numunelerin eğilme dayanımı değerleri

Farklı çelik lif oranlarına sahiplerin kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen eğilme dayanımı değerleri referans numune değerleri ile birlikte Şekil 5.13'te verilmiştir.



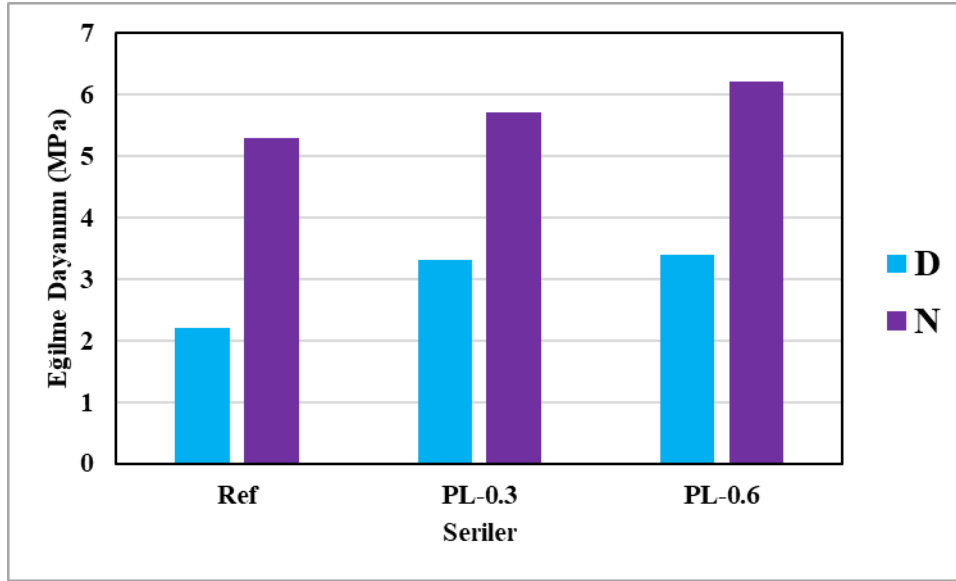
Şekil 5.13. Referans ve Çelik Lifli Numunelerde Eğilme Dayanımı Değerleri

Şekil 5.13 incelendiğinde; çelik lif oranının artmasıyla eğilme dayanımında genel bir artış olduğu görülmektedir. Referans numuneye kıyasla %0.3 lif oranında D sınıfı numunelerde %68 ve N sınıfı numunelerde %9, N sınıfı numunelerde ise %72 ve %20 artış sağlanmıştır. Ancak lif oranı %0.3 ten %0.6'ya geçtiğinde artış miktarı sınırlı kalmıştır (%2 ve %10). Tüm serilerde N serisi kirişlerin D serisi kirişlere göre daha yüksek eğilme dayanımı değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum hem beton sınıfının hem de çelik lif katkısının eğilme dayanımı performansı üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu göstermektedir.

5.4.2. Polipropilen lifli numunelerin eğilme dayanımı değerleri

Farklı polipropilen lif oranlarına sahip kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen eğilme dayanımı değerleri referans değerler ile birlikte Şekil 5.14'te verilmiştir. Değerler incelendiğinde; polipropilen lif katkısının eğilme dayanımı üzerinde olumlu bir etkisi olduğu görülmektedir. Referans numuneye kıyasla %0.3 lif oranında polipropilen lif katkılı numuneler; düşük dayanımlı beton sınıfında %50 ve normal dayanımlı beton sınıfında da %7 (N sınıfı için) oranlarında artış meydana getirmiştir. %0.6 lif katkısı olan numunelerde bu oranlar %54 ve %17 olarak belirlenmiştir. Tüm seriler için; N sınıfı numunelerin D sınıfı numunelere

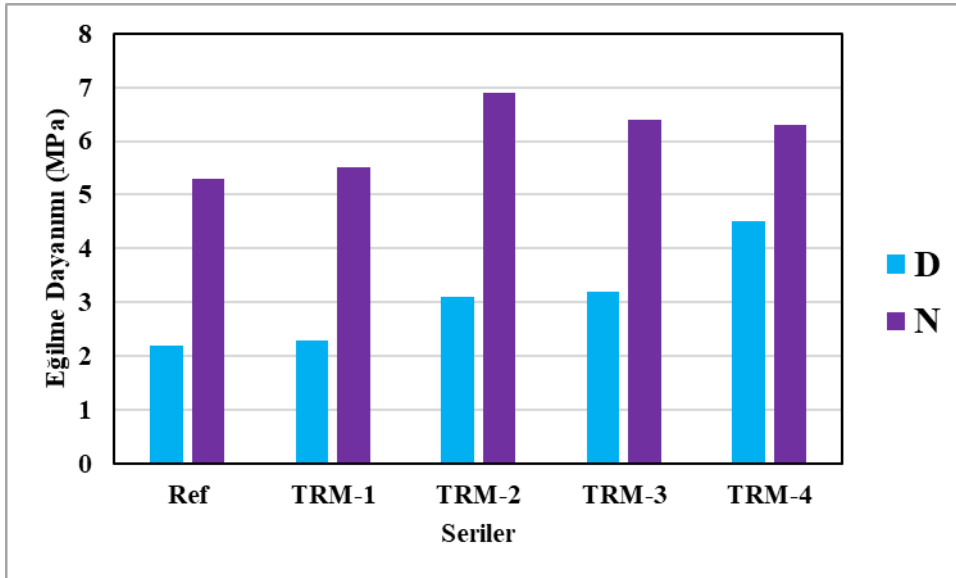
göre daha yüksek eğilme dayanımı değerleri verdiği görülmektedir. Hem lif katkısı hem de beton dayanımı eğilme performansını iyileştirmiştir.



Şekil 5.14. Referans ve Polipropilen Lifli Numunelerde Eğilme Dayanımı Değerleri

5.4.3. TRM ile sargılanan numunelerin eğilme dayanımı değerleri

TRM malzemesi ile 4 farklı sarım deseninde sargılanan kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen eğilme dayanımı değerleri referans değerler ile birlikte Şekil 5.15'te verilmiştir.



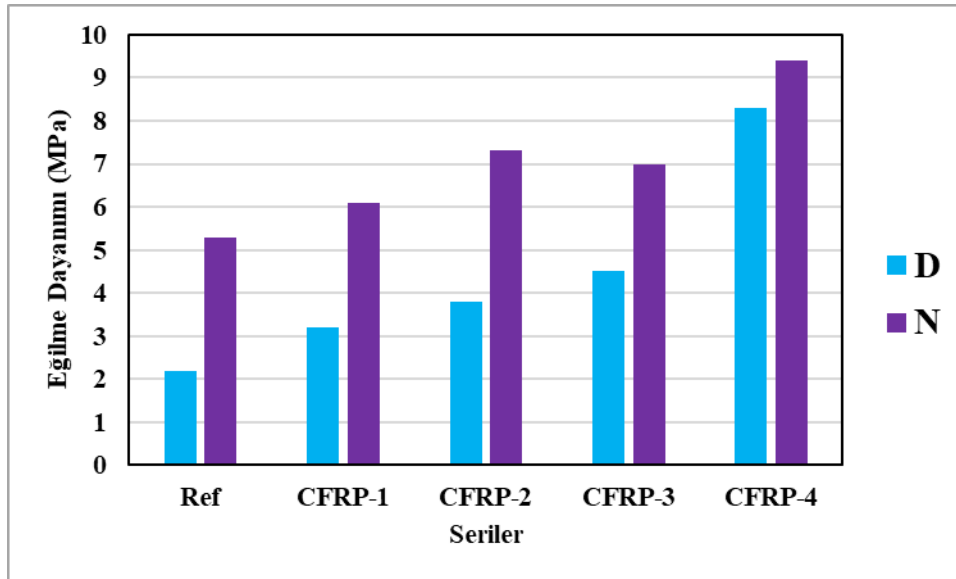
Şekil 5.15. Referans ve TRM ile Sargılanan Numunelerde Eğilme Dayanımı Değerleri

Şekil 5.15 incelendiğinde, TRM ile sargılanan kirişlerin eğilme dayanımı değerlerinin referans numunelere kıyasla arttığı görülmektedir. Sarım desenlerinin eğilme dayanımı

üzerinde etkili olduğu, özellikle TRM-2 ve TRM-4 numunelerinde daha yüksek değerler elde edildiği görülmüştür. Sarım desenlerinin düşük ve normal dayanımlı referans numunelere göre karşılaştırılmasında; TRM-1 için %4.5 ve %3.8; TRM-2 için %40 ve %30; TRM-3 için %45.5 ve %20.8 ve TRM-4 için %104 ve %18.9 oranlarında arttığı belirlenmiştir. Genel olarak, TRM sargının eğilme performansını iyileştirdiği ve sarım deseninin bu iyileşmede önemli bir rol oynadığı görülmektedir.

5.4.4. CFRP ile sargılanan numunelerin eğilme dayanımı değerleri

CFRP malzemesi ile dört farklı sarım desenine sahip kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen eğilme dayanımı değerleri referans numune değerleri ile birlikte Şekil 5.16'da verilmiştir. Değerler incelendiğinde; CFRP ile farklı desenlerde sargılanan kirişlerin eğilme dayanımlarının referans numunelere göre arttığı görülmektedir. Sarım desenlerinin düşük ve normal dayanımlı referans numunelere göre karşılaştırılmasında; CFRP-1 için %46 ve %15; CFRP-2 için %73 ve %38; CFRP-3 için %105 ve %32 ve CFRP-4 için %277 ve %77 oranlarında arttığı belirlenmiştir. Genel olarak, CFRP sargının eğilme performansını iyileştirdiği ve sarım deseninin bu iyileşmede önemli bir rol oynadığı görülmektedir.

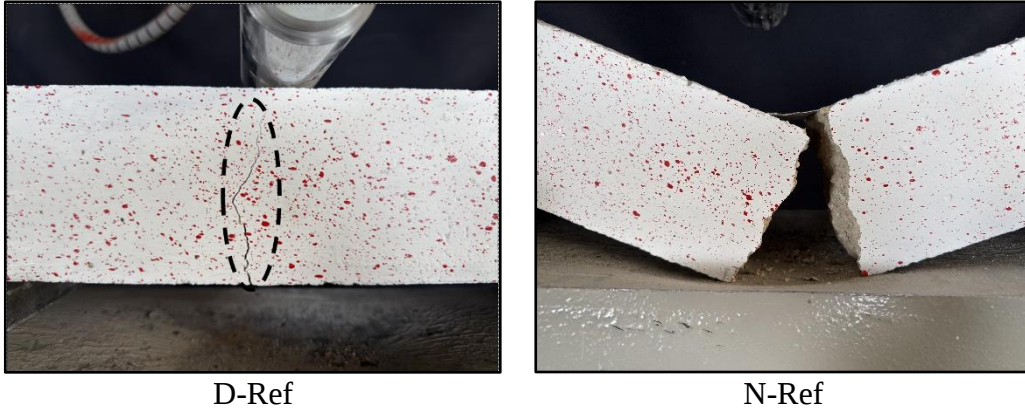


Şekil 5.16. Referans ve CFRP ile Sargılanan Numunelerde Eğilme Dayanımı Değerleri

5.5. Numunelerin Deney Sonrası Görüntüleri

5.5.1. Referans numunelerin deney sonrası görüntüleri

Düşük ve normal beton dayanımına sahip referans numunelerin kiriş eğilme deneyi sonucunda elde edilen görüntüleri Şekil 5.17'de verilmiştir. Bu iki numune çatlak deseni, kırılma tipi ve hasar dağılımı açısından belirgin farklar göstermiştir.



Şekil 5.17. Referans Numunelerin Deney Sonrası Görüntüleri

5.5.2. Çelik lifli numunelerin deney sonrası görüntüleri

Düşük ve normal dayanımlı beton sınıfında %0.3 ve %0.6 oranlarında çelik lif içeren kiriş numunelerinin eğilme deneyi sonucunda elde edilen deney sonrası görüntüleri EK-1’de verilmiştir. Çelik lif oranının %0.3’ten %0.6’ya çıkarılması hem düşük hem de normal dayanımlı beton sınıflarında çatlak yayılımını sınırlandırmış, ani kırılmayı geciktirmiş ve deney sonrası görüntülerde daha kontrollü bir hasar deseni oluşturmuştur. Bu etki özellikle düşük dayanımlı beton numunelerde daha belirgin olmuş, liflerin çatlak köprüleme etkisi sayesinde daha sünek bir davranış elde edilmiştir.

5.5.3. Polipropilen lifli numunelerin deney sonrası görüntüleri

Düşük ve normal dayanımlı beton sınıfında %0.3 ve %0.6 oranlarında polipropilen lif içeren kiriş numunelerinin eğilme deneyi sonucunda elde edilen deney sonrası görüntüleri EK-2’de verilmiştir. Polipropilen lifli numunelerin deney sonrası görüntülerinde, liflerin çatlak başlangıcını kısmen kontrol ettiği; ancak çatlaklar makro boyuta ulaştıktan sonra numune bütünlüğünü korumada sınırlı kaldığı görülmüştür.

5.5.4. TRM ile sargılanan numunelerin deney sonrası görüntüleri

Düşük ve normal dayanım beton sınıflarında TRM ile farklı sargı desenlerine sahip kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen deney sonrası görüntüleri EK-3’te verilmiştir. TRM ile sargılanan numunelerin deney sonrası görüntüleri, sarım seviyesi arttıkça çatlak dağılımının daha kontrollü hale geldiğini ve numune bütünlüğünü daha uzun süre koruduğunu göstermektedir.

5.5.5. CFRP ile sargılanan numunelerin deney sonrası görüntüleri

Düşük ve normal dayanım beton sınıflarında CFRP ile farklı sargı desenlerine sahip kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen deney sonrası görüntüleri EK-4'te verilmiştir. CFRP ile sargılanan numunelerin deney sonrası görüntüleri, sargı desenine bağlı olarak taşıma kapasitesini arttırdığını buna karşılık hasarın çoğunlukla belirli bir bölgede yoğunlaştığını göstermektedir. CFRP, çatlak oluşumunu geciktirmede etkili olmakla birlikte, çatlak oluştuktan sonra yükün kademeli aktarımını sağlayamadığından sünek bir hasar gelişimi oluşturmamıştır.

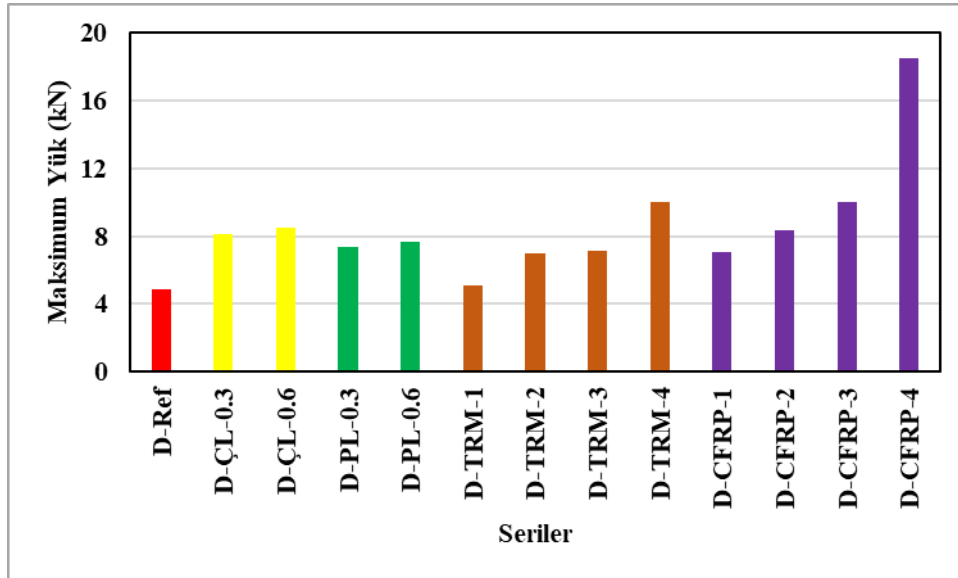
6. DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI VE YORUMLANMASI

Bu çalışmada düşük ve normal dayanımlı beton kirişlerin eğilme davranışı incelenmiştir. Üretilen kirişler üç nokta eğilme deneyine tabi tutulmuş ve deneyler sonucunda maksimum yük, rijitlik, maksimum deplasman, enerji yutma kapasitesi ve eğilme dayanımı gibi parametreler elde edilmiştir. Elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek, lif katkısı ve sargı tiplerinin beton kirişlerin performansı üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

6.1. Maksimum Yüklerin Karşılaştırılması

6.1.1. Düşük dayanımlı numunelerde maksimum yük değerleri

Çelik ve polipropilen lifli ve farklı sargı desenlerinde TRM ve CFRP ile sargılanan kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen maksimum yük değerleri referans numune ile birlikte karşılaştırmalı olarak Şekil 6.1’de verilmiştir.



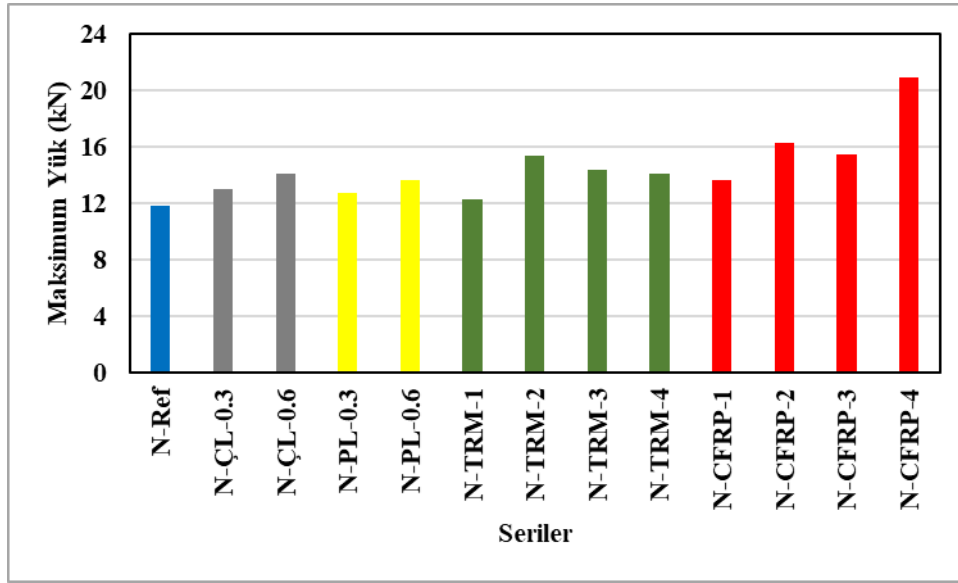
Şekil 6.1. Düşük Dayanımlı Kirişlerin Maksimum Yük Değerleri

Karşılaştırmalı olarak verilen değerler incelendiğinde; farklı sargılama yöntemlerinin kirişlerin maksimum yük taşıma kapasitesi üzerinde önemli etkiler oluşturduğu görülmektedir. Referans numuneye kıyasla çelik lif katkılı ve polipropilen lif katkılı kirişlerde sınırlı ancak düzenli artışlar elde edilirken, TRM ve özellikle CFRP ile sargılanan kirişlerde çok daha belirgin kapasite artışı gözlenmiştir. Çelik lifli kirişlerde %0.3 ve %0.6 oranlarında benzer seviyelerde artış olurken, polipropilen lifli kirişlerde artışın daha sınırlı kaldığı görülmüştür. TRM ile sargılanan numunelerde sarım desenine bağlı olarak kademeli bir artış görülmüş ve özellikle TRM-4 numunesinde daha yüksek kapasite değerlerine ulaşılmıştır. En yüksek maksimum yük değerleri CFRP ile sargılanan numunelerde elde edilmiştir. CFRP-1’den CFRP-

4'e doğru gidildikçe kapasitenin düzenli olarak arttığı ve her yüzeyin kaplı olduğu CFRP-4'te en yüksek değere ulaşıldığı görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, lif katkılarının kapasite artışına sınırlı katkı sağladığı, buna karşılık sargı desenlerinin, özellikle CFRP uygulamasının, eğilme performansını çok daha etkin bir şekilde iyileştirdiği anlaşılmaktadır.

6.1.2. Normal dayanımlı numunelerde maksimum yük değerleri

Farklı lif katkıları ve farklı sargı desenlerine sahip normal dayanımlı beton sınıfına sahip kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen maksimum yük değerleri referans numune ile birlikte karşılaştırmalı olarak Şekil 6.2'de verilmiştir.



Şekil 6.2. Normal Dayanımlı Kirişlerin Maksimum Yük Değerleri

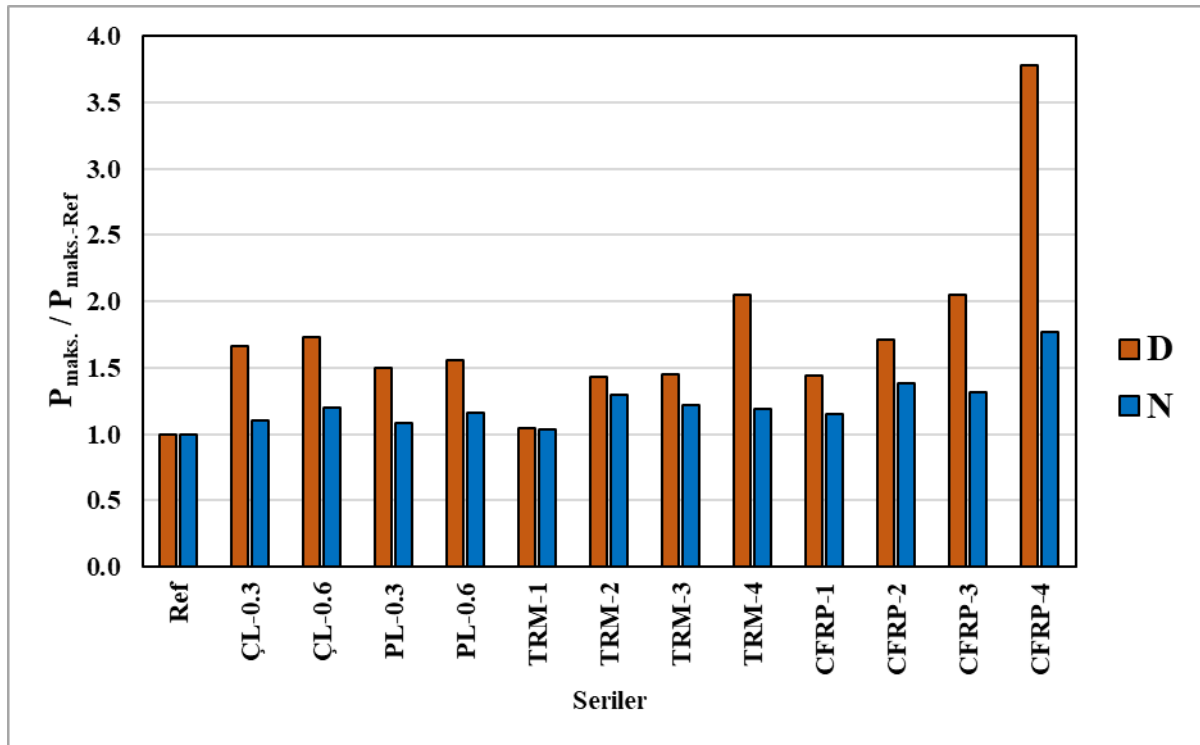
Normal dayanımlı beton sınıfında farklı lif ve sargı desenlerinin maksimum yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri Şekil 6.2'de açıkça görülmektedir. Referans numuneye kıyasla çelik ve polipropilen lif katkılı kirişlerde düzenli bir artış elde edilmiştir. Polipropilen lifli kirişlerdeki bu artış, çelik lifli kirişlere göre daha sınırlı kalmıştır. TRM ile sargılanan kirişlerde sargı desenine bağlı olarak kapasitede belirgin iyileşmeler meydana gelmiş ve özellikle TRM-2 ve TRM-3 numunelerinde en yüksek değerlere ulaşılmıştır. CFRP ile sargılanan kirişlerde ise en yüksek maksimum yük değerleri elde edilmiş, CFRP-1'den CFRP-4'e doğru gittikçe artmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, normal dayanımlı beton sınıfındaki kirişlerde lif katkılarının kapasite artışına katkısı sınırlı kalırken, sargılanan kirişlerde özellikle de CFRP ile sargılanan kirişlerin yük taşıma kapasitesini çok daha etkin bir şekilde artırdığı anlaşılmaktadır.

6.1.3. Genel değerlendirme: maksimum yük

Farklı lif katkıları ve farklı sargı çeşidi ve desenlerine sahip kirişlerin maksimum yük değerleri, kendi beton sınıflarındaki referans numunelere oranlanarak normalize değerler elde edilmiştir. Şekil 6.3 incelendiğinde, maksimum yük değerlerinin referans numunelere oranlanmasıyla farklı lif oranları ve sargı desenlerinin göreceli performansları daha net bir şekilde ortaya konulmuştur.

Düşük dayanımlı beton sınıfında; referans numuneye göre, ÇL-0.3 ve ÇL-0.6 numunesi 1.7 kat, PL-0.3 numunesi 1.5 ve PL-0.6 numunesi 1.6 kat fazla performans göstermiştir. Sargılanan numunelerde bu oranlar TRM-1 için 1, TRM-2 için 1.4, TRM-3 için 1.5 ve TRM-4 için 2 kat bulunurken, CFRP-1 için 1.4, CFRP-2 için 1.7, CFRP-3 için 2.1 ve CFRP için ise 3.8 kat olarak bulunmuştur.

Normal dayanımlı beton sınıfında; referans numuneye göre, ÇL-0.3 numunesi için 1.1, ÇL-06 numunesi 1.2, PL-0.3 numunesi 1.1 ve PL-0.6 numunesi 1.2 kat fazla performans göstermiştir. Sargılanan numunelerde bu oranlar TRM-1 için 1, TRM-2 için 1.3, TRM-3 ve TRM-4 için 1.2 kat bulunurken, CFRP-1 için 1.2, CFRP-2 için 1.4, CFRP-3 için 1.3 ve CFRP-4 için ise 1.8 kat olarak bulunmuştur.



Şekil 6.3. Maksimum Yük Değerlerinin Referans Numuneye Göre Normalize Değerleri

Genel olarak değerlendirildiğinde; düşük dayanımlı beton sınıfında üretilen numuneler normal dayanımlı beton sınıfında üretilen numunelere göre hem lif katkılı hem de sargılanan numunelerde daha etkili olduğu görülmüştür. Sargılama yöntemlerinin daha etkili olduğu, özellikle CFRP uygulamasının, kirişlerin taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırdığı ve bu etkinin düşük dayanımlı betonlarda daha belirgin olduğu görülmektedir.

6.2. Rijitlik Değerlerinin Karşılaştırılması

Rijitlik, bir yapı elemanın uygulanan yük nedeniyle oluşan deplasmana direnci olarak tanımlanmakta olup özellikle eğilme davranışının değerlendirilmesinde önemli bir parametre olarak kabul edilmektedir. Beton kirişlerde rijitlik hem çatlak oluşumu hem de kullanım sınır durumu açısından kritik bir göstergedir. Bu bölümde, farklı beton sınıfları, lif katkıları (çelik ve polipropilen) ile TRM ve CFRP gibi sargılama desenlerinin kirişlerin rijitlik davranışı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar şekiller aracılığıyla değerlendirilmiştir.

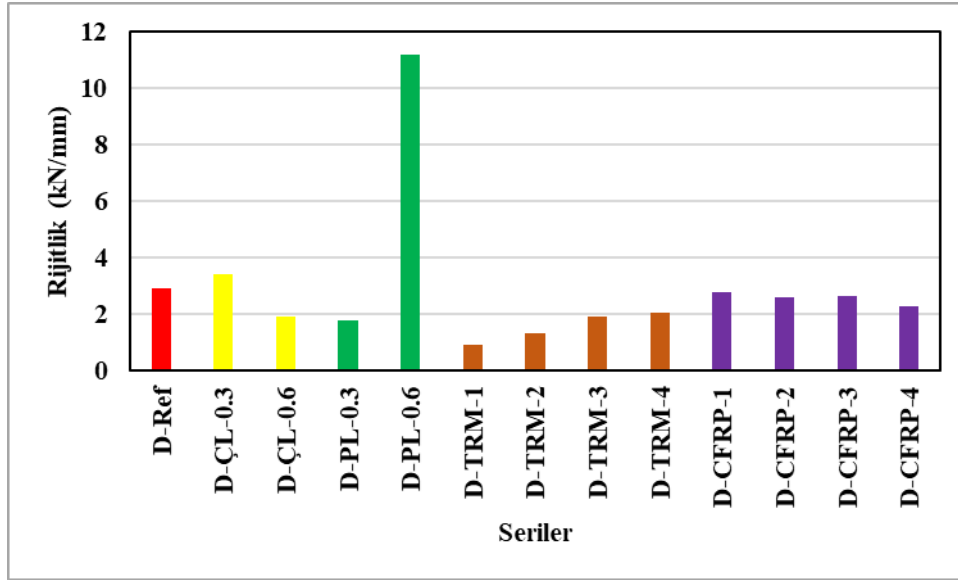
6.2.1. Düşük dayanımlı numunelerde rijitlik değerleri

Farklı lif katkısı ve farklı malzeme ve sargılama desenlerine sahip kirişlerin rijitlik değerleri referans değeri ile birlikte Şekil 6.4'te verilmiştir. Değerler incelendiğinde; lif katkısı ve farklı sargılama desenlerine sahip kirişlerin rijitlik davranışı üzerinde önemli etkiler olduğu görülmektedir. Referans numuneye kıyasla çelik lif katkılı kirişlerde rijitlikte belirli artışlar gözlenirken, %0.6 oranında bu artışın daha sınırlı kaldığı görülmüştür. Polipropilen lifli kirişlerde ise özellikle %0.6 oranında çok belirgin bir rijitlik artışı elde edilmiştir. TRM ile sargılanan kirişlerde rijitlik değerlerinin sarım desenine bağlı olarak kademeli şekilde arttığı görülürken, CFRP ile sargılanan numunelerde daha dengeli ancak sınırlı artışlar elde edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, lif katkılarının özellikle rijit davranışı iyileştirmede etkili olduğu, sargılama yöntemlerinin ise daha kontrollü ve sınırlı katkı sağladığı belirlenmiştir.

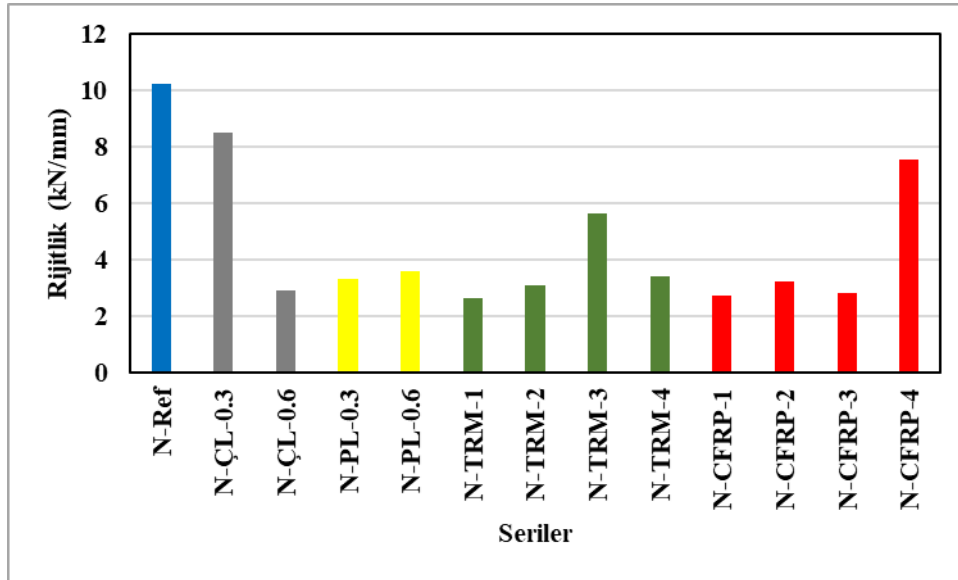
6.2.2. Normal dayanımlı numunelerde rijitlik değerleri

Farklı lif katkıları ve farklı sargı çeşidi ve desenlerine sahip kirişlerin rijitlik değerleri N sınıfı referans değeri ile birlikte Şekil 6.5'te verilmiştir. Değerler incelendiğinde normal dayanımlı beton sınıfında üretilen farklı lif ve katkısı ve farklı sargılama malzemesi ve desenlerinde üretilen kirişlerin farklı etkiler oluşturduğu görülmektedir. Referans numune en yüksek rijitlik değerlerinden birine sahipken, çelik lif katkılı kirişlerde %0.3 oranında yüksek rijitlik korunurken, %0.6 oranında belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Polipropilen lif katkılı kirişlerde ise referansa kıyasla daha düşük ancak dengeli rijitlik değerleri elde edilmiştir. TRM

ile sargılanan numunelerde rijitlik değerinin sarım desenine bağlı olarak arttığı ve özellikle TRM-3 numunesinde daha yüksek bir rijitlik elde edildiği görülmüştür. CFRP ile sargılanan kirişlerde ise genel olarak referansa göre daha düşük rijitlik değerleri gözlenmiş, ancak CFRP-4 numunesinde belirgin bir artış oluşmuştur. Genel olarak değerlendirildiğinde, lif katkısı ve sargı cinsi ve desenlerinin rijitlik üzerindeki etkisinin doğrusal olmadığı, sargı deseni ve sargı malzeme türüne bağlı olarak değiştiği söylenebilir.



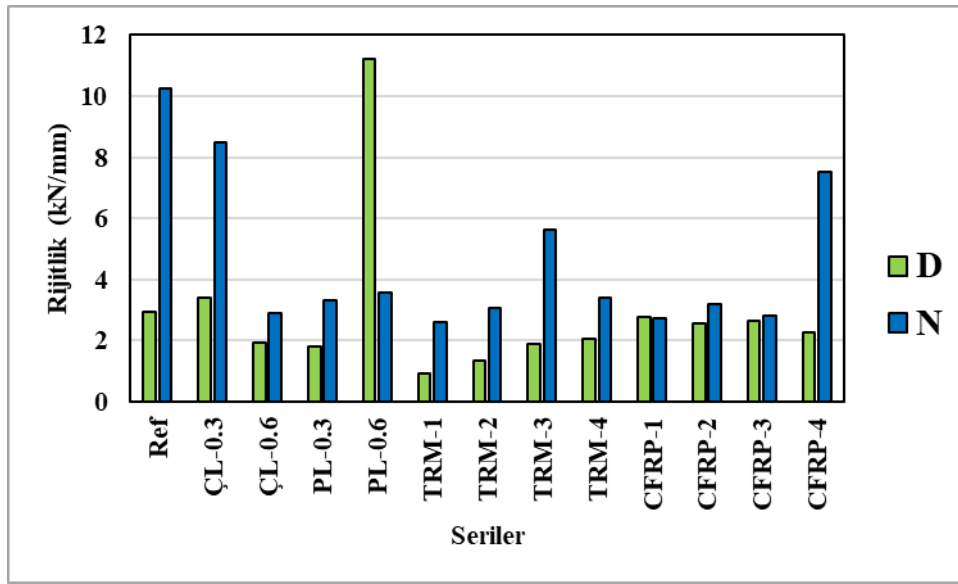
Şekil 6.4. Düşük Dayanımlı Kirişlerin Rijitlik Değerleri



Şekil 6. 5. Normal Dayanımlı Kirişlerin Rijitlik Değerleri

6.2.3. Genel değerlendirme: rijitlik

Düşük ve normal dayanımlı beton sınıflarında farklı lif katkıları ve oranları ve farklı sargı malzemesi ve desenlerine sahip kirişlerin rijitlik değerleri Şekil 6.6'da verilmiştir. Değerler incelendiğinde; rijitlik değerlerinin kullanılan malzeme türü ve sargılama desenine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Lif katkılı kirişlerde özellikle PL-0.6 numunesinde düşük dayanımlı beton sınıfında belirgin bir rijitlik artışı elde edilirken, çelik lifli numunelerde bu artış daha sınırlı kalmıştır. TRM ile sargılanan kirişlerde genel olarak rijitlik değerlerinin referans numuneye göre azaldığı, ancak sarım desenine bağlı olarak kısmi iyileşmelerin olduğu görülmektedir. CFRP ile sargılanan kirişlerde ise daha dengeli bir davranış gözlenmiş, özellikle CFRP-4 numunesinde N sınıfında yüksek rijitlik değerlerine ulaşılmıştır. Genel olarak bir değerlendirme yapıldığında; rijitlik üzerindeki etkinin doğrusal olmadığı ve hem lif katkısı hem de sargılama yöntemlerine bağlı olarak farklı eğilimler gösterdiği belirlenmiştir.



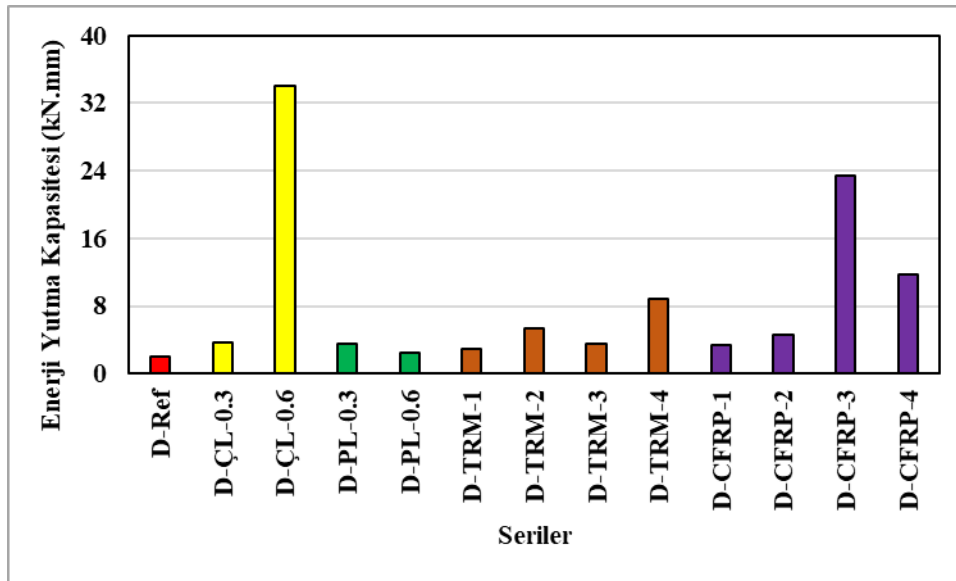
Şekil 6.6. Tüm Numunelerin Rijitlik Değerleri

6.3. Enerji Yutma Kapasitelerinin Karşılaştırılması

Beton kirişlerde enerji yutma kapasitesi, çatlak gelişimi, lif katkısı ve sargı uygulamalarının etkinliğini ortaya koyan önemli bir göstergedir. Bu bölümde, farklı beton sınıfları, lif türleri (çelik ve polipropilen) ile TRM ve CFRP gibi sargılama desenlerinin kirişlerin enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar şekiller aracılığıyla değerlendirilmiştir.

6.3.1. Düşük dayanımlı numunelerde enerji yutma kapasiteleri

Düşük dayanımlı beton sınıfında farklı lif ve katkı oranlarında, farklı sargı malzemesi ve sargı desenlerinde üretilen kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen enerji yutma kapasitesi değerleri referans numune değerleri ile birlikte Şekil 6.7’de verilmiştir. Değerler incelendiğinde; düşük dayanımlı beton sınıfında üretilen kirişlerde enerji yutma kapasitesinin kullanılan malzeme ve sargı desenine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Referans numuneye kıyasla çelik lif katkılı kirişlerde özellikle %0.6 oranında çok yüksek bir artış elde edilmiş ve en yüksek değerlerden biri bu seride gözlenmiştir. Polipropilen lif katkılı kirişlerde ise artış daha sınırlı kalmış ve lif oranındaki artışın enerji yutma kapasitesine etkisinin düşük olduğu görülmüştür. TRM ile sargılanan kirişlerde sargı desenine bağlı olarak kademeli bir artış görülmüş ve özellikle TRM-4 numunesinde referans numuneye göre 4.4 kat daha yüksek değer elde edilmiştir. CFRP ile sargılanan kirişlerde ise enerji yutma kapasite değerlerinin belirgin şekilde arttığı ve özellikle CFRP-3 ve CFRP-4 numunelerinde yüksek değerlere (11.5 ve 5.7 kat) ulaşıldığı görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, enerji yutma kapasitesi açısından en etkili olan serinin %0.6 çelik lif katkılı ve CFRP ile tam veya geniş sargılı olan serisinde elde edildiği görülmüştür.

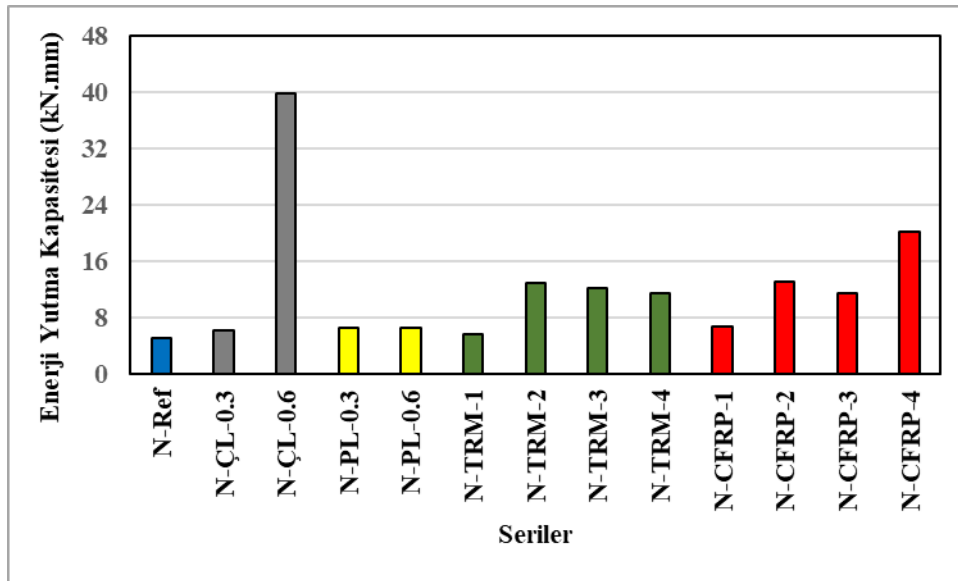


Şekil 6.7. Düşük Dayanımlı Kirişlerin Enerji Yutma Kapasitesi Değerleri

6.3.2. Normal dayanımlı numunelerde enerji yutma kapasiteleri

Normal dayanımlı beton sınıfında farklı lif ve katkı oranlarında, farklı sargı malzemesi ve sargı desenlerinde üretilen kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen enerji yutma kapasitesi değerleri referans numune değerleri ile birlikte Şekil 6.8’de verilmiştir. Değerler incelendiğinde; referans numuneye kıyasla çelik lif katkılı kirişlerde özellikle %0.6 lif oranında

çok yüksek bir artış (7.9 kat) elde edilmiş ve bu seri en yüksek enerji kapasitesine ulaşmıştır. Polipropilen lifli numunelerde ise referans numuneye oranla %0.3 ve %0.6 oranlar için yaklaşık 1.3 kat artış olmuştur. TRM ile sargılanan kirişlerde sarım desenine bağlı olarak belirgin artışlar gözlenmiş ve özellikle TRM-2, TRM-3 ve TRM-4 numunelerinde sırasıyla 2.6, 2.4 ve 2.3 kat daha yüksek enerji yutma kapasitesi değerleri elde edilmiştir. CFRP ile sargılanan kirişlerde de enerji yutma kapasitelerinin önemli ölçüde arttığı ve özellikle CFRP-4 numunesinde referans numuneye göre 4 kat, TRM-4 numunesine göre de 1.8 kat daha yüksek değerler bulunmuştur. Genel olarak değerlendirildiğinde, enerji yutma kapasitesi açısından en etkili iyileşmenin çelik lif katkısı ve CFRP ile her yüzeyin sargılandığı sarım deseninde elde edildiği görülmüştür.

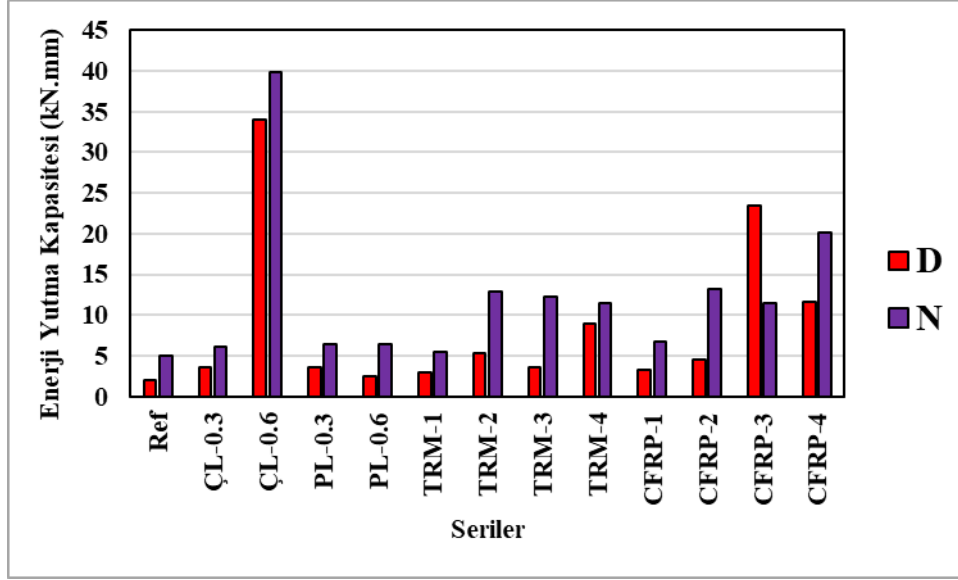


Şekil 6.8. Normal Dayanımlı Kirişlerin Enerji Yutma Kapasitesi Değerleri

6.3.3. Genel değerlendirme: enerji yutma kapasitesi

Düşük ve normal dayanımlı beton sınıfında farklı lif ve katkı oranlarında, farklı sargı malzemesi ve sargı desenlerinde üretilen kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen enerji yutma kapasitesi değerleri referans numune değerleri ile karşılaştırmalı olarak Şekil 6.9'da verilmiştir. Değerler incelendiğinde hem düşük hem de normal dayanımlı beton sınıfında üretilen kirişler için enerji yutma kapasitesi değerlerinin kullanılan lif türü ve oranı, sargı malzemesi ve desenine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği görülmektedir. Referans numuneye oranla çelik lif katkılı kirişlerde özellikle %0.6 lif oranında her iki beton sınıfında da çok belirgin bir artış elde edilmiş (D sınıfı için 16.7 kat ve N sınıfı için 7.9 kat) ve en yüksek enerji yutma kapasitesi değerleri bu seride gözlenmiştir. Polipropilen lif katkılı kirişlerde ise artış daha sınırlı kalmış ve lif oranındaki artışın etkisinin düşük olduğu görülmüştür. TRM ile sargılanan numunelerde her iki beton sınıfı için tüm sargı desenlerinde referans değerlerin üzerinde

değerler elde edilmiştir. Özellikle TRM-2, TRM-3 ve TRM-4 serilerinde yüksek değerler bulunmuştur. En yüksek artışlar CFRP ile sargılanan numunelerde gözlenmiştir. Özellikle CFRP-3 ve CFRP-4 numunelerinde yüksek enerji yutma kapasitesi değerlerine ulaşılmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, enerji yutma kapasitesi açısından en etkili serinin çelik lif katkısı ve CFRP ile her yüzeyin sargılandığı seri olduğu görülmüştür.



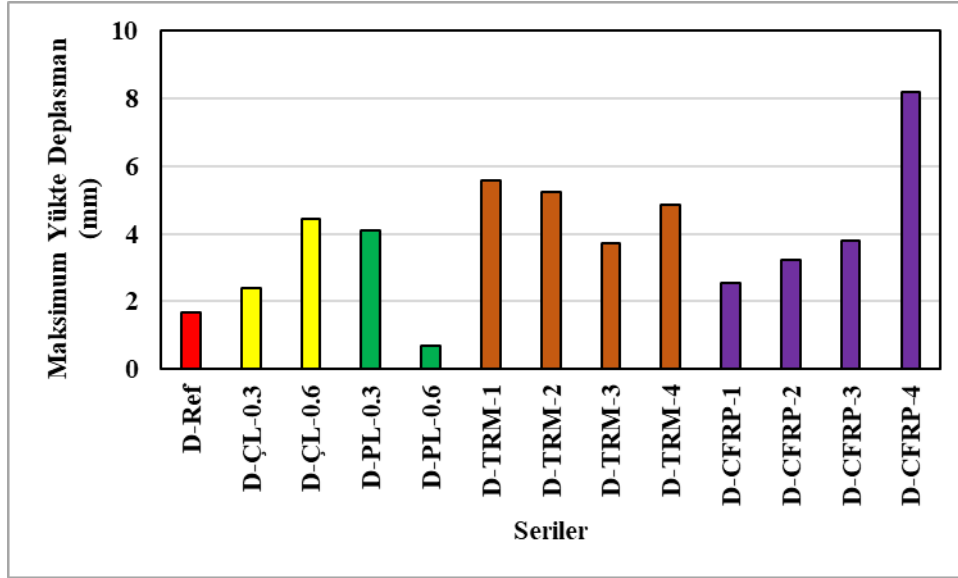
Şekil 6.9. Tüm Numunelerin Enerji Yutma Kapasitesi Değerleri

6.4. Maksimum Yükte Deplasman Değerlerinin Karşılaştırılması

Maksimum yükte deplasman, bir yapısal elemanın en yüksek yük değerine ulaştığı andaki yer değiştirme miktarını ifade etmektedir. Bu bölümde, farklı beton sınıfları (D ve N), farklı lif çeşidi ve oranları (çelik ve polipropilen, %0.3-%0.6) ile TRM ve CFRP sargı malzemelerinin farklı sargı desenlerinde üretilen kirişlerin maksimum taşıma gücündeki deplasman değerleri karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar şekiller aracılığıyla değerlendirilmiştir.

6.4.1. Düşük dayanımlı numunelerde maksimum yükte deplasman

Düşük dayanımlı beton sınıfında farklı lif ve katkı oranları, farklı sargı malzemesi ve sargı desenlerine sahip kirişlerin maksimum yük altındaki deplasman değerleri referans numune değeri ile birlikte Şekil 6.10'da verilmiştir.

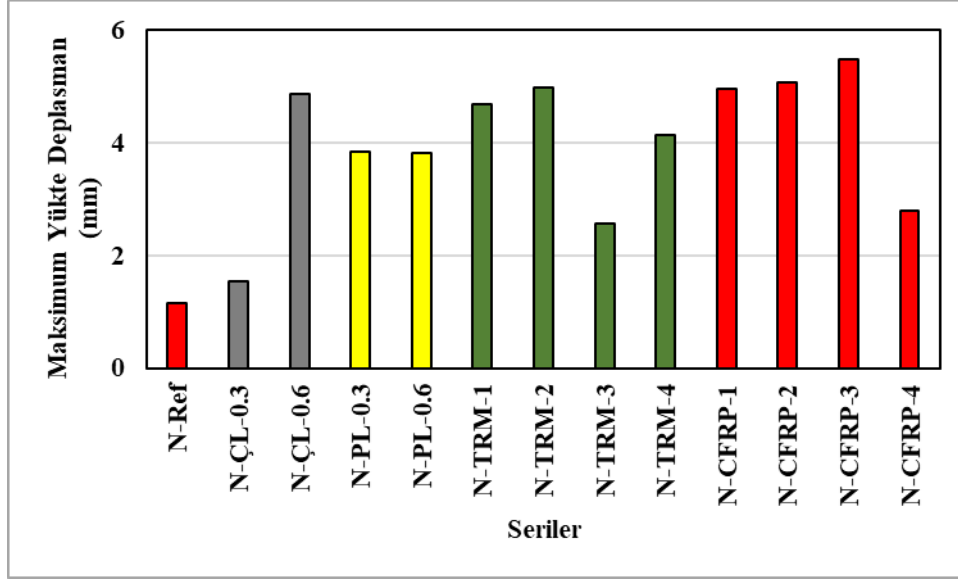


Şekil 6.10. Düşük Dayanımlı Kirişlerin Maksimum Yükle Deplasman Değerleri

Referans numune ile karşılaştırıldığında çelik lif katkılı kirişlerde lif oranının artmasıyla deplasman değerlerinin arttığı, özellikle %0.6 çelik lif oranında daha sünek bir davranış sergilendiği görülmüştür. Polipropilen lifli numunelerde ise %0.3 lif oranında artış görülürken, %0.6 lif oranında deplasman değerinin oldukça düşük kaldığı gözlenmiştir. TRM ile sargılanan kirişlerde genel olarak yüksek deplasman değerleri elde edilmiş, özellikle TRM-1 ve TRM-2 numunelerinde belirgin sünek davranış görülmüştür. CFRP ile sargılanan kirişlerde ise sarım desenleri değiştikçe deplasman değerlerinin kademeli olarak yükseldiği ve CFRP-4 numunesinde en yüksek deplasman değerine ulaşıldığı görülmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, maksimum deplasman açısından en etkili iyileşmenin CFRP ile her yüzeyin sarıldığı numunede elde edildiği anlaşılmaktadır.

6.4.2. Normal dayanımlı numunelerde maksimum yükle deplasman

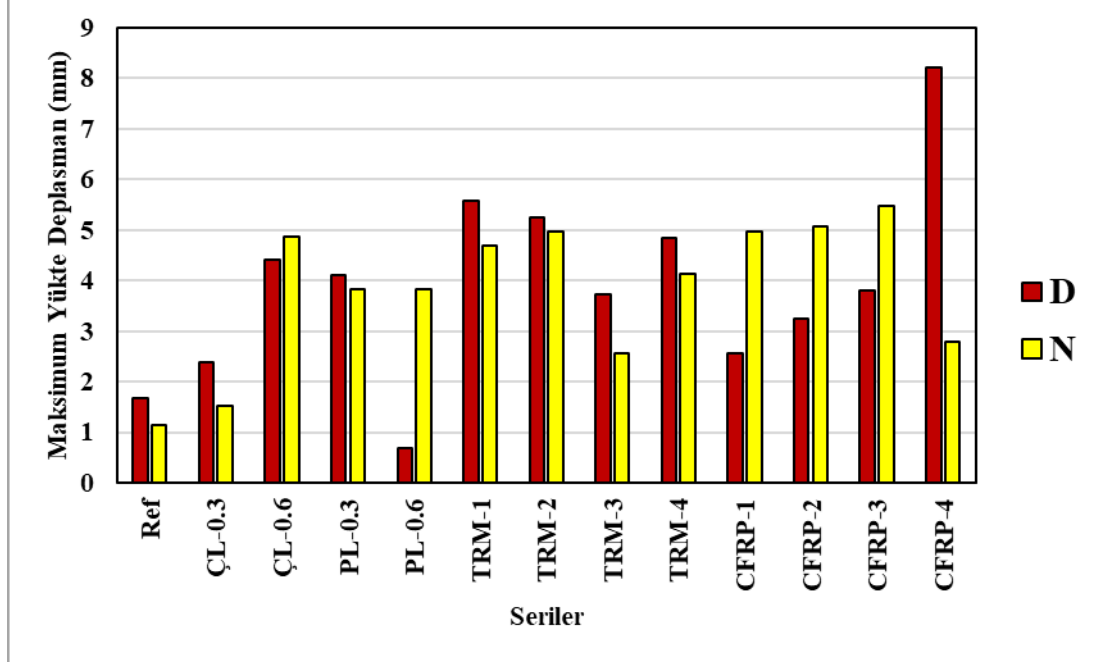
Normal dayanımlı beton sınıfında farklı lif ve katkı oranları, farklı sargı malzemesi ve sargı desenlerine sahip kirişlerin maksimum yük altındaki deplasman değerleri referans numune değeri ile birlikte Şekil 6.11’de verilmiştir. Referans numuneye oranla çelik lif katkılı kirişlerde lif oranının artmasıyla deplasman değerlerinde belirgin bir artış meydana gelmiştir. Polipropilen lif katkılı kirişlerde ise referansa göre daha yüksek ancak birbirine yakın deplasman değerleri gözlenmiştir. TRM ile sargılanan numunelerde genel olarak yüksek deplasman değerleri elde edilmiş, özellikle TRM-1 ve TRM-2 numunelerinin daha sünek bir davranış sergilediği görülmüştür. CFRP ile sargılanan kirişlerde ise referansa göre yüksek deplasman değerleri elde edilmiştir.



Şekil 6.11. Normal Dayanımlı Kirişlerin Maksimum Yükle Deplasman Değerleri

6.4.3. Genel değerlendirme: maksimum yükle deplasman

Düşük ve normal dayanımlı beton sınıfında farklı lif ve katkı oranları, farklı sargı malzemesi ve sargı desenlerine sahip kirişlerin maksimum yük altındaki deplasman değerleri referans numune değeri ile birlikte karşılaştırmalı olarak Şekil 6.12’de verilmiştir.



Şekil 6.12. Tüm Numunelerin Maksimum Yükle Deplasman Değerleri

Değerler incelendiğinde, maksimum yük altındaki deplasman değerlerinin hem beton sınıfına hem de kullanılan lif çeşidi ve oranı ve sargı malzemesi ve desenine bağlı olarak önemli farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Çelik lif katkılı numunelerin referans numuneye göre her

iki beton sınıfında da daha sünek bir davranış sergilediği görülmektedir. Polipropilen lif katkılı kirişlerde ise %0.3 lif oranında dengeli bir artış gözlenirken, %0.6 lif oranında düşük dayanımlı betonda belirgin bir düşüş meydana gelmiştir, normal dayanımlı betonda ise daha yüksek değer elde edilmiştir. TRM ile sargılanan numunelerde her iki beton sınıfı için de genel olarak yüksek deplasman değerleri gözlenmiştir. Özellikle TRM-1 ve TRM-2 numunelerinde sünek davranışın arttığı görülmüştür. CFRP ile sargılanan kirişlerde ise sarım desenine bağlı olarak farklı eğilimler gözlenmiştir. CFRP-4 numunesinde düşük dayanımlı beton grubu için en yüksek deplasman değeri elde edilirken, normal dayanımlı beton grubu için ise en düşük deplasman değeri elde edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde; maksimum yük altındaki deplasman açısından lif çeşidi ve oranı, sargılama malzemesi ve deseninin kirişlerin süneklik davranışı üzerinde belirleyici olduğu ve bu etkinin beton sınıfına bağlı olarak değiştiği görülmektedir.

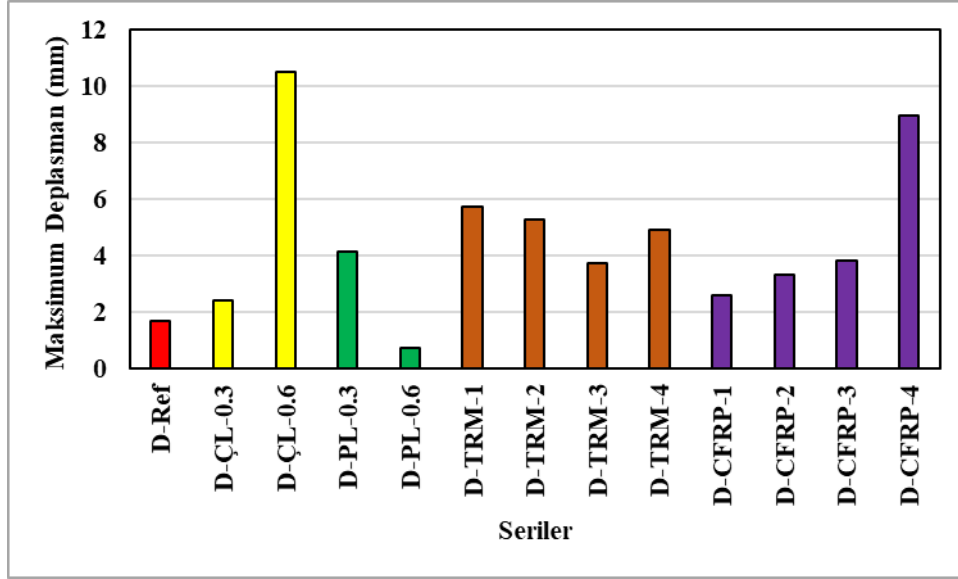
6.5. Maksimum Deplasman Değerlerinin Karşılaştırılması

Beton kirişlerde maksimum deplasman, lif katkısı ve sargı malzemesi ve desenlerinin sünek davranış üzerindeki etkilerini değerlendirmede önemli bir gösterge olarak kullanılmaktadır. Bu bölümde farklı beton sınıfları, farklı lif türleri ve oranları, farklı sargılama malzemesi ve desenlerinde üretilen kirişlerin eğilme deneyi sonucunda elde edilen maksimum deplasman değerleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar şekiller aracılığıyla değerlendirilmiştir.

6.5.1. Düşük dayanımlı numunelerde maksimum deplasman

Düşük dayanımlı beton sınıfında farklı lif ve katkı oranları, farklı sargı malzemesi ve sargı desenlerine sahip kirişlerin maksimum deplasman değerleri referans numune değeri ile birlikte Şekil 6.13'te verilmiştir. Referans numuneyle karşılaştırıldığında çelik lif katkılı kirişlerde özellikle %0.6 lif oranında çok belirgin bir artış elde edilmiş ve en yüksek deplasman değerlerinden biri bu seride gözlenmiştir. Polipropilen lif katkılı kirişlerde %0.3 lif oranında artış görülürken, %0.6 lif oranında deplasman değerinin çok düşük kaldığı ve en düşük deplasman değerine sahip olduğu görülmektedir. TRM ile sargılanan kirişlerde genel olarak yüksek deplasman değerleri elde edilmiş, özellikle TRM-1 ve TRM-2 numunelerinde daha sünek bir davranış sergilediği görülmüştür. CFRP ile sargılanan kirişlerde ise sarım deseni değiştikçe deplasman değerlerinin kademeli olarak yükseldiği ve CFRP-4 numunesinde en yüksek değere ulaşıldığı belirlenmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, maksimum deplasman açısından lif katkısı ve sargılama desenlerinin kirişlerin sünek davranışı üzerinde

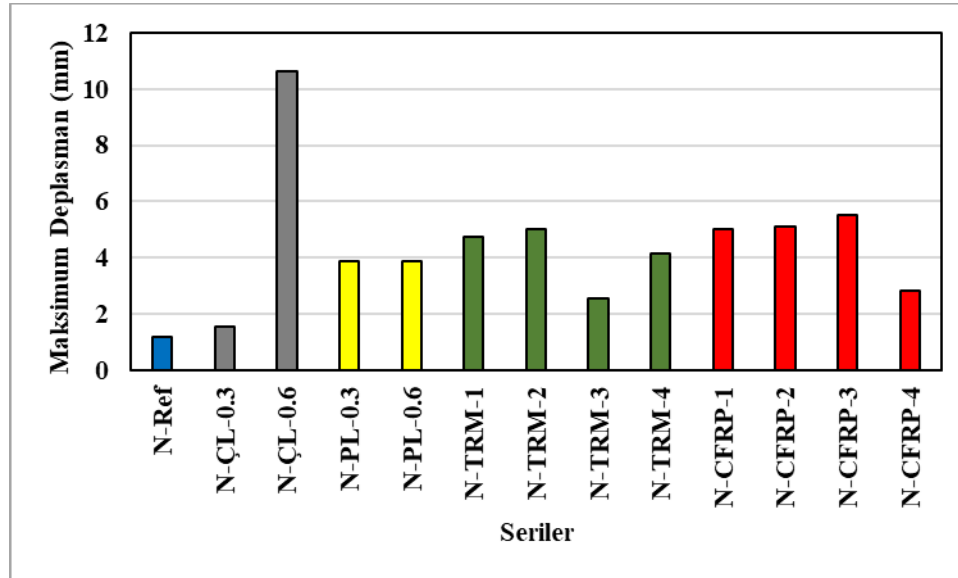
belirleyici olduğu ve özellikle şekilden de görüleceği üzere bazı uygulamaların sünekliği önemli ölçüde arttırdığı anlaşılmaktadır.



Şekil 6.13. Düşük Dayanımlı Kirişlerin Maksimum Deplasman Değerleri

6.5.2. Normal dayanımlı numunelerde maksimum deplasman

Normal dayanımlı beton sınıfında farklı lif ve katkı oranları, farklı sargı malzemesi ve sargı desenlerine sahip kirişlerin maksimum deplasman değerleri referans numune değeri ile birlikte Şekil 6.14'te verilmiştir.

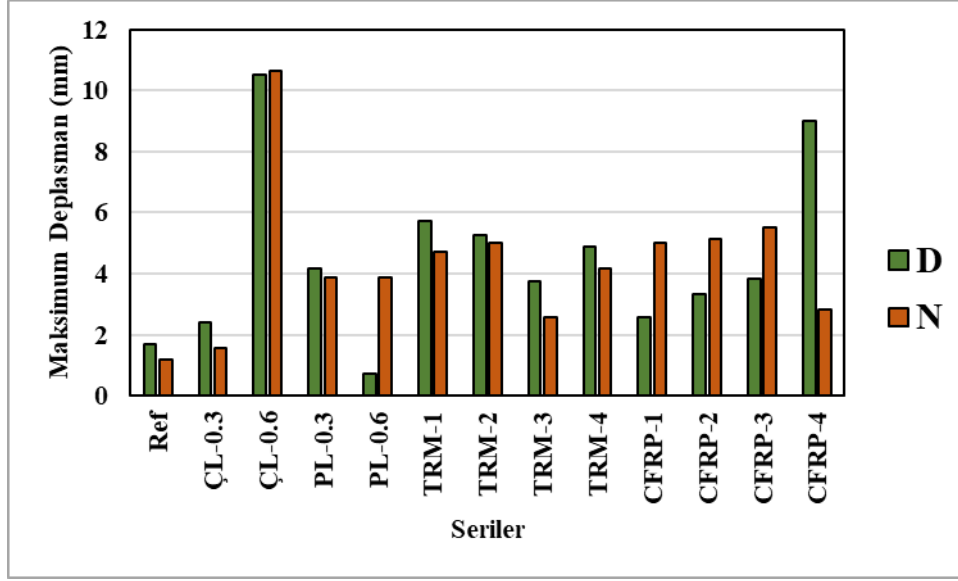


Şekil 6.14. Normal Dayanımlı Kirişlerin Maksimum Deplasman Değerleri

Normal dayanıma sahip numunelerde referans numune ile karşılaştırıldığında tüm seriler için deplasman değerleri referans deplasman değerinden fazla çıkmıştır. Çelik lif katkılı kirişlerde özellik %0.6 lif oranında en yüksek deplasman değeri elde edilmiştir. Polipropilen lif katkılı kirişlerde ise referansa göre yüksek ancak birbirine yakın deplasman değerleri gözlenmiştir. TRM ile sargılanan kirişlerde genel olarak yüksek deplasman değerleri elde edilmiş ve özellikle TRM-1 ve TRM-2 numunelerinde sünek davranış artmıştır. CFRP ile sargılanan numunelerde ise genel olarak yüksek deplasman değerleri korunmuş, ancak CFRP-4 numunesinde diğer CFRP serilerine göre daha düşük bir değer elde edilmiştir.

6.5.3. Genel değerlendirme: maksimum deplasman

Düşük ve normal dayanımlı beton sınıfında farklı lif ve katkı oranları, farklı sargı malzemesi ve sargı desenlerine sahip kirişlerin maksimum deplasman değerleri referans numune değerleri ile birlikte Şekil 6.15'te verilmiştir. Çelik lif katkılı kirişlerin referans numune değerlerinden fazla deplasman değerlerine sahip olduğu, özellikle %0.6 lif katkısı olan seride en büyük deplasman değerinin elde edildiği görülmektedir. Polipropilen lifli kirişlerde %0.3 lif oranında dengeli bir artış görülürken, %0.6 lif oranında düşük dayanımlı seride düşük bir değer elde edilmesine rağmen normal dayanımlı seride deplasman değeri referans değerin üzerine çıkmıştır. TRM ile sargılanan kirişlerde elde edilen deplasman değerleri referans değerlerin üzerindedir. Özellikle TRM-1 ve TRM-2 numunelerinde sünek davranışın arttığı görülmektedir. CFRP ile sargılanan numuneler de ise her iki beton sınıfı ve farklı sargı desenlerinde tüm değerler referansın üzerindedir. CFRP-4 numunesinde düşük dayanımlı seride en yüksek deplasman elde edilmiş normal dayanımlı seride ise daha düşük bir değer gözlenmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, maksimum deplasman açısından lif katkısı ve sargı deseni ve malzemesinin kirişlerin süneklik davranışı üzerinde belirleyici olduğu ve bu etkinin beton sınıfına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği anlaşılmaktadır.



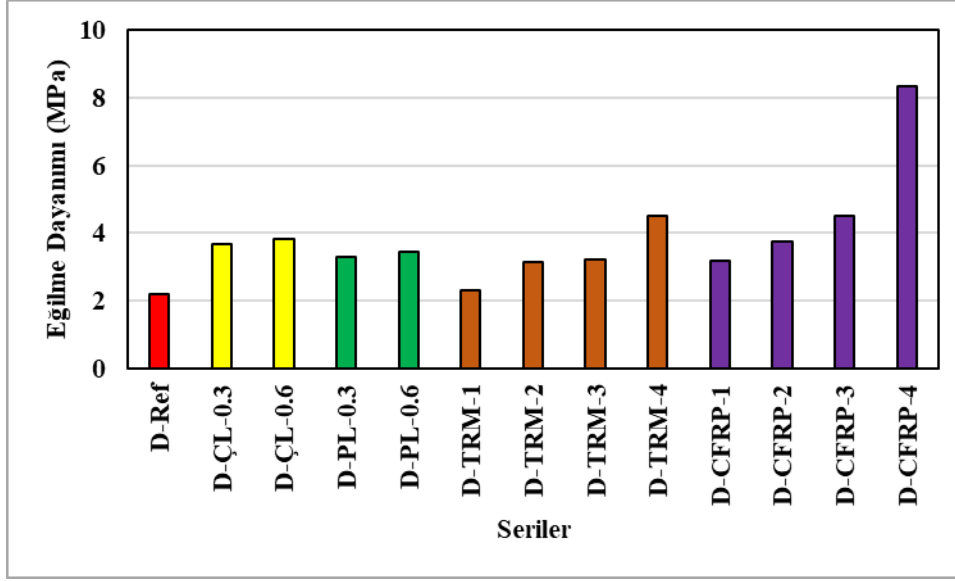
Şekil 6.15. Tüm Numunelerin Maksimum Deplasman Değerleri

6.6. Eğilme Dayanımı Değerlerinin Karşılaştırılması

Beton kirişlerde eğilme dayanımı hem taşıma gücü hem de çatlak gelişimi açısından yapısal performansın değerlendirilmesinde önemli bir göstergedir. Bu bölümde farklı beton sınıfları, farklı lif türleri ve oranları, farklı sargılama malzemesi ve desenlerinde üretilen kirişlerin eğilme dayanımı değerleri karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar şekiller aracılığıyla değerlendirilmiştir.

6.6.1. Düşük dayanımlı numunelerde eğilme dayanımı

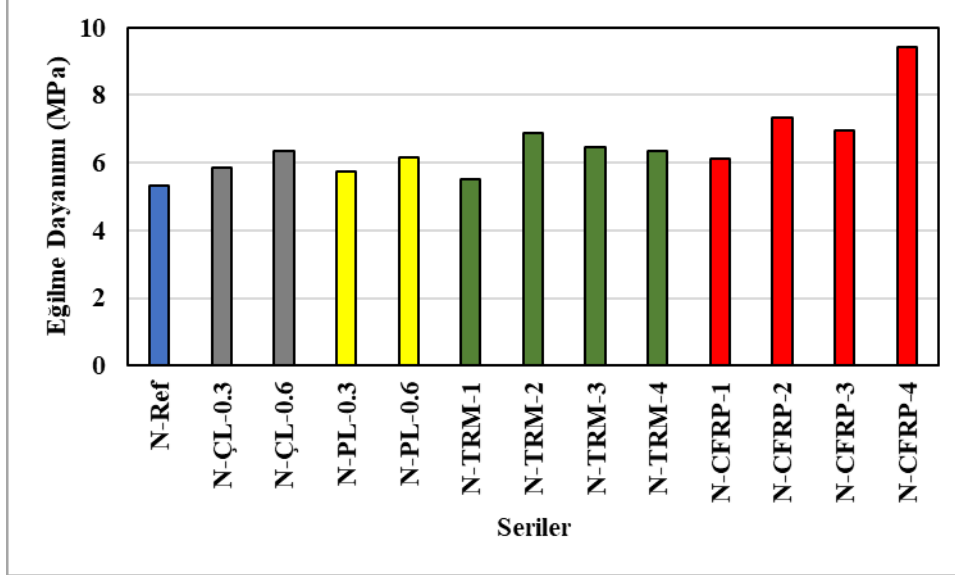
Düşük dayanımlı beton sınıfında farklı lif ve oranlarında, farklı sargı malzemeleri ve desenlerine sahip kirişlerin eğilme dayanımı değerleri referans numune değerleri ile birlikte Şekil 6.16’da verilmiştir. Değerler incelendiğinde; düşük dayanımlı beton sınıfında üretilen kirişlerde eğilme dayanımının lif türü ve sargılama malzemesi ve desenine bağlı olarak arttığı görülmektedir. Referans numuneye kıyasla çelik lif katkılı kirişlerde %0.3 ve %0.6 oranlarında belirgin bir artış (1.7 kat) elde edilmiştir. Polipropilen lifli kirişlerde bu artışlar 1.5-1.6 kat olmuştur. TRM ile sargılanan kirişlerde sarım desenine bağlı olarak kademeli bir artış gerçekleşmiş, özellikle TRM-4 numunesinde kendi serisi içinde en yüksek dayanım değerine ulaşılmıştır. En belirgin artışlar CFRP ile sargılanan kirişlerde görülmüştür. CFRP-4 numunesi düşük dayanımlı seride en yüksek eğilme dayanımı değerine ulaşmıştır.



Şekil 6.16. Düşük Dayanımlı Kirişlerin Eğilme Dayanımı Değerleri

6.6.2. Normal dayanımlı numunelerde eğilme dayanımı

Normal dayanımlı beton sınıfında farklı lif ve oranlarında, farklı sargı malzemeleri ve desenlerine sahip kirişlerin eğilme dayanımı değerleri referans numune değerleri ile birlikte Şekil 6.17’de verilmiştir.



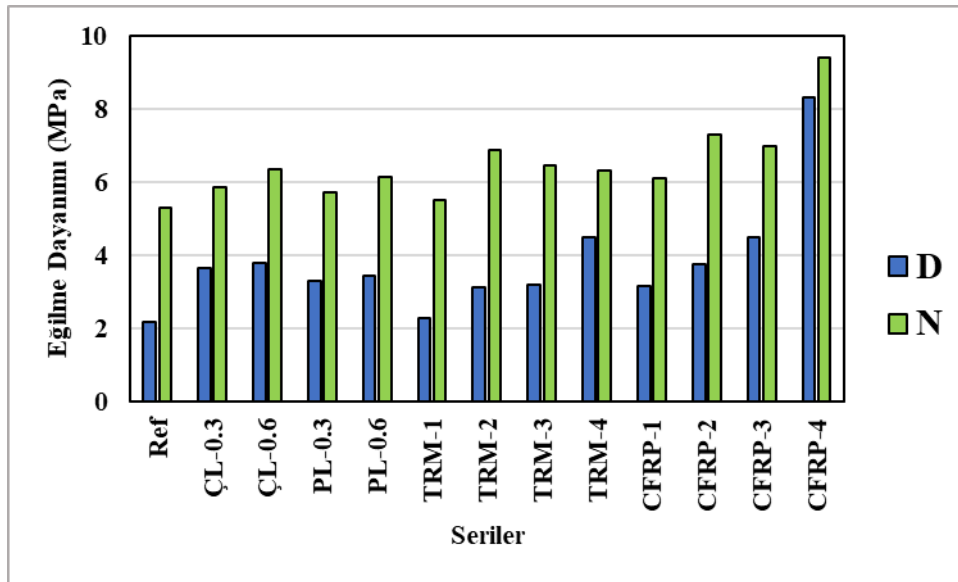
Şekil 6.17. Normal Dayanımlı Kirişlerin Eğilme Dayanımı Değerleri

Değerler incelendiğinde; çelik ve polipropilen lifli seride lif oranı arttıkça eğilme dayanımının arttığı görülmektedir. TRM ile sargılanan kirişlerde sarım desenine bağlı olarak eğilme dayanım değerlerinde artış olmuş, özellikle TRM-2 ve TRM-3 numunelerinde yüksek değerler elde edilmiştir. CFRP ile sargılanan numunelerde ise normal dayanımlı seri içerisinde en yüksek eğilme dayanımı değerleri oluşmuştur. Özellikle CFRP-4 numunesinde en yüksek

değere ulaşılmıştır. Bu aynı zamanda her yüzeyin sarılı olduğu sargı deseni için eğilme performansını iyileştirmede en etkili yöntem olduğunu göstermektedir.

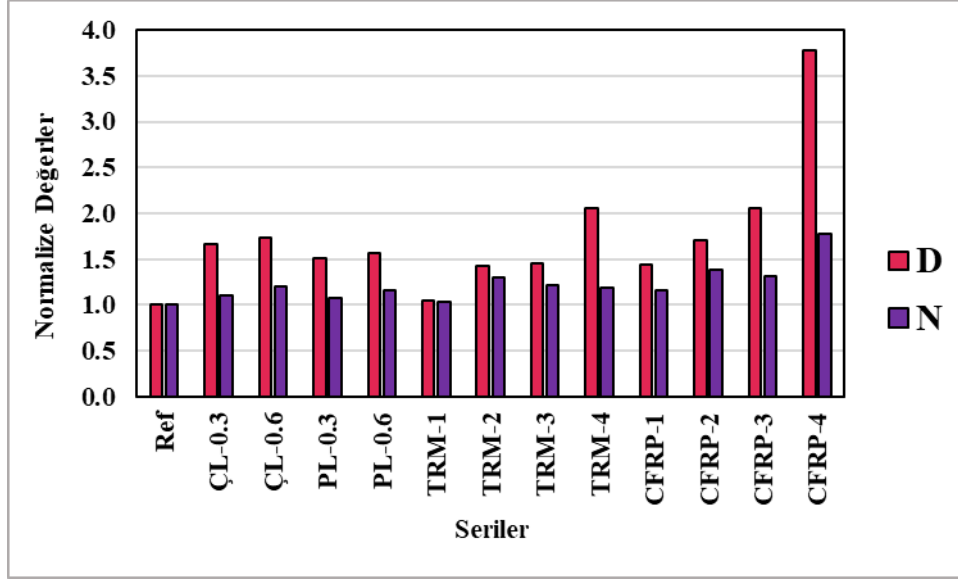
6.6.3. Genel değerlendirme: eğilme dayanımı

Düşük ve normal dayanımlı beton sınıfında farklı lif ve katkı oranları, farklı sargı malzemesi ve sargı desenlerine sahip kirişlerin eğilme dayanımı değerleri referans numune değerleri ile birlikte Şekil 6.18’te verilmiştir. Değerler incelendiğinde hem düşük hem de normal dayanımlı beton sınıflarında eğilme dayanımının kullanılan lif türü ve oranı, sargı malzemesi ve desenlerine bağlı olarak arttığı görülmektedir. Referans numuneye kıyasla çelik ve polipropilen lif katkılı kirişlerde %0.3 ve %0.6 oranlarında düzenli bir artış elde edilmiş ve lif oranı artışıyla da devam etmiştir. TRM ile sargılanan numunelerde sarım desenine bağlı olarak artışlar meydana gelmiştir. Düşük dayanımlı beton serisinde TRM-4 numunesi, normal dayanımlı beton serisinde de TRM-2 numunesi yüksek eğilme dayanımı değerlerine sahip olmuştur. CFRP ile sargılanan numunelerde de eğilme dayanımları artış göstermiş hem düşük hem de normal dayanımlı beton gruplarında CFRP-4 numunesi en yüksek eğilme dayanımına ulaşmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, lif katkılarının eğilme dayanımını arttırdığını, ancak sargılama yöntemlerinin özellikle de CFRP uygulamasının çok daha belirgin ve etkili bir iyileşme sağladığı görülmektedir.



Şekil 6.18. Tüm Numunelerin Eğilme Dayanımı Değerleri

Farklı lif katkıları ve farklı sargı çeşidi ve desenlerine sahip kirişlerin eğilme dayanımı değerleri, kendi beton sınıflarındaki referans numunelere oranlanarak normalize değerler elde edilmiştir (Şekil 6.19).



Şekil 6.19. Eğilme Dayanımı Değerlerinin Referans Numuneye Göre Normalize Değerleri

Değerler incelendiğinde; tüm katkı ve sargı malzeme ve desenlerinin referansa göre artış sağladığı görülmektedir. D sınıfı kirişler için artışlar genelde daha yüksek olup, N sınıfı kirişlerde daha sınırlı ama daha dengeli olmuştur. Lif ilaveli kirişlerde hem çelik hem de polipropilen lifli kirişlerin eğilme dayanımları referansa göre artmış, en fazla artış çelik lifli numunelerde görülmüştür. TRM ile sargılanan numunelerde özellikle de TRM-4 D sınıfında belirgin bir artış görülmüş olup sarım deseni arttıkça performansı da yükselmiştir. CFRP ile sargılanan numunelerin lif katkılı numunelere göre çok daha yüksek eğilme dayanımı değerlerine sahip olduğu ve düşük dayanımlı beton sınıfında artışın daha etkili olduğu görülmektedir.

7. SONUÇ ve ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Bu tez çalışması kapsamında, düşük (C16) ve normal dayanımlı (C30) beton kirişlerin eğilme davranışı; lif katkısı, lif oranı ve farklı sargı malzemesi ve sargı deseni açısından deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Lif katkısının betonun eğilme performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Özellikle çelik lif, polipropilen life kıyasla daha yüksek eğilme dayanımı ve enerji yutma kapasitesi sergilemiştir.
- Lif oranının %0.3'ten %0.6'ya çıkarılması, genel olarak tüm numunelerde: maksimum yük kapasitesini artırmış, çatlak ilerlemesini geciktirmiş ve sünek davranışı iyileştirmiştir.
- Polipropilen lifli kirişler, çatlak kontrolünde başarılı olmakla birlikte, çelik liflere göre daha düşük rijitlik ve dayanım artışı göstermiştir.
- Sargı uygulamaları hem malzeme hem de sargı deseni açısından tüm numunelerde performansı artırmıştır. Özellikle; CFRP sargı, en yüksek eğilme dayanım artışı sağlamıştır. TRM sargı da daha sünek davranış ve enerji yutma kapasitesi açısından iyi performans sergilemiştir.
- Sargılama tipleri karşılaştırıldığında; tam sargılama> U tipi sargılama> yan yüzey sargılama> alt yüzey sargılama şeklinde bir performans sıralaması elde edilmiştir. Tam sargılama hem dayanım hem de deplasman kapasitesi açısından en etkili yöntem olmuştur.
- Düşük dayanımlı (C16) kiriş numunelerde yapılan güçlendirmenin etkisi, normal dayanımlı (C30) kirişlere göre daha belirgin olmuştur.
- Enerji yutma kapasitesi açısından en iyi performans: yüksek lif oranı (%0.6), çelik lif ve tam sargı deseninde elde edilmiştir.
- Rijitlik açısından CFRP sargılı numuneler daha yüksek değerler verirken, TRM sargılı numuneler daha dengeli ve sünek davranış sergilemiştir.

7.2. Karşılaştırmalı Tablo

Tablo 7.1'de farklı lif katkısı ve oranları, sargı malzemesi ve desenleri ve beton sınıflarına sahip beton kirişlerin maksimum yük, rijitlik, enerji yutma kapasitesi ve eğilme dayanımı üzerindeki göreceli etkileri oklar yardımıyla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Tabloda yer alan ↑ : artış, ↑↑ : belirgin artış, ↑↑↑ : çok yüksek artış, → : sınırlı değişim veya ihmal edilebilir etkiyi ifade etmektedir.

Tablo 7.1. Performans Parametrelerinin Görelî Değişimlerinin Karşılaştırılması

Değişken	Maksimum Yük	Rijitlik	Enerji Yutma Kapasitesi	Eğilme Dayanımı	Genel performans
Çelik lif (%0.6)	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	Çok iyi
Çelik Lif (%0.3)	↑	↑	↑	↑	İyi
Polipropilen lif (%0.6)	↑	→	↑	↑	Orta-iyi
Polipropilen lif (%0.3)	→	→	↑	→	Orta
CFRP Sargı	↑↑↑	↑↑	↑	↑↑↑	En yüksek dayanım
TRM Sargı	↑↑	↑	↑↑	↑↑	Dengeli performans
Alt yüzey sargı	↑	→	→	↑	Sınırlı etki
Yan yüzey sargı	↑	↑	→	↑	Orta
U tipi sargı	↑↑	↑	↑	↑↑	Etkili
Tam sargı	↑↑↑	↑↑	↑↑	↑↑↑	En iyi
C16 beton	↑↑	→	↑↑	↑↑	Güçlendirmeye duyarlı
C30 beton	↑	↑	↑	↑	Daha stabil

Tablo incelendiğinde; lif katkısı ve sargı uygulamalarının beton kirişlerin performansını genel olarak artırdığı görülmektedir. Çelik liflerin dayanım açısından daha etkili olduğu, polipropilen liflerin ise daha dengeli bir katkı sunduğu anlaşılmaktadır. CFRP sargı uygulamaları en yüksek dayanım artışı sağlarken, TRM sistemleri süneklik ve enerji yutma kapasitesi açısından öne çıkmaktadır. Ayrıca, tam sargı uygulamasının en etkili yöntem olduğu ve düşük dayanımlı betonlarda güçlendirme etkisinin daha belirgin olduğu görülmektedir.

7.3. Öneriler

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara bağlı olarak gelecekteki çalışmalar için farklı lif kombinasyonlarının (hibrit lifler) etkisi, uzun süreli dayanıklılık (yorulma, çevresel etkiler), farklı açıklık ve kesitlerde davranış ve sayısal modelleme ile deneysel sonuçların doğrulanması önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- Abdel-Karim, A., H., Khalil, G. I., Ewis, A. E., & Makhoul, M. H.** (2023). Impact of developed hybrid polypropylene fiber inclusion on the flexural performance of concrete beams reinforced with innovative hybrid bars. *Construction and Building Materials*, 409, 134113.
- Acun, S.** (2000). *Yüksek Dayanımlı Beton Üretiminde Dizayn Parametresi Olarak Lifsel Katkıların İrdelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Açıkgöç, M., Arazsu, U., & Alyamaç, K. E.** (2012). Farklı Karışım Oranlarına Sahip Polipropilen Lifli Betonların Dayanım ve Durabilite Özellikleri. *Süleyman Demirel Üniversitesi Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 4(3), s. 41-54.
- Adhikari, S.** (2009). *Mechanical Properties and Flexural Applications of Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP) Bars*. (M.Sc. Thesis). University of Akron, Ohio.
- Adıbelli, H., & Varışlı, M.** (2017). Karbon Elyaf ve Cam Elyaf Kumaş ile Sargılı Betonların Eksenel Basınç Altında Davranışı. *Uludağ Üniversitesi 20. Ulusal Mekanik Kongresi*, s. 324-331, Bursa.
- Akbaş, A., & Çalışkan, Ö.** (2024a). Yapıların Deprem Performansını Artırmak Amacıyla Kullanılan Malzemeler ve Güçlendirme Teknikleri. *6th International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences*, s. 546-553, Konya.
- Akbaş, A., & Çalışkan, Ö.** (2024b). Kirişlerin CFRP ile Güçlendirilmesinde Uygulama Detayları. *3rd International Conference on Engineering, Natural and Social Sciences*, s. 582-591, Konya.
- Alav, D. S.** (2022). *Beton Dayanımının Farklı CFRP Tipleri ile Güçlendirilmiş Kesme Kirişlerinin Davranışına Olan Etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi). Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Alemdar, Z. F., & İnkaya, N.** (2019). CFRP ile Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Sonlu Elemanlar Parametrik Analizleri. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(3), s. 1073-1085.
- Alhallaak, T.** (2022). *Cam ve Karbon Elyaf Kumaşla Takviye Edilmiş Çimento Esaslı Kompozitlerin Eğilme Davranışının İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.
- Al-Zadjali, S. M. I.** (2011). *Strengthening of Reinforced Concrete Beams in Flexure Using Textile Reinforced Mortar TRM*. (M.Sc. Thesis). University of Sultan Qaboos, Al-Seeb.
- Ammar, M. A.** (2014). *Bond Durability of Basalt Fibre-Reinforced Polymers (BFRP) Bars Under Freeze-and-Thaw Conditions*. (M.Sc. Thesis). University of Laval, Quebec.

- Askar, M. K., & Al-Kamaki, Y. S. S. (2025).** Flexural Strength of Low-Strength RC Beams Using CFRP Composite. *Materials Science Poland*, 43(4), 38-58.
- Aslan, G., & Erol, H. (2024).** Bazalt Tekstil Takviyeli Harç ile Güçlendirilmiş Döşemelerin Darbe Yüğü Etkisi Altındaki Davranışının Deneysel İncelenmesi. *Innovative Studies in Engineering, All Sciences Academy*, s.143-164, Van.
- Aydöner, T. (2002).** *Çelik Tel Takviyeli Betonların Mekanik Davranışı*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bahadır, F. (2010).** *Polipropilen Lifli Betonların Mekanik Özellikleri*. (Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Banibayat P., & Patnaik A. (2013).** Creep Rupture Performance of Basalt Fiber-Reinforced Polymer Bars. *Journal of Aerospace Engineering*, 28(3), 04014074.
- Banthia, N., & Gupta, R. (2006).** Influence of Polypropylene Fiber Geometry on Plastic Shrinkage Cracking in Concrete. *Cement and concrete Research*, 36(7), 1263-1267.
- Bedirhanoglu, İ., & İlki, A. (2009).** Düşük Dayanımlı Betona Sahip Betonarme Elemanların Güçlendirilmesi İçin HPFRCC. *İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(6), s. 146-156.
- Berbergil, V. (2006).** *Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Çelik Lif Kullanımının İşlenebilirliğe Etkisi*. (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bournas, D. A., Lontou, P. V., Papanicolaou, C. G., & Triantafillou, T. C. (2007).** Textile-Reinforced Mortar Versus Fiber-Reinforced Polymer Confinement in Reinforced Concrete Columns. *ACI Structural Journal*, 104(6), 740.
- Cazacu, C., Galatanu, T., Mizgan, P., Muntean, R., & Tamas, F. (2017).** Experimental Research in Flexural Behavior of Carbon Fiber Polymer Strengthened Beams. *Procedia Engineering*, 257-264.
- Çağlar, Ö. Ü. H., Çağlar, A., & Gürbüz, B. (2019).** Çelik Liflerin Beton Basınç Dayanımı ve Kiriş Eğilme Dayanımına Etkilerinin Araştırılması. *Mühendislikte Yeni Yaklaşımlar Dergisi*, s. 71-83.
- Çalışkan, Ö., & Şenol, A. F. (2025).** Flexural Performance of concrete beams strengthened with textile reinforced mortars: Influence of application pattern and repair mortar type. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14(4), s. 1282-1292.
- Dalyan, İ., & Doran, B. (2021).** An investigation on the flexural behaviour of RC beams wrapped with CFRP. *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 5(1), 97-105.
- Demiralp, M., Beycioğlu, A., Ürünveren, H., Köksal, F., & Anadut, H. O. (2021).** Çelik Lifli Betonlarda Agrega Tipinin Kırılma Enerjisine Etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(1), s. 207-218.

- Dindar, B.** (2020). Metal-Cam fiber/Epoksi/ÇDKNT Sandviç Panellerin Eğilme Davranışlarının DeneySEL Olarak Araştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, s. 249-253.
- Durmaz, N.** (2018). *Frp Donatılı Beton Döşemelerin Eğilme Davranışlarının İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Dvorkin, D., Poursaee, A., Peled, A., & Weiss, W. J.** (2013). Influence of Bundle Voating on the Tensile Behavior, Bonding, Cracking and Fluid Transport of Fabric Cement-Based Composites. *Cement and Concrete Composites*, 42, 9-19.
- Ebead, U., Shrestha, K. C., Afzal, M. S., El Refai, A., & Nanni, A.** (2017). Effectiveness of Fabric-Reinforced Cementitious Matrix in Strengthening Reinforced Concrete Beams. *Journal of Composites for Construction*, 21(2), 04016084.
- El-Abbasy, A. A.** (2023). Tensile, Flexural, İmpact Strength, and Fracture Properties of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete–A Comprehensive Review. *Construction and Building Materials*, 133621.
- Elsanadedy, H. M., Almusallam, T. H., Alsayed, S. H., & Al-Salloum, Y. A.** (2013). Flexural Strengthening of RC Beams Using Textile Reinforced Mortar–Experimental and Numerical Study. *Composite Structures*, 40-55.
- Erbaş, Y.** (2025). Yükleme hızının dört noktalı eğilme etkisi altındaki aac lentoların eğilme performansına etkisi. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 8(5), 1313-1319.
- Ertekin, M.** (2017). Aramid Fibers. In *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*, 153-167.
- Güneş, E. M.** (2022). *Tekstil Donatılı Harçlar ile Yığma Elemanların Güçlendirilmesi*. (Doktora Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hsie, M.** (2008). Mechanical Properties of Polypropylene Hybrid Fiber-Reinforced Concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 494(1-2), 153-157.
- Hussien, W. M., Sarbıyık, A., & Aydın, E.** (2018). CFRP ile Güçlendirilmiş Eğilme Yüğü Etkisindeki Betonarme Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi. *Academic Perspective Procedia*, 1(1), 1062-1071.
- Kavas, T., & Sabah, E.** (2001). Sepiyolitin Lif Takviyeli Çimento Üretiminde Kullanılabilirliğinin Araştırılması. 4. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 18(19), s. 194-199.
- Kaya, T., Aras, M., & Çalışkan, Ö.** (2017). Beton Basınç ve Eğilme Dayanımlarına CFRP'nin Etkisi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), s. 1-9.
- Khandekar, A., & Pol, C.** (2018). CFRP Application in Retrofitting of RCC Beam. *Engineering and Technology*, 4(8), 1-7.

Kızılırmak, C., Aydın, S., & Yardımcı M. Y. (2019). Çelik Lif Kanca Geometrisinin Yüksek Dayanımlı Lifli Betonların Statik ve Darbe Yükleri Altında Eğilme Özelliklerine Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(3), s. 1609-1628.

Koç, V. (2004). *Karbon Lif Takviyeli Polimer Malzemeler ile Güçlendirilmiş Düşük ve Normal Dayanımlı Beton Elemanların Davranışı*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Koutas, L. N., & Papakonstantinou, C. G. (2021). Flexural Strengthening of RC Beams With Textile-Reinforced Mortar Composites Focusing on the Influence of the Mortar Type. *Engineering Structures*, 246, 113060.

Koutas, L. N., Tetta, Z., Bournas, D. A., & Triantafillou, T. C. (2019). Strengthening of Concrete Structures With Textile Reinforced Mortars: State-of-the-Art Review. *Journal of Composites for Construction*, 23(1), 03118001.

Kozak, M. (2013). Çelik Lifli Betonlar ve Kullanım Alanlarının Araştırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, s. 26-35.

Kurban, M., Babaarslan, O., & Çağatay, İ. H. (2022). Investigation of the Flexural Behavior of Textile Reinforced Concrete With Braiding Varn Structure. *Construction and Building Materials*, 334, 127434.

Kurt, G. (2006). *Lif İçeriği ve Su/Çimento Oranının Fibrobetonun Mekanik Davranışına Etkileri*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Maras, M. M. (2021). Betonarme Yapıların Güçlendirilmesinde Kullanılan FRP Kompozitin Yapısal Performansa Etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, s. 108-119.

Mardani-Aghabaglou, A., Tuyan, M., Yılmaz, G., Çakır, Ö. A., & Ramyar, K. (2013). Farklı Liflerin Kendiliğinden Yerleşen Betonun Taze ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Hazır Beton Kongresi*, s. 21-23.

Martinola, G., Meda, A., Plizzari, G. A., & Rinaldi, Z. (2010). Strengthening and Repair of RC Beams With Fiber Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 32(9), 731-739.

Nakayama, Y., Nakai, H., & Kanakubo, T. (2008, October). Bond Behavior Between Deformed Aramid Fiber-Reinforced Plastic Reinforcement and Concrete. In *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 12-17, Beijing.

Okay, F., & Engin, S. (2009). Çelik Lif Katkılı Betonarme Kirişlerde Basit Burulma Etkisinde Oluşan Çatlakların ve Kesit Taşıma Gücünde Oluşan Değişimlerin İncelenmesi. *Uluslararası Sakarya Deprem Sempozyumu*, s. 1-3.

Önal, M. M., Tokgöz, H., Can, Ö. & Dumanlar, N. (2006). Betonarme kirişlerde CFRP Sarılarak Güçlendirme yapılması ve Tasıma Gücünün Artırılması. *Yapısal Onarım ve Güçlendirme Sempozyumu*, s. 64-69, Denizli.

Özalp, F. (2016). *Kür Koşulları ve Yalıtımın Yüksek Dayanımlı Betonların Geçirimlilik, İç-Yapı ve Mekanik Özelliklerine Etkileri*. (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Özcan, Z. (2005). Betonarme Kirişlerin Kompozit Malzemelerle Güçlendirilmesi. *Deprem Sempozyumu*, s. 1016-1022, Kocaeli.

Özyüksel, A. (2012). *Çelik Levha ve CFRP ile Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Eğilme Davranışlarının Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Papanicolaou, C. G., Triantafillou, T. C., Karlos, K., & Papathanasiou, M. (2007). Textile-Reinforced Mortar (TRM) Versus FRP as Strengthening Material of URM Walls: in-Plane Cyclic Loading. *Materials and structures*, 40(10), 1081-1097.

Raof, S. M., & Bournas, D. A. (2017). TRM Versus FRP in Flexural Strengthening of RC Beams: Behaviour at High Temperatures. *Construction and Building Materials*, 154, 424-437.

Sarasini, F., Tirillò, J., Ferrante, L., Valente, M., Valente, T., Lampani, L., ... & Sorrentino, L. J. C. P. B. E. (2014). Drop-Weight Impact Behaviour of Woven Hybrid Basalt–Carbon/Epoxy Composites. *Composites Part B: Engineering*, 59, 204-220.

Sarı, D. S. (2008). *Normal ve Yüksek Dayanımlı Betonların Mekanik Davranışına Lif İçeriğinin ve Dayanımının Etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Sarıbıyık, A. (2018). Betonların Güçlendirilmesinde FRP Kompozitlerin Hibrit Olarak Kullanımının Etkisi. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), s. 383-391.

Sen, T., & Reddy, H. J. (2014). Flexural Strengthening of RC Beams Using Natural Sisal and Artificial Carbon and Glass Fabric Reinforced Composite System. *Sustainable Cities and Society*, 10, 195-206.

Sharifi Ghalehnoei, M., & Behfarnia, K. (2025). Enhancing the Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beams: A Comprehensive Review of İnorganic Composite Solutions. *Journal of Composite Materials*, 00219983251391411.

Sika (2020a). *Sikadur 330 Ürün Teknik bilgileri*. [Erişim: 26.04.2025, <https://tur.sika.com/tr/yapi/tamir-ve-guclendirme-sistemleri/yapisal-guclendirme/karbon-lifli-polimer-cfrp-kumaslar/sikadur-330.html>]

Sika (2020b). *SikaRepair®-645 Ürün Teknik Föyü*. [Erişim: 26.04.2025, https://tur.sika.com/dms/getdocument.get/8625298d-9131-4042-8163-b62b5bf66212/sikarepair_-645.pdf]

Şenol, A. F. (2022). Beton Teknolojisinde Lif Türleri ve Lif Takviyeli Betonların Özellikleri. *Mühendislik Bilimlerinde Güncel Tartışmalar*, 7-22.

Tokgöz, H., & DüNDAR, B. (2014). Kesme Yönünden Yetersiz Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kirişlerin CFRP ile Güçlendirilerek Kesme Kapasitelerinin Arttırılması. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 3(2), s. 87-97.

Topçu, İ. B., Demirel, O. E., & Uygunoğlu, T. (2017). Polipropilen Lif Katkılı Harçların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri. *Politeknik Dergisi*, 20(1), s. 91-96.

Topçu, İ. B., & Uğurlu, A. (2008). Çelik Lifli Betonlara Farklı İşlenebilirlik Yöntemlerinin Uygulanması ve Bunlar Arasındaki İlişkiler. *Yapı Mekaniği Semineri*, s. 125-137.

Triantafillou, T. C., & Papanicolaou, C. G. (2006). Shear Strengthening of Reinforced Concrete Members With Textile Reinforced Mortar (TRM) Jackets. *Materials and Structures*, 39(1), 93-103.

TSE, Türk Standartları Enstitüsü. *Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları*. Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü, Kabul 24 Mart 2016, TS 802.

TSE, Türk Standartları Enstitüsü. *Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri- Bölüm 3: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini*. Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü, Kabul 30 Eylül 2019, TS EN 12390-5.

Turgay, T., Polat, Z., Koksall, H. O., Doran, B., & Karakoç, C. (2010). Compressive Behavior of Large-Scale Square Reinforced Concrete Columns Confined With Carbon Fiber Reinforced Polymer Jackets. *Materials and Design*, 31(1), 357-364.

Türker, K., Birol, T., Yavaş, A., & Hasgöl, U. (2016). Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton İçeren Kirişlerde Etkin Çelik Lif Tipi İncelemesi. *Afyon Kocatepe Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, s. 776-785.

Türkmenoğlu, Z. F., & Varol, O. (2014). Lifli Beton Türleri ve Kullanım Alanları. *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress*, 3792-3795.

Ustaş, İ., Gürbüz, A., Kurt, Z., & Deşik, F. (2020). Betonda CFRP sargı uygulamasının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(3), s. 921-930.

Yaprak, H., Şimşek, O., & Öneş, A. (2004). Cam ve Çelik Liflerin Bazı Beton Özelliklerine Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 7(4), s. 353-358.

Yavuz, G. (2011). Lif Takviyeli Polimerlerin Betonarme Kirişlerde Donatı Olarak Kullanımı. *Engineering Sciences*, 6(4), 1001-1015.

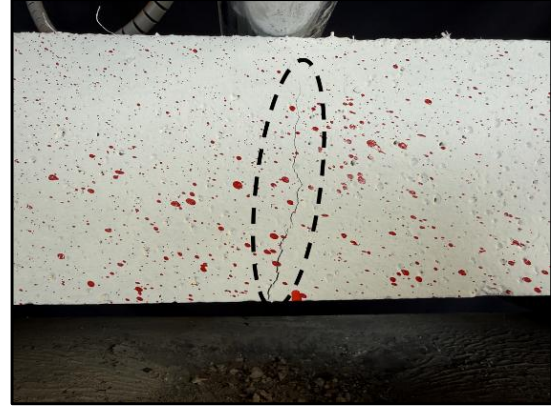
Yüncüler, M., & Çalışkan, Ö. (2024). Tekstil ile Takviye Edilmiş Harçların Kullanımı, Innovative Studies in Engineering. *All Sciences Academy Design*, s. 270-286.

EKLER

EK-1: ÇELİK LİFLİ NUMUNELERİN DENEY SONRASI GÖRÜNTÜLERİ



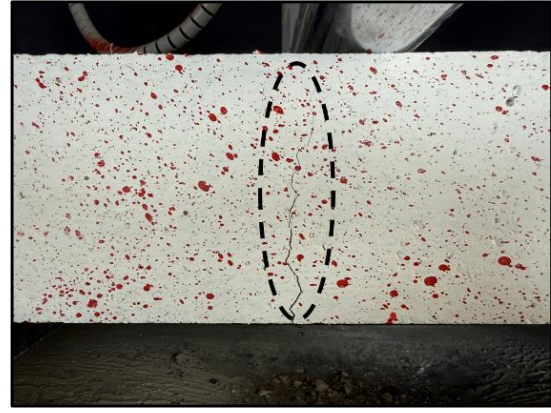
D-ÇL-0.3



N-ÇL-0.3



D-ÇL-0.6



N-ÇL-0.6

EK-2: PROPİLEN LİFLİ NUMUNELERİN DENEY SONRASI GÖRÜNTÜLERİ



D-PL-0.3



N-PL-0.3



D-PL-0.6



N-PL-0.6

EK-3: TRM NUMUNELERİN DENEY SONRASI GÖRÜNTÜLERİ



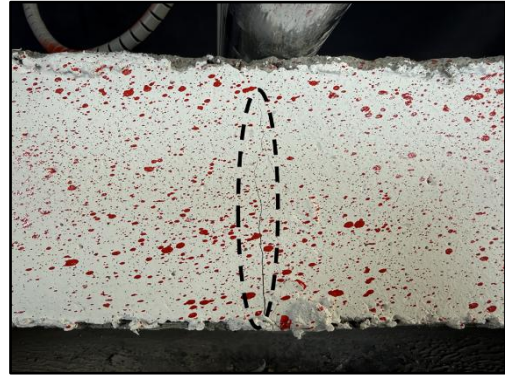
D-TRM-1



N-TRM-1



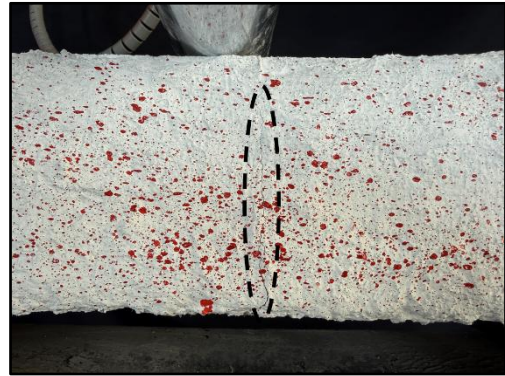
D-TRM-2



N-TRM-2



D-TRM-3



N-TRM-3



D-TRM-4



N-TRM-4

EK-4: CFRP NUMUNELERİN DENEY SONRASI GÖRÜNTÜLERİ



D-CFRP-1



N- CFRP-1



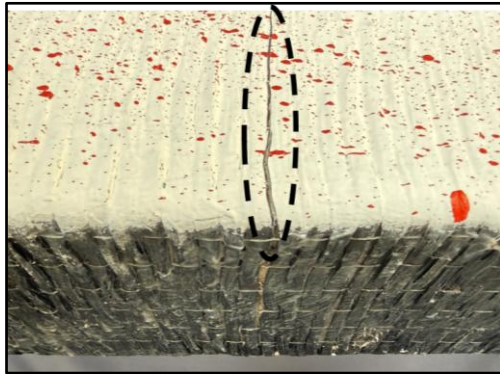
D- CFRP-2



N- CFRP-2



D- CFRP-3



N- CFRP-3



D- CFRP-4



N- CFRP-4