



T.C.

**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**BETON DAYANIMININ FARKLI CFRP TİPLERİ İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ
KESME KİRİŞLERİNİN DAVRANIŞINA OLAN ETKİSİ
Deniz SARI ALAV**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

**Eylül-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Deniz SARI ALAV tarafından hazırlanan “Beton Dayanımının Farklı CFRP Tipleri İle Güçlendirilmiş Kesme Kirişlerinin Davranışına Olan Etkisi” adlı tez çalışması 29 / 09 /2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Ali KÖKEN

Üye (Danışman)

Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ali Serdar ECEMİŞ

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından 211004041 numaralı proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Deniz SARI ALAV

Tarih: 29.09.2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

BETON DAYANIMININ FARKLI CFRP TİPLERİ İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ KESME KİRİŞLERİNİN DAVRANIŞINA OLAN ETKİSİ

Deniz SARI ALAV

Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği
Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN,
Yardımcı Danışman: Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU

2022, 160 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN

Prof. Dr. Ali KÖKEN

Dr. Öğr. Üyesi Ali Serdar ECEMİŞ

Bu çalışmada kesme kapasitesi yetersiz denge altı dikdörtgen kesitli 5 farklı beton sınıfında imal edilmiş betonarme kirişlerin kesme açıklıklarında bölgesel olarak dıştan CFRP ile güçlendirilmesi sonucunda düşey yük altında değişen davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada yönetmeliklerdeki normlara göre kiriş davranışını dayanım ve süneklik açısından ideal seviyeye getirecek olan CFRP'nin gramaj ve üç tür sargılama şekline göre davranışı gözlenmiştir. Deneysel çalışmada, 1/3 ölçekli 35 adet 100x150x1000 mm boyutlarında betonarme kiriş numunesi hazırlanmıştır. Kirişlerde boyuna donatılar 2Ø8 ve 2Ø10, kesme kapasitesinin yetersiz olması için etriyeler ise sadece mesnetlerde ikişer ve orta açıklık bölgesinde beş adet olmak üzere Ø6/50 mm olarak seçilmiştir. Çalışmada kullanılan CFRP'nin kirişlerin kesme kırılmasından değil eğilme kapasitesine ulaşmasını sağlayabildiği veya betonun çatlaması ile beraber ani kopmalar yaşadığı görülmüştür. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (2018)'de kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinde yalnızca tam sargılama tipine yer verilmesi ve ACI 440.2R-17 (2017) (Beton Yapıların Güçlendirilmesi için Dıştan Yapıştırılmış FRP Sistemlerinin Tasarım ve Yapım Kılavuzu)'nda kirişin iki veya üç taraftan güçlendirilmesi için karakteristik beton basınç dayanımının en az 17 MPa ve karakteristik beton çekme dayanımının en az 1,4 MPa olması şartı bulunmaktadır. Bu çalışmada da özellikle 5 - 20 MPa beton dayanımları için tam sargılamanın iki ve üç taraftan sargıya göre kirişin dayanımı ve davranışı konusunda daha etkili olduğu görülmüştür. Yönetmeliklerde güçlendirme yapılacak yapı elemanlarının beton sınıfı ve CFRP'nin gramaj bilgileriyle ilgili detaylı bilgilerin olmaması bir eksiklik olarak düşünülmüş, beton sınıfına göre tercih edilecek uygulama şekli hakkında detaylı bilgilerin olmasının daha uygun ve daha ekonomik çözümleri getireceği düşünülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Karbon fiber malzeme (CFRP), Kesme, Eğilme, Güçlendirme, Betonarme kiriş, Beton sınıfı, Sargı türü.

ABSTRACT

MS

THE EFFECT OF CONCRETE STRENGTH ON THE BEHAVIOR OF SHEET BEAMS REINFORCED WITH DIFFERENT CFRP TYPES

Deniz SARI ALAV

Konya Technical University Institute of Graduate Studies Department of Civil Engineering

Advisor: Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN,

Co-Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ceyhun AKSOYLU

2022, 160 Pages

Jury

Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN

Prof. Dr. Ali KÖKEN

Asst. Prof. Dr. Ali Serdar ECEMİŞ

In this study, the changing behavior of reinforced concrete beams manufactured in 5 different concrete classes with insufficient shear capacity, under equilibrium, under vertical load, as a result of regional reinforcement with CFRP at shear openings, was investigated experimentally. In the study, the behavior of CFRP, which will bring the beam behavior to the ideal level in terms of strength and ductility, according to the norms in the regulations, was observed according to the weight and three types of wrapping. In the experimental study, 35 pieces of 1/3 scale reinforced concrete beam samples of 100x150x1000 mm were prepared. The longitudinal reinforcements in the beams are 2Ø8 and 2Ø10, while the stirrups are chosen as Ø6/50 mm, two each on the supports and five in the middle span area, in order to have insufficient shear capacity. It has been observed that the CFRP used in the study can enable the beams to reach their bending capacity, not shear fracture, or that the concrete experiences sudden ruptures with cracking. In the Turkish Building Earthquake Code (2018), only the full wrapping type is included in the reinforcement of beams against shear, and in ACI 440.2R-17 (2017) (Design and Construction Guide for Externally Bonded FRP Systems for Reinforcement of Concrete Structures), characteristic concrete for strengthening the beam from two or three sides. There is a requirement that the compressive strength should be at least 17 MPa and the characteristic concrete tensile strength should be at least 1.4 MPa. In this study, it has been observed that full wrapping is more effective on the strength and behavior of the beam than wrapping on two and three sides, especially for concrete strengths of 5 - 20 MPa. The lack of detailed information about the concrete class of the structural elements to be strengthened and the weight of CFRP in the regulations was considered as a deficiency, and it was thought that having detailed information about the application method to be preferred according to the concrete class would bring more appropriate and more economical solutions.

Keywords: Carbon fiber material (CFRP), Shear, Bending, Reinforcement, Reinforced concrete beam, Concrete grade, Winding type.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Farklı beton dayanımlarındaki betonarme kesme kirişlerinin farklı gramajda CFRP ile tam, U, yan yüz sargı türlerine göre güçlendirilmesinin, kirişlerin kesme ve eğilme kapasitesine olan katkısı incelenmiştir.

Tezimin her aşamasında yardım ve desteğini benden esirgemeyen, danışman hocalarım Sayın Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN'a ve Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU'ya, yüksek lisans tez çalışmamda her aşamada yanımda olan eşim Erdem ALAV'a, deneysel çalışmamda bilgisini benimle paylaşan arkadaşım Dr. Arş. Gör. Ahmad Javid ZIA'ya, deneyde uygulama aşamasında destek olan arkadaşım Yusuf UYSAL'a teşekkürü borç bilirim.

Çalışmada hedef beton basınç dayanımı 40 MPa-50 MPa olan beton ile hazırlanan kirişler için desteklerini esirgemeyen Konya Çimento San. A.Ş'ne ayrıca teşekkür ederim.

Son olarak çalışma boyunca laboratuvar çalışmalarında yardımcı olan Yüksel ÇİFTÇİ'ye yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim hayatım boyunca bana maddi manevi her türlü yardımlarından dolayı aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Deniz SARI ALAV
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç	3
1.2. Kapsam.....	5
2. LİTERATÜR TARAMASI	6
2.1. Kirişlerde Kesme İçin Yapılan Deneyler	6
2.2. Kirişlerde Eğilme İçin Yapılan Deneyler	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM	14
3.2. Deney Numuneleri ve Yükleme Hücresi	15
3.2. Numunelerin Boyutları	17
3.3. Deney Numunelerinin Malzeme Özellikleri	17
3.3.1. Beton.....	17
3.3.2. Donatı	18
3.3.3. Karbon lifli polimer	19
3.3.4. Reçine	19
3.4. Deney Elemanlarının Üretilmesi	21
3.4.1. Kalıpların hazırlanması	21
3.4.2. Donatıların hazırlanması	22
3.4.3. Beton dökümü	22
3.4.4. Sertleşmiş betonun CFRP uygulaması için hazırlanması ve uygulanması	23
3.4.5. CFRP Şeritlerin hazırlanması ve uygulanması	26
3.5. Güçlendirilmiş Numunelerin Mekanik Özellikleri	28
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	31
4.1. Deney Sonuçları.....	31
4.1.1. B ₁ -0 Numunesi	33
4.1.2. B ₂ -0 Numunesi	35
4.1.3. B ₃ -0 Numunesi	37
4.1.4. B ₄ -0 Numunesi	39
4.1.5. B ₅ -0 Numunesi	41
4.1.6. BF ₁ -1 Numunesi	43
4.1.7. BF ₂ -1 Numunesi	45
4.1.8. BF ₃ -1 Numunesi	47
4.1.9. BF ₄ -1 Numunesi	49
4.1.10. BF ₅ -1 Numunesi	51

4.1.11. BF ₁ -2 Numunesi	53
4.1.12. BF ₂ -2 Numunesi	55
4.1.13. BF ₃ -2 Numunesi	57
4.1.14. BF ₄ -2 Numunesi	59
4.1.15. BF ₅ -2 Numunesi	61
4.1.16. BU ₁ -1 Numunesi	63
4.1.17. BU ₂ -1 Numunesi	65
4.1.18. BU ₃ -1 Numunesi	67
4.1.19. BU ₄ -1 Numunesi	69
4.1.20. BU ₅ -1 Numunesi	71
4.1.21. BU ₁ -2 Numunesi	73
4.1.22. BU ₂ -2 Numunesi	75
4.1.23. BU ₃ -2 Numunesi	77
4.1.24. BU ₄ -2 Numunesi	79
4.1.25. BU ₅ -2 Numunesi	81
4.1.26. BS ₁ -1 Numunesi	83
4.1.27. BS ₂ -1 Numunesi	85
4.1.28. BS ₃ -1 Numunesi	87
4.1.29. BS ₄ -1 Numunesi	89
4.1.30. BS ₅ -1 Numunesi	91
4.1.31. BS ₁ -2 Numunesi	93
4.1.32. BS ₂ -2 Numunesi	95
4.1.33. BS ₃ -2 Numunesi	97
4.1.34. BS ₄ -2 Numunesi	99
4.1.35. BS ₅ -2 Numunesi	101
4.2. Deney Elemanların Karşılaştırılması	103
4.2.1. Beton sınıflarının karşılaştırılması	104
4.2.1.1. B ₁ -0, B ₂ -0, B ₃ -0, B ₄ -0, B ₅ -0 Numunelerin karşılaştırılması	104
4.2.1.2. BF ₁ -1, BF ₂ -1, BF ₃ -1, BF ₄ -1, BF ₅ -1 Numunelerin karşılaştırılması	105
4.2.1.3. BF ₁ -2, BF ₂ -2, BF ₃ -2, BF ₄ -2, BF ₅ -2 Numunelerin karşılaştırılması	106
4.2.1.4. BU ₁ -1, BU ₂ -1, BU ₃ -1, BU ₄ -1, BU ₅ -1 Numunelerin karşılaştırılması	107
4.2.1.5. BU ₁ -2, BU ₂ -2, BU ₃ -2, BU ₄ -2, BU ₅ -2 Numunelerin karşılaştırılması	108
4.2.1.6. BS ₁ -1, BS ₂ -1, BS ₃ -1, BS ₄ -1, BS ₅ -1 Numunelerin karşılaştırılması	110
4.2.1.7. BS ₁ -2, BS ₂ -2, BS ₃ -2, BS ₄ -2, BS ₅ -2 Numunelerin karşılaştırılması	111
4.2.2. Sargılama şeklinin karşılaştırılması	112
4.2.2.1. B ₁ -0, BF ₁ -1, BU ₁ -1, BS ₁ -1 Numunelerin karşılaştırılması	113
4.2.2.2. B ₂ -0, BF ₂ -1, BU ₂ -1, BS ₂ -1 Numunelerin karşılaştırılması	114
4.2.2.3. B ₃ -0, BF ₃ -1, BU ₃ -1, BS ₃ -1 Numunelerin karşılaştırılması	116
4.2.2.4. B ₄ -0, BF ₄ -1, BU ₄ -1, BS ₄ -1 Numunelerin karşılaştırılması	117
4.2.2.5. B ₅ -0, BF ₅ -1, BU ₅ -1, BS ₅ -1 Numunelerin karşılaştırılması	118
4.2.2.6. B ₁ -0, BF ₁ -2, BU ₁ -2, BS ₁ -2 Numunelerin karşılaştırılması	119
4.2.2.7. B ₂ -0, BF ₂ -2, BU ₂ -2, BS ₂ -2 Numunelerin karşılaştırılması	120
4.2.2.8. B ₃ -0, BF ₃ -2, BU ₃ -2, BS ₃ -2 Numunelerin karşılaştırılması	122
4.2.2.9. B ₄ -0, BF ₄ -2, BU ₄ -2, BS ₄ -2 Numunelerin karşılaştırılması	123
4.2.2.10. B ₅ -0, BF ₅ -2, BU ₅ -2, BS ₅ -2 Numunelerin karşılaştırılması	125
4.2.3. CFRP gramaj etkisinin karşılaştırılması	126
4.2.3.1. B ₁ -0, BF ₁ -1, BF ₁ -2 Numunelerin karşılaştırılması	126

4.2.3.2. B ₂ -0, BF ₂ -1, BF ₂ -2 Numunelerin karşılaştırılması	127
4.2.3.3. B ₃ -0, BF ₃ -1, BF ₃ -2 Numunelerin karşılaştırılması	128
4.2.3.4. B ₄ -0, BF ₄ -1, BF ₄ -2 Numunelerin karşılaştırılması	129
4.2.3.5. B ₅ -0, BF ₅ -1, BF ₅ -2 Numunelerin karşılaştırılması	130
4.2.3.6. B ₁ -0, BU ₁ -1, BU ₁ -2 Numunelerin karşılaştırılması.....	131
4.2.3.7. B ₂ -0, BU ₂ -1, BU ₂ -2 Numunelerin karşılaştırılması.....	132
4.2.3.8. B ₃ -0, BU ₃ -1, BU ₃ -2 Numunelerin karşılaştırılması.....	133
4.2.3.9. B ₄ -0, BU ₄ -1, BU ₄ -2 Numunelerin karşılaştırılması.....	134
4.2.3.10. B ₅ -0, BU ₅ -1, BU ₅ -2 Numunelerin karşılaştırılması.....	135
4.2.3.11. B ₁ -0, BS ₁ -1, BS ₁ -2 Numunelerin karşılaştırılması	136
4.2.3.12. B ₂ -0, BS ₂ -1, BS ₂ -2 Numunelerin karşılaştırılması	137
4.2.3.13. B ₃ -0, BS ₃ -1, BS ₃ -2 Numunelerin karşılaştırılması	138
4.2.3.14. B ₄ -0, BS ₄ -1, BS ₄ -2 Numunelerin karşılaştırılması	139
4.2.3.15. B ₅ -0, BS ₅ -1, BS ₅ -2 Numunelerin karşılaştırılması	140
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	143
KAYNAKLAR.....	147

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a ve a_v	Eleman kesme açıklığı
B420c	Akma gerilimi sınırı 420 MPa olan nervürlü donatı sınıfı
d	Kiriş faydalı yüksekliği
ε_c	Beton basınç birim şekildeğiştirmesi
ε_{cu}	Sargılı betondaki maksimum basınç birim şekildeğiştirmesiDeney
P	elemanlarına uygulanan yük
s_f	FRP şeritlerin eksen aralıkları
V_f	FRP şeritlerin karşıladığı kesme dayanımı
δ_u	Yükün %85'ine karşı gelen deplasman değeri
δ_y	Akma anındaki deplasman değeri
\emptyset	Donatı çapı
wf	Lifli polimer şerit genişliği

Kısaltmalar

ACI 440.2R-17 (2017)	Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete Structures
AFRP	Aramid Fiber Takviyeli Polimerler
BFRP	Bazalt Fiber Takviyeli Polimerler
CFRP	Karbon Fiber Takviyeli Polimerler
CNR- DT200-2013	The Italian Design Duide
FIB-2001	The International Federation for Structural Concrete (fib) as Bulletin (Uluslararası Yapısal Beton Federasyonu)
FRP	Elyaf Takviyeli Polimerler
GFRP	Cam Fiber Takviyeli Polimerler
LP	Lifli Polimer
TBDY-2018	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018
TDY-2007	Türk Deprem Yönetmeliği -2007
TET	Toplam enerji tüketimi

1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliğinin başlıca alanları; konut, demiryolu, otoyol, köprü, su yapıları, enerji santrali, fabrika, sanayi tesisi, liman, havalimanı ve daha birçok farklı amaçlar için imal edilmiş yapıların planlanması, projelendirilmesi ve imalat aşamalarıdır. Bu yapılarda kullanılan malzemelerin üretilmesi ve sürekli geliştirilmesi de yine inşaat mühendisliğinin konularındandır.

Yapıların projelendirilmesinde servis-kullanım yükleri altında kılcal çatlakların oluşmaması oldukça önemlidir. Bununla beraber tasarım yükleri altında da yeterli dayanım, rijitlik ve süneklik bir yapı ve yapıyı oluşturan yapı elemanları için oldukça önemlidir.

Bir yapı için en geniş çapta zarar verebilme potansiyeli olan yük ise deprem yükü olmasından dolayı yapı imalatında tüm bu olası yükler dikkate alınarak projelendirilme sürecinin titizlikle yürütülmesi ve uygulama sırasında karşılaşılan problemlerin çözülmesi gerekmektedir. Bu mümkün olmadığında ise güçlendirme, iyileştirme ya da yapıyı baştan imal etmek gerekebilmektedir.

Güçlendirme, bir yapının taşıma gücünü, rijitliğini, stabilitesini mevcut durumun üstüne çıkarmak için yapılan uygulamalardır. Yapının yanal rijitliği yetersizliği, kolon ve kirişlerin uç bölgeleri sık etriye ile sarılmamış olması durumunda eleman bazında onarım ve güçlendirme pratik bir çözüm olmayabilir. Bu gibi durumlarda çok sayıda kolon ve kirişte onarım ve güçlendirme uygulaması yapılması yerine, deprem yükünü alabilecek yeni elemanlar oluşturularak taşıyıcı sistemin iyileştirilmesi tercih edilebilmektedir.

Güçlendirme çalışmalarının uygulamasındaki zorluklar ve maliyet düşünüldüğünde projelendirme safhasında öngörünün ve projeye uygun uygulama yapmanın önemi bir kez daha ortaya çıkmaktadır. Bununla beraber bir yapının güçlendirilmesi sadece yapının hasar görmesiyle ilgili değildir. Yapının kullanım amacının değişmesi, etkiyen hareketli yüklerde artış olması, yönetmeliğin değişmesi, uygulama sırasındaki ihmaller gibi sebeplerle projede hesaplanmış olan malzeme özellikleri ve boyutların yetersiz kalması, yapı elemanlarının ve malzemelerinin ömrünü doldurması gibi nedenlerden dolayı da yapıda güçlendirme söz konusu olabilmektedir.

Bir yapının birçok bölümünde veya birkaç yapı elemanında güçlendirme uygulaması yapılması mümkündür. Dayanım ve süneklik açısından yetersiz yapı elemanları için eğilme ve kesme kuvveti etkisine karşı farklı güçlendirme modelleri tercih edilebilmektedir. Bunlardan özellikle kesme dayanımı yetersiz kirişler için lifli

polimer (LP) ile güçlendirme uygulamaları gidererek yaygınlaşmaktadır. Tek ya da çift yönlü LP kumaşlar Kirişlerde kesme kuvvetinin karşılanacağı şekilde yüzeye epoksi ile yapıştırılarak uygulanmaktadır.

Yapı elemanları ve birleşim noktalarında yapının bir bölümü veya tamamının hasar almaması için betonarme kirişlerin kesme kırılmasından değil eğilme kapasitesine ulaşması ve eğilme güç tükenmesi istenir. Elemanda yeterli etriye olmadığına kesme kuvveti ile oluşan asal çekme gerilmeleri betonun çekme dayanımını aştığı zaman yapı elemanlarında çatlaklar oluşur. Betonarme bir yapı elemanı basit kesme gerilmelerine maruz kaldığında ve eleman bu gerilmeye yeterinde dayanıklı olmadığına elemanda asal çekme gerilmelerine dik olacak şekilde ani ve gevrek kırılmalar oluşur. Nihayetinde taşıyıcı eleman göçmektedir. Bu durumu önlemeye çalışan kesme donatısı, betonarme elemanın asal çekme gerilmelerinin etkisiyle oluşacak çatlakları engelleyerek kesme kırılmasına ulaşmadan önce eğilme etkisinde sünek davranmasını sağlayacaktır.

Betonarme kirişte yük etkisiyle en çok zorlanan beton lifi $\epsilon_c = \epsilon_{cu} = 0.003$ birim kışalmasına ulaştığında beton ezilir, kiriş moment taşıma kapasitesine ulaşır ve kırılma olur. Bu konumda donatının akıp akmadığına bağlı olarak farklı kırılma türleri oluşur. Betondaki birim kışalma $\epsilon_c = \epsilon_{cu} = 0.003$ değerine ulaşmadan önce donatı akarsa çekme kırılması olur. Bu durumda kırılma sünektir. Beton ezilmesinden sonar çelik akarsa kırılma gevrektilir. Çelik aktığı anda betondaki birim kışalma 0.003 olursa kırılma yine gevrektilir. Yapı elemanlarının sünek davranması ve neticede de aniden göçmemesi istenir. Kesme donatıları ile kesme kırılmasının engellenmesi ve betonarme taşıyıcı elemanların eğilme kapasitesine ulaşarak eğilme güç tükenmesinin sağlanması amaçlanmaktadır. Kesme kuvvetiyle yön değiştiren asal çekme gerilmeleri ile kirişte çatlaklar oluşur ve kesme kırılması meydana gelir. Bu durumu engellemek için yönetmeliklerde sargı (kesme) donatısı kullanılması zorunludur. Sargı donatısı gereken miktarda ve sıklıkta olmadığına kirişler eğilme kapasitesine ulaşmadan önce kesme çatlaklarıyla beraber ani bir şekilde göçecektir.

Türkiye'de mevcut olan betonarme binaların yaklaşık % 40'ı için donatı ve beton kalitesi, donatı sayısı ve sıklığı, beton bakım koşulları açısından yetersiz olduğu bilinmektedir. Betonarme yapılarda kullanılan birçok malzemenin mekanik özelliklerinin zayıf olması ve hatta yapının farklı amaçla kullanılması gibi sebeplerle kolon ve kiriş gibi taşıyıcı yapı elemanlarında dayanım zafiyeti ortaya çıkmaktadır. Bulduğu koşullara göre dayanımı yetersiz olan mevcut binaların güçlendirilmesi mevcut yükler ve olası deprem gibi büyük yükler için oldukça önemlidir.

Bugün kesme dayanımı yetersiz kirişlerin çok pratik uygulamalarla güçlendirilmesi söz konusudur. Güçlendirme çalışmaları sırasında yapının zarar görmesi istenmeyen bir durum olduğu için LP ile güçlendirme uygulama kolaylığı açısından tercih edilecek en uygun çözümlerden biri olarak görülmektedir. Kesme dayanımı yetersiz bir kirişte etriye ile aynı doğrultuda LP uygulamasıyla güçlendirme yapmak mümkündür. Eğilme ve kesme kuvveti çift yönlü olarak etkili olduğu için tüm kesitte uygulama yapılması söz konusudur. Yönetmelik gereği kesme kuvvetinin yönü dikkate alınarak genellikle kiriş gövdesinde uygulama yapılmaktadır. Lifli polimerler uygulama alanlarına göre çeşitli türlerde ve farklı yapıda ürünlerle güçlendirme çalışmalarında önemli bir noktadadır. Kumaş ve donatı şeklinde uygulama çeşitliliği barındıran lifli polimerler aramid, cam, karbon vb. çeşitleriyle ve farklı mekanik özellikleri ile uygulanacak bölgelerde uygun olan türü seçme şansı sunmaktadır.

Kesme kapasitesi yetersiz kirişlerin güçlendirilmesi gerektiği noktalarda LP malzemelerin liflerinin uygun olan yönde ve hesaplama sonuçlarına göre uygun olan sıklıkta kullanılmasıyla güçlendirme çalışmasından mümkün olan en büyük faydayı sağlama açısından önemlidir. Ayrıca güçlendirme çalışmalarında maliyet düşünüldüğünde tasarımın önemi büyüktür. Bu yüzden güçlendirme yapılacak kirişlerde optimum malzeme miktarının bulunması amaçlanır.

1.1. Amaç

Bugün Türkiye’de bulunan mevcut yapılarda tasarım ve uygulama aşamalarında yapılan hatalar, yapının farklı amaçla kullanılmaya başlanmış olması nedeniyle yapıya etki eden yüklerin değişmesi, korozyon ve diğer dış etkiler ile yapı ömründen kaynaklı malzeme bozulmaları gibi birçok sebeple yapıların güçlendirilmesi söz konusu olmaktadır. Özellikle mevcut betonarme yapı stokunun en önemli problemlerinden birisi olan imalat hataları yapıların gerek deprem gerekse kullanım yükleri altında yeterli performansı gösterememelerine sebep olmaktadır. Özellikle beton basınç dayanımının istenilen seviyede olmaması (değişen yönetmeliklerle beraber son yirmi yılda yapılan betonarme yapıların en az 20 MPa ve üzeri basınç dayanımına sahip betonla üretilmesi vs.), boyuna ve enine donatı miktarının ve kalitesinin yetersizliği (özellikle etriye sıklaştırması, kanca uygulaması, sık donatı, donatı mekanik özelliklerinin yetersizliği vs.) gibi durumlar yapının olası yükler altında istenen davranışı sergilememesine sebeptir. Yapı elemanlarında yükler altında oluşan eğilme ve kesme güç tükenmelerinin

yetersizliği, yapı elemanın ve devamında da taşıyıcı sistemin ağır hasar almasına ve göçmesine neden olabilir. Özellikle habersiz bir göçme türü olan kesme güç tüketmesinin taşıyıcı sistemde oluşmaması için gerekli tüm önlemlerin alınması elzemdir. Bu nedenle çeşitli sebeplerden yetersiz olduğu anlaşılan yapı elemanın özellikle kesme dayanımının başta olmak üzere taşıma kapasitesinin artırılması günümüzde LP adı verilen kompozitler ile sıklıkla yapılmaktadır. Türkiye ve dünyada uygulamalarda LP'ler mekanik özelliklerinden dolayı daha çok karbon esaslı (bundan sonra CFRP olarak anılacaktır) olarak tercih edilmektedir.

Özellikle kirişlerde kesmeye karşı zayıflık söz konusu olduğu zaman lif yönlerinin, LP kumaş malzemenin genişliğinin, gramajının, sarılama şeklinin ve kat adedinin uygun şekilde seçilmesi ile kapasite artışı ve mümkünse sünek davranış rahatlıkla elde edilebilmektedir.

Yapım ve güçlendirme yönetmeliklerinde (TBDY (2018), ACI 440.2R-17 (2017), TBEC-2019 (2019), FIB-2010 (2010) ve CNR-DT200-2013 (2013)). CFRP ile güçlendirme ile ilgili bazı sınırlar söz konusudur. Özellikle beton basınç dayanımının belirli bir seviyenin altında olması (17 MPa altı), güçlendirme şekli gibi kriterler baz yönetmeliklerde yer almaktadır. Bununla beraber CFRP'nin betonarme yapıya uygulama şekli (yapıştırma şekli ve kullanılan yapıştırıcı türü ve gramajı vs. gibi) ile ilgili detaylar yönetmeliklerde yer almamaktadır. Bu çalışmanın temel motivasyonunu ve araştırmanın sorusu da bu problemin çözülmesi üzerine oluşturulmuştur. Araştırma sorusu;

- 1) Kesme açısından yetersiz olan kirişlerde farklı (çok düşük-orta ve yüksek) beton dayanımlarında CFRP ile yapılacak güçlendirme sonucunda güçlendirilen elemanın performansı nasıl değişir?
- 2) Güçlendirmede farklı gramajlarda CFRP kullanılmasının taşıma kapasitesi, süneklik, rijitlik gibi özellikler için elemanda oluşturacağı fark nedir?
- 3) Farklı CFRP sargılama türleri (tam sargı, U sargı ve yandan sargı) ile elemanın davranışı nasıl değişmektedir?

Bu sorulara cevap verebilmek amacıyla kapsam kısmında belirtildiği şekliyle, farklı beton basınç dayanımlarına sahip kesme kirişlerinde, farklı gramajlarda CFRP ve farklı güçlendirme şekilleri ile çalışılmıştır. Bu malzemelerle yapılacak detaylı çalışmaların güçlendirme malzemelerinin daha uygun şekilde uygulanmasına hem istenen kapasite artışı hem ekonomiklik açısından katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

1.2. Kapsam

Bu çalışmada hedef dayanım olarak beş farklı dayanım seçilmiştir. Bunlar sırasıyla 5-10 MPa, 10-20 MPa, 20-30 MPa, 30-40 MPa ve 40-50 MPa'dır. Betonun üretiminde bazı belirsizlikler olması nedeniyle bu aralıklarda beton üretimi hedeflenmiştir. Her beton sınıfında yedişer olmak üzere toplamda 35 adet kiriş hazırlanmıştır. Tüm numunelerde boyuna donatılar üstte 2Ø8 ve altta 2Ø10, kesme kapasitesinin yetersiz olması için etriyeler ise Ø6 / 50 olarak seçilmiştir. Yine tüm numunelerde etriyeler 5 cm aralıklarla sağ ve sol mesnet bölgelerinde ikişer, orta açıklıkta beşer olmak üzere dokuz adet kullanılmıştır.

Her beton sınıfı için birer adet referans olmak üzere tam, U tipi ve yan yüz sargının kirişin kesme kapasitesi ve davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Hazırlanan her tür sargılamada 300 ve 900 g/m² birim ağırlıklarında CFRP tek yönlü (+ 90/-90 konfigürasyonunda) kumaş kullanılmıştır.

TBDY-2018 (Madde 7.2.5.1.)'de, bu yönetmelik kapsamında yapılacak tüm betonarme binaların beton sınıfının C25'ten daha düşük olmaması şartı bulunmaktadır. Ayrıca ACI 440.2R-17 (2017)'de sürekli ve şerit uygulamalar halinde tam sargılama, iki veya üç taraftan yapıştırma ile kesme etkilerine karşı güçlendirmeye izin verilmiştir. Bu güçlendirme yöntemlerinden biri seçilirken iki ve üç taraftan yapıştırma ile güçlendirme uygulamalarında karakteristik beton basınç dayanımının en az 17 MPa ve karakteristik beton çekme dayanımının en az 1,4 MPa olması şartı bulunmaktadır. Çalışmada CFRP malzemesinin kirişlerde beton sınıfı, uygulama tipi ve CFRP gramaj türüne göre kirişin kapasitesine ve davranış şekline katkısı incelenmiştir.

Yönetmelik şartları ve Türkiye'deki mevcut yapıların çok daha düşük beton sınıflarında olması sebebiyle bu çalışmada hedef beton basınç dayanımı 5MPa-10 MPa gibi düşük dayanımlı beton la da çalışılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu çalışmada CFRP ile kirişlerin güçlendirilmesinde beton sınıfı ve CFRP gramaj etkisi incelenmiş, sargı türünün güçlendirmede oluşturduğu farklar gözlemlenmiştir. Bu bölümde, farklı LP malzemelerle güçlendirilen betonarme elemanların taşıma gücü kapasitelerinde görülen değişimlerle ilgili farklı çalışmalar sunulmuştur.

2.1. Kirişlerde Kesme İçin Yapılan Deneyler

Chalioris ve ark. (2003) tarafından yapılan çalışmada 1400 mm uzunluğunda 300 milimetre flanş genişliğinde 50 mm flanş kalınlığında 150 milimetre gövde genişliğinde toplam 200 milimetre derinlikle 5 adet tablalı betonarme kiriş hazırlanmıştır. Bu kirişlerin bir grubu etriye ile diğer grup etriyesiz şekilde tasarlanmıştır. Kesme alanı boyunca CFRP ile U şeklinde sargılanan kirişlerden birine ankraj uygulanmıştır. Güçlendirilen kirişlerin referans kirişe oranla daha büyük kesme mukavemetine sahip olduğu görülmüştür. Ankraj uygulamasının da karbon fiberin betondan ayrılmasını geciktirerek daha etkin çalışmasını sağladığı görülmüştür.

Jayaprakash (2008) tarafından yapılan çalışmada 2980 mm boyunda 120*340 mm kesitinde toplam 16 adet betonarme kiriş hazırlanmıştır. 6 tane hasarlı kiriş, 6 tane hasarsız kiriş CFRP ile güçlendirilmiştir. 4 tane referans giriş hazırlanmıştır. Deneyde CFRP şeritler yatay düzlemle 45, 90 ve 135⁰ açıyla, U ve L şeklinde yapıştirilmiştir. Kesme dayanımına katkısı kıyaslandığında en iyi sonucun 45⁰ açılı uygulamayla alındığı görülmüştür. CFRP şeritler kirişin kesme kapasitesini yaklaşık %11-139 aralığında değişen oranlarda artırmıştır. a/d oranı 4 olan kirişler 2,5 olan kirişlere göre kesme dayanımını %83 artırmıştır.

Alzate (2009) tarafından yapılan çalışmada, hazırlanan betonarme kirişlerde kesme dayanımını artırmak için FRP ile güçlendirme yapılmıştır. Güçlendirme yapılan betonarme yapı elemanlarında, kesme dayanımı büyük ölçüde artmıştır. Uygulamada yapı elemanlarının kesme dayanımına en fazla katkısı olan güçlendirme şekli tüm yüzlere yapılan tam sargılama ile elde edilmiştir.

Bukhari (2010) tarafından yapılan çalışmada CFRP şeritlerle güçlendirilen betonarme kirişlerin, güçlendirmenin kesme dayanımına katkısını görmek için farklı araştırmacılar tarafından önerilmiş bağıntıların doğruluğu değerlendirilmiştir. CFRP'nin kesme dayanımını önemli oranda artırdığı ve CFRP'nin kiriş eksenini ile 45° açı ile uygulanmasının kirişin yük taşıma kapasitesine en fazla katkıyı sağladığı görülmüştür.

Kankal (2011) tarafından yapılan çalışmada ankraj bulon sayısının, kesme kapasitesi yetersiz kirişlerin davranışına ve yük taşıma kapasitesine etkisi araştırılmıştır. 2 adet referans, 3 adet farklı sayıda bulonlarla ankraj ile güçlendirilen kirişler test edilmiştir. Referans kirişlerden biri kesme donatısı yeterli, diğeri ise yetersiz şekilde hazırlanmıştır. Sırasıyla bu iki referans kirişe iyi ve kötü referans kiriş denilmiştir. Güçlendirme yapılırken GFRP plaklar, kirişlerin yan yüzlerine yapıştırılmış ve bu kirişlerde 2, 3 ve 4 adet bulon kullanılmıştır. 2 ve 3 adet bulon kullanılan güçlendirilmiş kirişler, kesme donatısı yetersiz olan kötü referans numuneden daha çok yük taşımıştır. Fakat kesme kırılmasıyla göçmüştür. 4 bulon kullanılan güçlendirilmiş kiriş ise sünek bir davranış sergilemiştir ve nihayetinde eğilmeden dolayı kırılmıştır.

Arabacı (2018) tarafından yapılan çalışmada betonarme kirişler çelik levhalarla güçlendirilmiş, kirişlerin dayanımındaki değişim incelenmiştir. Bir referans, 4 tanesi 3 mm, 4 tanesi 6 mm kalınlıktaki çelik plakalar kullanılmak üzere toplamda 9 adet kiriş üretilmiştir. Çelik plakalar bu iki grup numuneden birer tanesine epoksi ile kiriş açıklığına uygulanmıştır. Birer tanesine U şeklinde uygulama yapılmış ve diğer kirişlerde uygulamaya ek olarak uç kısımlara bulon yerleştirilmiştir. Levha uçlarında kayma gerilmeleri olduğundan uygulanan yükün artışıyla çelik levha ve kiriş arasındaki bağlantı kopmaktadır. Bulon uygulaması bu gerilmeler için kirişin yük taşıma kapasitesini ve rijitliğini artırmıştır. Numunelere yerdeğiştirme kontrollü yükleme yapılmış, deplasmanlar kaydedilmiştir. Levha kalınlığındaki artış ve uygulamanın bulonlarla desteklenmesi kirişin sünekliğine ve yük taşıma kapasitesine önemli ölçüde katkı sağlamıştır.

Oruç (2019) tarafından yapılan çalışmadan kesmeye karşı yetersiz 2 adet referans olmak üzere toplam 6 tane betonarme kiriş imal edilmiş, hazırlanan numuneler yarı statik yükleme ve dinamik ölçüm olmak üzere iki aşamada test edilmiştir. Numunelerde CFRP uygulamasında 50 mm, 100 mm, 150 mm 200 mm olmak üzere 4 farklı şerit aralığı tayin edilmiştir. Deneysel çalışmanın sonucuna göre şerit aralıklarının, güçlendirme yapılan kirişlerde kesme dayanımı ve sünekliğe katkısını oldukça etkilediği gözlemlenmiştir. Şerit aralığı değeri azaldıkça kiriş numunelerin dinamik özelliklerinin olumlu etkilendiği görülmüştür.

Abodan (2019) tarafından yapılan çalışmada 150 mm ve 250 mm kesitinde 2000 mm boyunda C16 beton sınıfında ve B420c çelik donatı ile kirişin bir tarafı kesme kapasitesi yetersiz olacak şekilde betonarme kirişler üretilmiştir. Bu numuneler BFRP ile açılı şerit yöntemi ile güçlendirilmiştir. Kesme kapasitesi yetersiz olan tarafına 45

derece açıyla U sargılama ve tam sargılama yapılmıştır. Kirişlerin ortalama kesme dayanımı sehim kapasitesi ve kiriş yüzeyindeki kesme çatlak açıklıkları ve kesme deformasyonları incelenmiştir. Güçlendirilen kiriş numunelerin referans kirişlere oranla kesme kapasitesinde %61-113 arasında artış görülmüş, en verimli sonucun tam sargılamada 45 derece açıyla yapılan numunede olduğu ortaya çıkmıştır.

Kaya (2019) tarafından yapılan yaptığı çalışmada güçlendirilmiş kolon-kiriş birleşim noktalarının çarpma davranışı incelenmek üzere, sekiz adet 1/3 ölçekli, 1200 mm boyunda 200*200 mm en kesitli kolon ve 1500 mm boyunda 100*150 mm en kesitli kirişler monolitik şekilde hazırlanmıştır. CFRP şeritler Sikadur-330 ile birleşim noktalarına uygulanmıştır. Ağırlık düşürücü test düzeneği ile numunelere 84 kg çekiçle 500 ve 750 mm yükseklikten çarpma yükü uygulanmıştır. Çarpma yüklemesi ile CFRP şeritlerde ölçülmüş maksimum birim deformasyon değeri, statik yüklemeye yüzeyden soyulma değerinden 2.05 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. CFRP şeritlerin çarpma yüklemesi etkisi ile statik yüklemeye oranla, daha çok kesme kuvvetini karşıladığı görülmüştür. Kirişteki kesme donatısı oranının çarpma yüklemesi etkisinde önemli bir etkisi olduğu görülmüştür. Kesme donatısı oranının azalmasıyla, çarpma yüklemesi etkisindeki kolon-kiriş birleşimlerinin performansı önemli ölçüde azalmıştır. Kirişlerin kesme donatısı oranı azaldıkça CFRP şeritlerin deplasman değeri artmıştır.

Aldhabır (2019) tarafından yapılan çalışmada dikdörtgen kesitli eğilme ve kesme kapasitesi yetersiz olarak üretilen kirişlerde CFRP ve GFRP kompozitlerle enine ve boyuna doğrultularda U şeklinde güçlendirme yapılmıştır. Kirişlerin SEM analiz sonuçları ve deney sonuçları kıyaslanmıştır. Deney sonuçlarına göre FRP'lerle güçlendirilmiş kirişlerin FRP sargı katmanı artmasıyla yük taşıma kapasitesinin arttığı fakat SEM analizinde sargı katmanı artışı ile kirişin taşıma kapasitesinin aynı oranda artmadığı tespit edilmiştir. Betonarme kirişlerin alt ve yan yüzeyleri parametrik olarak FRP kumaşlarla güçlendirilmiş ve SEM analizi yapılmıştır. Kirişin alt yüzeyinde FRP kumaş uygulanmasının boyuna doğrultuda daha etkili olduğu görülmüştür. Kirişin yan yüzeyinde FRP kumaş uygulamasının enine doğrultuda daha etkili olduğu görülmüştür. Ve tüm sonuçlara bakıldığında CFRP'nin GFRP kumaşlara kıyasla taşıma kapasitesine katkısının daha çok olduğu görülmüştür.

İnceltilmiş uçlu öngermeli beton/betonarme kirişler kullanılan yapılarda kirişler, kesme etkisi ile göçmekte ve istenen eğilme kapasitesine ulaşamamaktadır. Kirişin inceltilmiş uç bölgesinde oluşan kesme hasarını önlemede, kirişler yönetmeliklere uygun olarak imal edilmesine karşın öngörülen kar yükünden daha fazla yük meydana

gelebilmektedir. Böylece kiriş uç bölgelerinde kesme hasarı meydana gelmektedir. Aksoylu (2019) tarafından yapılan çalışmada, bu hasarı engellemek için CFRP uygulaması yapılmış ve deneysel olarak incelenmiştir. Deneyde 320 cm boyunda kirişler hazırlanmış, beton silindir basınç dayanımı 30 MPa beton kullanılmış, boyuna donatı 2Ø9, 1Ø8, 2 adet 2Ø8 askı donatısı ve 1 adet 1/2 öngerme halatı kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler referans numune ve tam ve yarım sargılı uygulama yapılan güçlendirilmiş kirişlerin sonuçları kıyaslanmıştır. +45/-45 konfigürasyonunda tek kat 400 g/m² CFRP kumaş ile güçlendirme yapılmıştır. Kesme yetersiz kirişler tasarlamak için a_v/d oranı 2,4 olarak seçilmiştir. Deney sonunda tam sargılı uygulamanın %60, yarı sargılı uygulamanın %49 oranında kesme kapasitesine katkı sağladığı tespit edilmiştir.

Aksoylu (2020) tarafından yapılan bir çalışmada, kesmeye karşı yetersiz 11 adet kiriş hazırlanmış, kirişlerin kesme açıklığında delik çapı/kiriş yüksekliği oranı 0.30, 0.44, 0.64 olan delikler oluşturulmuştur. Hazırlanan kirişler düşey yüklerle test edilmiştir. Bu numunelerden 0.30 oranında boşlukla hazırlanan kirişin yük taşıma kapasitesinde azalma olmuş ve kirişin sünekliği artmıştır. Delik çapının artışıyla yük taşıma kapasiteleri önemli ölçüde azalmıştır. CFRP ile bu kirişlerin yük taşıma kapasitesi ve sünekliği büyük oranda iyileştirilmiştir. Deney sonunda güçlendirme yöntemi ve oluşturulan delik çaplarının, güçlendirme üzerinde önemli parametreler olduğu görülmüştür. d/h oranı 0.64 olan kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan yöntemlerin hiçbiri başarılı sonuç vermemiştir.

Aksoylu (2021) tarafından yapılan deneysel çalışmada kesme yönünden yetersiz ön hasarsız betonarme kirişler güçlendirilerek düşey yükler altında test edilmiştir. Ön hasarsız kesme kirişleri için önerdiği Mekanik Dikişlerle güçlendirme literatürdeki ilk çalışmadır. Çalışmada lifli polimer malzemelerin en ekonomik türü olan GFRP ile Mekanik Dikiş yönteminin sonuçları performans/maliyet açısından kıyaslanmıştır. Çalışmada tüm numunelerde çekme bölgesinde 3Ø12 ve basınç bölgesinde 2Ø8 boyuna donatı varken, enine donatılar Ø6/350mm olarak seçilmiştir. Beton sınıfı olarak C35 ve donatı sınıfı olarak B420c tercih edilmiştir. Deneyde boyuna donatılar denge altı sünek davranışa göre tasarlanmıştır. Ön hasarsız kesme kirişleri mekanik dikişler, GFRP ve bunların hibrit kullanılması durumu kıyaslanmıştır. Numunelerin yük taşıma kapasitesi, sünekliği, rijitlik değerleri ve enerji tüketme kapasiteleri karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Deneysel çalışmada referans numune kesme hasarı ile göçme moduna ulaşmıştır. Mekanik dikiş ve GFRP ile güçlendirilmiş olan numuneler ise referans kirişe oranla taşıma kapasitelerinde sırasıyla %16,8 ve %18,1 oranında artış görülmüştür.

Ayrıca yine bu güçlendirilmiş kirişlerin referans kirişe oranla daha sünek davranış sergilemesi, yapılan uygulamaların güçlendirme yöntemleri içinde tercih edilebilecek etkili yöntemler olduğu belirtilmiştir. Çalışma sonucuna göre kesme kirişlerinde uygulanacak güçlendirme yöntemlerinde yeni bir yöntem olan mekanik dikiş tanıtılmıştır. Ayrıca mekanik dikişlerin GFRP'ye göre daha ekonomik bir çözüm yöntemi olduğu vurgulanmıştır.

Hamad (2021) tarafından yapılan çalışmada kesme açısından yetersiz tablalı kirişler, farklı CFRP konfigürasyonlarıyla güçlendirilmiş, güçlendirme tipinin kirişin davranışına etkisi deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Biri referans 9 adet 1/2 ölçekli T kiriş üretilmiştir. Bunlardan 7 tanesinin kesme hasarı beklenen bölgede CFRP ile parçalı şekilde, bir tanesi ise yine kesme bölgesinde tam salgılamayla güçlendirilmiştir. Parçalı uygulamada iki çalışmada CFRP ankrajlarla kirişe sabitlenmiştir. Çalışmanın sonucuna göre ankrajsız ve U sargılama yapılan numunelerde CFRP tabakası ayrılma (debonding) olmuştur. Ankraj uygulamasının sürekli ve kesme kapasitesine oldukça katkı sağladığı görülmüştür.

Aksoylu ve ark. (2022)'de yaptıkları çalışmada mekanik dikişleri inovatif bir güçlendirme yöntemi olarak sunmuşlardır. Bu yenilikçi yöntem, düşük maliyetli bir çözümle kirişlerin güçlendirilmesi uygulamasını kolaylaştırmaktadır. Bu kapsamda altı adet numune düşey yük altında deneysel olarak incelenmiştir. Numunelerden biri referans olarak test edilirken, diğerleri her iki kirişin kesme açıklığında %0,2 ile %1 arasında değişen farklı oranlarda (ρ_{MS}) mekanik dikiş uygulaması ile güçlendirilmiştir. Mekanik Dikişler etriye mantığı dikkate alınarak 90° açı ile uygulanmıştır. Mekanik Dikişlerin çapı, ankraj derinliği ve mekanik özellikleri sabit tutulmuş ve bunların kirişlerin güçlendirilmesi üzerindeki etkileri süneklik, dayanım, rijitlik ve enerji dağıtma kapasiteleri açısından incelenmiştir. Sonuçlar, artan Mekanik Dikiş oranının hem güç hem de enerji tüketme kapasitesi açısından davranışta dramatik bir pozitif değişikliğe neden olduğunu ortaya koymuştur. Uygun aralıklarla ((%1) mekanik dikiş oranı veya (d/5) Mekanik dikiş aralığı) yapılan mekanik dikiş yerleşimleri kesme kapasitesini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Ancak mekanik dikişler kirişlere dışarıdan delinerek ve ankraj yapılarak uygulandığı için ρ_{MS} 'deki artışla birlikte rijitlikte %43'lük bir kayıp meydana geldiği belirtilmiştir.

Aksoylu (2022) çalışmasında kesme yönünden yetersiz 12 adet 100x150x1000mm boyutlarındaki ön hasarsız betonarme kirişleri CFRP ve GFRP şeritlerle farklı konfigürasyonlarla güçlendirmiştir. Çalışmada, literatür açısından

minimum olan CFRP ve GFRP şerit genişliği (30mm) dikkate alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, minimum CFRP ve GFRP şerit genişliğinin, tam sarma, U-sarma ve U-sarma + boyuna şerit yapıştırma ile güçlendirilmiş betonarme kesme kirişlerin davranışları üzerindeki etkisine odaklanmaktadır. Kesme kırılmasına karşı uygulanan tam sarma şeritler, numunelerin yük taşıma kapasitesini %53 - %63 aralık oranında artırmıştır. Tam sarma en iyi güçlendirme seçimi olmasına rağmen, hem CFRP hem de GFRP yapıştırmanın U-sargısı ve U-sargısı+boyuna şeritleri, referans kesme numunesine kıyasla kesme kapasitesini %53~75 oranında artırmıştır. Süneklik açısından en iyi sonuç, kirişinin tamamen GFRP sarılı olduğu (S5 numunesi) güçlendirme tipi ile elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar ayrıca ACI440.2R-17, TBEC-2019 ve FIB-2001 tarafından analitik olarak verilen formüllerle karşılaştırılmıştır. Özellikle U-sargılı kirişlerde FIB tahmini %81 olarak belirlenmiştir. Diğer kodların tahminleri deneysel sonuçları karşılamaktan uzak olduğundan, özellikle CFRP ve GFRP deformasyonu ve uzunlamasına şerit bağlantıları için yaklaşımlarla ilgili olarak kodlara önemli iyileştirmeler uygulanması gerektiği belirtilmiştir. Test sonuçlarına göre, güçlendirme uygulamalarında en az CFRP kadar etkili ancak daha ucuz olan GFRP'nin tercih edilebileceği önerilmiştir.

2.2. Kirişlerde Eğilme İçin Yapılan Deneyler

Kaya (2010) tarafından yapılan çalışmada maksimum 15 mm agrega boyutlu beton üretimiyle 35 adet betonarme kiriş imal edilip kirişlerin çekme bölgeleri CFRP kumaş uygulaması ile güçlendirilmiştir. Kirişlerin en, boy ve yüksekliği birbirinden farklı şekilde üretilen bir grup ve boy yükseklik ölçüleri farklı, eni aynı olmak üzere ikinci bir grup numune hazırlanmıştır. Deneyde kirişlerin taşıma kapasitesi ve boyut etkisinin ilişkisi incelenmiştir. En güçlü boyut etkisi 3 boyutlu güçlendirilmiş kirişlerde en zayıf boyut etkisi 2 boyutlu ve genişliği değişken olan güçlendirilmiş kirişlerde olmuştur. Ayrıca güçlendirme yapılan kirişler de ilk çatlak oluşumundan sonra CFRP şeritlerin çatlakları büyük ölçüde engellediği gözlemlenmiştir.

Al-Rousan ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmada termal şok ile kesme yetersizliği oluşturulan betonarme kiriş numunelere CFRP güçlendirmesi uygulanmıştır. Öncelikle hazırlanan betonarme kiriş numuneleri 2 saat boyunca 500°C sıcaklığa maruz bırakılmış, bu kirişlerin referans numunelere göre yük taşıma kapasitelerinde %68 azalma görülmüştür. Yatayla 90 ve 45° açı ile CFRP levhalarla güçlendirme yapılmış,

numunelerin yük taşıma kapasitesinin sırasıyla %90 ve %99 oranlarında geri kazandığı görülmüştür.

Şengün (2016) tarafından yapılan çalışmada 2 grup halinde toplamda beş adet kiriş hazırlanmıştır. Bu kirişlerin tümünde a/d oranı 2,5 seçilmiş, ilk grupta çelik lif içermeyen, aynı şerit genişliğinde biri hasarlı diğeri hasarsız iki adet kiriş hazırlanmıştır. DBYBHY-2007 CFRP şerit genişliği şartına uyulmamasına rağmen yapılan güçlendirmenin kirişin dayanım ve sünekliğine katkısı olduğu görülmüştür. İkinci grupta iki tane hasarsız biri hasarlı farklı şerit genişlikleriyle hazırlanmış toplamda 3 adet kiriş bulunmaktadır. Deney sonucunda CFRP şerit genişliklerinin artmasıyla kirişlerin taşıma kapasitelerinin arttığı görülmüştür. CFRP şerit genişliği sırasıyla 5 ve 10 cm olan iki numunede yük taşıma kapasiteleri 115,9 ve 137 kN bulunmuş, yük taşıma kapasitesi şerit genişliğinin değişmesiyle %18 daha fazla bulunmuştur. Yine bu iki kiriş kıyaslandığında geniş şeritler kullanılan numunenin daha fazla yerdeğiştirme kapasitesinin olduğu yani daha sünek davrandığı görülmüştür. İkinci grupta bulunan hasarlı kirişin diğeri iki hasarsız kirişe göre yük tükenmesi durumunda yerdeğiştirmesi daha fazla olmuş, rijitliği daha düşüktür. Aynı şerit genişliği kullanılan hasarlı ve hasarsız iki kirişte hasarlı kirişin onarıldığı haliyle maksimum yük taşıma kapasiteleri çok yakın çıkmıştır. Hasarlı kirişin yerdeğiştirme kapasitesi daha düşük olmuştur.

Hussien ve ark. (2018) tarafından yapılan çalışmada karbon fiber takviyeli polimer kompozitleri ile güçlendirilen betonarme kirişlerin, yükleme ile eğilme davranışı ABAQUS sonlu elemanlar programıyla modellenmiş ve yetersiz donatılar ve düşük dayanımlı beton ile hazırlanan betonarme kirişler güçlendirilmiştir. Çalışmada tek yönlü CFRP kumaşlar U şeklinde numunelere uygulanmıştır. Abaküs paket programında oluşturulan betonarme kiriş modeline, CFRP kompozitler kirişin yüzlerine kabuk eleman şeklinde tanımlanmıştır. Programda betonarme kiriş için uygun parametreler belirlenmiş ve deneysel çalışmaların yük-sehim grafikleriyle kıyaslandığında analiz sonuçlarının önemli oranda benzediği görülmüştür.

Kaygusuz (2018) tarafından yapılan çalışmada hazırlanan betonarme kirişler, sıcaklık hasarına uğradıktan sonra CFRP ve GFRP ile onarılmıştır. Çalışmada 1 grup referans, 7 grup sıcaklık hasarına maruz kalmış kiriş hazırlanmıştır. Bu 7 grup numune 3 saat 600°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Hasarlı gruplara CFRP ve GFRP uygulanmış ve eğilme deneyi yapılmıştır. Sıcaklık hasarına uğramış numune grubunda, referans numunelere göre yük taşıma kapasitesinde %16, sehim değerinde %46, enerji tüketme kapasitesinde %61 oranında azalma olmuştur. Onarım yapılan kirişlerde, hasarlı ve

onarım yapılmamış referans kirişlere oranla yük taşıma kapasitesinde %4-30 oranında artış görülmüştür. Yine onarım ile hasarlı kirişlerin yük taşıma kapasiteleri %88-110 oranında artmıştır.

Kırteke (2019) tarafından yapılan çalışmada boyu 2000 mm, enkesit boyutları 150*250 mm, toplamda on adet kiriş hazırlanmıştır. 2 adet referans, 2 adet 5 mm kalınlığında sadece epoksi ile güçlendirilmiş, iki adet çelik lifli epoksi ile sadece çekme yüzeyi güçlendirilmiş, 2 adet Çelik lifli epoksi ile U şeklinde güçlendirilmiş kiriş üretilmiştir. Kirişler 4 noktalı eğilme deneyi ile test edilmiştir. Deneyde C30/37 sınıfı beton, B420c sınıfı donatı, Sikadur-31 epoksi malzemesi kullanılmıştır. Bu çalışmada mevcut yapılarda sadece epoksi sıva ile güçlendirme yapmanın uygulama kolaylığı sağlayacağı düşünülmüş ve bu uygulamanın sonuçları deneylerle irdelenmiştir. Enerji yutma kapasitesi açısından en yüksek değer sadece epoksi ile yapılan güçlendirmeyle elde edilmiş, daha sonra sırasıyla çelik lifli epoksili güçlendirme ve elyaf lifli epoksili güçlendirme sonuçları elde edilmiştir. Kirişlerin akma yükü değerleri kıyaslandığında en yüksek sonucun elyaf takviyeli uygulamada daha sonra çelik lifli ve sadece epoksi ile yapılan uygulamalarda alındığı görülmüştür. Taşıma yükü en yüksek çekme bölgesine uygulanan çelik lifli uygulamada, daha sonra sırasıyla yalın epoksili, elyaf takviyeli, U şeklinde çelik lifli ve referans kirişte elde edilmiştir. Taşıma yükü ve deplasman açısından çelik lifli uygulama en iyi sonucu verirken akma yükü en yüksek elyaf takviyeli güçlendirmede görülmüştür. Enerji yutma kapasitesi için en yüksek değer yalın epoksi uygulamasından elde edilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Giriş

Bu çalışmada, yükseklikleri 150 mm ve genişlikleri 100 mm olan 1/3 ölçekli 35 adet betonarme kesme dayanımı yetersiz olan kirişin beş adedi güçlendirilmeden (referans) diğer 30 adedi ise farklı birim ağırlıklarda CFRP şeritleri ile güçlendirilmiştir. Kiriş imalatları beş farklı beton sınıfına göre yapılmıştır. Güçlendirmeler tam sargılama, U sargı ve yalnız yan yüzlerde olmak üzere üç farklı şekilde uygulanmıştır. 35 adet kirişin kesit özellikleri ile envanter bilgileri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kiriş Envanteri ve Kod İsimleri

Hedef Beton Basınç Dayanımı (MPa)	Güçlendirilmemiş	CFRP İle Güçlendirilmiş					
		Tam Sargı (F)		U Tip Sargı		İki Taraftan Sargı	
5-10	B ₁ -0	BF ₁ -1	BF ₁ -2	BU ₁ -1	BU ₁ -2	BS ₁ -1	BS ₁ -2
10-20	B ₂ -0	BF ₂ -1	BU ₁ -2	BU ₂ -1	BU ₂ -2	BS ₂ -1	BS ₂ -2
20-30	B ₃ -0	BF ₃ -1	BF ₃ -2	BU ₃ -1	BU ₃ -2	BS ₃ -1	BS ₃ -2
30-40	B ₄ -0	BF ₄ -1	BF ₄ -2	BU ₄ -1	BU ₄ -2	BS ₄ -1	BS ₄ -2
40-50	B ₅ -0	BF ₅ -1	BF ₅ -2	BU ₅ -1	BU ₅ -2	BS ₅ -1	BS ₅ -2

Bu deneyde Çizelge 3.1’de görüldüğü üzere kirişlerin imalatında varsayılan kabuller aşağıda verilmiştir.

1. Beton sınıfları: TBDY-2018 (madde 7.2.5.1)’de ,bu yönetmelik kapsamında yapılacak tüm betonarme binaların beton sınıfının C25’ten daha düşük olmaması şartı bulunmaktadır. ACI 440.2R-17 (2017) ’de ise sürekli ve şerit uygulamalar halinde tam sargılama, iki veya üç taraftan yapıştırma ile kesme etkilerine karşı güçlendirmeye izin verilmektedir. Bu güçlendirme yöntemlerinden biri seçilirken iki ve üç taraftan yapıştırma ile güçlendirme uygulamalarında karakteristik beton basınç dayanımının en az 17 MPa ve karakteristik beton çekme dayanımının en az 1,4 MPa olması şartı bulunmaktadır. Karakteristik beton basınç dayanımının en az 17 MPa olması şartı ve Türkiye’de bugün çok daha düşük beton sınıflarında binaların mevcut olması ile bu deneyde hedef beton basınç dayanımı 5MPa-25 MPa olan betonla hazırlanan numunelerle de çalışılmıştır. Çizelge 3.1’deki gibi 5 farklı aralıkta beton sınıfı imal edilmiştir.

2. Sargı şekli: TBDY-2018 (madde 15.10.3.2)'de kirişlerde LP sargılama ile kiriş sünekliğinin ve kesme dayanımının artırılmasında tam sargı (tüm kesit çevresinin sarılması) yönteminin kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Fakat ACI 440.2R-17 (2017) 'de sürekli ve şerit uygulamalar halinde tam sargılama, iki veya üç taraftan yapıştırma ile kesme etkilerine karşı güçlendirmeye izin verilmektedir. Bu sebeple deneyde tam, U tipi ve yan yüzlerde CFRP şeritler uygulanarak sargı şeklinin farklı beton sınıflarındaki etkisi incelenmiştir.
3. Donatılar: deneydeki tüm numunelerde eşit sayı ve aralıklarda kullanılan boyuna donatılar üst ve alt olmak üzere sırasıyla 2Ø8 ve 2Ø10, kesme kapasitesinin yetersiz olması için etriyeler ise sadece mesnetlerde ikişer adet ve açıklık ortasında Ø6 / 5 cm olarak beş adet olacak şekilde tasarlanmıştır. Sargı şeritlerinin merkezler arası uzaklıkları 6,5 cm, şerit genişlikleri 3 cm olarak seçilmiştir.
4. Etriye kancaları: Türkiye Bina Deprem yönetmeliği 2018 (TBDY-2018)'de etriyelerin her iki ucunda 135 derece kıvrımlı kanca bulunması şartından dolayı deneyde enine donatıların kancaları 135° olarak uygulanmıştır.
5. CFRP gramajı: 300 ve 900 gr/m² olmak üzere iki farklı gramajda tek yönlü CFRP kullanılarak, CFRP gramajına göre kirişin kesme dayanımına katkısında oluşacak farklar incelenmiştir.

Bu deneyde 3 parametrede kıyaslama yapmak üzere kirişin kesme donatısı yetersiz seçilmiş olup beton sınıfına göre, CFRP gramajı ve sargı şeklinin kiriş güçlendirmede oluşturduğu farklı etkiler incelenmiştir.

3.2. Deney Numuneleri ve Yükleme Hücresi

Bu çalışmada hazırlanan numuneler ve yapılan deneyler Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma laboratuvarında, Yardımcı Prefabrik Yapı Elemanları A.Ş. ve Konya Çimento San. A.Ş. laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Deney numuneleri

Deneyde numuneler 300 kN kapasitesindeki yükleme düzeneğine yerleştirilerek test edilmiştir. Düşey yükleri ölçmek amacıyla yük ölçer (Loadcell) ve yerdeğiştirmeleri ölçmek için potansiyometrik cetveller (LVDT), yük taşıma kapasiteleri ve yerdeğiştirme bilgisinin kaydeden veri okuma sistemi ve bilgisayar kullanılmıştır. Yükleme düzeneği Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Silindir numuneleri

3.3.2. Donatı

Deneyde hazırlanan kirişlerin kesme kapasitesinin yetersiz olması amacıyla etriyeler Şekil 3.6'daki gibi yerleştirilmiştir. Her bir kirişte toplam dokuz etriye mesnet bölgelerinde 5 cm aralıklarla iki adet, orta açıklık bölgesinde yine 5 cm aralıklarla beşer adet kullanılmıştır. Etriye kancaları yönetmelik gereği 135 derece olarak tasarlanmıştır.



Şekil 3.6. Donatı kafesleri

3.3.3. Karbon lifli polimer

Bu çalışmada 300 ve 900 g/m² olarak iki tür, + 90/-90 konfigürasyonunda tek tabakalı karbon elyaf kumaş kullanılmış olup tam sargılama, U tipi sargılama ve yan yüzlere uygulanmak üzere 3 tip sargı modeli ile güçlendirme yapılmıştır. Kesme ve eğilme etkisine karşı yetersiz yapı elemanlarına farklı türde malzemelerle güçlendirme yapılabilmektedir. LP türleri içinde mukavemeti ve hafifliği sebebiyle CFRP kullanımı oldukça yaygındır.

CFRP kumaşların belirlenen kalınlık ve boyda hazırlanma aşaması Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. CFRP kumaş kesimi

3.3.4. Reçine

Güçlendirme uygulamalarında kullanılan fiber malzemelerin polimerlerle kompozit halde çalışması amaçlanmaktadır. Polimer malzemelerin termal stabilitesi, kimyasal dayanıklılıkları ve sünmeye karşı dayanıklılıkları güçlendirme uygulamaları için büyük önem teşkil etmektedir. Kompozitlerde yaygın olarak polyester, epoksi, vinil ester olmak üzere 3 tür reçine kullanılmaktadır.

- Polyester reçinesi güçlendirme uygulamalarında Ekonomik olması hafifliği ve ısıya dayanıklılığı açısından en çok tercih edilen matris malzemedir.

- Epoksi reçinesi diğer reçinelere nazaran daha iyi mekanik özelliklere ve dayanıklılığa sahiptir. Özellikle viskozitesi ve büzülme eğilimi düşüktür. Fakat maliyeti diğerlerine göre daha yüksektir.
- Vinil Ester reçinesi kimyasal etkilere karşı diğerlerine oranla daha dayanıklı olmasıyla FRP Çubuk imalatında daha çok tercih edilmektedir.

Bu çalışmada CFRP kumaş uygulamadan önce astar olarak kullanılmak üzere MAPEWRAP Primer 1, kumaşı kirişe uygularken kullanılan güçlü epoksi reçine olarak MAPEWRAP 31 ürünleri kullanılmıştır. (Şekil 3.8) İki yapıştırıcı da çift komponentlidir ve üreticinin belirlediği (4:1) oranlarda karıştırılarak sırasıyla uygulanmıştır.

Deneyde kullanılan MapeWrap Primer 1 ve MapeWrap Primer 31 T epoksi yapıştırıcının mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.8. Yapıştırıcı çift bileşenli kimyasallar

Çizelge 3.2. MapeWrap Primer 1 ve MapeWrap Primer 31 T, epoksi yapıştırıcının mekanik/fiziksel özellikleri

AÇIKLAMA	A bileşeni	B bileşeni	A bileşeni	B bileşeni
Kıvam	Sıvı	Sıvı	Macun	Macun
Renk	Transparan sarı	Transparan sarı	Koyu sarı	Açık sarı
Yoğunluk (g/cm ³)	1.12	1	1.34	1.25
Karışım Oranı	3	1	3	1
Priz alma süresi:				
+10°C:	5-6 saat			
+23°C:	3-4 saat		4 saat	
+30°C:	2-3 saat			
Çalışılabilirlik süresi				
+10°C	120'			
+23°C	90'		40 dakika	
+30°C	60'			
Uygulama sıcaklığı	+10°C ile +30°C arası		+5°C ile +30°C arası	
Tamamen prizini alma süresi	7 gün		7 gün	
Betona yapışma mukavemeti (N/mm ²)	> 3 (+23°C ortam sıcaklığında, 7 günün sonunda betonun çatlaması)		> 3 (+23°C ortam sıcaklığında, 7 günün sonunda betonun çatlaması)	
Çekme dayanımı* (ASTM D 638) (N/mm ²):	-		≥ 20	

3.4. Deney Elemanlarının Üretilmesi

Bu çalışmada tüm kirişler, aynı boyutlarda ve aynı donatı miktarı, türü ve aralığında, kesme dayanımı yetersiz şekilde hazırlanmıştır.

3.4.1. Kalıpların hazırlanması

Deneyde kullanılmak üzere 35 tane playwood kalıp hazırlanmış beton söküm işleminin kolaylığı açısından kalıplar yağlanarak Şekil 3.9' daki gibi beton dökümüne hazır hale getirilmiştir.



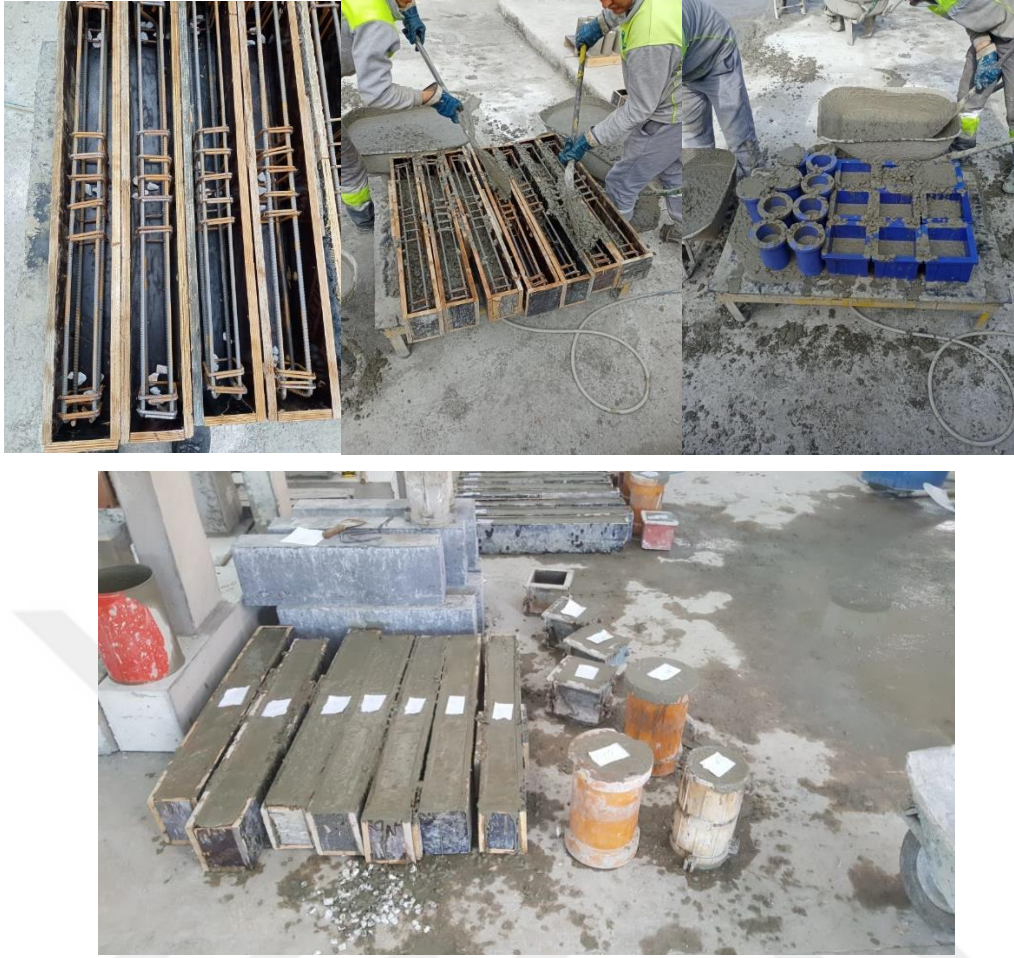
Şekil 3.9. Kiriş numunelerin kalıpları ve beton dökülmeden önce kalıp yağlama işlemi

3.4.2. Donatıların hazırlanması

Tüm kirişlerde üst donatılar 2Ø8 ve alt donatılar 2Ø10 olarak, kesme kapasitesinin yetersiz olması için etriyeler ise sadece mesnetlerde ikişer ve orta açıklık bölgesinde beş adet olmak üzere Ø6/50 mm olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan donatı kafesleri iç yüzeyi yağlanmış kalıplara 1 cm pas payı olacak şekilde yerleştirilmiştir.

3.4.3. Beton dökümü

Üst ve alt donatıların yerleşiminin, etriye aralıklarının ve paspaylarının kontrolü yapıldıktan sonra hazırlanan beton kalıp içine yerleştirilmiştir. Mümkün olduğunca homojen bir yapı elde etmek için çelik çubuklarla şişleme yapılmıştır, vibratör yardımıyla betonun Şekil 3.10'da görüldüğü gibi yerleşmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.10. Ahşap kalıplara ve küp - silindir kalıplara beton dökme aşaması

3.4.4. Sertleşmiş betonun CFRP uygulaması için hazırlanması ve uygulanması

Kalıplara yerleştirilen taze betonun sertleşmesinin ardından 35 kirişte referans kirişler, beton sınıf ve sargılama türü bilgisi kirişlerin sağ ve soluna işaretlenmiştir. CFRP kumaş uygulamak için kiriş yüzeyinde yardımıyla taşlama yapılmış, yüzeyde kalan ince çimento tabakası temizlenmiştir. Bu sayede yüzeyde uygulamaya engel olabilecek fazlalıklar da alınmıştır.

Tam ve U tipi sargılama yapılacak olan CFRP şeritleri ile güçlendirilen kirişlerin köşe bölgelerinde gerilme yoğunluğu ile CFRP şeritleri kopmaması için TBDY-2018 yönetmeliğe göre 30 mm'lik pahlama dönüş yarıçapı elde edilmiştir. Nemli bez yardımıyla yüzey tozdan arındırılmıştır. Sargı şekli ve kumaş türü için numaralandırılan kirişlerin (Şekil 3.11), yüzeyi taşlanmış, temizlenmiş ve CFRP kumaş yapıştırılmaya uygun hale getirilmek üzere uygulama bölgeleri işaretlenmiştir. (Şekil 3.12)



Şekil 3.11. Yüzey işlemine hazır hale getirilen numuneler



Şekil 3.12. Betonarme kirişlerin yüzey taşlama, pahlama, temizleme ve şerit genişliği ve aralıklarının işaretlenmesi

3.4.5. CFRP Şeritlerin hazırlanması ve uygulanması

Kullanılan iki farklı gramajdaki CFRP kumaşlardan 3 cm genişlikte 60 cm, 40 cm, 15 cm olmak üzere 3 farklı boyutta kesim yapılmıştır. Hazırlanan kumaşların boyutlarına göre miktarları Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Beton sınıflarına ve sargı boyutlarına göre CFRP kumaş miktarları

. Tahmini Beton Basınç Dayanımı (MPa)	CFRP adetleri					
	İki taraftan sargılama tipi		U tip		Tam Sargı	
	(300 g/m ²)	(900 g/m ²)	(300 g/m ²)	(900 g/m ²)	(300 g/m ²)	(900 g/m ²)
5-10	24	24	12	12	12	12
10-20	24	24	12	12	12	12
20-30	24	24	12	12	12	12
30-40	24	24	12	12	12	12
40-50	24	24	12	12	12	12

Çift komponentli astar ve epoksi yapıştırıcı karışımları karıştırılarak kullanıma hazır hale getirilmiştir. Taşlanmış ve temizlenmiş kuru beton yüzeyine astar tabaka sürülmüştür. Kesilip hazırlanmış CFRP kumaşlar epoksi yapıştırıcıyla ıslatılarak işaretlenmiş yüzeye yapıştırılmıştır. Kiriş ve kumaş arasında boşluk kalmamasına özen gösterilerek uygulama tamamlanmıştır. Betonarme kirişlere CFRP kumaşların yapıştırılması işlemi U tip sargılama için Şekil 3.13’te, yan yüz sargılama için Şekil 3.14’te, tam sargılama için Şekil 3.15’te verilmiştir.



Şekil 3.13. Güçlendirme uygulaması (U tip sargılama)

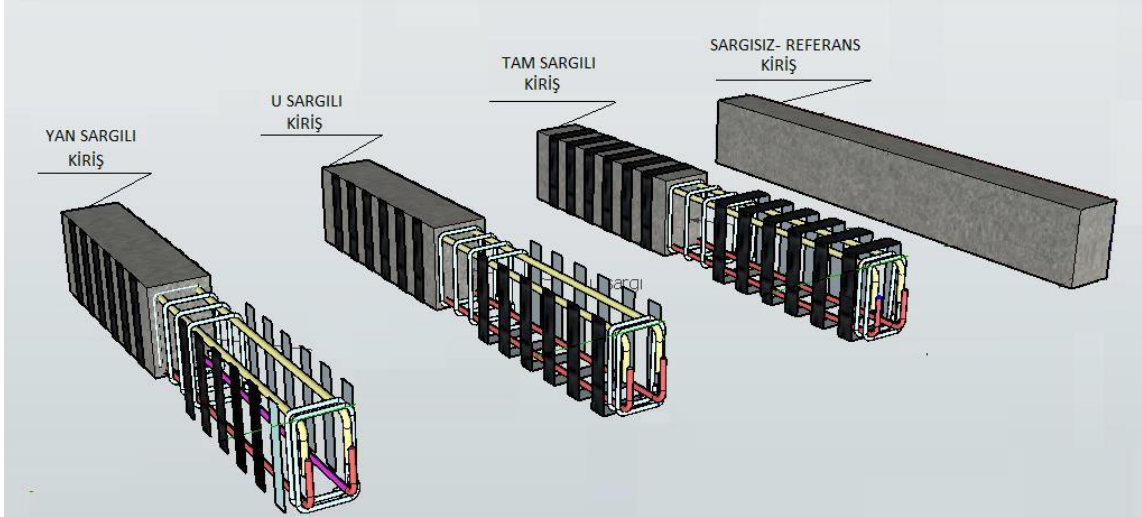


Şekil 3.14. Güçlendirme uygulaması (yan yüz sargılama)



Şekil 3.15. Güçlendirme uygulaması (Tam sargılama)

Deneyde Güçlendirilen kiriş numenlerin üç farklı sargılama şekli için şematik görüntüleri Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16. Güçlendirilen kiriş numunelerin şematik görüntüleri

3.5. Güçlendirilmiş Numunelerin Mekanik Özellikleri

CFRP ile güçlendirilmiş yapı elemanlarında birçok hasar türü oluşabilmektedir. Bu hasar modları lif kopması veya betonun ezilmesi gibi durumların yanında CFRP'nin betonun yüzeyinden ayrılması durumu da oluşabilmektedir. CFRP'nin beton yüzeyinden ayrılması, güçlendirme uygulamasının tam kapasitesine ulaşmasına engel olmaktadır. Bu nedenle yapı elemanlarının eğilme ve kesme mukavemeti hasar durumuna da bağlıdır.

Bugüne dek yapılmış olan çalışmalarda CFRP'nin beton yüzeyinden ayrılması, çekme donatısının akması sonrasında CFRP'nin kopması, donatı akmadan önce beton ezilmesi, donatı aktıktan sonra betonun ezilmesi gibi farklı durumlar meydana gelmiştir.

Bu çalışmada da tüm deneylerden sonra ulaşılan deplasman ve numuneye uygulanan yük arasındaki ilişkiyi gösteren verilerle yük-deplasman grafikleri çizilmiş, hasar durumları analiz edilmiştir. Veriler sayesinde numunelerin sünekliği, enerji tüketme kapasitesi ve rijitliklerine ulaşılmıştır.

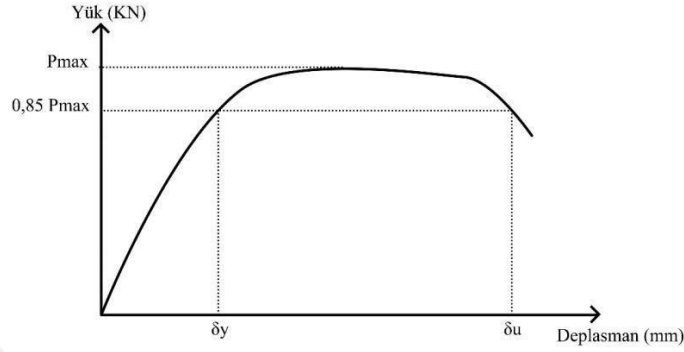
a) Sünekliğin değerlendirilmesi

Süneklik; yapı elemanında yük taşıma kapasitesinde artış olmazken deplasman miktarının artması durumudur.

Süneklik katsayısı μ , yükün %85 ine karşı gelen deplasman değeri ve akma anındaki deplasman değerine oranıdır. Süneklik sınırları içinde kalan dayanım düşüşü %15 kabul edilir ($P_u = 0.85 \times P_{max}$) (Aykaç ve Yılmaz, 2011).

Numunelerin süneklik oranına ulaşmak için öncelikle taşınan maksimum yükün %85'ine karşılık gelen yük değerleri, daha sonra da süneklik oranının hesabı yapılır.

Sünekliğinin değerlendirilmesi grafiği Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.17. Sistem sünekliğinin değerlendirilmesi grafiği

b) Enerji tüketimi değerlendirilmesi

Betonarme kirişlerin toplam enerji tüketme kapasiteleri, numunelerin yük deplasman eğrilerinin altında kalan alanların toplamı ile hesaplanmaktadır. Toplam enerji tüketimi ve maksimum yük anındaki ve akma anındaki toplam enerji tüketimleri, δ_y ile δ_u arasında tüketilen enerjilerin toplamı hesaplanır.

Maksimum yüke ulaşılan dek tüketilen enerji, P_{max} değerine kadar olan eğri altında kalan alan ile hesaplanmaktadır. teorik akma anındaki enerji tüketme kapasitesi, $0,85P_{max}$ değeri altında kalan alan ile hesaplanmıştır. δ_y ve δ_u değerleri arasında kalan alan ise plastik enerji tüketme kapasitesini vermektedir.

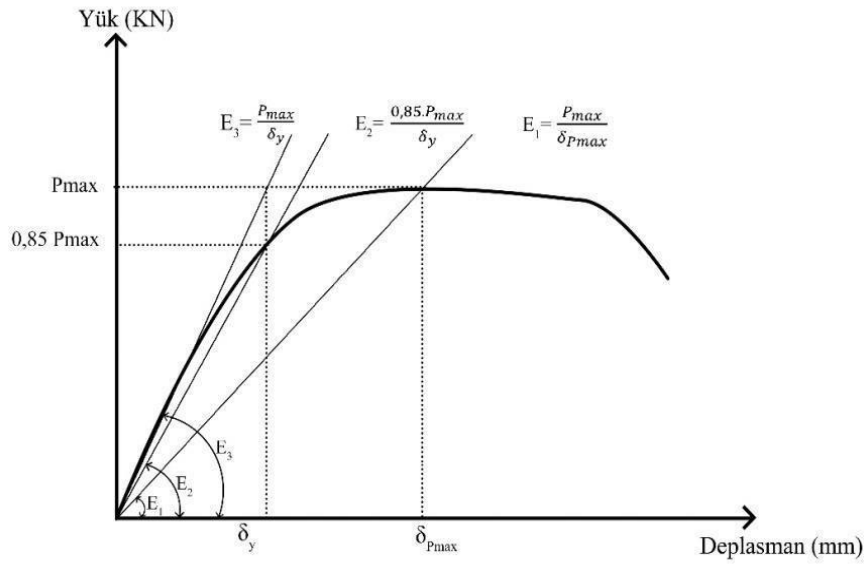
$$\overline{TET} = \sum \left(\frac{P_n + P_{n+1}}{2} (\delta_{n+1} - \delta_n) \right) \quad (1)$$

c) Elemanların rijitliğinin değerlendirilmesi

Rijitlik, bir yapı elemanının yük etkisiyle şekil değiştirmeye karşı direncidir. Rijitlik hesabı (Yük-deplasman grafiği) Şekil 3.18'de gösterilmiştir.

$$K = \frac{P}{\delta}$$

(2)



Şekil 3.18. Rijitlik hesabı (Yük-deplasman grafiği)

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu deneyde numunelerin deney sonuçları ve bu sayısal ve gözlemsel sonuçlarla her bir numuneye ait veriler düzenlenmiş ve kıyaslanmıştır. Numunelerin ulaştığı maksimum yük, maksimum deplasman, ilk çatlamanın meydana geldiği yük, enerji tüketimi, süneklik ve rijitlik gösterilmiştir. Numunelerin isimlendirme tablosu aşağıda verilmiştir.

Tablo 4.1. Kiriş Envanteri ve Kod İsimleri

Tahmini Beton Basınç Dayanımı	Referans Kiriş	Tam Sargı		U Tipi Sargı		Yan Yüz Sargı	
		300 g/m ²	900 g/m ²	300 g/m ²	900 g/m ²	300 g/m ²	900 g/m ²
5-10 MPa	B ₁ -0	BF ₁ -1	BF ₁ -2	BU ₁ -1	BU ₁ -2	BS ₁ -1	BS ₁ -2
10-20 MPa	B ₂ -0	BF ₂ -1	BF ₂ -2	BU ₂ -1	BU ₂ -2	BS ₂ -1	BS ₂ -2
20-30 MPa	B ₃ -0	BF ₃ -1	BF ₃ -2	BU ₃ -1	BU ₃ -2	BS ₃ -1	BS ₃ -2
30-40 MPa	B ₄ -0	BF ₄ -1	BF ₄ -2	BU ₄ -1	BU ₄ -2	BS ₄ -1	BS ₄ -2
40-50 MPa	B ₅ -0	BF ₅ -1	BF ₅ -2	BU ₅ -1	BU ₅ -2	BS ₅ -1	BS ₅ -2

4.1. Deney Sonuçları

Bu çalışmada test edilen kiriş numunelerin deneylerin ve sonuçları gösterilmiştir. Deneylerde her bir numunenin ulaştığı maksimum yük, maksimum deplasman, akmanın oluştuğu yük, enerji tüketimi, rijitliği ve sünekliği hakkında bilgiler verilmiştir. Daha sonra farklı beton sınıfları, farklı CFRP gramajları ve farklı sargı şekilleri açısından numune sonuçları kıyaslanmıştır.

Deneyde her beton sınıf aralığında 3'er adet küp ve 3'er adet silindir numune hazırlanmıştır. Numunelerin 10 kN'luk artan yüklemelerle kırılana dek ulaştığı yük ve yaptığı deplasman bilgisi kaydedilmiştir.

Betonarme bir kirişin kesme kuvveti etkisiyle kırılma şekli oldukça karmaşık olup, yük ve mesnet arası mesafeye, kirişin derinliğine, beton basınç dayanımına çekme ve kesme donatı miktarı ve dizaynına, yüklemeye göre değişmektedir. (Sağiroğlu,2017) Yapılan deneysel çalışmalarla kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranının betonarme kirişin davranışını etkileyen en önemli değişkenlerden olduğu görülmüştür. (Ersoy, 2001)

Betonarme yapı elemanlarının istenen davranışı sergilemesi için beton ve donatı arasında etkili bir uyum gerekmektedir. Hesaplamalar sonucunda tespit edilen miktarda Donatı kullanılmasının yanında tüm yüklenme durumlarında istenen davranışı sergilemesi beklenen kirişte, donatının uygun şekilde detaylandırılması gerekmektedir. Betonarme elemanların bileşik eğilme etkisinde, eğilme etkisini karşılamak üzere boyuna donatı, kesme etkisini karşılamak üzere enine donatı hesabı yapılmaktadır. Özkal (2017) tarafından yapılan çalışmada da belirtildiği üzere bu hesaplamalar, standartlarda elemanların maruz kaldığı etkilerle yapılırken bazı boyut etkileri göz ardı edilebilmektedir. Kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı yapısal davranışta farklar oluşturmaktadır. Bu orandaki farklar kiriş davranışı ve kemer davranışı arasında bir geçiş ortaya çıkarmaktadır. Etriyersiz betonarme bir kirişin dahi kemerlenme etkisiyle tanımlanan durumdan dolayı kiriş kırılma yükü, hesaplanan kesme dayanımını aşabilmektedir. Yapılan çalışmalar doğrultusunda kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranının aralığı için farklı dayanım, göçme ve çatlak türleri görülmektedir.

a_v/d kesme açıklığının (a), faydalı yüksekliğe (d) oranı olup bu değer $3 < a_v/d < 7$ aralığındayken noktasal yükün oluşturduğu yerel basınç gerilmeleri, çatlakların basınç bölgesine doğru ilerlemesine engel olur. Kiriş eksenine dik çatlaklar oluşur, yükün artması ile kesme açıklığındaki çatlaklar tarafsız eksene doğru ilerler, bazı çatlaklar asal çekme gerilmelerine dik şekilde eğikleşmeye başlar. Bu sırada donatıdaki birim uzamada ani bir artış görülür. Bu artış eğik çatlamanın sebep olduğu bir gerilme uyumunu göstermektedir. Eğik çatlama, donatıda ani bir gerilme artışına neden olduğu için donatı doğrultusunda aderans çatlakları oluşur. Yükün daha da artmasıyla eğik çatlak kirişin basınç bölgesine doğru ilerler ve göçme olur. Bu şekilde oluşan kırılma gevrek ve aniden oluşur. (Ersoy ve Özcebe, 2002)

a_v/d oranı 7'den büyükse kiriş, eğilmedeki taşıma gücüne erişebilir. Kirişte eğik çatlamlar görülmez. Kirişi eğilme kapasitesine ulaştıran kesme kuvveti düşüktür. Yani kesme kuvvetinin kırılma üzerindeki etkisi azdır.

a_v/d oranı 2,5'tan düşük olan kirişlerde kesme davranışı eğilme davranışına göre daha baskın olmaktadır. Bu çalışmada kesme yetersiz kirişler elde edilmesi için bu oran 2,5 (35/14) seçilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan farklı sınıftaki betonların küp ve silindir numuneleri üzerinde basınç ve çekme deneyleri yapılmış, sonuçlar Tablo 4.2'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Küp ve silindir numunelerin basınç-çekme dayanımları

Hedef Beton Basınç Dayanımı (MPa)	Küp Numune Basınç Dayanımları (MPa)			Silindire Çevrilmiş Basınç Dayanımları (MPa)			Silindir Numune Çekme Dayanımı (MPa)		
	1.	2.	3.	1.	2.	3.	4.	5.	6.
	Numune	Numune	Numune	Numune	Numune	Numune	Numune	Numune	Numune
5-10 MPa	7,41	8,52	9,23	5,93	6,82	7,38	0,59	0,88	1,26
10-20 MPa	19,05	20,46	20,64	15,24	16,37	16,51	1,41	1,45	1,60
20-30 MPa	43,33	44,23	54,44	34,66	35,38	43,55	3,01	3,01	3,74
30-40 MPa	52,93	68,81	73,26	42,34	55,05	58,61	3,19	3,70	3,81
40-50 MPa	75,55	81,74	82,27	60,44	65,39	65,82	3,33	3,71	4,21

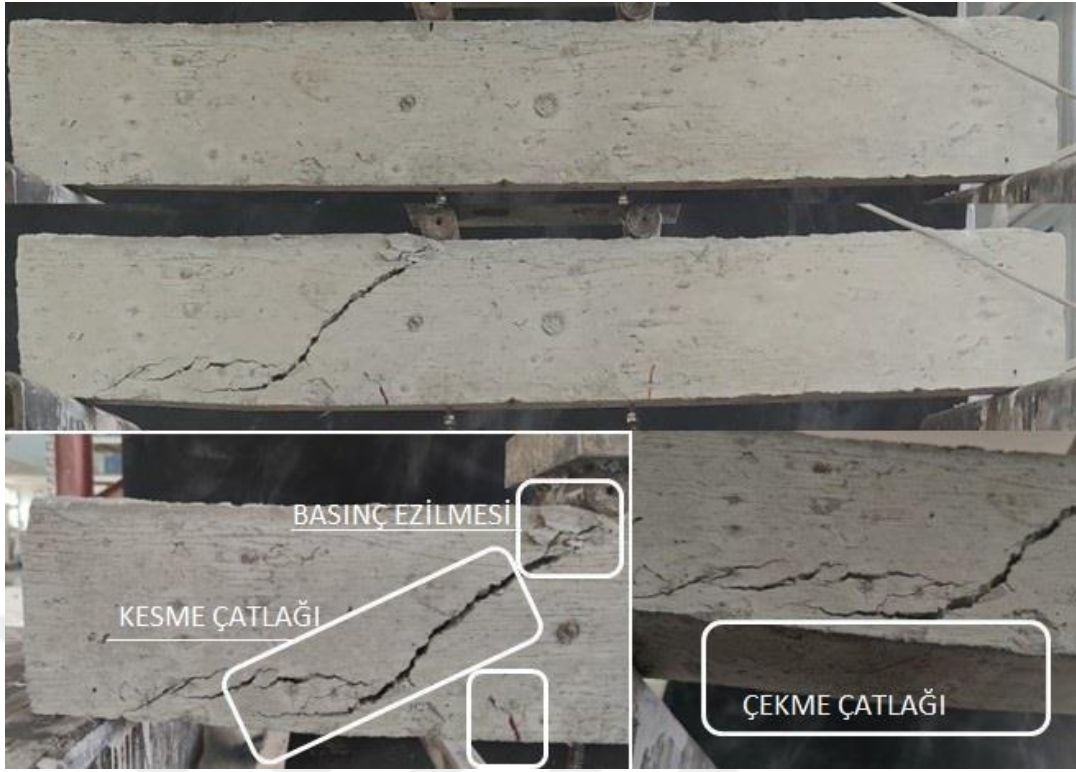
4.1.1. B₁-0 Numunesi

Hedef beton basınç dayanımı 5 MPa-10 MPa olan beton ile güçlendirme yapılmamış referans numunesi B₁-0 olarak kodlanmıştır. B₁-0 numunesinde ilk çatlaklar

20 kN yükte kesme bölgesinde oluşmuş, daha sonra eğilme çatlakları görülmeye başlanmıştır. Bu numune maksimum 22,49 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 3,48 mm olmuştur. Yüklemeye devam edildiğinde basınç bölgesinde kabuk betonda ezilme olmuştur. Kesme çatlakları beton basınç bölgesine hızlı bir şekilde ilerlemiş, bu durum akma noktasına yaklaşıldığını göstermiştir. Başlangıçta kiriş orta alt bölgesinde ince dikey eğilme çatlakları görülmüş, kirişin alt tarafından başlayan çatlaklar kiriş üst kısmına doğru eğimi azalarak ilerlemiştir. Kiriş yüksekliği boyunca asal çekme gerilmelerinin oluştuğu açı değiştiği için çatlakın eğiminde azalma olmuştur.

Güçlendirme yapılmamış, hedef beton basınç dayanımı 5MPa-10 MPa olan beton ve kesmeye karşı yetersiz donatı kullanılan kirişte, beklenen şekilde kesme kırılması gerçekleşmiştir. Deney sonunda numunede az deplasman oluşmuş ve yüklemeye noktalarında betonda ezilme görülmüştür. Eğilme bölgesinde mikro eğilme çatlakları görülmüştür. Kirişin sadece sol tarafında çekme çatlakları oluşmuş ve üst başlığa doğru ilerlemiştir. Nihai hasar kesme hasarıdır, ani göçme olmuştur.

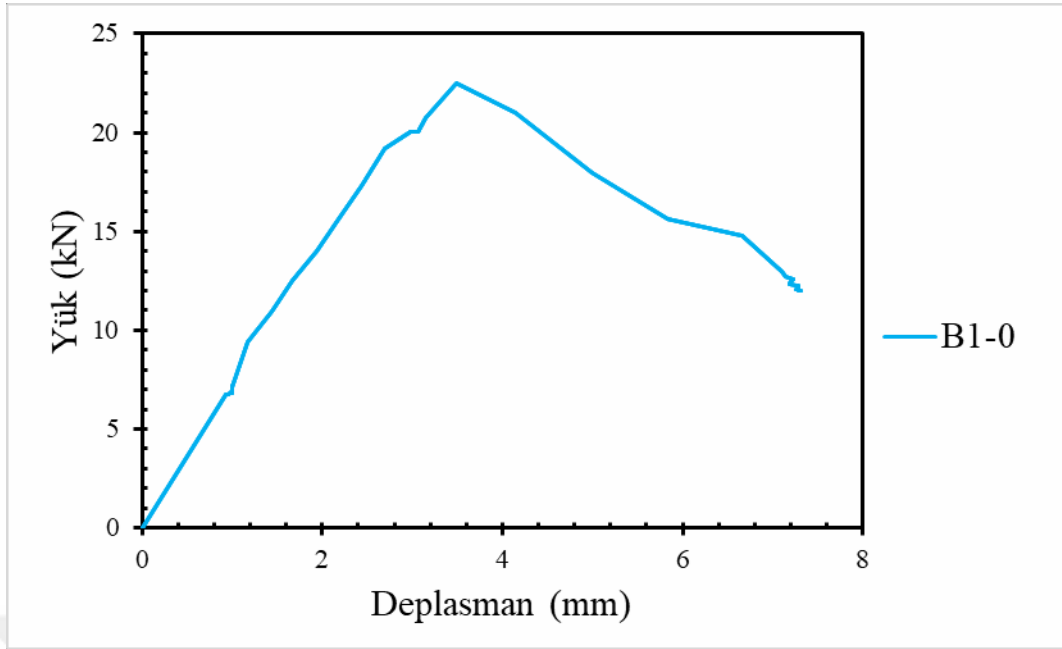
B₁-0 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü Şekil 4.1'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.2'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. B₁-0 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.3. B₁-0 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
22,49	19,12	1,54	3,48	6,46	109,21	7,10	56,99	47,29



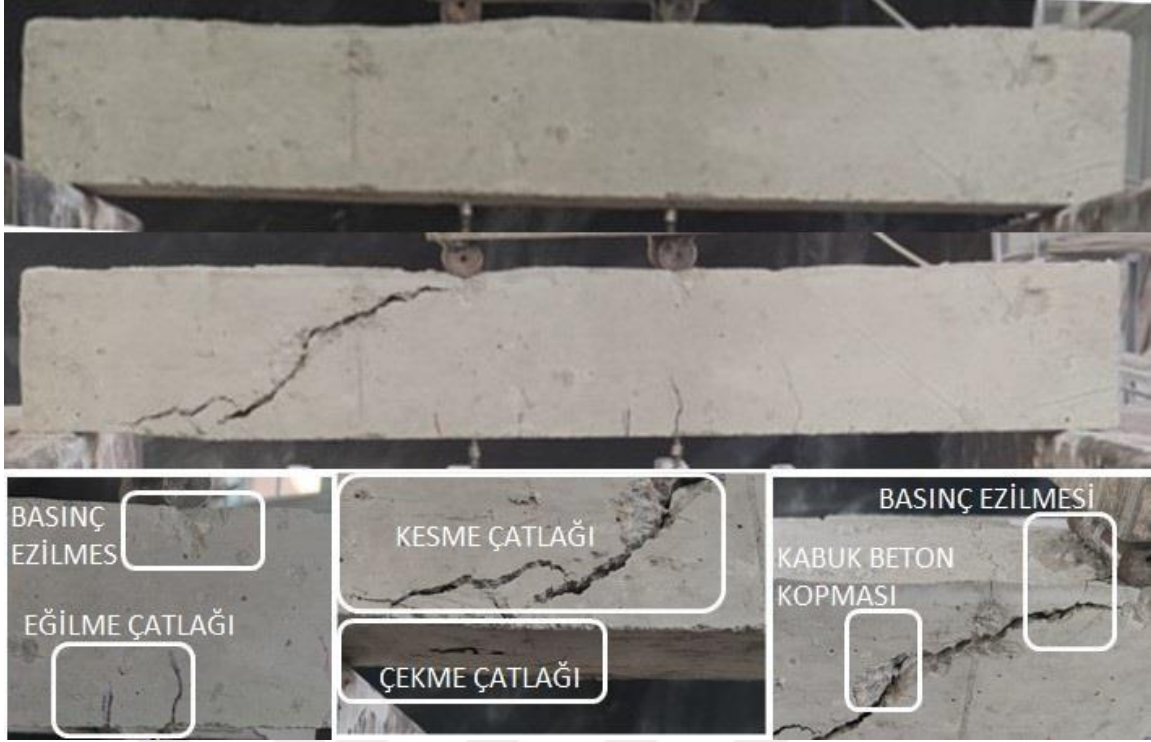
Şekil 4.2. B₁-0 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.2. B₂-0 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 10 MPa - 20 MPa olan beton ile güçlendirme yapılmamış referans numunesi B₂-0 olarak kodlanmıştır. B₂-0 numunesinde 15 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. 20 kN yükte eğilme çatlakları artmış ve kesme çatlağı oluşmuştur. Kirişin yükleme noktalarında beton, basınç etkisiyle ezilmiş ve dökülmüştür. 30 kN yüke gidilirken sol bölgedeki kesme çatlağı basınç bölgesine doğru hızla ilerleyerek hasar oluşmuştur. Bu numune maksimum 29,42 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 4,417 mm olarak gözlenmiştir. Düşük dayanımlı beton ve kesme yetersiz donatı ile oluşturulan numune beklendiği gibi kesme hasarıyla göçmüştür.

Deney sonunda kesme çatlaklarının etkisiyle kirişin ön yüzünde kabuk betonda kopmalar olmuştur. Son durumda numunede yükleme noktalarında betonda ezilme görülmüştür. Kirişin sol tarafında oluşan çekme çatlakları yükleme devam ettikçe üst başlığa kadar ilerlemiştir. Nihai hasar kesme hasarıdır ve gevrek şekilde göçme olmuştur.

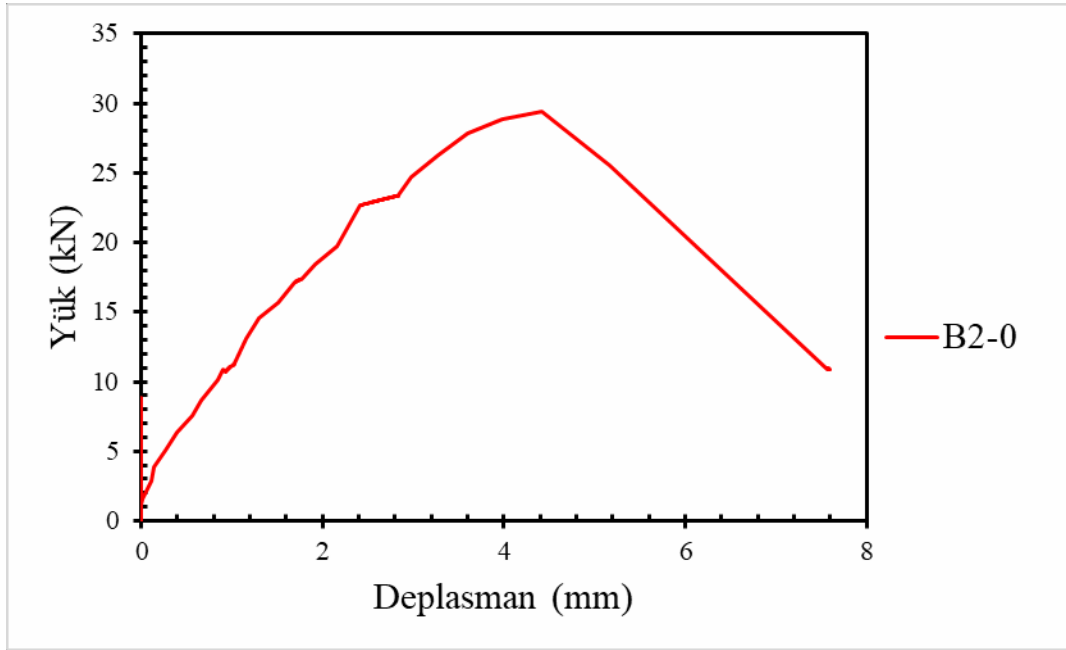
B₂-0 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümüleri Şekil 4.3'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.4'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. B₂-0 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.4. B₂-0 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
29,42	25,01	1,71	4,42	6,66	148,51	8,280	104,27	96,30



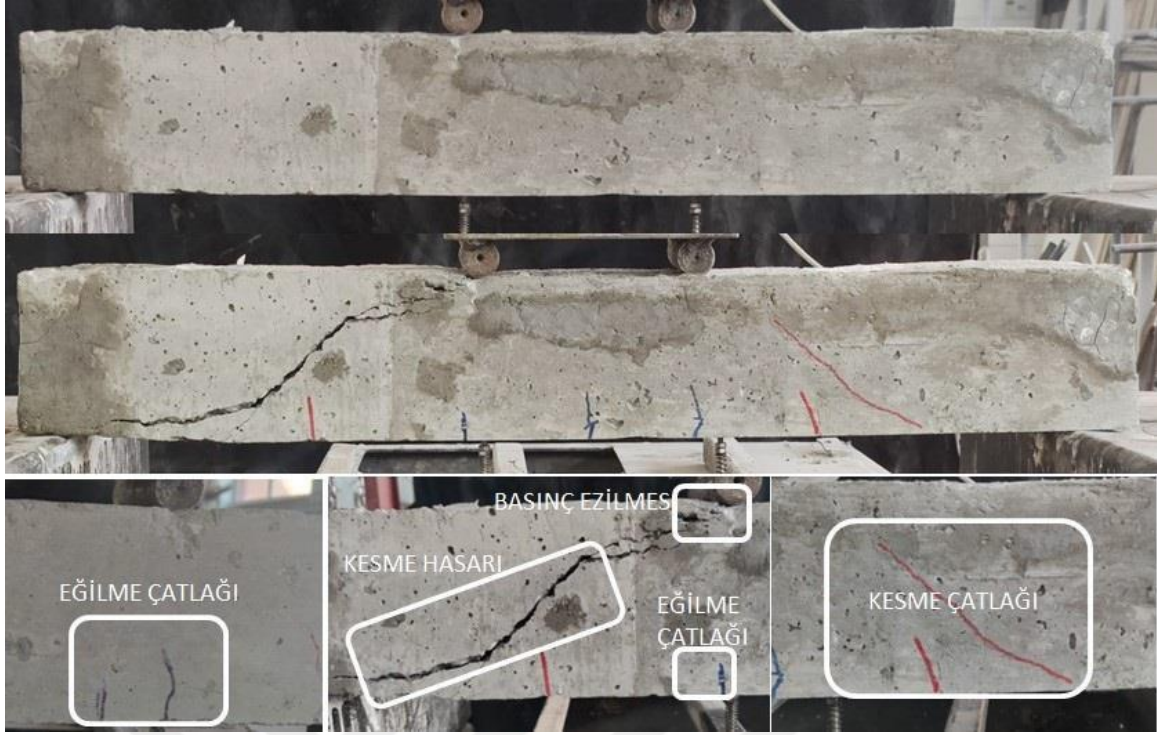
Şekil 4.4. B₂-0 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.3. B₃-0 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 20 MPa - 30 MPa olan beton ile güçlendirme yapılmamış referans numunesi B₃-0 olarak kodlanmıştır. B₃-0 numunesinde 20 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlaklar gözlenmiştir. 20 kN yükte matris çatlak sesleri duyulmuş, ilk çatlağın oluştuğu yükte 1,42 mm deplasman oluşmuştur. Başlangıçta eğilme çatlakları oluşmuş sonrasında kesme çatlakları oluşmuştur. Maksimum yüke ulaşıldığında kirişin sağ tarafında büyük bir kesme çatlağı oluşmuştur. 40 kN a gidilirken sol tarafta aniden oluşan kesme çatlağı hızla ilerlemiş ve gevrek davranışla göçme görülmüştür. Nihai hasar kesme hasarıdır.

Bu numune maksimum 43,507 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 3.83 mm olarak gözlenmiştir.

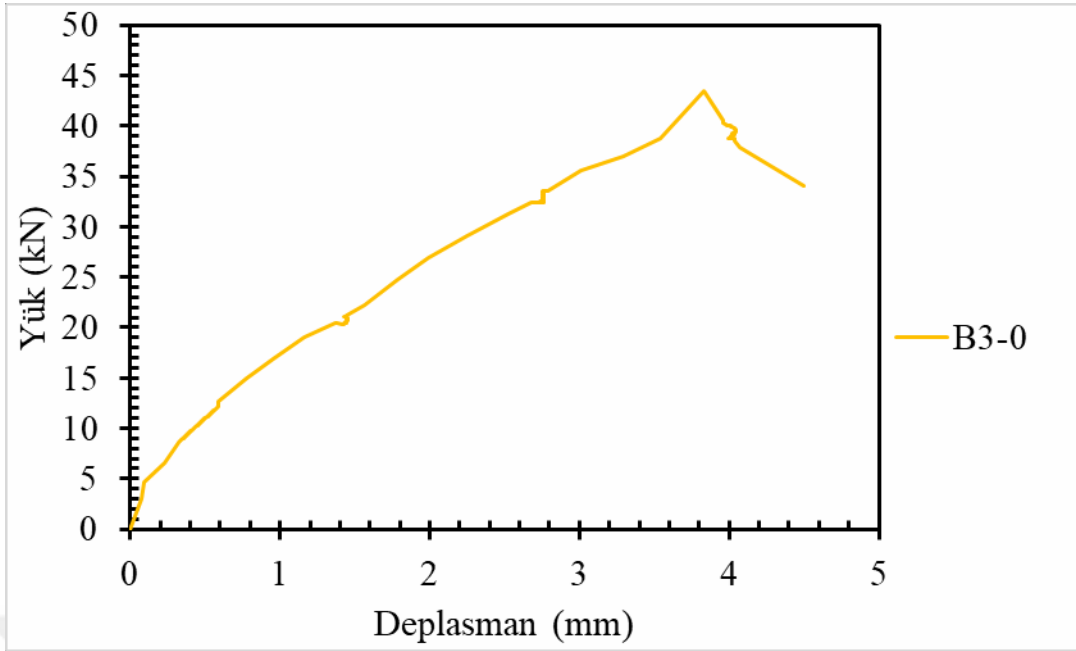
B₃-0 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümleri Şekil 4.5'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.6'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.5'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. B₃- numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.5. B₃-0 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
43,51	36,98	1,62	3,83	11,36	44,06	3,87	100,87	46,64



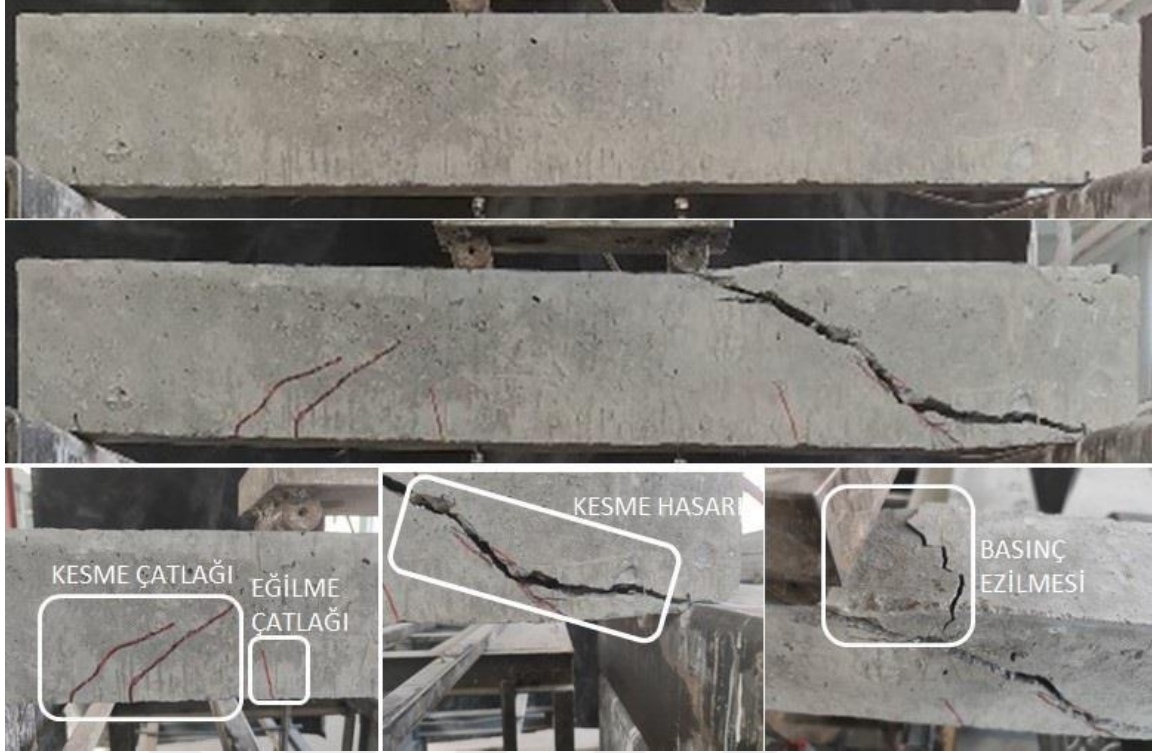
Şekil 4.6. B₃-0 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.4. B₄-0 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 30 MPa - 40 MPa olan beton ile güçlendirme yapılmamış referans numunesi B₄-0 olarak kodlanmıştır. B₄-0 numunesinde 30 kN ile kesme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. 45 kN da sağ kesme bölgesinde kiriş üst yüzüne uzanan büyük kesme çatlakları oluşmuş ve kiriş sağ taraftan mesnet ve yükleme noktası arasında kesme hasarıyla göçmüştür.

Bu numune maksimum 45,735 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 4,526 mm olarak gözlenmiştir. Beton dayanımı önceki numunelere kıyasla daha yüksek olduğu için ilk çatlakların görüldüğü yük daha fazla olmuş, fakat kesme donatısı yetersiz olmasından dolayı nihayetinde kesme kırılması görülmüştür.

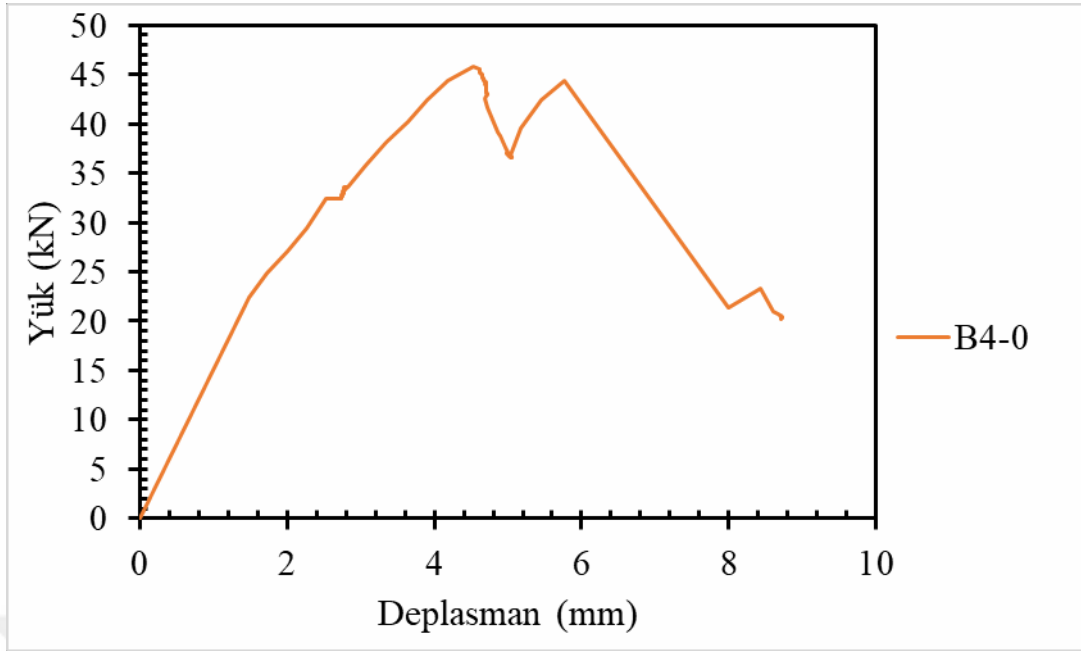
B₄-0 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümleri Şekil 4.7'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.8'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.6'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. B₄-0 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.6. B₄-0 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
45,74	38,87	1,46	4,53	10,10	263,33	11,08	127,16	68,18



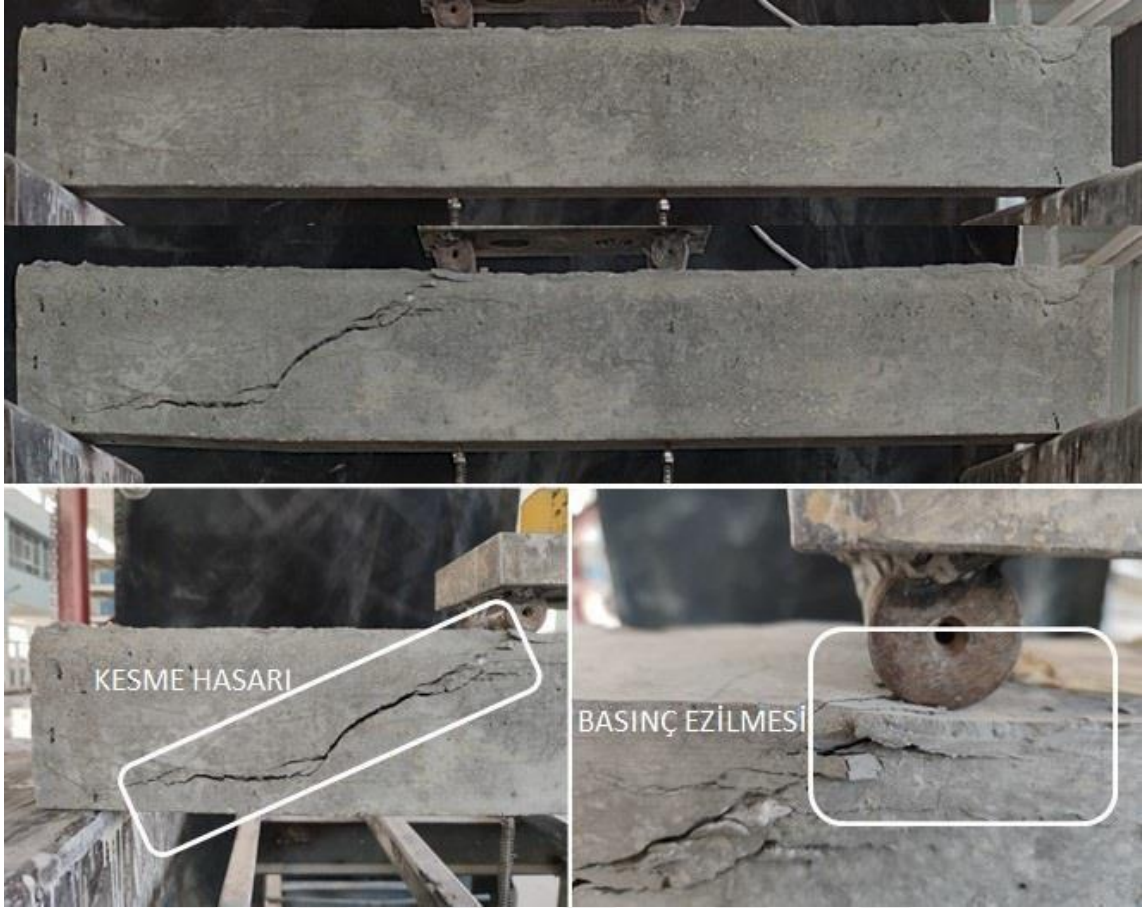
Şekil 4.8. B₄-0 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.5. B₅-0 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 40 MPa-50 MPa olan beton ile güçlendirme yapılmamış referans numunesi B₅-0 olarak kodlanmıştır. B₅-0 numunesinde 40 kN yüke kadar çatlak görülmemiş, 40 kN'da kesme çatlak gözlenmiştir ve basınç bölgesi ezilmiştir. Göçme halinin tamamlanması için kontrollü bir şekilde yüklemeye devam edilmiştir. Deney düzeneğine zarar vermemek için çok az bir yükleme ile göçme belirgin şekilde görülmüştür. Güçlendirilmemiş ve kesme donatısı yetersiz olarak hazırlanan kirişte beklenen kesme hasarı oluşmuştur.

Bu numune maksimum 41,573 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 4,211 mm olarak gözlenmiştir.

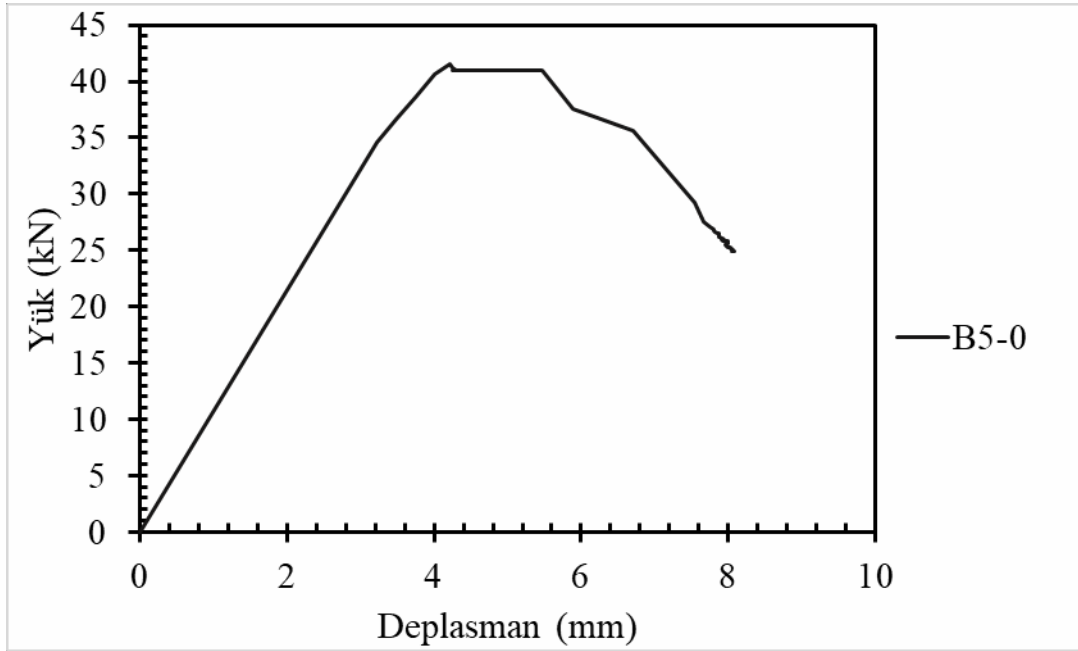
B₅-0 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünüşleri Şekil 4.9'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.10'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.9. B₅-0 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.7. B₅-0 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
41,57	35,34	1,91	4,21	9,87	232,74	10,07	95,54	162,92



Şekil 4.10. B₅-0 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.6. BF₁-1 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 5MPa-10 MPa olan beton ile 300 g/m² gramajlı CFRP ile tam sargılama şeklinde güçlendirilmiş numune BF₁-1 olarak kodlanmıştır. BF₁-1 numunesinde 30 kN ile kesme bölgelerinde CFRP uygulanmamış alanlarda ilk çatlaklar gözlenmiştir. Bu andaki deplasman değeri 4,68 mm dir. Tam sargılı CFRP uygulaması numunenin geç hasar almasını sağlamış ve oluşan çatlakların da ilerlemesini geciktirmiştir. CFRP'nin kiriş kesme dayanımını artırdığı, kirişin güç tükenmesine eğilme kırılması ile ulaştığı görülmüştür.

40 kN'da kesme çatlakları uzamış ve eğilme bölgesinde çatlaklar oluşmuştur. Yükte 50 kN'a ilerlenirken kiriş sünek davranış sergilemiştir. Çekme donatısında akma oluşmuş ve eğilme kırılması gerçekleşmiştir. Daha önce yapılan hedef beton basınç dayanımı 5MPa-10 MPa olan beton ile yapılan referans numunenin davranışına göre bu numunede, ACI 440.2R-17 (2017)'da 17 MPa ve daha düşük beton dayanımları için tam sargılama ile güçlendirme yapılması şartının gerekliliği görülmüştür.

Bu numune maksimum 41,335 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 22,53 mm olarak gözlenmiştir. Basınç bölgesi büyük oranda ezilmiştir. 35,135 kN yükte akma seviyesine ulaşılmış ve bu andaki deplasman değeri 23,16 mm olmuştur.

Referans numuneye göre tam sargının yük taşıma kapasitesine katkısı % 83,80 daha fazla olmuştur. Bu da tam sargılamanın kirişin taşıma kapasitesini oldukça

artırdığını göstermektedir. Referans numunenin süneklik oranı 1,54 iken, tam sargılama ile bu değer 4,91'e çıkmıştır. Sünek davranış için, süneklik oranının 4-5 aralığında olması gerektiği düşünüldüğünde bu numunede yapılan uygulamanın istenen orana yükselerek sünekliği sağladığı görülmüştür.

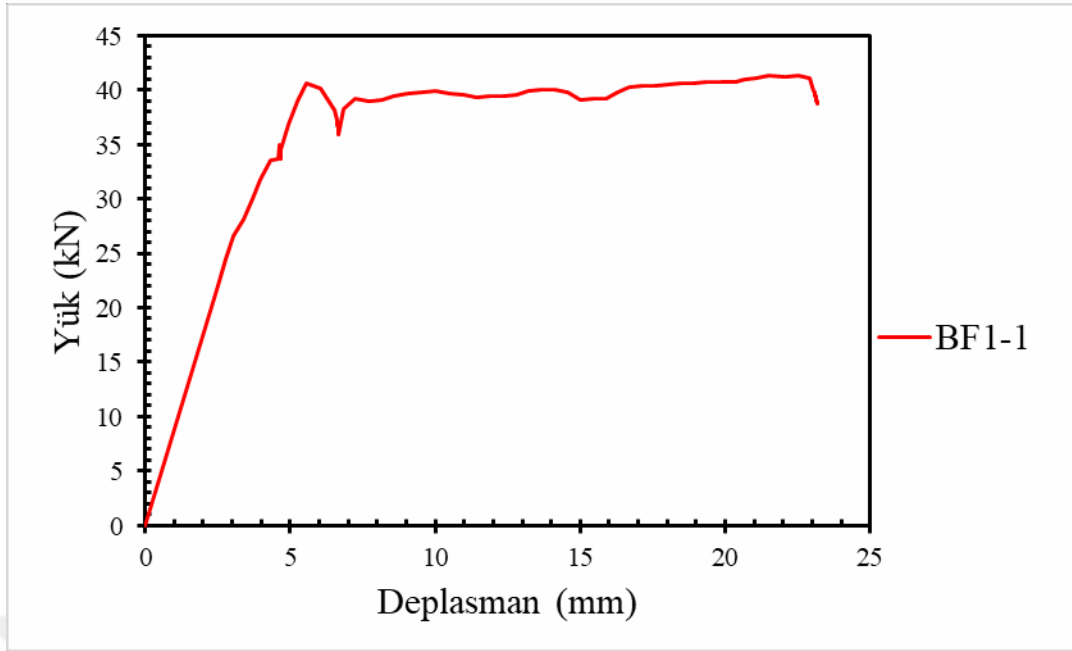
BF₁-1 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görüntüleri Şekil 4.11'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.12'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. BF₁-1 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.8. BF₁-1 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85*P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
41,34	35,13	4,91	22,53	1,83	827,78	7,44	818,66	738,28



Şekil 4.12. BF₁-1 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.7. BF₂-1 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 10 MPa - 20 MPa olan beton ile 300g/m² gramajlı CFRP ile tam sargılama şeklinde güçlendirilmiş numune BF₂-1 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 40 kN ile kesme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu sırada oluşan deplasman değeri 4,97 mm dir. 50 kN yükte eğilme çatlakları da oluşmaya başlamıştır. Beton bölgesi ezilmiştir. Deneyde kirişte kesme çatlakları oluşmuş, sünek bir davranışla göçme olmuştur.

Bu numune maksimum 61,607 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 10,909 mm olarak gözlenmiştir. Numune 52,366 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 22,02 mm olarak bulunmuştur. Deney sonunda yapılan incelemede CFRP yüzeyinden epoksi yapıştırıcının yer yer soyulduğu görülmüş fakat CFRP şeritlerde kopma veya beton yüzeyden ayrılma (debonding) olmamıştır. ACI 440.2R-17 (2017)'da belirtilen tam sargılama şartı yine düşük sınıflı betonla hazırlanmış numune ile doğrulanmış, referans numuneye göre maksimum yük ve hasar şekli kesmeden eğilmeye dönüşmüştür. Tam sargılamayı, numunenin yük taşıma kapasitesi ve davranışına olumlu etkisi açıkça görülmüştür.

300 g/ cm² gramajındaki CFRP uygulanan bu numunede referans numuneye göre yük taşıma kapasitesine % 109,42 katkısı olmuştur. Süneklik oranı 1,71'den 3,53'e çıkmıştır. Tam sargılamının düşük beton sınıflarında taşıma kapasitesine katkısı oldukça

yüksektir. Süneklik artışıyla kesme kapasitesi yetersiz kirişin güçlendirilerek eğilme kırılması sergilediği görülmüştür.

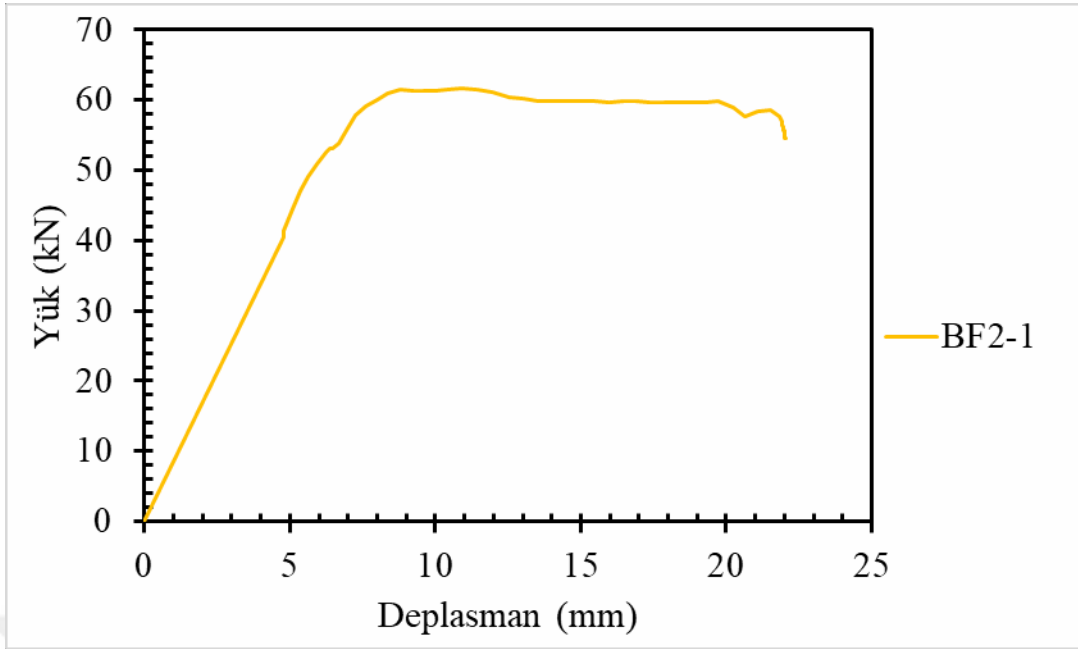
BF2-1 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü Şekil 4.13'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.14'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.9'de gösterilmiştir.



Şekil 4.13. BF₂-1 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.9. BF₂-1 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
61,61	52,37	3,53	10,91	5,65	1108,62	8,40	174,23	942,08



Şekil 4.14. BF₂-1 numunesinin yük-deplasman grafiği

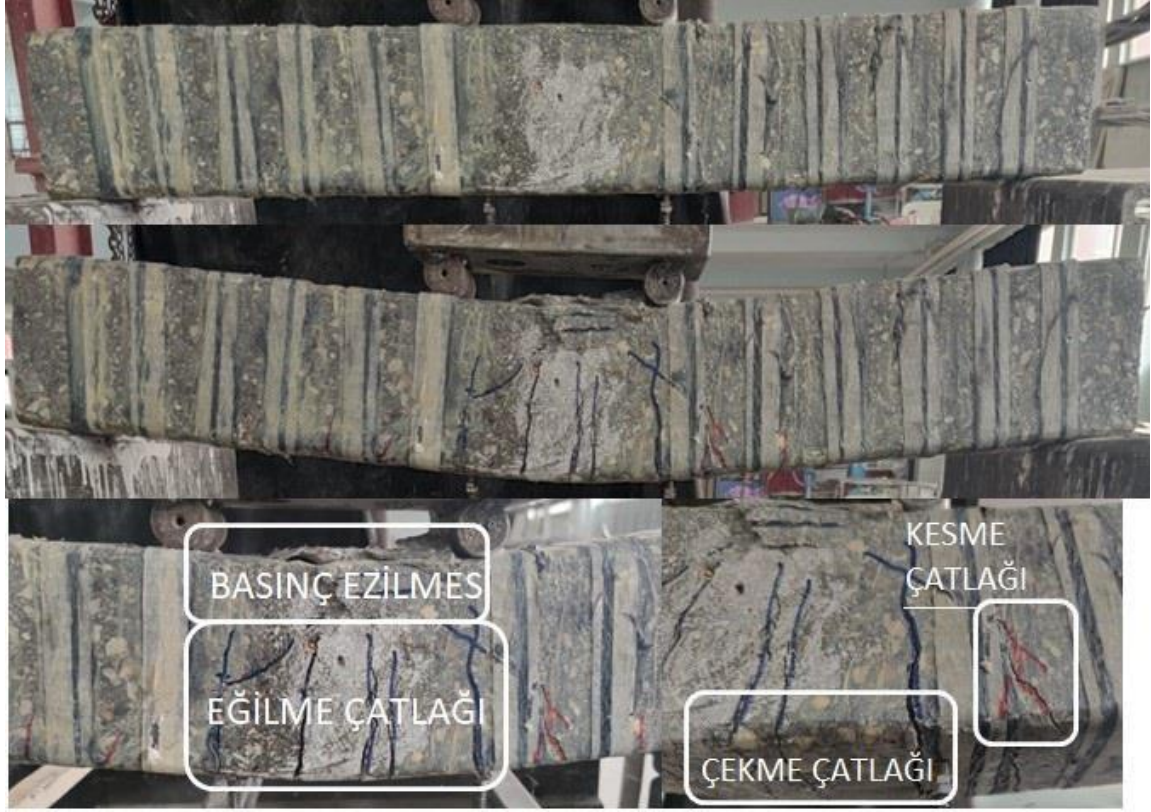
4.1.8. BF₃-1 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 20 MPa - 30 MPa olan beton ile 300g/m² gramajlı CFRP ile tam sargılama şeklinde güçlendirilmiş numune BF₃-1 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 30 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu sırada oluşan deplasman değeri 3 mm dir. 40 kN da kesme çatlakları görülmüş ve epoksi yapıştırıcılardan kopma sesleri duyulmuştur. Bu yükte beton basınç bölgesi ezilmeye başlamıştır. 60 kN'a gidilirken akma oluşmuştur ve sonrasında eğilme hasarı görülmüştür. Deneyde kirişte eğilme çatlakları oluşmuş, sünek bir davranışla göçme olmuştur. Numunede oluşan kesme çatlaklarının CFRP şeritler tarafından engellendiği görülmüştür.

Bu numune maksimum 59,555 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 20,142 mm olarak gözlenmiştir. Numune 50,621 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 33,06 mm olarak bulunmuştur.

Bu numunenin taşıdığı maksimum yük, aynı beton sınıfındaki referans numuneye kıyasla 43,51 kN'dan 59,55 kN'a, süneklik oranı ise 1.62'den 3.26'ya yükselmiştir. Maksimum yükte yaptığı deplasman 3.83'ten 20,14 mm'ye çıkmıştır. 17 MPa'dan düşük dayanımlı betonlarda bu sargılama tipinin, U ve yan sargılamaya göre daha fazla katkı sağladığı görülmüştür. Ayrıca bu sonuç, ACI 440.2R-17 (2017) 'de düşük dayanımlı betonlarda tam sargılama şartını desteklemektedir.

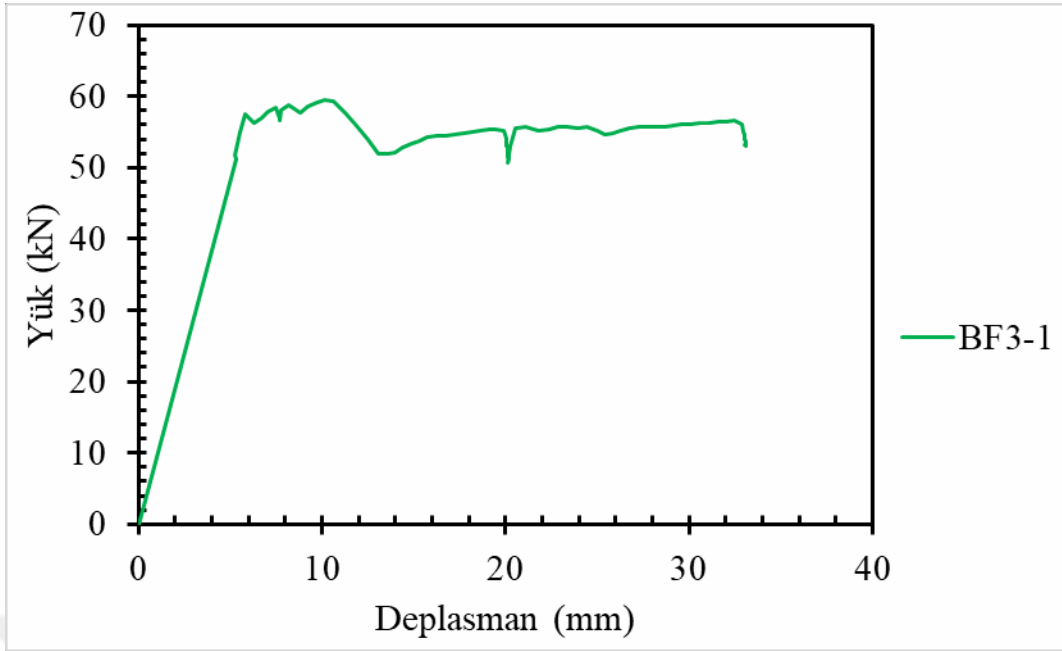
BF₃-1 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü Şekil 4.15'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.16'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.10'de gösterilmiştir.



Şekil 4.15. BF₃-1 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.10. BF₃-1 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
59,55	50,62	3,26	20,14	2,96	1681,74	5,00	968,75	1267,41



Şekil 4.16. BF₃-1 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.9. BF₄-1 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 30 MPa - 40 MPa olan beton ile 300g/m² gramajlı CFRP ile tam sargılama şeklinde güçlendirilmiş numune BF₄-1 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 30 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu sırada 3,39 mm deplasman görülmüştür. 40 kN yükte ilk eğilme çatlakları görülmüş, 54 kN'a dek yüklemeye kesme çatlakları basınç bölgesine doğru uzamıştır. Çekme çatlaklarının uzaması CFRP ile sınırlı kalmış ve sünek davranış gözlenmiştir. Deney sonunda basınç bölgesinde beton ezilmiş ve çekme bölgesinde geniş çatlaklar görülmüştür.

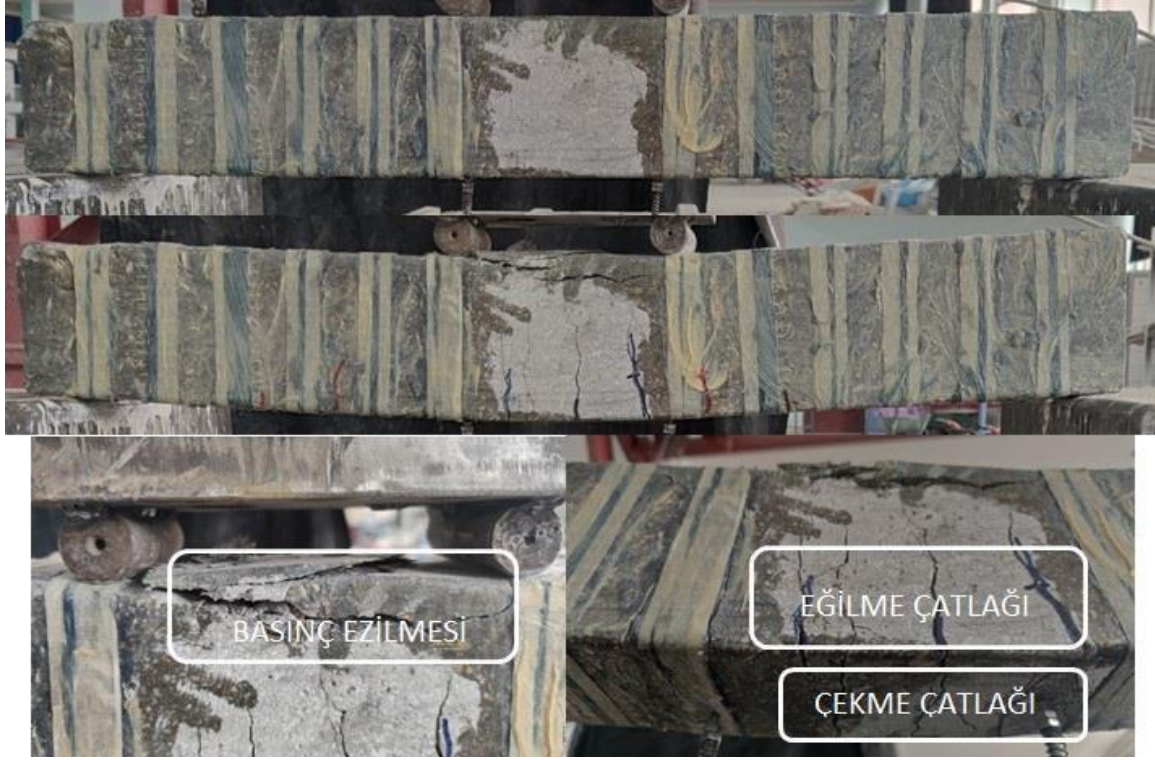
Bu numune maksimum 54,111 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 11,337 mm olarak gözlenmiştir. Numune 45,995 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 19,63 mm olarak bulunmuştur.

Deneyde CFRP sargılarda hasar oluşmamıştır. Bu durum, güçlendirmenin kirişle beraber çalıştığını göstermektedir. CFRP uygulaması sayesinde B₄-0 kodlu referans kirişte taşınan maksimum yük 45,74 kN iken bu numunenin maksimum taşıdığı yük 54,11 kN'a ulaşmıştır.

Gerek dayanımı yüksek beton kullanımı gerek tam sargılama uygulanması, bu numunenin maksimum taşıdığı yükün, enerji kapasitesinin oldukça yüksek değerlere ulaşmasına sebep olmuştur. Bu numunede aynı beton sınıfındaki referans numuneye

kıyasla, taşıma yükündeki artışın daha düşük beton sınıflarında elde edilen artış miktarından çok daha düşük bir oranda olduğu görülmüştür. Tam sargılamamanın düşük beton sınıflarında, kapasiteye, süneklığe ve davranışa katkısı daha yüksek oranlarda görülmüştür.

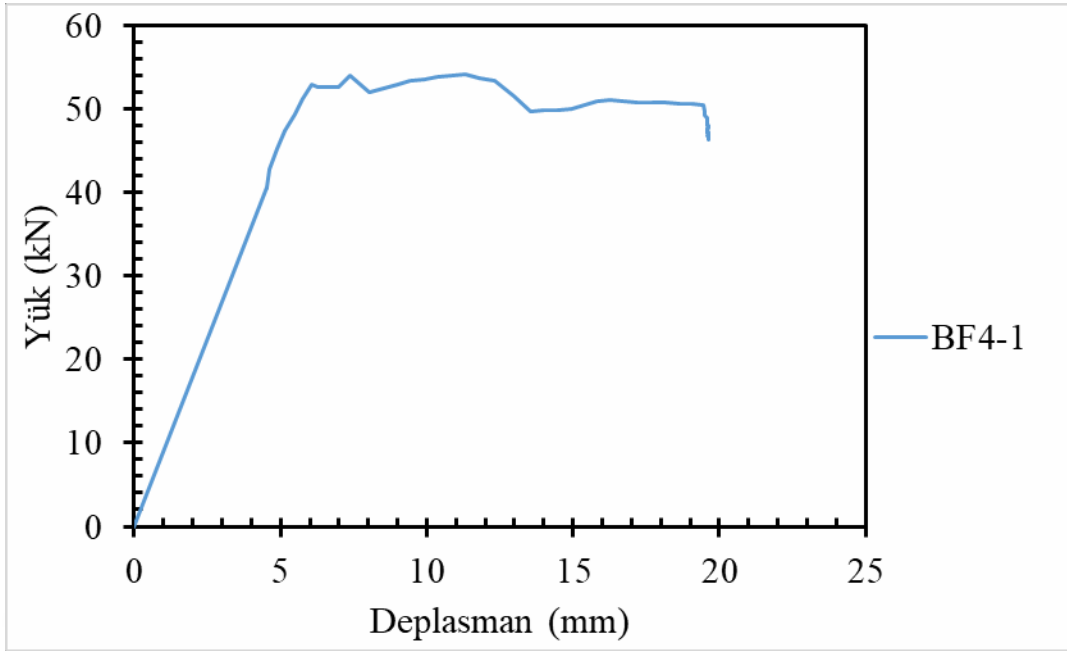
BF₄-1 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü Şekil 4.17'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.18'de, süneklilik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. BF₄-1 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.11. BF₄-1 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklilik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
54,11	46,00	4,00	11,34	4,78	868,42	9,38	471,65	760,21



Şekil 4.18. BF₄-1 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.10. BF₅-1 Numunesi

Denyde hedef beton basınç dayanımı 40 MPa-50 MPa olan beton ile 300g/m² gramajlı CFRP ile tam sargılama şeklinde güçlendirilmiş numune BF₅-1 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 30 kN ile sol tarafta ilk kesme çatlağı gözlenmiştir. 40 kN da ilk eğilme çatlağı görülmüştür. CFRP bu çatlakları önemli miktarda engellemiştir ve böylece göçme süresi referans numuneye göre gecikmiştir. Deney sonunda numunede eğilme çatlakları artmış ve sünek bir sünek davranış göstermiştir. Basınç bölgesinde beton ezilmiştir. CFRP şeritler, beton yüzeyinden ayrılmamıştır, bu da güçlendirmenin kirişle bir bütün olarak çalıştığını göstermektedir.

Bu numune maksimum 60,989 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 47,327 mm olarak gözlenmiştir. Numune 51,841 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 53,69 mm olarak bulunmuştur.

Tam sargılamanın hedef beton basınç dayanımı 30 MPa-40 MPa olan beton sınıfında taşıma yüküne katkısı %30,38 iken hedef beton basınç dayanımı 40 MPa-50 MPa olan betonda bu oran % 46,70'tir. hedef beton basınç dayanımı 5MPa-30 MPa olan beton için tam sargılama ile yapılan güçlendirmenin kapasiteye ve sünekliğe olan katkısı % 100'ü aşarken beton dayanımının artışıyla bu oran çok düşmüştür. Bu da tam sargılamanın yine düşük beton sınıfları için çok daha iyi sonuçlar verdiğini ve daha çok tercih edilebileceğini göstermiştir.

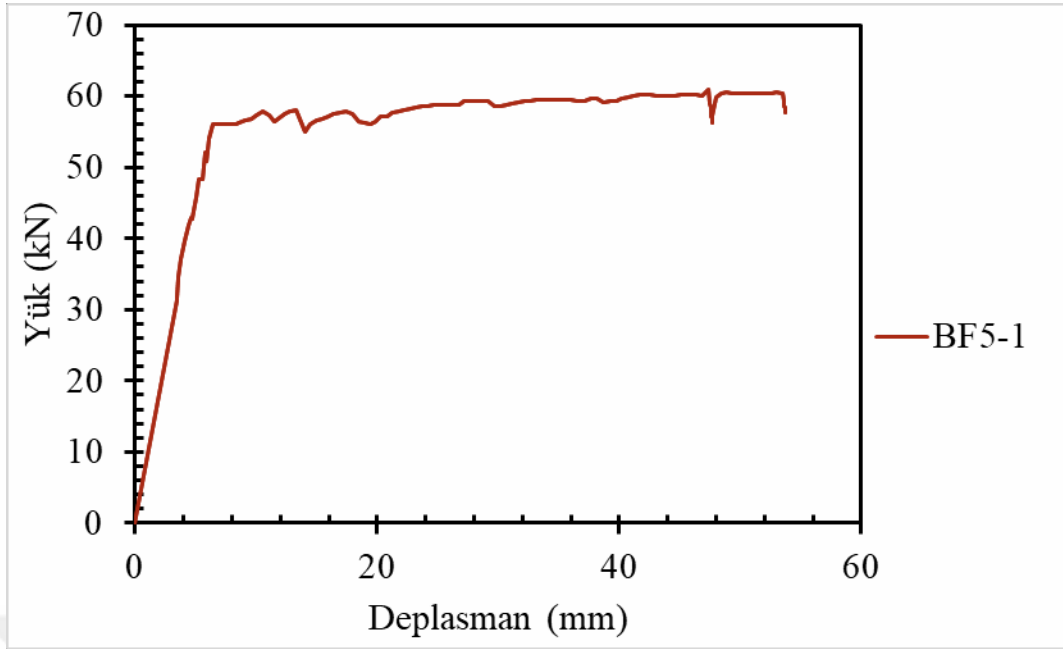
BF₅-1 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü Şekil 4.19.de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.20'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.19. BF₅-1 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.12. BF₅-1 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
60,989	51,841	9,354	47,327	47,327	2962,685	9,032	2590,657	2810,560



Şekil 4.20. BF₅-1 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.11. BF₁-2 Numunesi

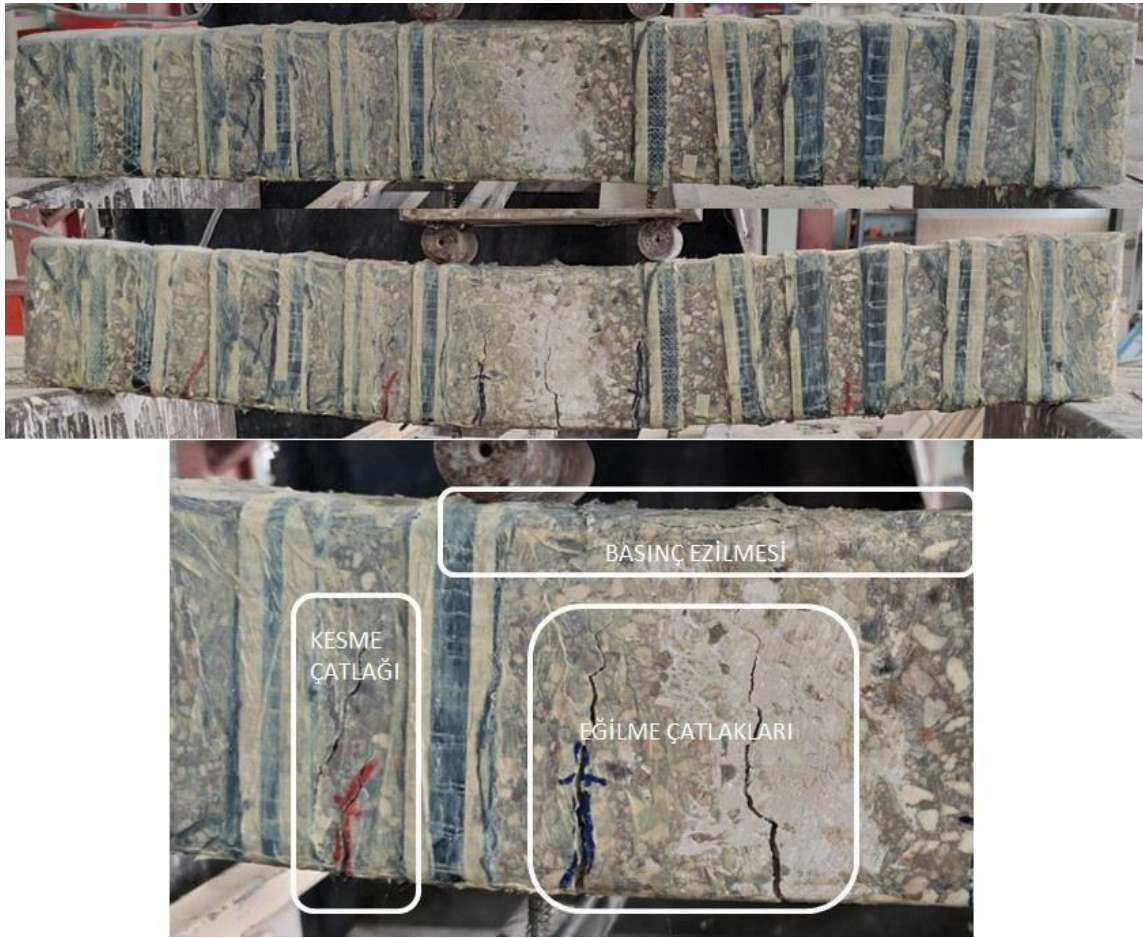
Deneyde hedef beton basınç dayanımı 5MPa - 10 MPa olan beton ile 900g/m² gramajlı CFRP ile tam sargılama şeklinde güçlendirilmiş numune BF₁-2 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 20 kN ile kesme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu sırada 2,18 mm deplasman oluşmuştur. 30 kN yükte eğilme çatlakları da oluşmaya başlamıştır. 40 kN yükte çatlaklar basınç bölgesine doğru ilerlemiştir ve beton basınç bölgesinin ezildiği görülmüştür. Kiriş sünek davranışla eğilme hasarı ile geçmiştir. CFRP ve epoksinin beton yüzeyinden ayrılmadığı, kirişi eğilme davranışına zorladığı görülmüştür. Deney sonunda CFRP şeritlerde kopma ve beton yüzeyinden ayrılma olmamıştır. Kesme çatlaklarının CFRP şeritler arasında kaldığı görülmüştür. Tam sargılama yapılan numunelerde yan ve U sargıya nazaran, CFRP'nin genellikle zarar görmediği, böylece kirişin kapasitesini artırmada etkili olduğu görülmüştür.

Bu numune maksimum 44,125 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 28,211 mm olarak gözlenmiştir. Numune 37,507 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 28,70 mm olarak bulunmuştur.

Bu numunede kirişin maksimum taşıdığı yükte %96.20 artış sağlanırken U ve yan sargılamada daha düşük oranlarda katkı elde edilmiştir. Süneklik oranı referans numunede 1,54 iken tam sargılamada 6.37'ye yükselmiştir. Toplam enerji tüketimi referans numunede 65.50 kN.mm iken bu değer tam sargılamayla 1118,55 kN.mm'ye

yükselmiştir. CFRP gramajlarının katkısı kıyaslandığında 300 g/m^2 gramaj ile yapılan tam sargılamanın taşıma kapasitesine katkısı %83.80 iken 900 g/m^2 ile taşıma kapasitesi %96.20 oranında artmıştır. Süneklik oranı referans numunede 1.54 iken 300 g/m^2 CFRP ile 4.91, 900 g/m^2 CFRP ile 6.37 oranı elde edilmiştir. Yüksek gramajda taşıma kapasitesi, süneklik ve enerji tüketimine katkısı düşük gramajlı uygulamaya göre çok daha iyi sonuçlar vermiştir.

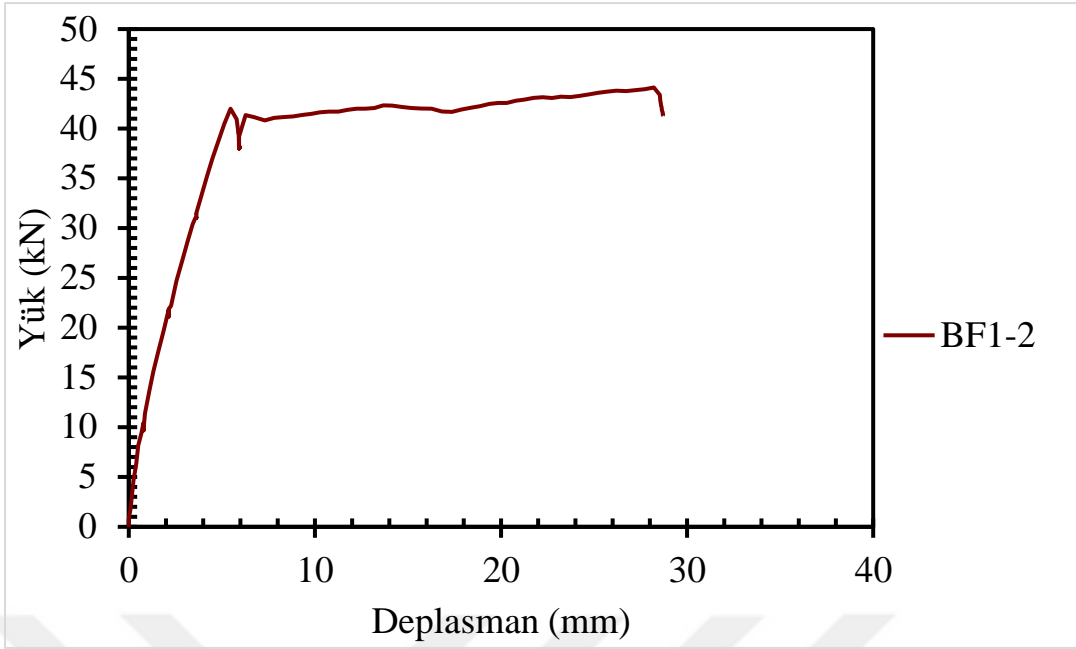
BF₁-2 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü Şekil 4.21'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.22'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.13'de gösterilmiştir.



Şekil 4.21. BF1-2 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.13. BF1-2 numunesinin deney sonuçları

P_{\max} (kN)	$0.85 \cdot P_{\max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{\max} (mm)	P_{\max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{\max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{\max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
44,13	37,51	6,37	28,21	1,56	1118,55	8,33	1111,53	1021,75



Şekil 4.22. BF1-2 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.12. BF₂-2 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 10 MPa - 20 MPa olan beton ile 900g/m² gramajlı CFRP ile tam sargılama şeklinde güçlendirilmiş numune BF₂-2 olarak kodlanmıştır. 30 kN yükte matris çatlak sesleri duyulmuş fakat kirişte çatlak görülmemiştir. Yüklemede 50 kN a gidilirken kesme bölgesinde çatlaklar oluşmuş fakat CFRP şeritler, çatlakların ilerlemesi engellemiştir. Bu sırada 4,94 mm deplasman oluşmuştur. Kirişin sol kesme bölgesinde oluşan kesme çatlakları yükleme noktasına doğru ilerlemiş ve kesme hasarıyla göçme olmuştur.

Bu numune maksimum 58,761 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 6,881 mm olarak gözlenmiştir.

Deney sonunda kesme çatlakları CFRP sargıya rağmen yükleme noktasına doğru ilerlemiş ve CFRP yüzeyinde yer yer soyulmalar gözlemlenmiştir. Bazı CFRP şerit sargılar yükün artışıyla beton yüzeyinden ayrılmıştır.

Bu numunede yapılmış olan uygulamanın kirişin taşıma kapasitesine katkısı %99.74 oranlarındayken U sargılamayla %73.96'lık bir artış elde edilmiştir. Tam sargılama, daha düşük gramajlı CFRP ile güçlendirme yapıldığında kirişin taşıma kapasitesinde %109.42'lik bir artış sağlanmıştır. Bu durum laboratuvar koşulları, uygulama hataları, kirişlerin beton dayanımının aynı olmaması gibi ihtimaller göz

önünde bulundurulduğunda çok büyük bir fark teşkil etmemekte, maliyet açısından daha düşük gramajlı CFRP'nin tercih edilebileceğini göstermektedir.

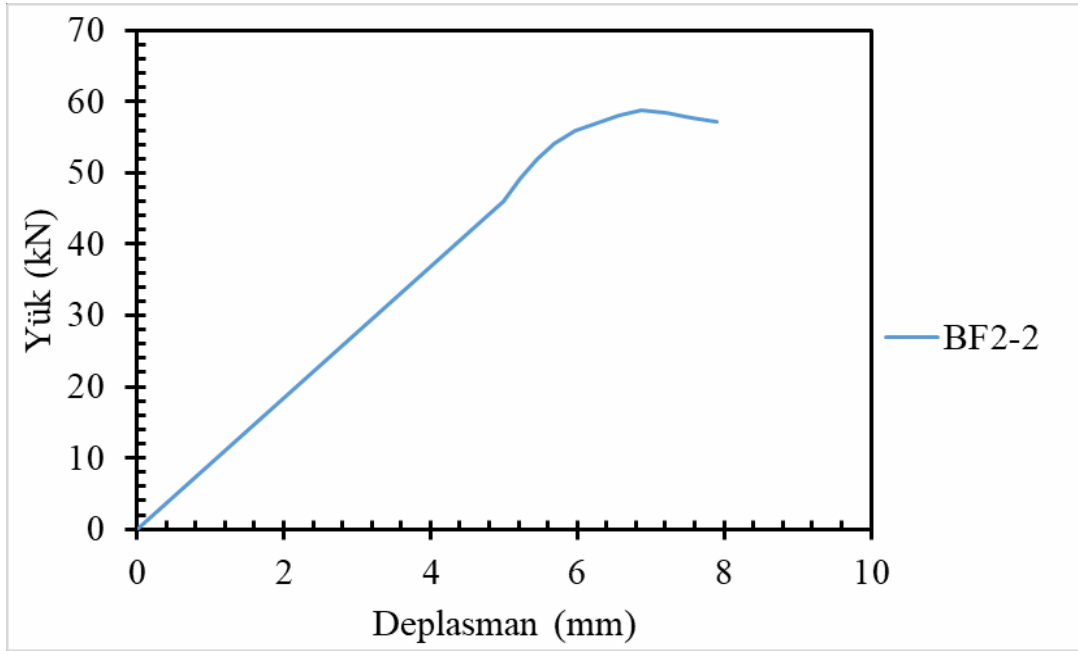
BF₂-2 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü Şekil 4.23'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.24'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.14'de gösterilmiştir.



Şekil 4.23. BF₂-2 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.14. BF₂-2 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
58,76	49,95	1,51	6,88	8,54	276,48	9,56	236,82	150,75



Şekil 4.24. BF₂-2 numunesinin yük-deplasman grafiği

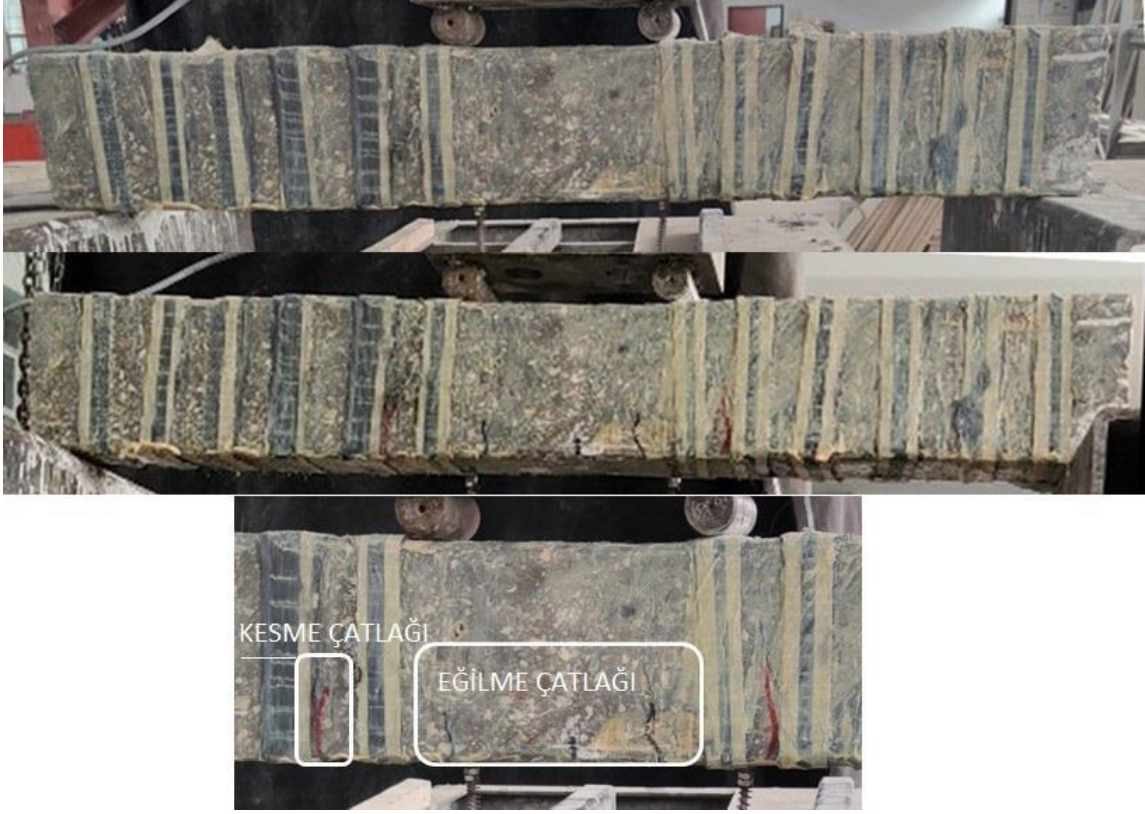
4.1.13. BF₃-2 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 20 MPa - 30 MPa olan beton ile 900g/m² gramajlı CFRP ile tam sargılama şeklinde güçlendirilmiş numune BF₃-2 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 20 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu anda 3,63 mm deplasman oluşmuştur. 30 kN'a kadar yükleme ile kesme çatlakları da oluşmuştur. Maksimum yüke yaklaşıırken numune sol mesnet bölgesinden kırılmış ve düzenekle beraber göçmüştür. Deney sonundaki incelemede CFRP şeritlerin epoksi ile beton yüzeyinden kopmadığı ve kirişi eğilme davranışına zorladığı görülmüştür.

Bu numune maksimum 43,398 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 16,97 mm olarak gözlenmiştir.

Aynı beton sınıfı için referans numunede süneklik oranı 1.62'dir. Bu numunede süneklik oranı 4.04 olarak bulunmuştur. U sargılama ve yan sargılamada sırasıyla süneklik oranları 5.98 ve 2.90 çıkmıştır. Sünekliğe olan katkısı kıyaslandığında U sargılamanın tam sargılamadan daha fazla etkisi olduğu görülmüştür. Toplam enerji tüketimi açısından kıyaslandığı zaman yine U sargılamanın tam sargılamadan çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu durumun laboratuvar koşulları, numunelerin birebir eşit üretilmemesi gibi durumlardan olabileceği düşünülmektedir.

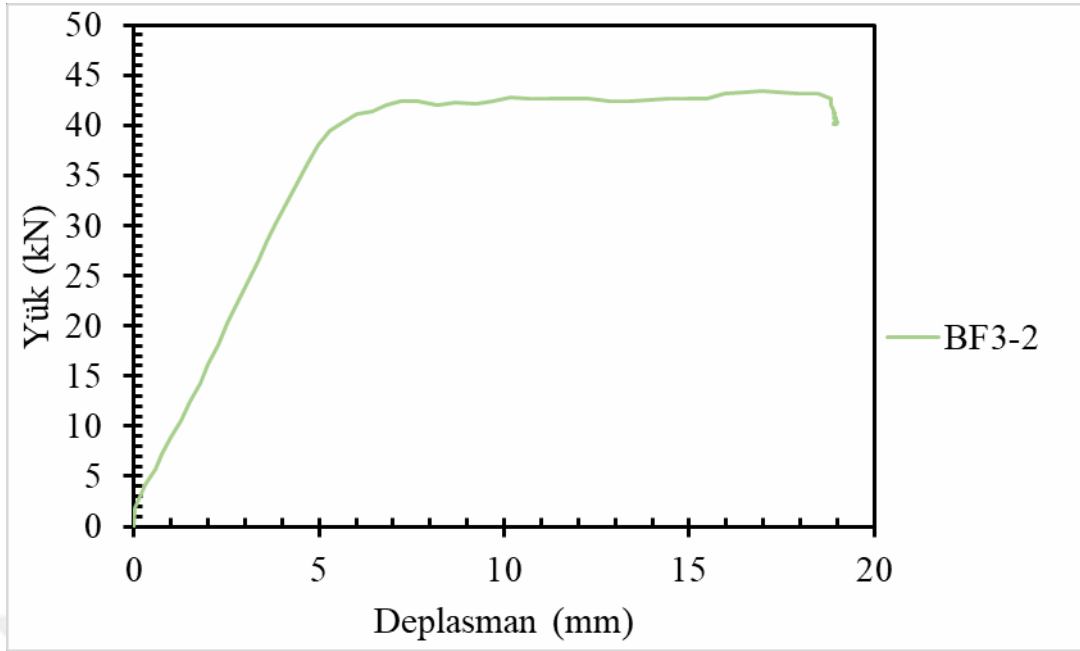
BF₃-2 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü Şekil 4.25'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.26'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.15'de gösterilmiştir.



Şekil 4.25. BF₃-2 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.15. BF₃-2 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85*P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
43,40	36,89	4,04	16,97	2,56	692,17	7,86	627,14	603,30



Şekil 4.26. BF₃-2 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.14. BF₄-2 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 30 MPa - 40 MPa olan beton ile 900g/m² tam sargılama şeklinde güçlendirilmiş numune BF₄-2 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 30 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu anda numunede 3,85 mm deplasman gözlemlenmiştir. 40 kN'a kadar yükleme ile kesme çatlakları oluşmuş ve maksimum yüke kadar CFRP şeritlerin sınırlarından basınç bölgesine doğru ilerlemiştir. Deney sonunda numune sünek bir davranış göstermiştir. Beton basınç bölgesi ezilmiş ve CFRP liflerde ve epoksi ile beton yüzeyinde ayrılma olmamıştır.

Bu numune maksimum 37,538 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 14,762 mm olarak gözlenmiştir. Numune 31,908 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 29,54 mm olarak bulunmuştur.

Bu numunede güçlendirme ile kirişin süneklik oranı 1.46'dan 7.51'e yükselmiştir. Toplam enerji tüketimi referans numunede 175.18 kN.mm iken bu numunede 967.48 kN.mm elde edilmiştir. Tam sargılamada gramajlarda kıyaslamada yapıldığında, referans numunenin taşıdığı maksimum 45.74 kN iken düşük gramajla yapılan uygulamada 59.63 kN, yüksek gramajlı uygulamada 64.36 kN çıkmıştır. Süneklik oranı düşük gramajda 2.05 elde edilirken yüksek gramajda 3.20 çıkmıştır. Toplam enerji tüketimi her iki gramaj için de çok yakın değerlerde bulunmuştur. Referans numunede toplam enerji tüketimi 175.18 kN.mm iken tam salgılamada 647.53 ve 632.01 kN.mm değerleri elde

edilmiştir. Hem düşük hem yüksek gramajlı tam sargılamalı uygulamanın yüksek dayanımlı betonlarda enerji tüketimine yaklaşık %370 katkı sağladığı görülmüştür.

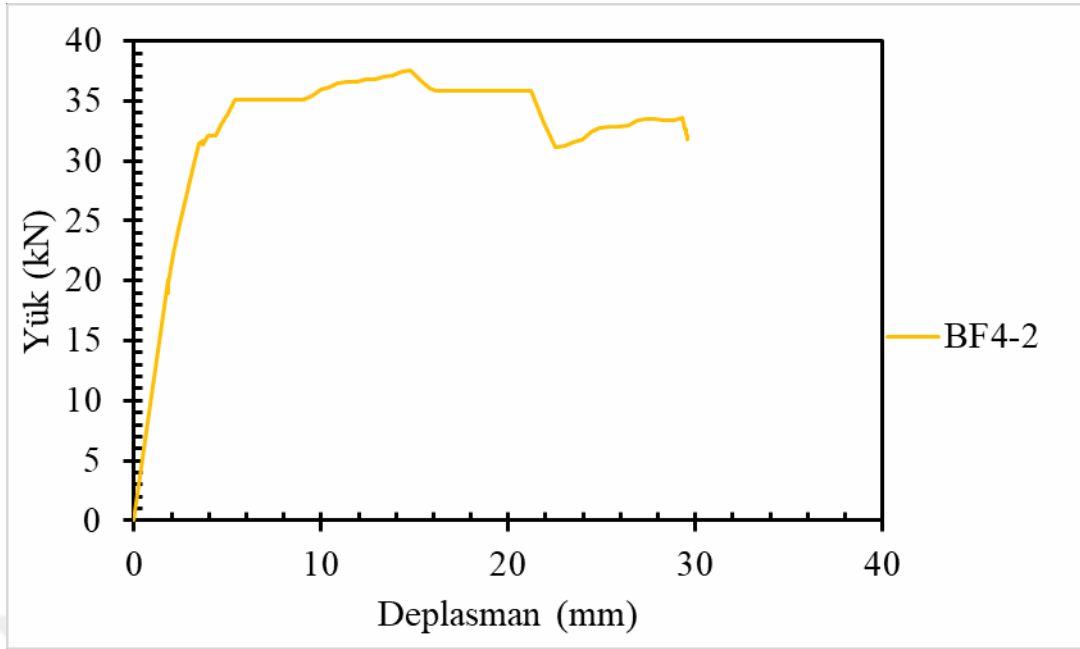
BF₄-2 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü Şekil 4.27'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.28'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.16'de gösterilmiştir.



Şekil 4.27. BF₄-2 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.16. BF₄-2 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
37,54	31,91	7,51	14,76	2,54	967,48	8,12	483,02	891,26



Şekil 4.28. BF₄-2 numunesinin yük-deplasman grafiği

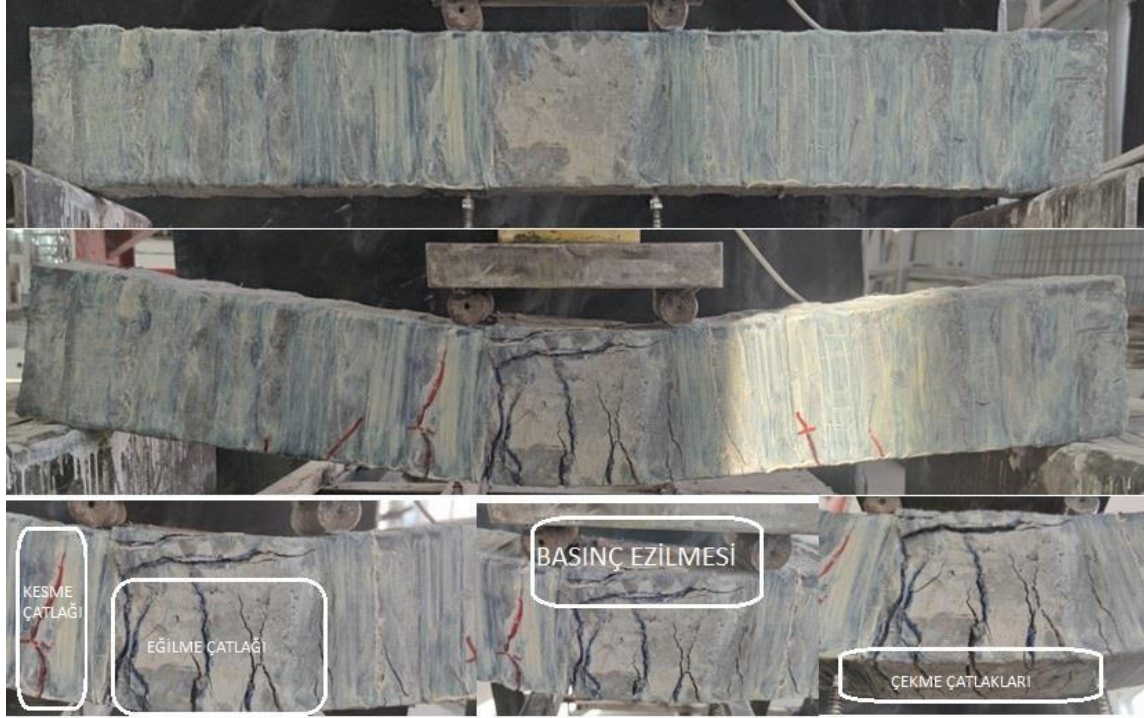
4.1.15. BF₅-2 Numunesi

Denyede hedef beton basınç dayanımı 40 MPa - 50 MPa olan beton ile 900g/m² gramajlı CFRP ile tam sargılama şeklinde güçlendirilmiş numune BF₅-2 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 40 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu sırada 3,70 mm deplasman oluşmuştur. 50 kN'a ulaşıldığında kirişte ilk kesme çatlakları oluşmuştur. CFRP sargı bu çatlakların ilerlemesini engellemiştir. Nihayetinde sünek bir davranış ile çatlaklar derinleşmiş ve göçme olmuştur. Maksimum deplasmanı tespit edebilmek için yüklemeye devam edilmiştir. Maksimum deplasmana ulaşıldığında eğilme çatlakları basınç bölgesine yaklaşmıştır. Kesme çatlakları CFRP sınırından basınç bölgesine doğru açısı azalarak ilerlemiştir. Basınç bölgesi betonu ezilmiştir. Numune, maksimum 61,207 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 11,103 mm olarak gözlenmiştir. 52,026 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 50,99 mm olarak bulunmuştur. Deney sonunda yapılan incelemede beton basınç bölgesi ezilmiş ve çekme bölgesinde geniş çatlaklar oluşmuştur.

Bu numunede güçlendirmenin kirişin yük taşıma kapasitesine katkısı %47.23'tür. U ve yan sargılarda katkısı ise sırasıyla %35,21 ve %29.73 olarak elde edilmiştir. Bu beton sınıfı aralığı için CFRP gramaj kıyaslaması yapıldığında her 2 gramaj için de yakın sonuçlar elde edildiği, maliyet açısından düşük gramajlı CFRP elyaf uygulamasının tercih edilebileceği düşünülmüştür. Referans numunede süneklik oranı

1.91 iken düşük ve yüksek gramajlı uygulamalarda süneklik oranını yaklaşık 9'a çıkmış, toplam enerji tüketimi ise referans numunede 132.34 kN.mm iken her 2 gramajda da bu değer yaklaşık 2900 kN.mm'ye çıkmıştır.

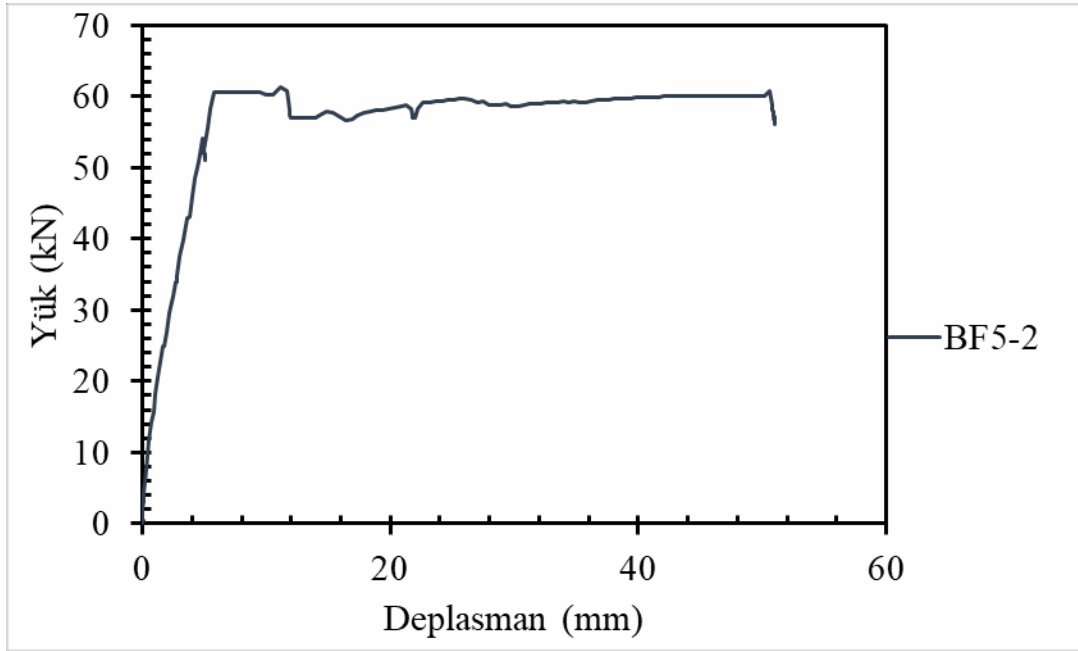
BF₅-2 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görüntüleri Şekil 4.29'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.30'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.17'de gösterilmiştir.



Şekil 4.29. BF₅-2 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.17. BF₅-2 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
61,21	52,03	10,83	11,10	5,51	2879,05	11,05	555,04	2745,36



Şekil 4.30. BF₅-2 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.16. BU₁-1 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 5MPa - 10 MPa olan beton ile 300g/m² gramajlı CFRP ile U tipi sargı ile güçlendirilmiş numune BU₁-1 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 20 kN ile kesme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu anda 3,2 mm deplasman oluşmuştur. 30 ve 40 kN yüke gelindiğinde kesme çatlakları yüklenme noktasına doğru ilerlemiştir. Bazı CFRP şeritlerde hasar görülmezken çekme çatlaklarının CFRP sargı altından ilerlediği görülmüştür. Kirişin basınç bölgesinde CFRP şeritin devam etmemesi ile betonda oluşan kesme çatlaklarının yük artışıyla ilerlemesi CFRP şeritlerin betondan ayrılmasına (debonding) yol açmıştır. U sargılamada CFRP sargının betondan ayrılması, tam sargılamaya göre büyük bir dezavantaj olarak görülmüştür. Mevcut yapılarda kirişlerde güçlendirme yapılırken uygulama kolaylığı açısından U sargının tam sargıya göre daha avantajlı olduğu bilinmektedir. Bu noktada ankraj, çelik plaka uygulaması gibi CFRP ve betonun ayrılmasını engelleyecek ya da geciktirecek alternatifler hazırlanıp incelenmelidir. Bu deneyde yükün artışıyla kesme çatlakları ilerlemiş ve gevrek bir şekilde kirişin sağ tarafında aniden hasar oluşmuştur.

Bu numune maksimum 57,198 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 9,079 mm olarak gözlenmiştir.

Bu numunenin maksimum taşıdığı yük, tam sargılama ile karşılaştırıldığında çok daha yüksek sonuçlara ulaşılmıştır. Süneklik oranı için tam salgılamada U ve yan salgılamaya oranla çok daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. U sargılamasının enerji tüketimi tam salgılamaya göre çok daha düşüktür. Kirişte istenen durumun kesme kapasitesinin artması ve eğilme kapasitesinin zorlanması olduğu için düşük dayanımlı betonlarda, U sargılama yerine tam sargılamasının tercih edilmesi gerektiği düşünülebilir.

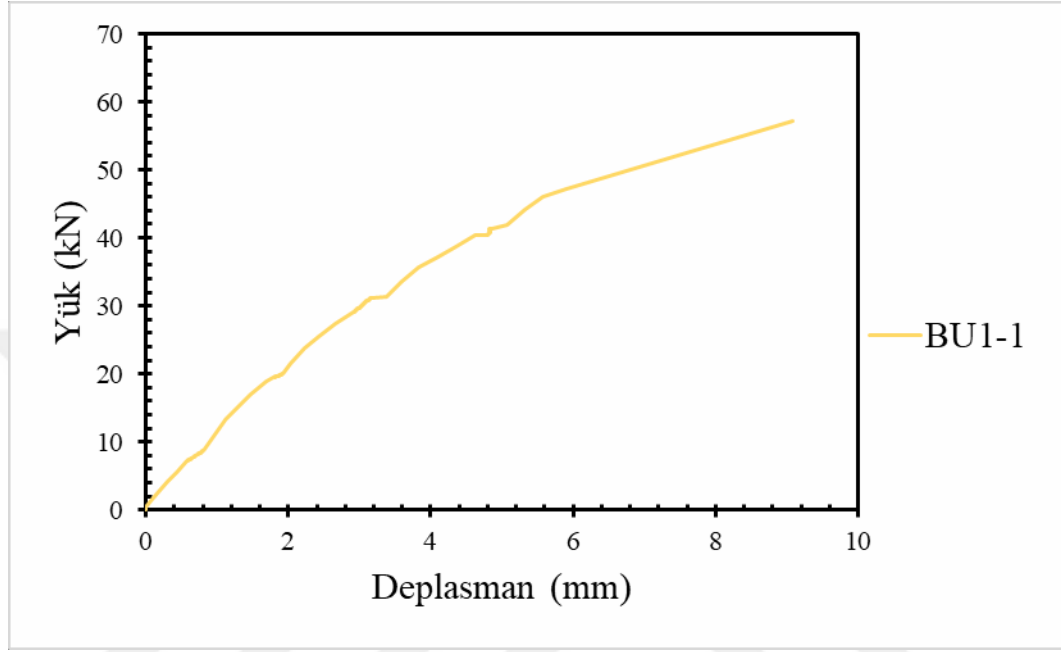
BU₁-1 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü Şekil 4.31'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.32'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.18'de gösterilmiştir.



Şekil 4.31. BU₁-1 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.18. BU₁-1 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
57,198	48,618	1,541	9,079	6,300	327,501	8,241	327,502	166,04

**Şekil 4.32.** BU₁-1 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.17. BU₂-1 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 10 MPa - 20 MPa olan beton ile 300g/m² gramajlı CFRP ile U tipi sargı ile güçlendirilmiş numune BU₂-1 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 30 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu anda 4,26 mm deplasman gözlemlenmiştir. Deneyde kirişte kesme çatlakları oluşmuş ve deney sonunda kesme çatlakları ilerleyerek kesme hasarıyla göçme olmuştur.

Bu numune maksimum 39,588 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 3,555 mm olarak gözlenmiştir.

Bu numunede kirişin maksimum taşıma yükü %34.57 artmıştır, bu oran tam sargılamada %109.42 olduğu için düşük sınıflı betonlarda yine tam sargılamaya göre daha avantajlı olduğu görülmüştür. Enerji tüketimi ve süneklik oranı kıyaslandığında da yine tam sargılama, U ve yan sargılamaya göre çok daha iyi sonuçlar vermiştir.

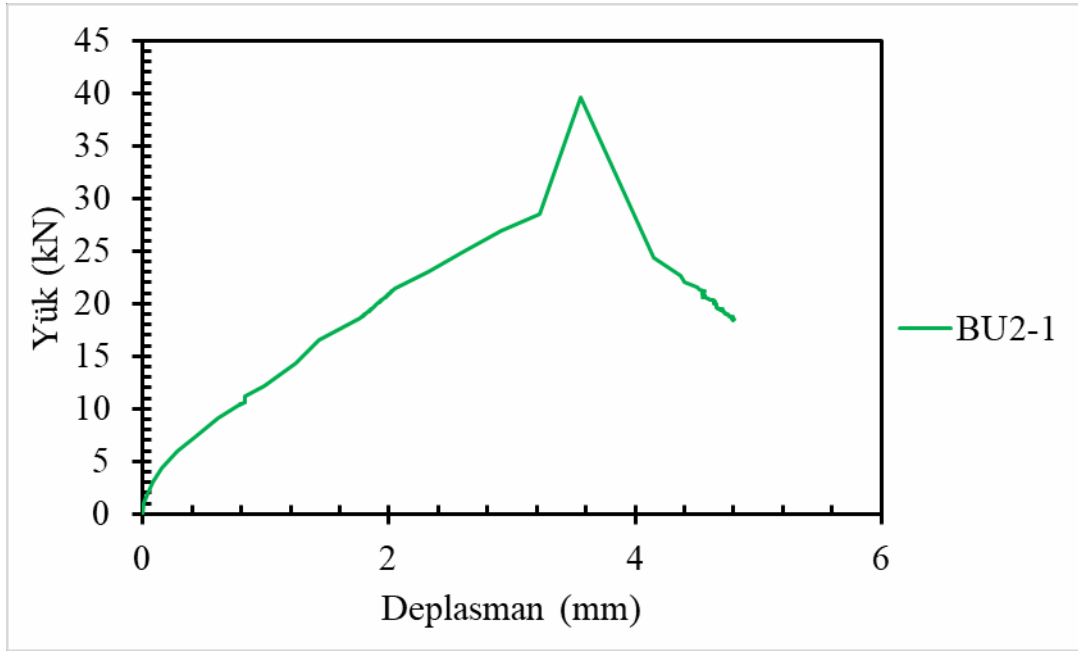
BU₂-1 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü Şekil 4.33'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.34'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.19'de gösterilmiştir.



Şekil 4.33. BU₂-1 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.19. BU₂-1 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
39,59	33,65	1,12	3,56	11,13	54,88	9,98	85,21	35,33



Şekil 4.34. BU₂-1 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.18. BU₃-1 Numunesi

Denyede hedef beton basınç dayanımı 20 MPa - 30 MPa olan beton ile 300g/m² gramajlı CFRP ile U tipi sargı ile güçlendirilmiş numune BU₃-1 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 40 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu anda numunede 4,17 mm deplasman görülmüştür. Bu numunede güçlendirme sayesinde ideal elastoplastik davranış görülmüştür. Denyede kirişte kesme ve eğilme çatlakları oluşmuş, numune kesme hasarıyla göçmüştür.

Bu numune maksimum 58,095 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 7,742 mm olarak gözlenmiştir. Numune 49,380 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 35,41 mm olarak bulunmuştur.

Bu numunede elde edilen maksimum taşıma yükü ve toplam enerji tüketimi değerlerinin tam sargılamayla çok yakın olduğu görülmüştür. Bu yüzden hedef beton basınç dayanımı 20 MPa-30 MPa olan betonda uygulama kolaylığı açısından U sargılamasının tercih edilebileceği düşünülmüştür.

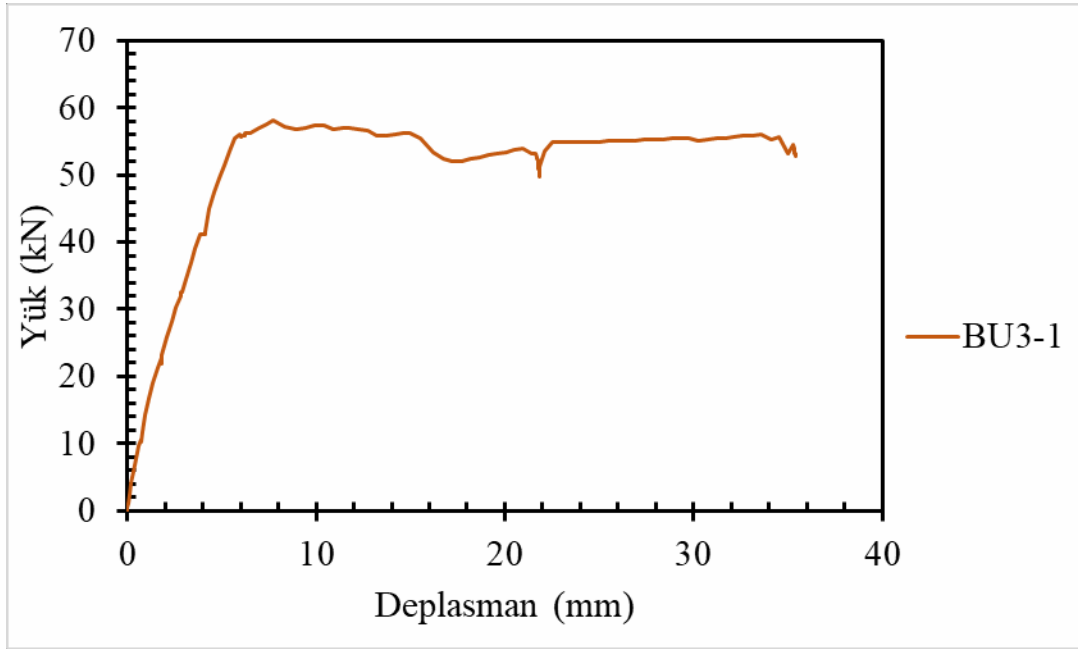
BU₃-1 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünüşleri Şekil 4.35'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.36'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.20'de gösterilmiştir.



Şekil 4.35. BU₃-1 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.20. BU₃-1 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85*P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
58,09	49,38	7,30	7,74	7,50	1819,93	10,17	330,79	1685,11



Şekil 4.36. BU₃-1 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.19. BU₄-1 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 30 MPa - 40 MPa olan beton ile 300g/m² gramajlı CFRP ile U tipi sargı ile güçlendirilmiş numune BU₄-1 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 40 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu anda oluşan deplasman 3,82 mm dir. Deneyde kirişte eğilme çatlakları oluşmuş, oldukça sünek davranış sergilemiştir.

Bu numune maksimum 60,310 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 47,141 mm olarak gözlenmiştir. Numune 51,264 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 47,99 mm olarak bulunmuştur. Deney sonunda numunede eğilme kırılması görülmüştür.

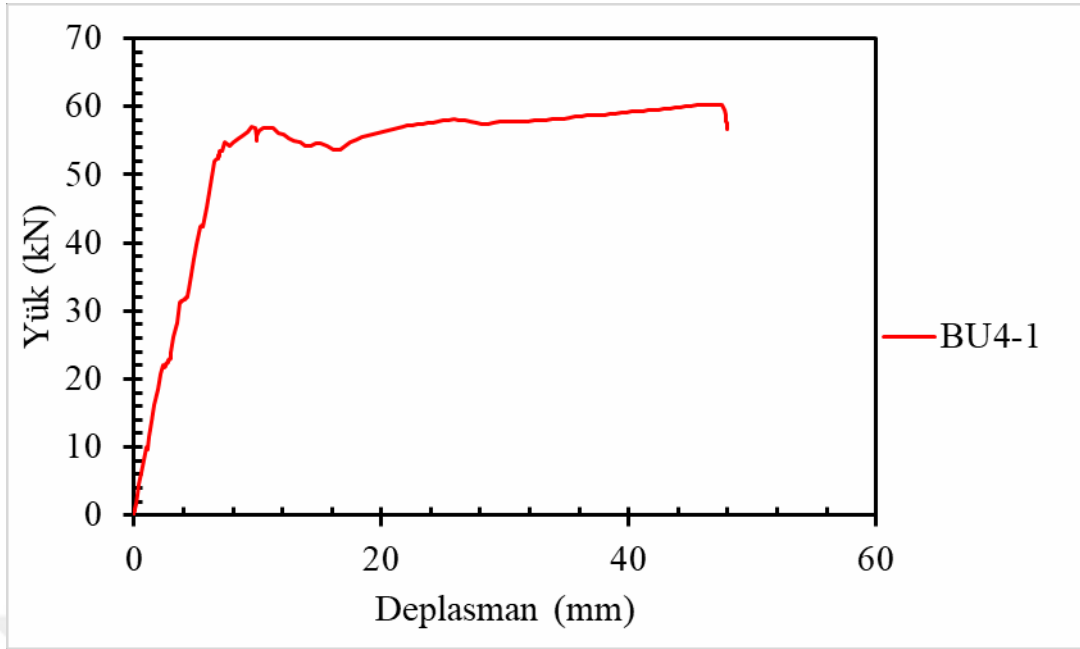
BU₄-1 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünüşleri Şekil 4.37'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.38'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4.37. BU₄-1 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.21. BU₄-1 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
60,31	51,26	7,35	47,14	1,28	2552,07	7,85	2527,02	2378,22



Şekil 4.38. BU₄-1 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.20. BU₅-1 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 40 MPa - 50 MPa olan beton ile 300g/m² gramajlı CFRP ile U tipi sargı ile güçlendirilmiş numune BU₅-1 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 30 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu andaki deplasman değeri 1,93 mm dir. Deneyde kirişte kesme ve eğilme çatlakları oluşmuş, fakat numune gevrek bir davranış ile kesme hasarı ile göçmüştür.

Bu numune maksimum 60,882 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 10,939 mm olarak gözlenmiştir.

Bu numunede elde edilen maksimum taşıma yükü, tam sargılama ile çok yakın sonuçlar vermiştir. Fakat tam sargılamada elde edilen süneklik oranı ve toplam enerji tüketimi çok daha yüksek sonuçlar vermiş, bu durum yüksek sınıflı betonlarda tam sargılamanın U ve yan salgılamaya göre tercih edilmesi gerektiğini göstermiştir.

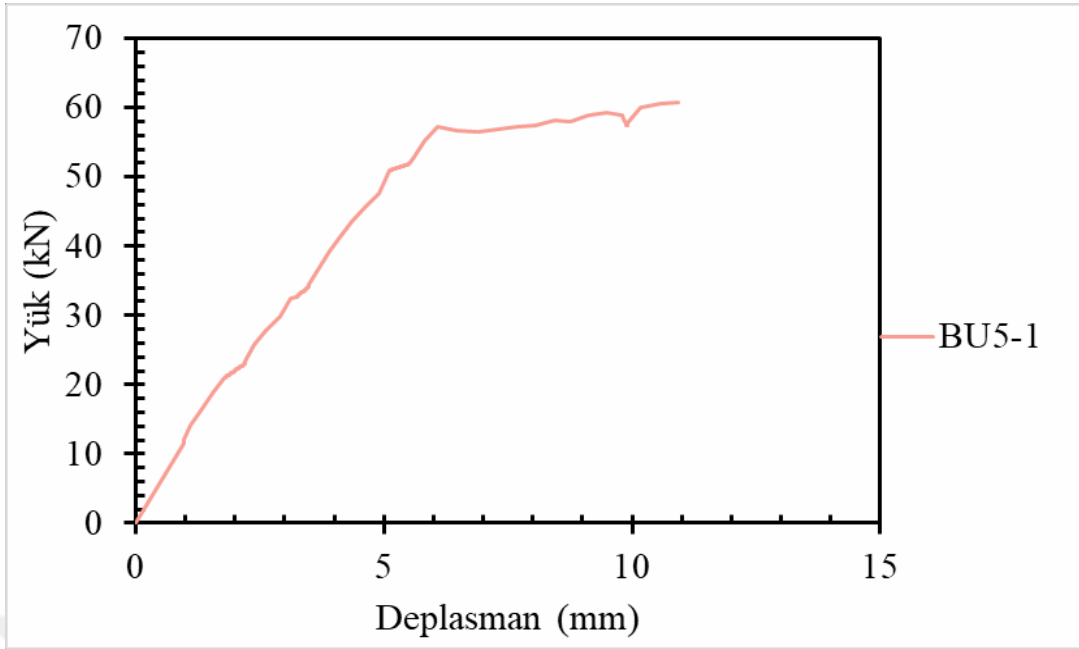
BU₅-1 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünüşleri Şekil 4.39'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.40'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.22'de gösterilmiştir.



Şekil 4.39. BU₅-1 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.22. BU₅-1 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
60,82	51,70	1,96	10,94	5,56	470,31	9,25	470,31	309,58



Şekil 4.40. BU₅-1 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.21. BU₁-2 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 5MPa - 10 MPa olan beton ile 300g/m² gramajlı CFRP ile U tipi sargı ile güçlendirilmiş numune BU₁-2 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 40 kN ile kesme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu sırada numunede 5,27 mm deplasman gözlemlenmiştir. Deneyde kirişin sağ kesme bölgesinde CFRP kabuk betonla beraber aniden ayrılmıştır. Kesme çatlakları ilerlemiş ve kesme hasarıyla göçme olmuştur.

Bu numune maksimum 43,394 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 5,036 mm olarak gözlenmiştir.

Bu numunenin maksimum taşıma yükü 43.39 kN bulunmuş, tam sargılama ile çok yakın sonuç vermiştir. Süneklik oranı tam sargılamadan çok daha düşük çıkarken toplam enerji tüketimi yan sargılama ile yakın bir sonuç vermiştir. Yine düşük dayanımlı betonlarda tam sargılamanın çok daha iyi sonuçlar vermesi sebebiyle tercih edilebileceği görülmüştür.

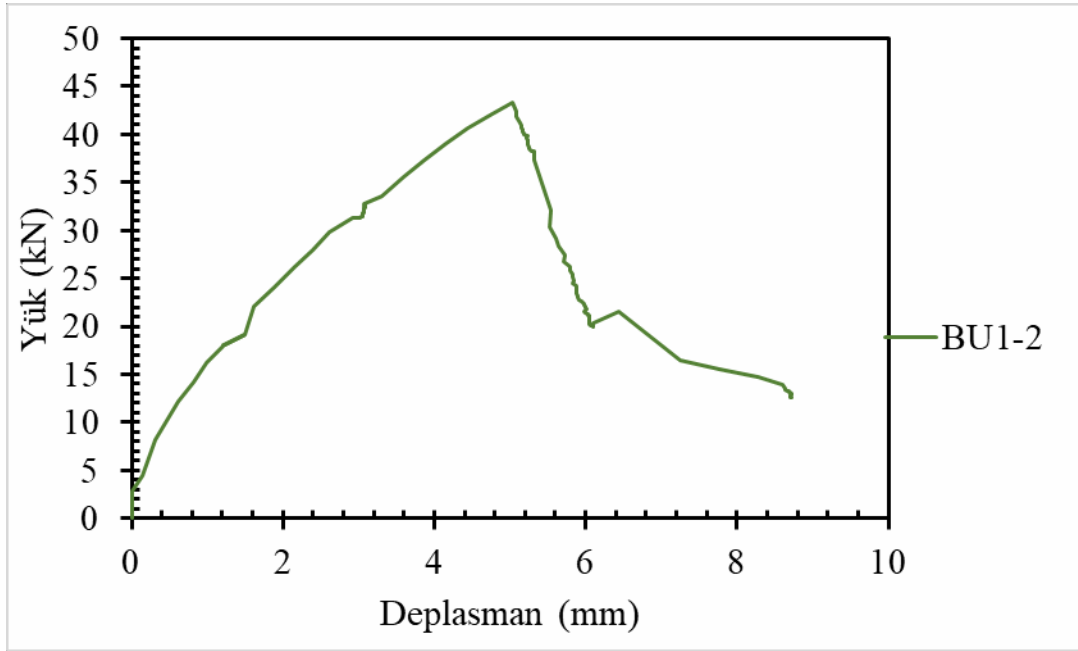
BU₁-2 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünüşleri Şekil 4.41'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.42'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.23'de gösterilmiştir.



Şekil 4.41. BU₁₋₂ numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.23. BU₁₋₂ numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
43,39	36,89	1,48	5,04	8,62	214,56	10,27	138,64	66,14



Şekil 4.42. BU₁-2 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.22. BU₂-2 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 10 MPa - 20 MPa olan beton ile 900g/m² ile U tipi sargı ile güçlendirilmiş numune BU₂-2 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 20 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu anda numunedeki deplasman değeri 2,72 m dir. Deneyde kirişte kesme çatlakları oluşmuş, kesme çatlakları aniden ilerlemiş ve göçme olmuştur.

Bu numune maksimum 51,179 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 8,063 mm olarak gözlenmiştir.

Bu numunede maksimum taşıma yükü tam sargılamadan daha düşük çıkmış, fakat toplam enerji tüketimi daha yüksek sonuç vermiştir. Beton dayanımı yükseldikçe U ve tam sargılamamanın sonuçlarının daha yakın seyrettiği görülmüştür. Bu yüzden uygulaması daha avantajlı olan U sargılamamanın tercih edilebileceği düşünülmüştür.

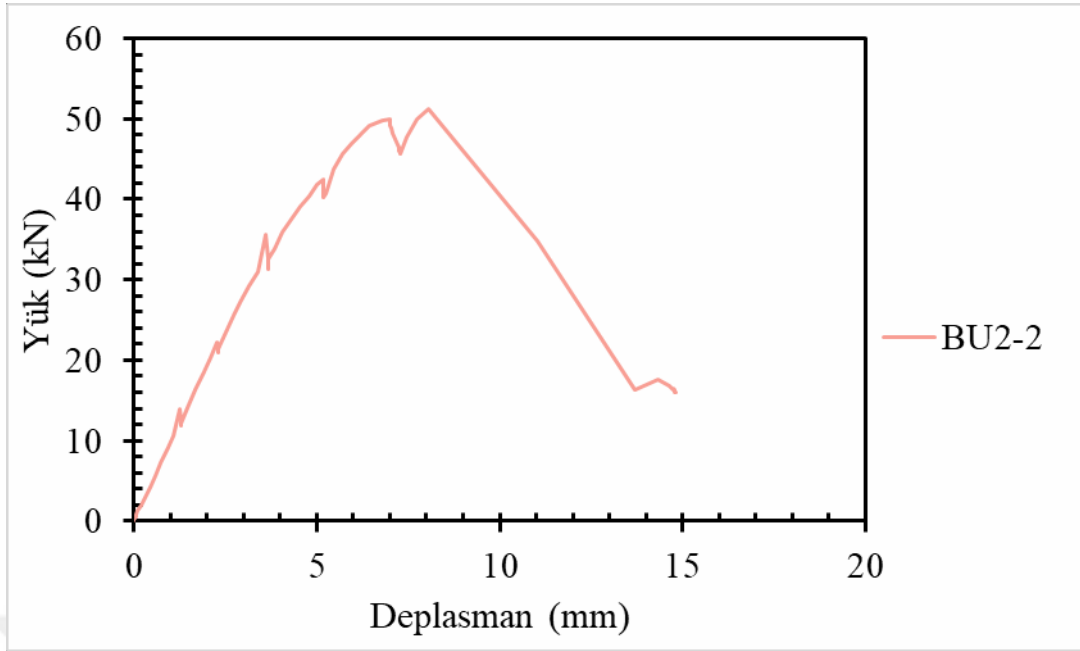
BU₂-2 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görüntüleri Şekil 4.43'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.44'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.24'de gösterilmiştir.



Şekil 4.43. BU₂-2 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.24. BU₂-2 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
51,18	43,50	1,73	8,06	6,35	473,92	7,97	386,64	321,67



Şekil 4.44. BU₂-2 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.23. BU₃-2 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 20 MPa - 30 MPa olan beton ile 900g/m² ile U tipi sargı ile güçlendirilmiş numune BU₃-2 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 30 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu sırada 3,63 mm deplasman oluşmuştur. Deneyde kirişte eğilme çatlakları oluşmuş, sünek bir davranışla göçme olmuştur.

Bu numune maksimum 54,009 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 28,607 mm olarak gözlenmiştir. Numune 45,908 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 29,24 mm olarak bulunmuştur.

Bu numunede tam sargılamadan daha fazla süneklik oranı, enerji tüketimi ve maksimum taşıma yükü elde edilmiştir. 17 MPa dayanımından yüksek betonlarda U ve tam sargılamamanın sonuçlarının daha yakın olduğu, bazı numuneler için ise U sargılamamanın tam sargılamaya göre daha avantajlı olduğu sonuçları elde edilmiştir. Uygulama kolaylığı açısından güçlendirme yapılırken yüksek beton sınıflarında U sargılamamanın tam sargılamaya göre daha tercih edilebilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

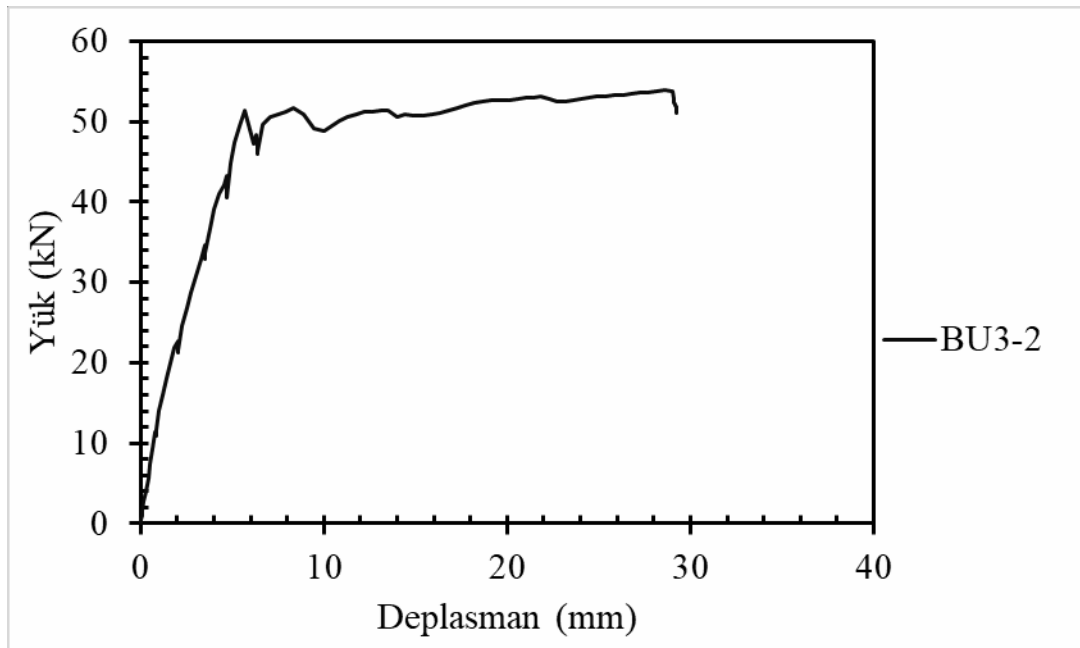
BU₃-2 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünüşleri Şekil 4.45'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.46'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.25'de gösterilmiştir.



Şekil 4.45. BU₃-2 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.25. BU₃-2 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
54,01	45,91	5,98	28,61	1,89	1381,41	9,39	1371,42	1258,03



Şekil 4.46. BU₃-2 numunesinin yük-deplasman grafiği

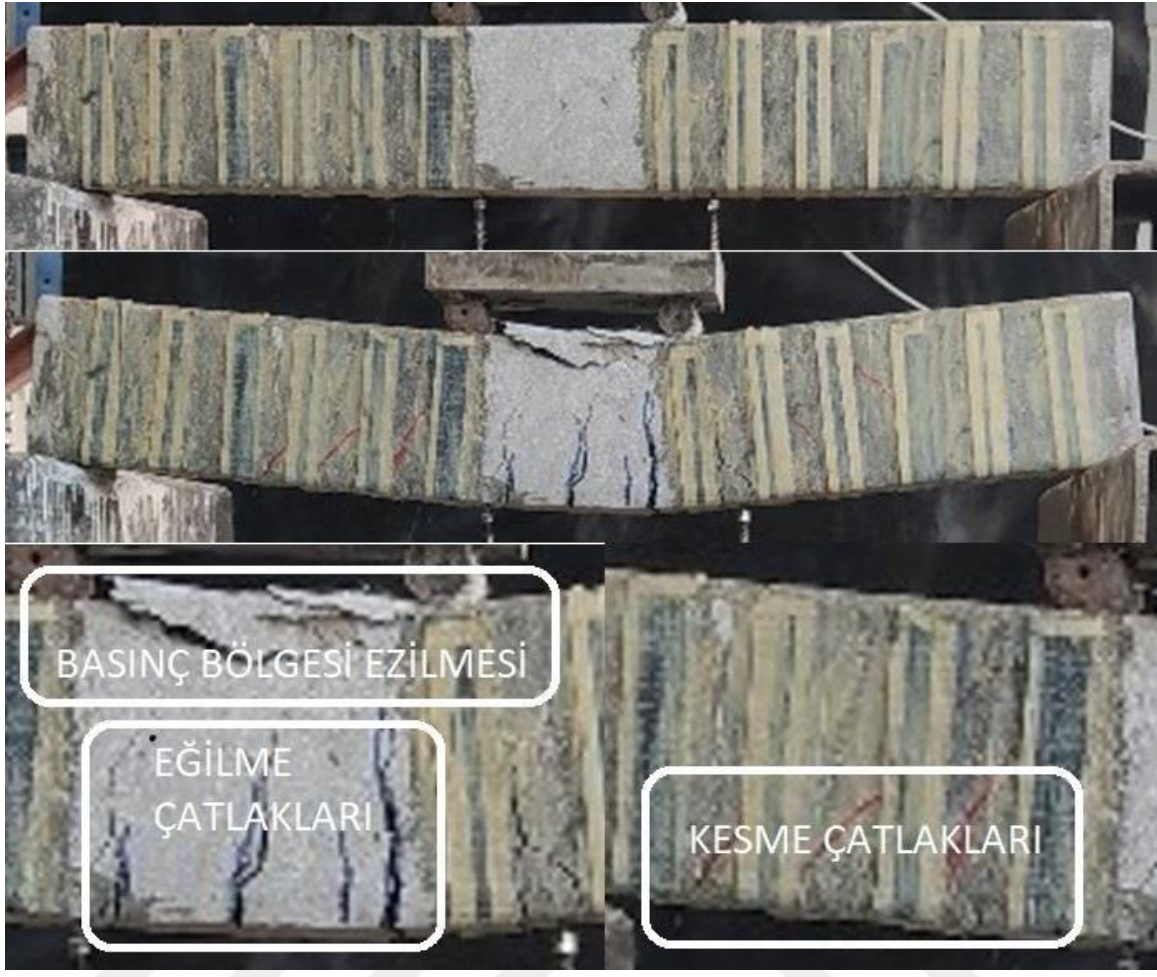
4.1.24. BU₄-2 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 30 MPa - 40 MPa olan beton ile 900g/m² ile U tipi sargı ile güçlendirilmiş numune BU₄-2 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 30 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu anda 3,27 mm deplasman yapmıştır. Deneyde kirişte kesme ve eğilme çatlakları oluşmuş, basınç bölgesi ezilmiş ve numune sünek bir davranış sergilemiştir.

Bu numune maksimum 58,133 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 35,331 mm olarak gözlenmiştir. Numune 49,413 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 35,59 mm olarak bulunmuştur.

Bu numunede elde edilen maksimum taşıma yükü, tam sargılamaya göre çok daha yüksek, süneklik oranı ise çok yakın çıkmıştır. Toplam enerji tüketimi U sargılamada tam sargılamaya göre yaklaşık 2 kat daha yüksek sonuç vermiştir. Beton dayanımı yüksek numunelerde U sargının tam sargıdan zaman zaman daha avantajlı olduğu görülmüştür.

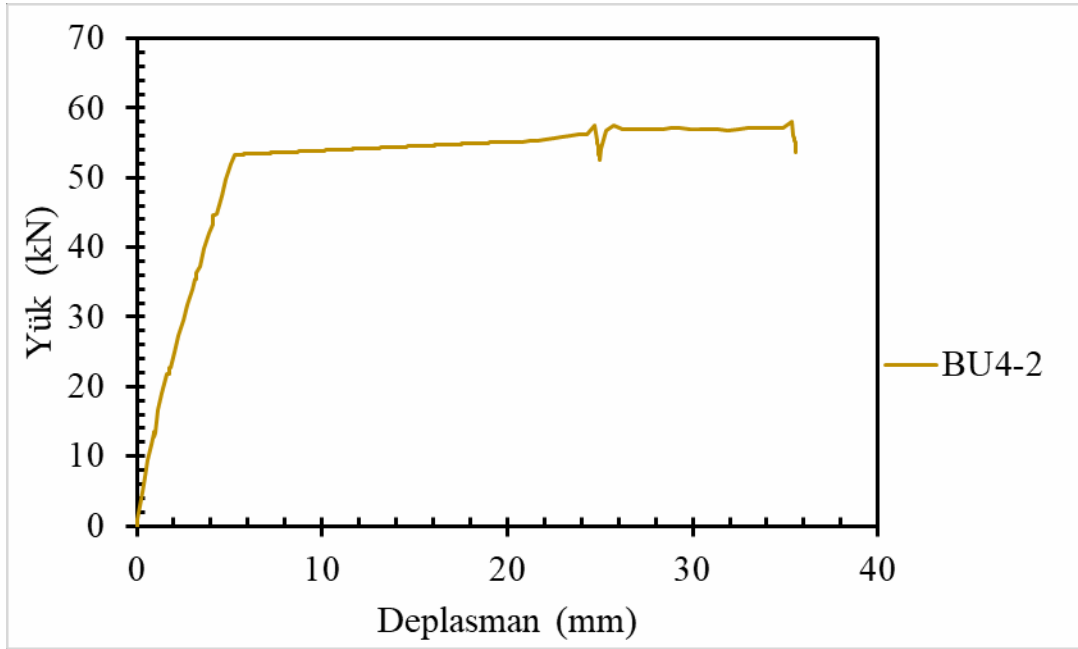
BU₄-2 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görüntüleri Şekil 4.47'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.48'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.26'de gösterilmiştir.



Şekil 4.47. BU₄-2 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.26. BU₄-2 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
58,13	49,41	7,40	35,33	1,65	1836,49	10,27	1829,21	1703,94



Şekil 4.48. BU₄-2 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.25. BU₅-2 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 40 MPa - 50 MPa olan beton ile 900g/m² ile U tipi sargı ile güçlendirilmiş numune BU₅-2 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 30 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu sırada 3,10 mm deplasman kaydedilmiştir. Deneyde kirişte eğilme çatlakları oluşmuş, sünek bir davranış ile göçme olmuştur.

Bu numune maksimum 56,212 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 17,550 mm olarak gözlenmiştir. Numune 47,780 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 28,46 mm olarak bulunmuştur.

Bu numunede yapılan uygulama, kirişin maksimum yük taşıma kapasitesine % 35.21 oranında katkı sağlamış, tam sargılama ile yakın sonuçlar vermiştir. Tam sargılamanın süneklik oranı ve enerji tüketimi yaklaşık 2 kat daha fazla çıkmıştır. Bu₄-2 ve Bu₅-2 numunelerinden elde edilen sonuçların tam salgılama yapılmış numunelerle kıyaslandığında farklı sonuçların elde edilmesinin, uygulama hataları vb. durumlardan kaynaklanabileceği düşünülmüştür.

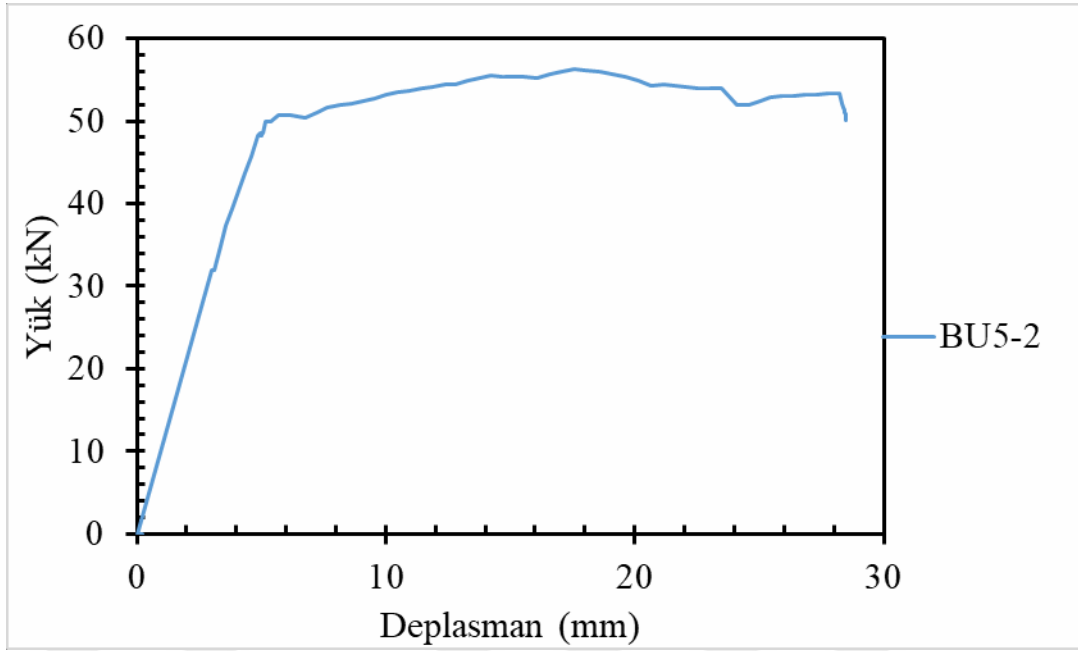
BU₅-2 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünüşleri Şekil 4.49'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.50'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.27'de gösterilmiştir..



Şekil 4.49. BU₅-2 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.27. BU₅-2 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
56,21	47,78	5,86	17,55	3,20	1388,07	9,84	828,03	1266,39



Şekil 4.50. BU₅-2 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.26. BS₁-1 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 5MPa - 10 MPa olan beton ile 300g/m² ile yan sargı ile güçlendirilmiş numune BS₁-1 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 20 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Mesnet bölgesine yakın şekilde kesme hasarı oluşmuş, 300 g/m²'lık CFRP ile yan sargı ile yapılan güçlendirmenin, hedef beton basınç dayanımı 5MPa-10 MPa olan beton için istenen ölçüde dayanıma katkısı olmamıştır. Nihayetinde kirişte aniden oluşan kesme hasarıyla birlikte göçme olmuştur. Göçme esnasında CFRP şeritler ve epoksi betondan ayrılmış ve kesme çatlaklarının ilerlemesine engel olamamıştır. Neticede kiriş eğilmeye zorlanmadan kesme hasarı ile göçmüştür. Göçme olduktan sonra yapılan incelemede yükleme noktalarında ezilme olmuştur.

Bu numune maksimum 23,028 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 3,873 mm olarak gözlenmiştir.

Bu numunede tam ve U sargılamaya göre maksimum taşıma yükü, süneklik oranı ve enerji tüketimi değerleri çok düşük çıkmış, güçlendirme yapılmayan referans numune ile yakın sonuçlar vermiştir. Düşük beton sınıflarında yan sargılamamanın kirişin taşıma kapasitesine ve davranış özelliklerine etkisinin çok az olduğu görülmüştür.

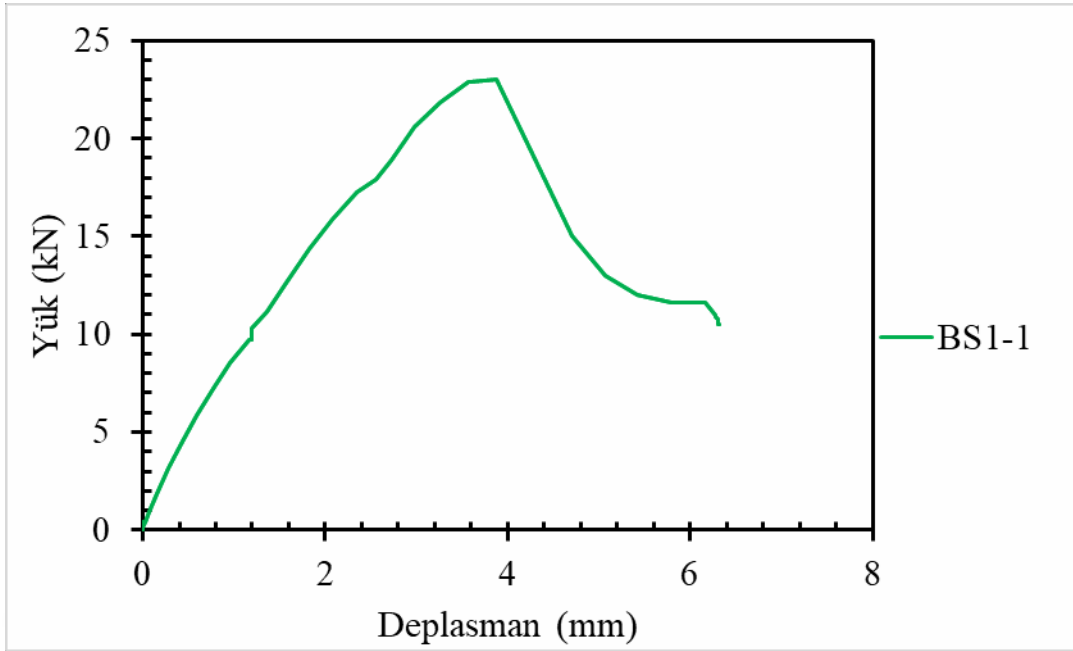
BS₁-1 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görüntüleri Şekil 4.51'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.52'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.28'de gösterilmiştir.



Şekil 4.51. BS₁-1 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görüntüsü

Tablo 4.28. BS₁-1 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
23,03	19,57	1,73	3,87	5,95	90,03	7,17	70,27	45,75



Şekil 4.52. BS₁-1 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.27. BS₂-1 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 10 MPa - 20 MPa olan beton ile 300g/m² ile yan sargı ile güçlendirilmiş numune BS₂-1 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 40 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Deneyde kirişte kesme çatlakları oluşmuş ve aniden göçme olmuştur.

Bu numune maksimum 40,599 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 4,733 mm olarak gözlenmiştir.

Bu numunede maksimum taşıma yükü, süneklik ve enerji tüketimi değerleri için referans numune ile yakın sonuçlar elde edilmiştir. Yine düşük dayanımlı beton sınıflarında yan sargılamamanın tercih edilmemesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

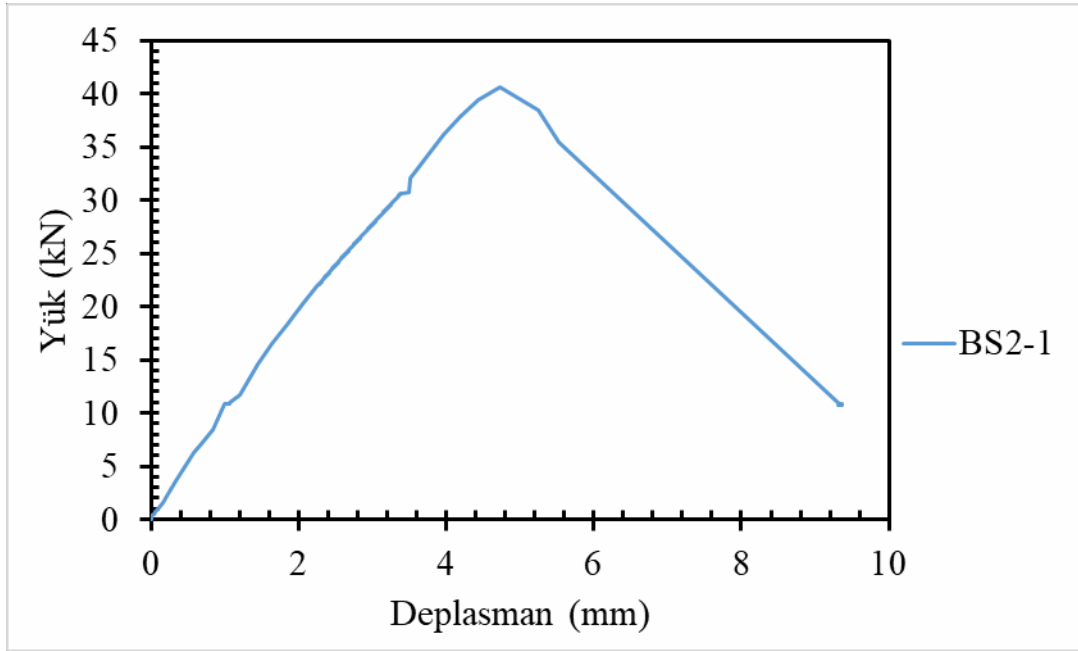
BS₂-1 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünüşleri Şekil 4.53'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.54'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.29'de gösterilmiştir.



Şekil 4.53. BS₂-1 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.29. BS₂-1 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
40,60	34,51	1,48	4,73	8,58	223,42	9,23	125,06	156,54



Şekil 4.54. BS₂-1 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.28. BS₃-1 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 20 MPa - 30 MPa olan beton ile 300g/m² ile yan sargı ile güçlendirilmiş numune BS₃-1 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 30 kN ile kesme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu anda deplasman 3 mm olmuştur. Deney aniden göçme ile sonlanmıştır.

Bu numune maksimum 58,466 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 6,343 mm olarak gözlenmiştir.

Bu numunede maksimum taşıma yükü, U ve tam sargılamayla çok yakın çıkmış, toplam enerji tüketim değeri diğer salgılamalara göre oldukça düşük çıkmıştır. Beton dayanımının artışıyla güçlendirmenin katkısı düşük dayanımlı betonlara göre daha yakın seyretmektedir. Özellikle dayanımı 17 MPa'dan daha yüksek beton sınıflarında güçlendirme yapılırken maliyet ve uygulama açısından daha pratik seçeneklerin tercih edilmesi mümkündür.

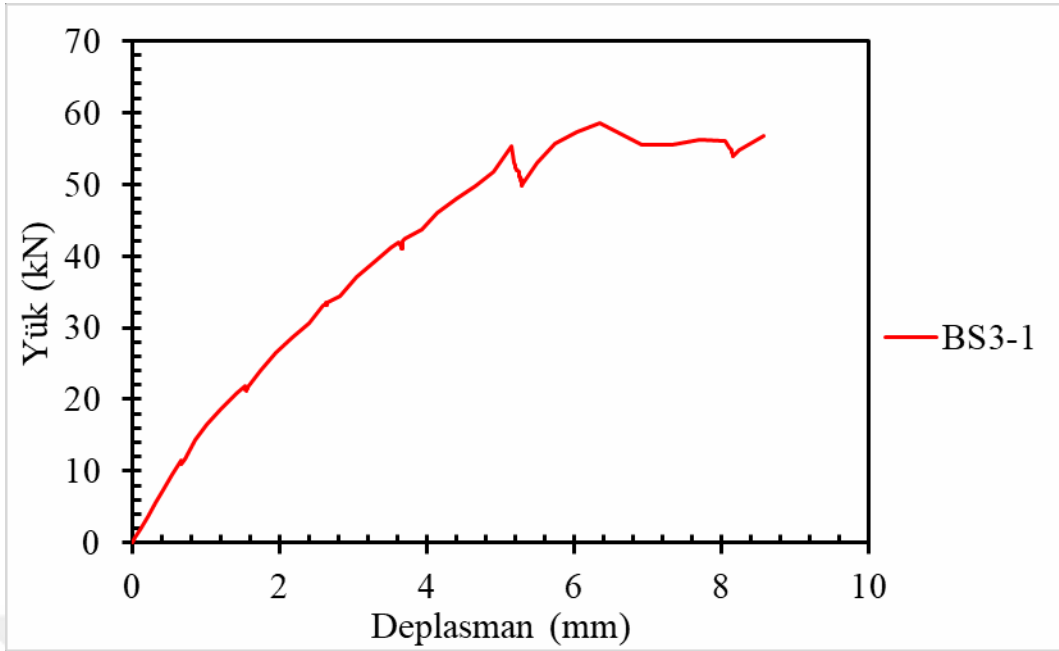
BS₃-1 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünüşleri Şekil 4.55'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.56'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.30'de gösterilmiştir.



Şekil 4.55. BS₃-1 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.30. BS₃-1 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
58,47	49,70	3,42	6,34	9,22	350,38	10,68	257,67	216,73



Şekil 4.56. BS₃-1 numunesinin yük-deplasman grafiği

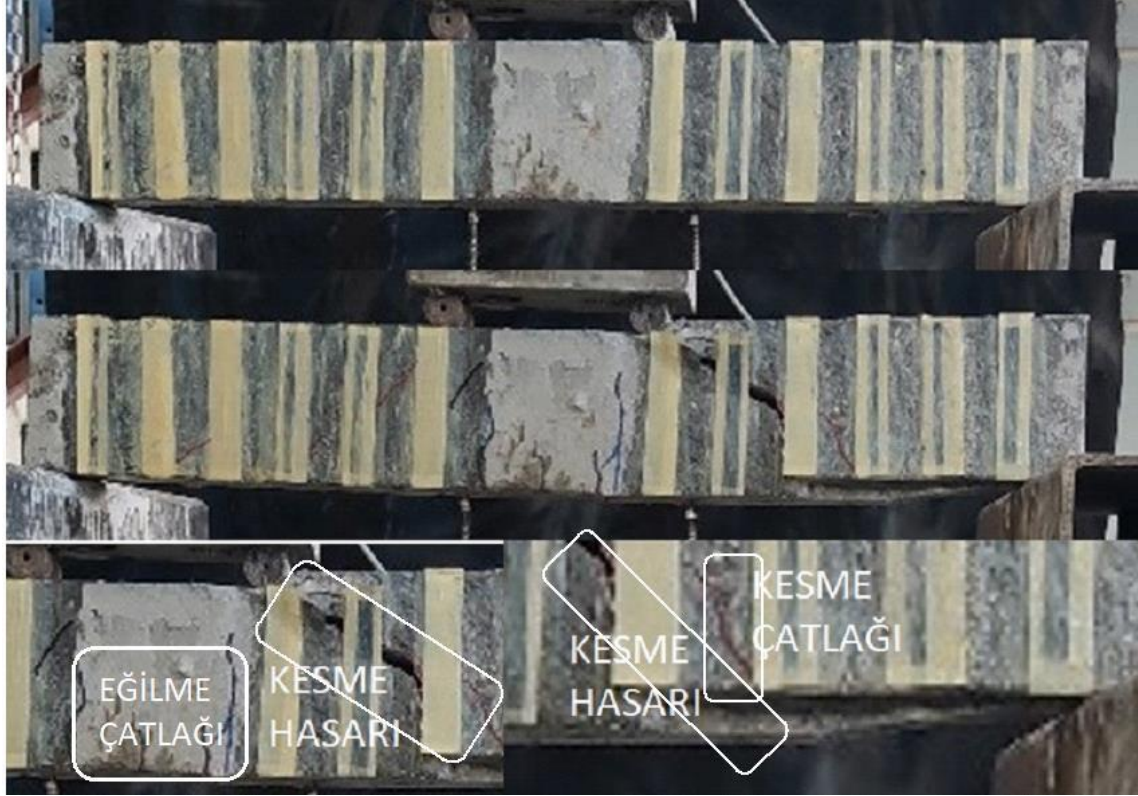
4.1.29. BS₄-1 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 30 MPa - 40 MPa olan beton ile 300g/m² ile yan sargı ile güçlendirilmiş numune BS₄-1 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 40 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu sırada numunede 4,02 mm deplasman oluşmuştur. Deneyde kirişte başta eğilme çatlakları oluşmuş, fakat sonradan kesme çatlakları oluşmuş ve göçme olmuştur. BF₄-1 VE BU₄-1 numunelerinin eğilme kırılması ile göçmüş, yan sargılamada ise kesme kırılmasının meydana gelmiştir. Kırılma türü ve kirişlerin davranışındaki bu fark tam ve U sargının kirişin ve CFRP'nin daha rijit davranmasıyla açıklanabilir. Yan sargıda CFRP şeritler kesme çatlaklarının olduğu bölgelerde beton yüzeyinden kopmuştur. Fakat tam sargı ile U sargıda bu durum görülmemiştir.

Bu numune maksimum 59,631 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 8,985 mm olarak gözlenmiştir.

Bu numunede maksimum taşıma yükü diğer sargılamalarla çok yakın sonuç vermesine rağmen süneklik oranı ve enerji tüketimi değerleri daha düşük çıkmıştır. Bu sebeple tam ve U sargılamasının yan sargılamaya kıyasla daha tercih edilebilir olduğu düşünülmüştür.

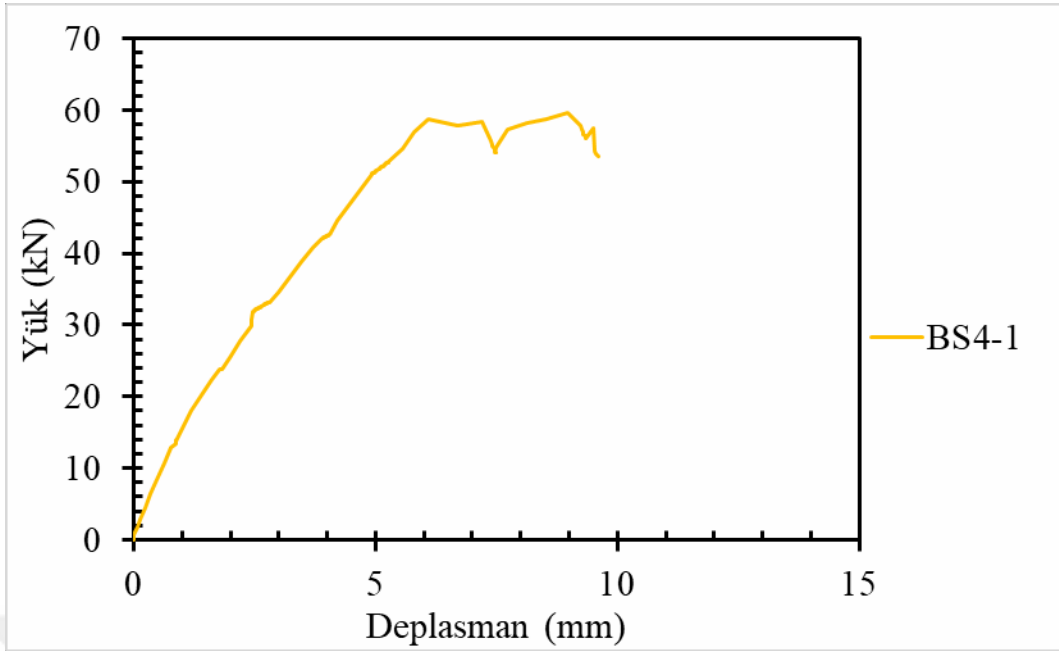
BS₄-1 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü Şekil 4.57'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.58'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.31'de gösterilmiştir.



Şekil 4.57. BS₄-1 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.31. BS₄-1 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
59,63	50,69	2,05	8,99	6,64	409,19	10,82	388,54	278,78



Şekil 4.58. BS₄-1 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.30. BS₅-1 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 40 MPa - 50 MPa olan beton ile 300g/m² ile yan sargı ile güçlendirilmiş numune BS₅-1 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 30 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu sırada 2,75 mm deplasman kaydedilmiştir. Deneyde kirişte kesme ve eğilme çatlakları oluşmuş ve kesme etkisiyle göçme olmuştur.

Bu numune maksimum 59,362 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 8,672 mm olarak gözlenmiştir.

Bu numunede maksimum taşıma yükü tam ve U sargılamayla çok yakın çıkmıştır. Fakat süneklik oranı ve enerji tüketimi kıyaslandığı zaman tam ve U sargılamasının yan sargılamaya tercih edilmesi gerektiği düşünülmüştür.

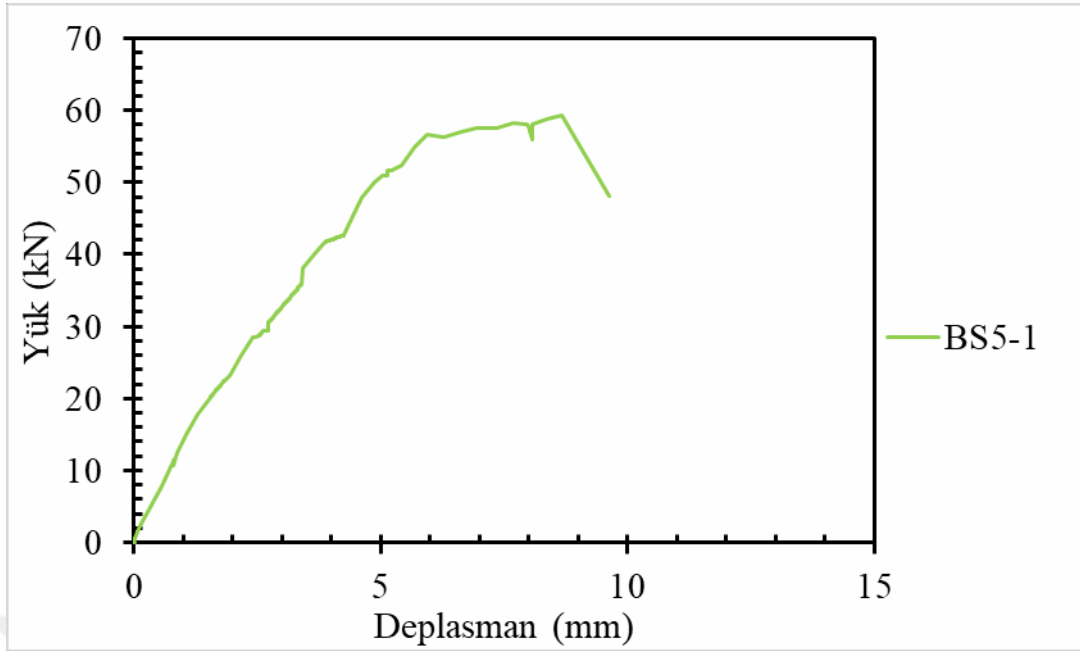
BS₅-1 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünüşleri Şekil 4.59'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.60'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.32'de gösterilmiştir.



Şekil 4.59. BS₅-1 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.32. BS₅-1 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
59,36	50,46	1,91	8,67	6,85	398,39	10,01	398,39	256,87



Şekil 4.60. BS₅-1 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.31. BS₁-2 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 5MPa - 10 MPa olan beton ile 900g/m² ile yan sargı ile güçlendirilmiş numune BS₁-2 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 20 kN ile kesme bölgesinde ilk çatlak oluşmuştur. sünek bir davranış gözlenmeden sağ kesme bölgesindeki kesme çatlakları ilerlemiş ve ani bir göçme olmuştur.

Bu numune maksimum 27,036 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 4,955 mm olarak gözlenmiştir.

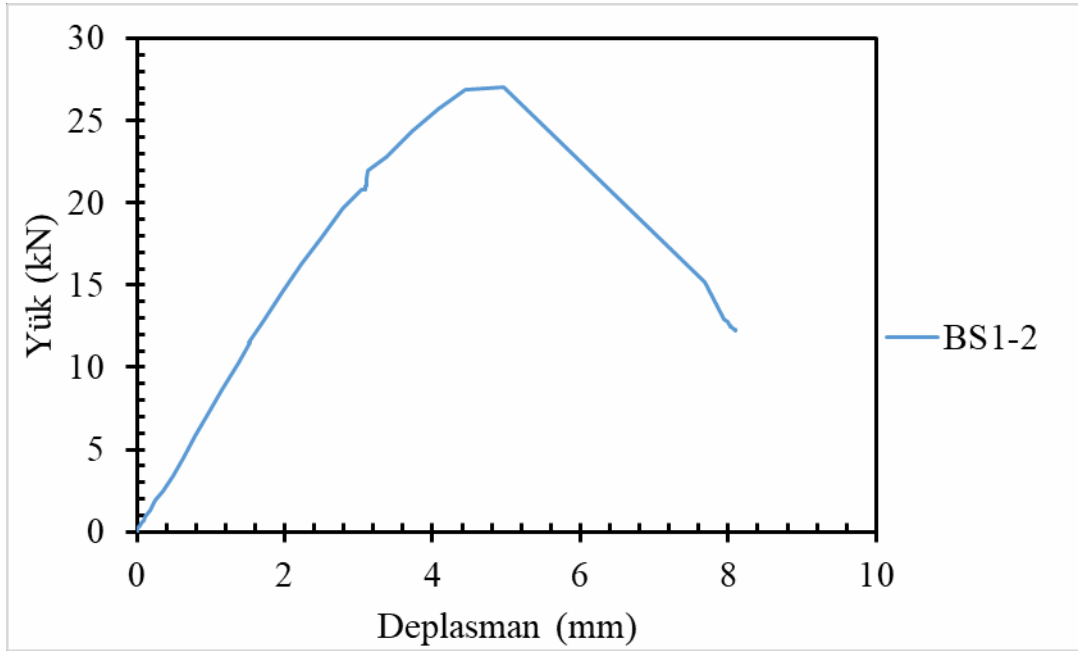
BS₁-1 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünüşleri Şekil 4.61'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.63'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.33'de gösterilmiştir.



Şekil 4.61. BS₁-2 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.33. BS₁-2 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
27,04	22,98	1,74	4,96	5,46	144,71	6,78	139,17	101,40



Şekil 4.62. BS₁-2 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.32. BS₂-2 Numunesi

Denyde hedef beton basınç dayanımı 10 MPa - 20 MPa olan beton ile 900g/m² ile yan sargı ile güçlendirilmiş numune BS₂-2 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 30 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu anda 3,41 mm deplasman oluşmuştur. Denyde kirişte kesme çatlakları oluşmuş, aniden göçme olmuştur.

Bu numune maksimum 24,838 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 7,839 mm olarak gözlenmiştir.

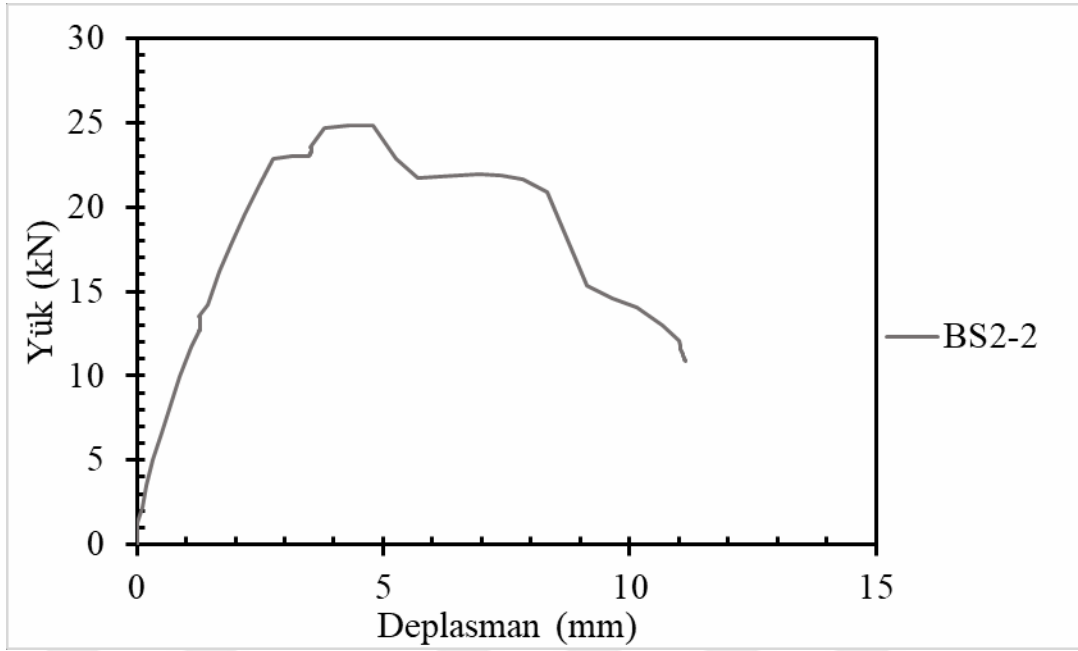
BS₂-2 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünüşleri Şekil 4.63'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.64'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.34'de gösterilmiştir.



Şekil 4.63. BS₂-2 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.34. BS₂-2 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
24,84	21,11	2,59	7,84	3,17	205,99	4,91	163,92	132,67



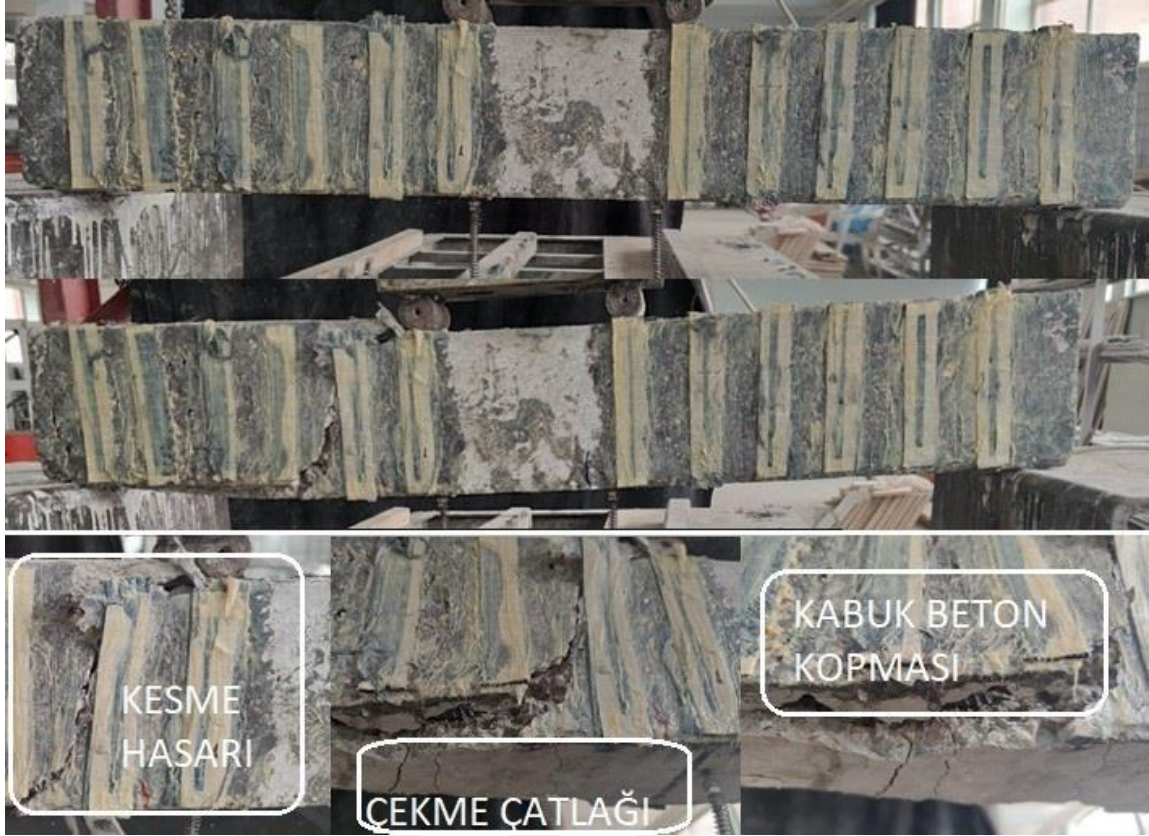
Şekil 4.64. BS₂-2 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.33. BS₃-2 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 20 MPa - 30 MPa olan beton ile 900g/m² ile yan sargı ile güçlendirilmiş numune BS₃-2 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 40 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu sırada 4,3 mm deplasman oluşmuştur. Deneyde kirişte kesme çatlakları oluşmuş, gevrek bir şekilde göçme olmuştur.

Bu numune maksimum 26,626 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 3,98 mm olarak gözlenmiştir.

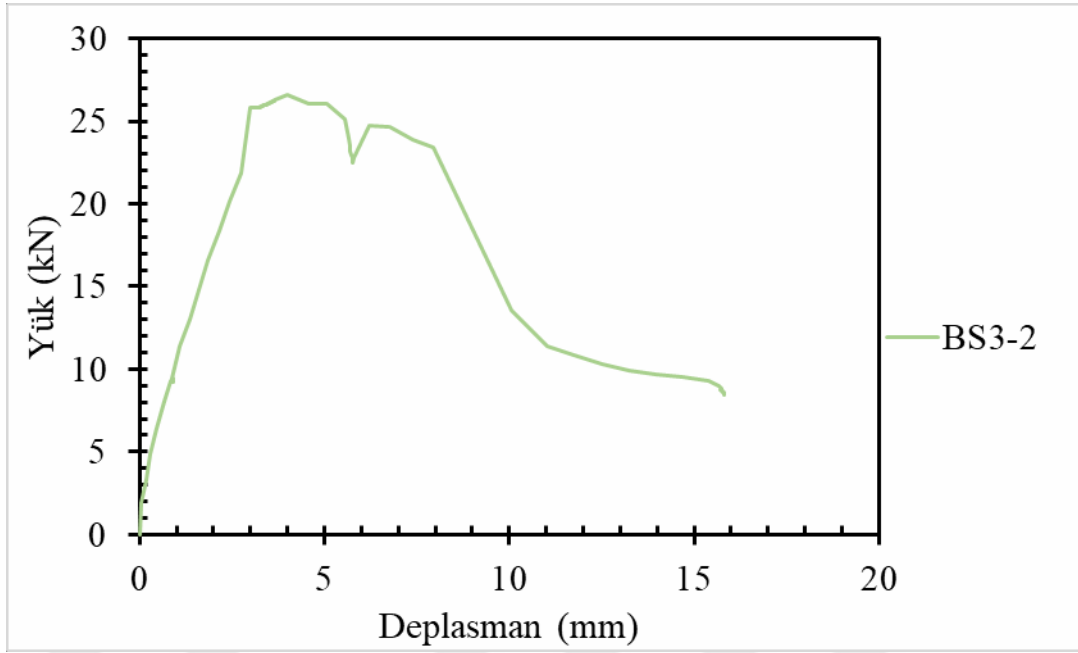
BS₃-2 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümleri Şekil 4.65'de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.66'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.35'de gösterilmiştir.



Şekil 4.65. BS₃-2 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.35. BS₃-2 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
26,63	22,63	2,90	3,98	6,69	264,30	8,25	82,46	169,33



Şekil 4.66. BS₃-2 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.34. BS₄-2 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 30 MPa - 40 MPa olan beton ile 900g/m² ile yan sargı ile güçlendirilmiş numune BS₄-2 olarak kodlanmıştır. Bu numunede 40 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu andaki deplasman 4,11 mm dir. kirişte oluşan çatlaklar ilerlemiş ve aniden kesme hasarıyla göçme olmuştur.

Bu numune maksimum 64,357 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 12,226 mm olarak gözlenmiştir.

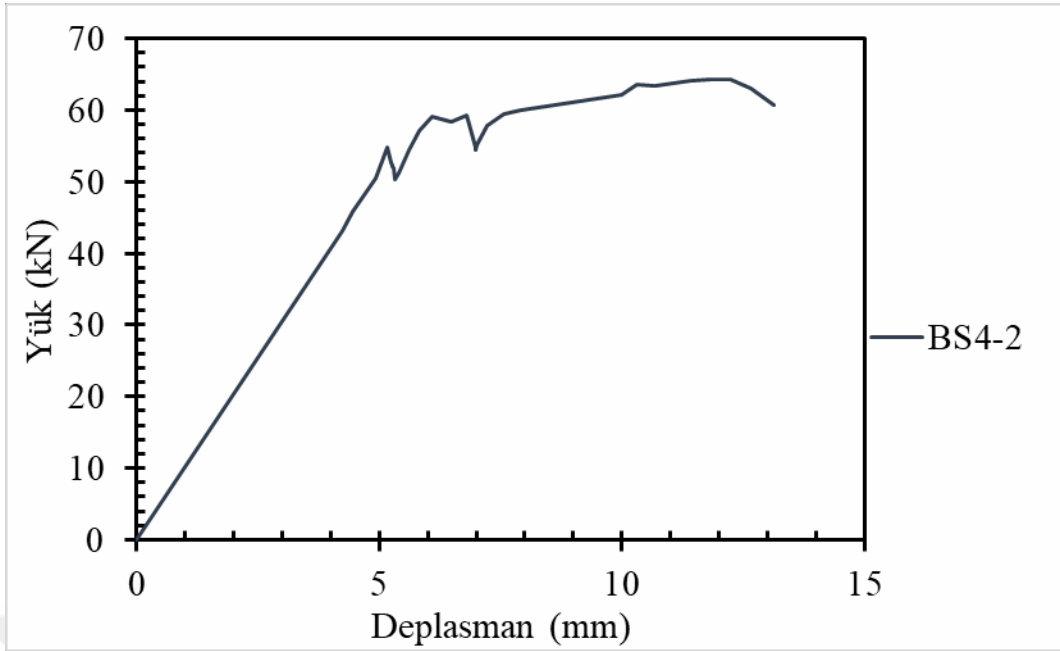
BS₄-2 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünüşleri Şekil 4.67’de, yük-deplasman grafiği Şekil 4.38’de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.36’de gösterilmiştir.



Şekil 4.67. BS₄-2 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.36. BS₄-2 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
64,36	54,70	2,54	12,23	5,26	626,12	10,59	596,25	496,95



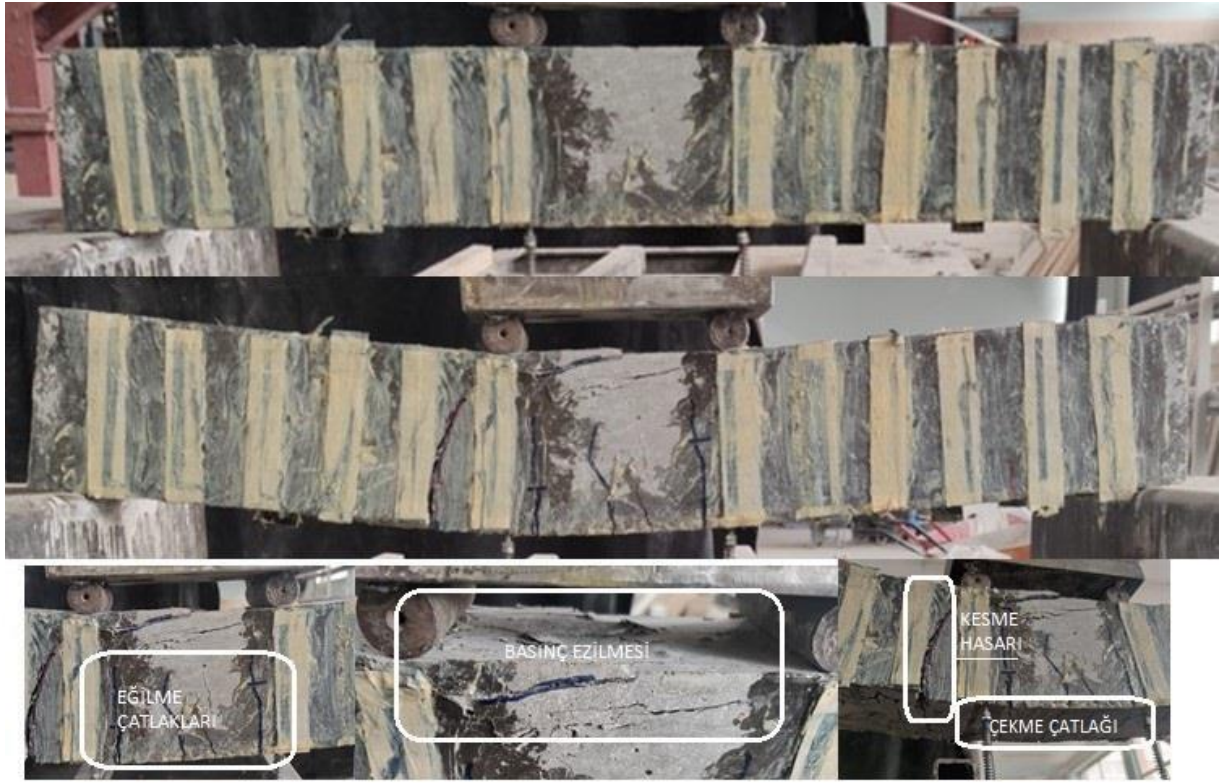
Şekil 4.68. BS₄-2 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.35. BS₅-2 Numunesi

Deneyde hedef beton basınç dayanımı 40 MPa - 50 MPa olan beton ile 900g/m² ile yan sargı ile güçlendirilmiş numune BS₅-2 olarak kodlanmıştır. Bu numunedeki 40 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Bu anda 4,66 mm deplasman kaydedilmiştir. Deneyde kirişte eğilme çatlakları oluşmuş, basınç bölgesi tamamen ezilmiş ve sünek bir davranış ile göçme olmuştur.

Bu numune maksimum 53,932 kN yüküne ulaşmış ve bu yükte deplasman değeri 15,864 mm olarak gözlenmiştir. Numune 45,842 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 33,20 mm olarak bulunmuştur.

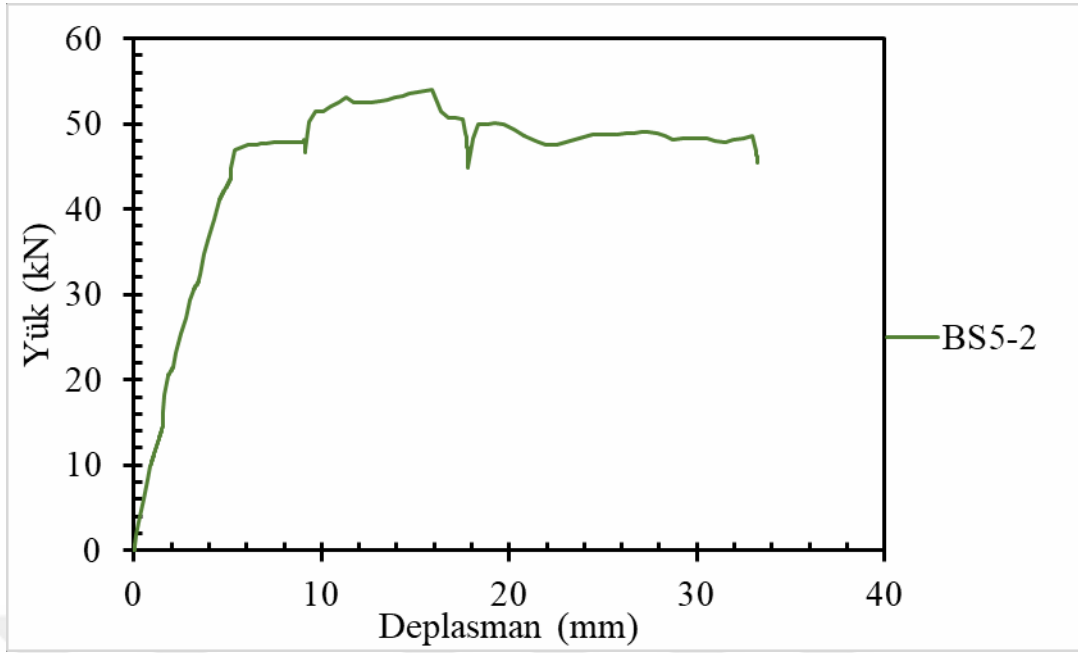
BS₅-2 numunesine ait deney öncesi-sonrası ve detaylı görünüşleri Şekil 4.69'da, yük-deplasman grafiği Şekil 4.70'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.37'de gösterilmiştir.



Şekil 4.69. BS₅-2 numunesinin deney öncesi-sonrası ve detaylı görünümü

Tablo 4.37. BS₅-2 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
53,93	45,84	6,44	15,86	3,40	1517,57	8,89	696,35	1389,78



Şekil 4.70. BS₅-2 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.2. Deneysel Elemanların Karşılaştırılması

Çalışmanın amaç kısmında da belirtildiği üzere çalışmanın temel motivasyonu ve araştırmanın sorusu üç farklı problemin çözülmesi üzerine oluşturulmuştur. Araştırma sorusu şu şekildedir;

- 1) Kesme açısından yetersiz olan kirişlerde farklı (çok düşük-orta ve yüksek) beton dayanımlarında CFRP ile yapılacak güçlendirme sonucunda güçlendirilen elemanın performansı nasıl değişir? Başka bir ifade ise beton dayanımı CFRP ile yapılan güçlendirmede nasıl bir öneme sahiptir?
- 2) Güçlendirmede farklı gramajlarda CFRP kullanılmasının taşıma kapasitesi, süneklik, rijitlik gibi özellikler için elemanda oluşturacağı fark nedir?
- 3) Farklı CFRP sargılama türleri (tam sargı, U sargı ve yandan sargı) ile elemanın davranışı nasıl değişmektedir?

Bu sorulara cevap verebilmek amacıyla kapsam ve deneyler kısmında da belirtildiği şekliyle, farklı beton basınç dayanımlarına sahip kesme kirişlerinde, farklı gramajlarda CFRP ve farklı güçlendirme şekilleri ile çalışılmıştır. Bu bölümde ise bu alt başlıklara göre elde edilen deneysel sonuçlar karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

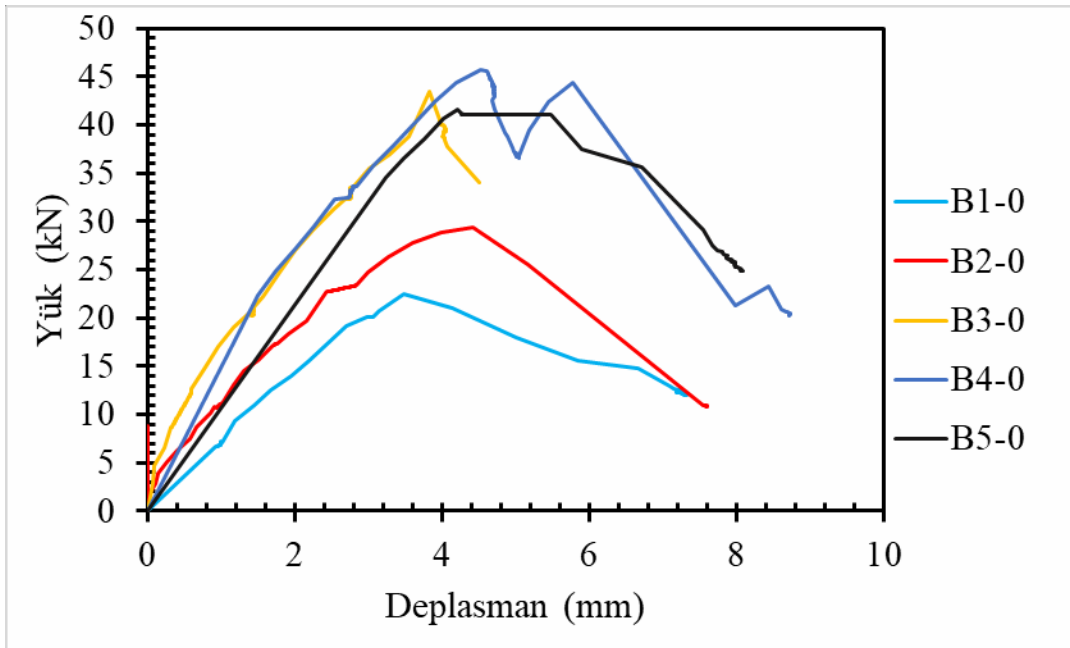
4.2.1. Beton sınıflarının karşılaştırılması

Kesme açısından yetersiz olan kirişlerde CFRP ile yapılan güçlendirmede beton basınç dayanımının nasıl bir etkiye sahip olduğunu anlamak için aşağıda verilen karşılaştırmalar yapılmıştır.

4.2.1.1. B₁₋₀, B₂₋₀, B₃₋₀, B₄₋₀, B₅₋₀ Numunelerin karşılaştırılması

B₁₋₀, B₂₋₀, B₃₋₀, B₄₋₀ numunelerinde beklendiği gibi beton sınıfı artışı ile yük taşıma kapasitesinde artış görülmüştür. B₅₋₀ numunesinin beton hazırlık aşamasında yeterince homojen yerleştirilmemesi gibi üretim kaynaklı hatalara bağlı olarak beklenenden daha düşük taşıma kapasitesinde olduğu düşünülmüştür. Burada tek numune kullanılarak yapılan deneylerde beton dayanımındaki değişkenlik ve laboratuvar ortamı dâhil betonun istenilen homojenlikte üretilmemesinin bir etkisi gözükmemektedir.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.71’de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.38’de gösterilmiştir. Tabloda verilen değerlerden beklendiği gibi rijitliklerin de (EI ile orantılı olarak) beton dayanımı ile beraber arttığı görülmektedir. Özellikle B₃₋₀ ve B₄₋₀ numunelerinin başlangıç rijitlikleri ile dayanımlarının birbirine yakın olması beton üretiminde iki numune arasında çok ciddi bir farkın olmaması ile de açıklanabilir.



Şekil 4.71. B₁₋₀, B₂₋₀, B₃₋₀, B₄₋₀, B₅₋₀ numunelerinin yük-deplasman grafiği

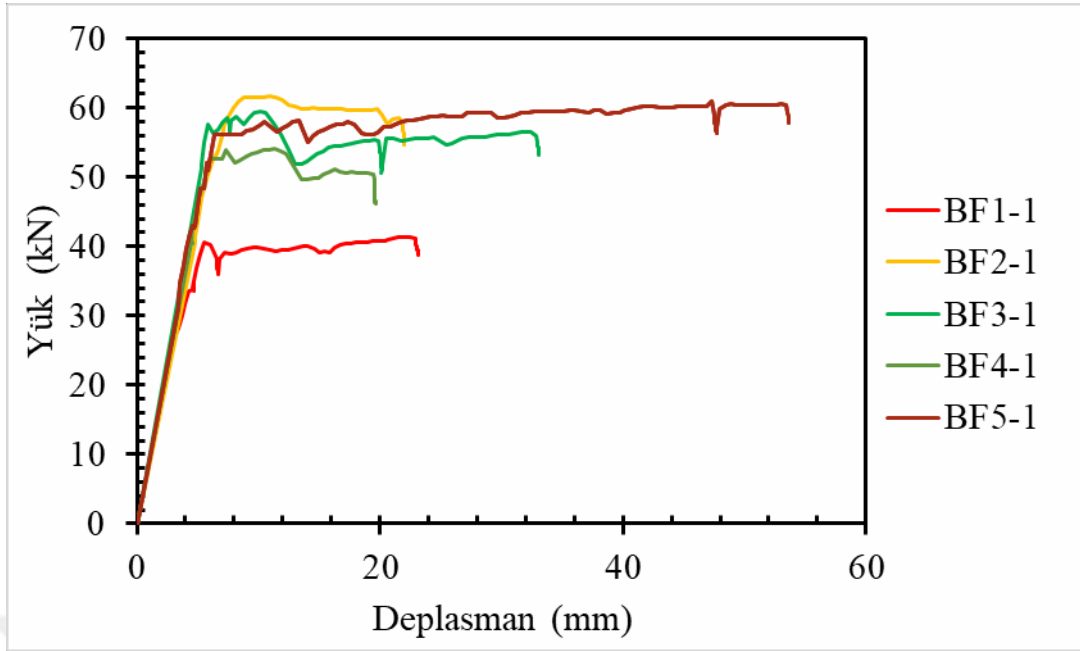
Tablo 4.38. B₁-0, B₂-0, B₃-0 ,B₄-0 ,B₅-0 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85*P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₁ -0	22,49	19,12	1,54	3,48	6,46	109,21	7,10	56,99	47,29
B ₂ -0	29,42	25,01	1,71	4,42	6,66	148,51	8,28	104,27	96,30
B ₃ -0	43,51	36,98	1,62	3,83	11,36	44,06	3,87	100,87	46,64
B ₄ -0	45,74	38,87	1,46	4,53	10,10	263,33	11,08	127,16	68,18
B ₅ -0	41,57	35,34	1,91	4,21	9,87	232,74	10,07	95,54	162,92

4.2.1.2. BF1-1, BF2-1, BF3-1, BF4-1, BF5-1 Numunelerin karşılaştırılması

300 g/m²'lik CFRP ile yapılan tam sargılamanın (Full sargılanmış olan) BF₁-1, BF₂-1, BF₃-1, BF₄-1, BF₅-1 numunelerinin tamamı beklendiği gibi referans numunelere oranla oldukça sünek davranış göstermiştir. Deneylerin sonunda , tam sargının tüm beton sınıflarında davranış şekli için etkili olduğu düşünülmüştür. 300 g/m²'lik CFRP ile yapılan tam sargılamanın bu beş tür beton sınıfı için taşıma kapasitesi açısından farklı oranlarda katkı sağladığı, özellikle 10 MPa-30 MPa aralığında beton basınç dayanımına sahip beton sınıflarında imal edilmiş olan BF₂-1, BF₃-1 numunelerinin BF₄-1, BF₅-1 numunelerinden yük taşıma kapasitesi açısından daha yüksek değerlere sahip olduğu dikkat çekmektedir. Fakat BF₂-1, BF₃-1, BF₄-1 ve BF₅-1 numunelerinde davranış, kesmeden eğilmeye doğru değiştiği için artık beton dayanımının (özellikle 20 MPa ve sonrasında) dayanıma hatırı sayılır bir katkısı olmayacağı açıktır.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.72'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.39'de gösterilmiştir.



Şekil 4.72. BF₁-1, BF₂-1, BF₃-1, BF₄-1, BF₅-1 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.39. BF₁-1, BF₂-1, BF₃-1, BF₄-1, BF₅-1 numunelerinin deney sonuçları

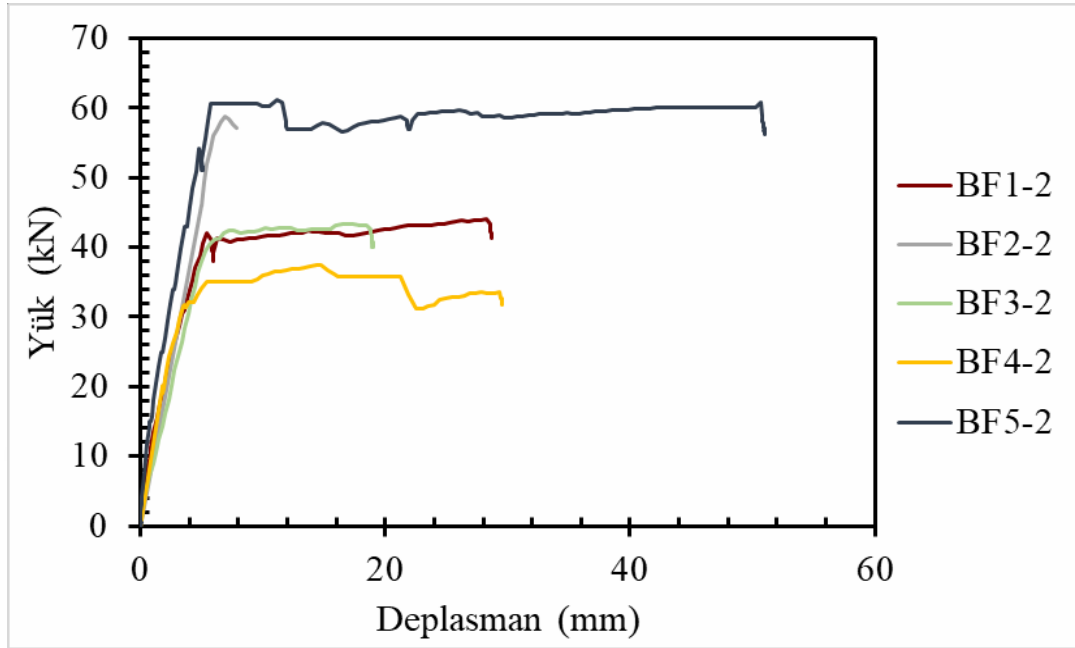
	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
BF ₁ -1	41,34	35,13	4,91	22,53	1,83	827,78	7,44	818,66	738,28
BF ₂ -1	61,61	52,37	3,53	10,91	5,65	1108,62	8,40	174,23	942,08
BF ₃ -1	59,55	50,62	3,26	20,14	2,96	1681,74	5,00	968,75	1267,41
BF ₄ -1	54,11	46,00	4,00	11,34	4,78	868,42	9,38	471,65	760,21
BF ₅ -1	60,99	51,84	9,35	47,33	47,33	2962,68	9,03	2590,66	2810,56

4.2.1.3. BF₁-2, BF₂-2, BF₃-2, BF₄-2, BF₅-2 Numunelerin karşılaştırılması

900 g/m²'lik CFRP ile yapılan tam sargılamanın (Full sargılanmış olan) BF₁-2, BF₂-2, BF₃-2, BF₄-2 ve BF₅-2 numunelerinin tamamı beklendiği gibi referans numunelere oranla oldukça sünek davranış göstermiştir. BF₂-2 numunesinin deneyi sırasında CFRP malzemesi beton yüzeyinden sıyrılmakta ve diğer dört numune ile kıyaslandığında sünek davranmadığı ve aniden göçme olduğu görülmektedir. BF₄-2 numunesinin beklenenden daha düşük yük taşıma kapasitesinde seyrettiği fakat yine de sünek davranışla göçme olduğu görülmektedir.

BF₂-1, BF₂-2 numunelerinin yük taşıma kapasitesi ve sünek davranışı, 900 g/m² CFRP uygulamasının düşük sınıflı betonlar için tam sargılama ile oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.73’de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.40’de gösterilmiştir.



Şekil 4.73. BF₁₋₂, BF₂₋₂, BF₃₋₂, BF₄₋₂, BF₅₋₂ numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.40. BF₁₋₂, BF₂₋₂, BF₃₋₂, BF₄₋₂, BF₅₋₂ numunelerinin deney sonuçları

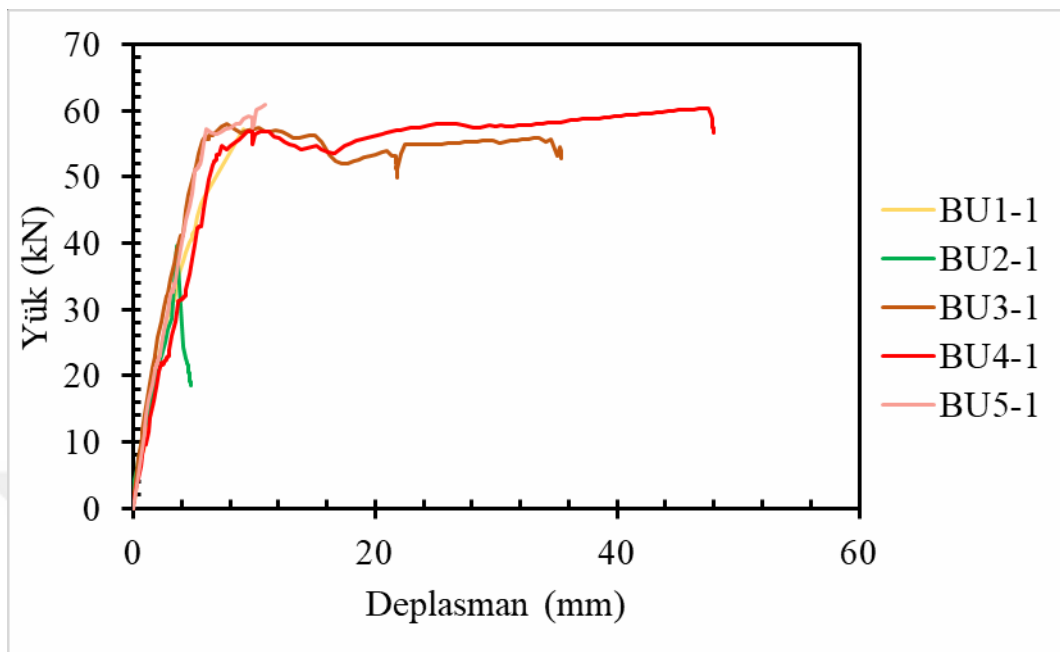
	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
BF ₁₋₂	44,13	37,51	6,37	28,21	1,56	1118,55	8,33	1111,53	1021,75
BF ₂₋₂	58,76	49,95	1,51	6,88	8,54	276,48	9,56	236,82	150,75
BF ₃₋₂	43,40	36,89	4,04	16,97	2,56	692,17	7,86	627,14	603,30
BF ₄₋₂	37,54	31,91	7,51	14,76	2,54	967,48	8,12	483,02	891,26
BF ₅₋₂	61,21	52,03	10,83	11,10	5,51	2879,05	11,05	555,04	2745,36

4.2.1.4. BU₁₋₁, BU₂₋₁, BU₃₋₁, BU₄₋₁, BU₅₋₁ Numunelerin karşılaştırılması

300 g/m²’lik CFRP kumaşla U şeklinde uygulanan güçlendirmenin özellikle C20 ve üzeri beton sınıflarında yük taşıma kapasitesinin ve sünekliği artırdığı, daha düşük beton sınıflarında ise sadece yük taşıma kapasitesini etkilediği, beklenen sünek davranış için yeterli katkıyı sağlamadığı görülmektedir. Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.74’de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.41’de gösterilmiştir.

TBDY (2018)’de kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinde yalnızca tam sargılama tipine yer verilmiştir. Benzer şekilde ACI 440.2R-17 (2017)’de de U tipi

sargılama için beton dayanımının en az 17 MPa olması şartı, bu sonuçları desteklemektedir



Şekil 4.74. BU₁₋₁, BU₂₋₁, BU₃₋₁, BU₄₋₁, BU₅₋₁ numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.41. BU₁₋₁, BU₂₋₁, BU₃₋₁, BU₄₋₁, BU₅₋₁ numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
BU ₁₋₁	57,20	48,62	1,54	9,08	6,30	327,50	8,24	327,50	166,04
BU ₂₋₁	39,59	33,65	1,12	3,56	11,13	54,88	9,98	85,21	35,33
BU ₃₋₁	58,09	49,38	7,30	7,74	7,50	1819,93	10,17	330,79	1685,11
BU ₄₋₁	60,31	51,26	7,35	47,14	1,28	2552,07	7,85	2527,02	2378,22
BU ₅₋₁	60,82	51,70	1,96	10,94	5,56	470,31	9,25	470,31	309,58

4.2.1.5. BU₁₋₂, BU₂₋₂, BU₃₋₂, BU₄₋₂, BU₅₋₂ Numunelerin karşılaştırılması

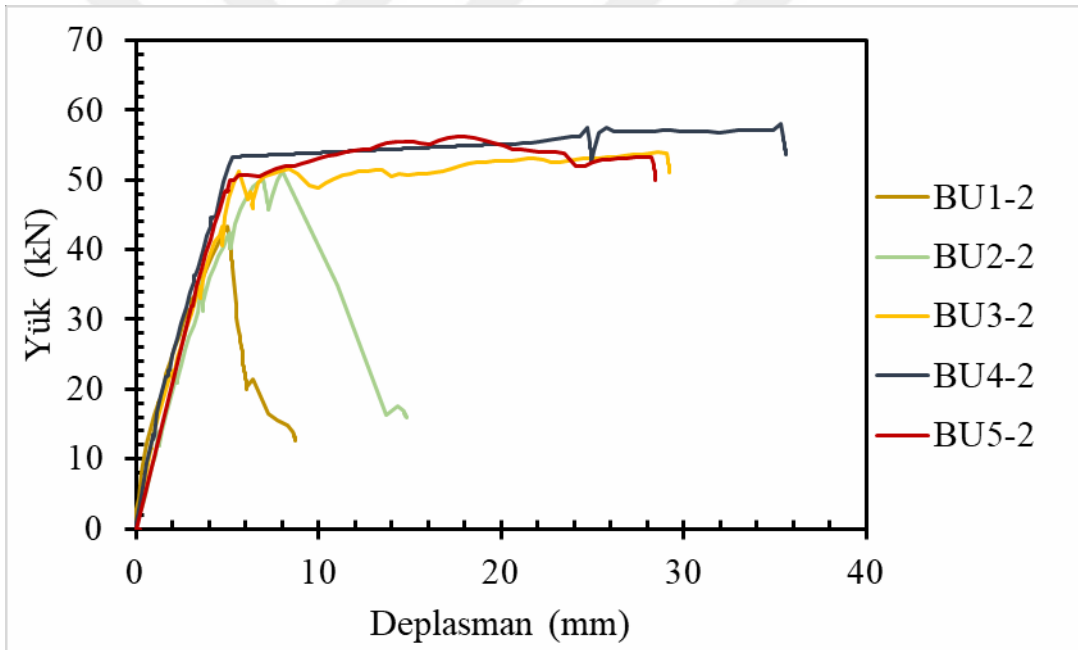
BU₁₋₂, BU₂₋₂, BU₃₋₂, BU₄₋₂, BU₅₋₂ numunelerinde U tipi sargı ve 900 g/m² gramajlı tek yönlü CFRP uygulamasının yük taşıma kapasitelerine beton sınıflarıyla uyumlu şekilde katkı sağladığı görülmüştür.

20 MPa'dan daha düşük dayanımlı betonlu numunelerin sünek davranış sergilemediği görülmektedir. Bununla beraber bir önceki kıyaslamada da görüldüğü gibi 20 MPa ve üzeri betonlar için istenilen sünek davranışı sağladığı söylenebilir.

TBDY (2018)'de kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinde yalnızca tam sargılama tipine yer verilmiştir. Benzer şekilde ACI 440.2R-17 (2017)'de de U tipi

sargılama için beton dayanımının en az 17 MPa olması şartı bu sonuçları desteklemektedir. Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.75. 'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4. 42. 'de gösterilmiştir.

ACI 440.2R-17 'de sürekli ve şerit uygulamalar halinde tam sargılama, iki veya üç taraftan yapıştırma ile kesme etkilerine karşı güçlendirmeye izin verilmektedir. Bu güçlendirme yöntemlerinden biri seçilirken iki veya üç taraftan yapıştırma uygulamalarında karakteristik beton basınç dayanımının en az 17 MPa ve karakteristik beton çekme dayanımının en az 1,4 MPa olması şartı bulunmaktadır. Bahsedilen iki yönetmelik şartlarının 300 ve 900 g/m²'lik CFRP kumaşla U şeklinde güçlendirme uygulamalarının sonuçlarında görüldüğü gibi C20'den daha düşük dayanımlı betonla üretilmiş kiriş elemanların tam sargılama ile güçlendirilmesinin istenilen taşıma kapasitesi ve sünekliği sağladığı görülmüştür.



Şekil 4.75. BU₁-2, BU₂-2, BU₃-2, BU₄-2, BU₅-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

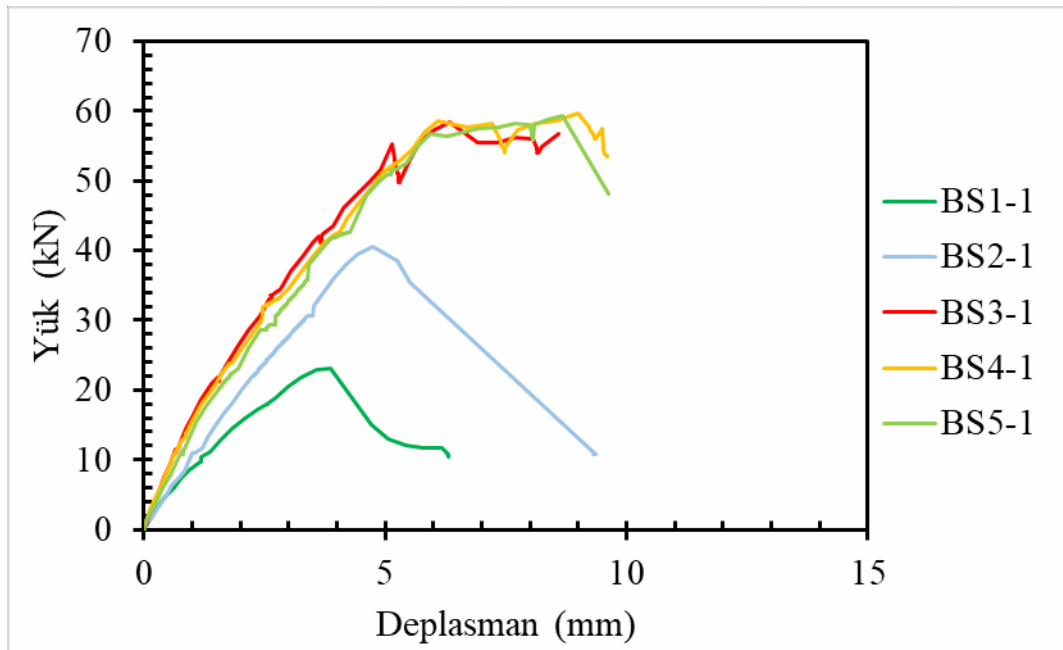
Tablo 4.42. BU₁₋₂, BU₂₋₂, BU₃₋₂, BU₄₋₂, BU₅₋₂ numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85*P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
BU ₁₋₂	43,39	36,89	1,48	5,04	8,62	214,56	10,27	138,64	66,14
BU ₂₋₂	51,18	43,50	1,73	8,06	6,35	473,92	7,97	386,64	321,67
BU ₃₋₂	54,01	45,91	5,98	28,61	1,89	1381,41	9,39	1371,42	1258,03
BU ₄₋₂	58,13	49,41	7,40	35,33	1,65	1836,49	10,27	1829,21	1703,94
BU ₅₋₂	56,21	47,78	5,86	17,55	3,20	1388,07	9,84	828,03	1266,39

4.2.1.6. BS₁₋₁, BS₂₋₁, BS₃₋₁, BS₄₋₁, BS₅₋₁ Numunelerin karşılaştırılması

BS₁₋₁, BS₂₋₁, BS₃₋₁, BS₄₋₁ ve BS₅₋₁ numunelerinde yan yüz sargı ve 300 g/m² gramajlı tek yönlü CFRP kumaşlar kullanılmış, beton sınıflarına uygun olacak şekilde yük taşıma kapasitesinde artış görülmüştür. Yine 30 MPa'dan daha düşük dayanımlı betonlarla üretilen numunelerde diğerlerinden çok daha düşük yük ve deplasman değerleri görülmektedir. Yan sargı türünün düşük beton sınıfları için istenilen sünek davranışa ulaşılması yönünden yeterli olmadığı görülmüştür.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.76. 'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.43. 'de gösterilmiştir.

**Şekil 4.76.** BS₁₋₁, BS₂₋₁, BS₃₋₁, BS₄₋₁, BS₅₋₁ numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.43. BS₁-1, BS₂-1, BS₃-1 ,BS₄-1 ,BS₅-1 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85*P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
BS ₁ -1	23,03	19,57	1,73	3,87	5,95	90,03	7,17	70,27	45,75
BS ₂ -1	40,60	34,51	1,48	4,73	8,58	223,42	9,23	125,06	156,54
BS ₃ -1	58,47	49,70	3,42	6,34	9,22	350,38	10,68	257,67	216,73
BS ₄ -1	59,63	50,69	2,05	8,99	6,64	409,19	10,82	388,54	278,78
BS ₅ -1	59,36	50,46	1,91	8,67	6,85	398,39	10,01	398,39	256,87

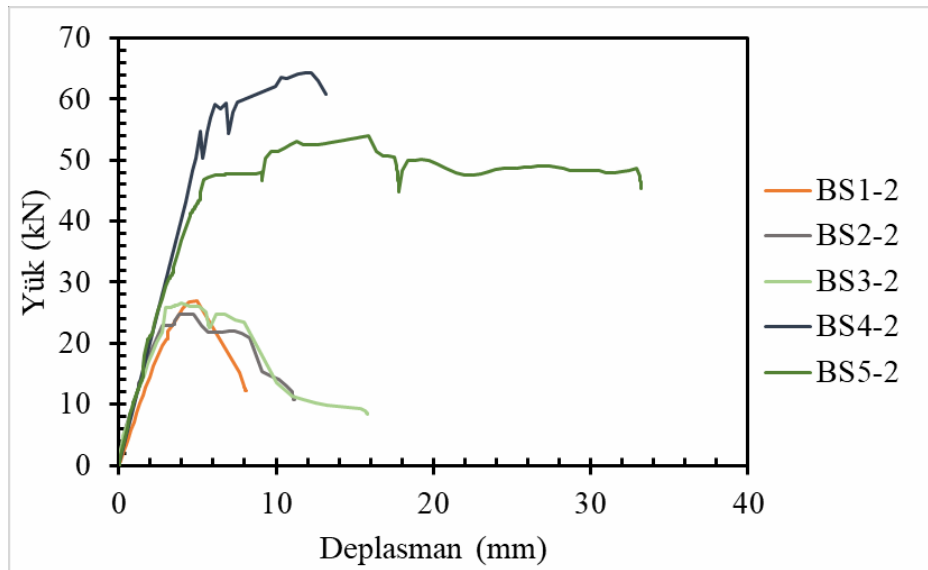
4.2.1.7. BS1-2, BS2-2, BS3-2, BS4-2, BS5-2 Numunelerin karşılaştırılması

BS₁-2, BS₂-2, BS₃-2, BS₄-2 ve BS₅-2 numunelerinde yan yüz sargı (S) ve 900 g/m² gramajlı tek yönlü CFRP kumaşlar kullanılmıştır.

BS₄-2 numunesi BS₅-2'ye nazaran daha düşük yük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. Bu iki numunede kullanılan hedef beton basınç dayanımı 40 MPa-50 MPa olan betonda olduğundan sargı etkisinden ziyade beton sınıfının avantajı olduğu düşünülmektedir.

900 g/m² için de 300 g/m² de olduğu gibi yan sargı türünün düşük beton sınıfları için istenilen sünek davranışa ulaşılması yönünden yeterli olmadığı görülmüştür. Bu da ACI 440.2R-17 da 17 MPa dayanımlı beton için tam sargılama tercihinin doğruluğunu teyit etmektedir.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.77'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.44. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.77. BS₁-2, BS₂-2, BS₃-2 ,BS₄-2 ,BS₅-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.44. BS₁-2, BS₂-2, BS₃-2, BS₄-2, BS₅-2 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
BS ₁ -2	27,04	22,98	1,74	4,96	5,46	144,71	6,78	139,17	101,40
BS ₂ -2	24,84	21,11	2,59	7,84	3,17	205,99	4,91	163,92	132,67
BS ₃ -2	26,63	22,63	2,90	3,98	6,69	264,30	8,25	82,46	169,33
BS ₄ -2	64,36	54,70	2,54	12,23	5,26	626,12	10,59	596,25	496,95
BS ₅ -2	53,93	45,84	6,44	15,86	3,40	1517,57	8,89	696,35	1389,78

Buraya kadar yapılan karşılaştırmalardan F tipi tam sargının beton dayanımı ne olursa olsun kesme açısından yetersiz olan kirişlerin davranışını kesmeden eğilmeye evirdiği rahatlıkla görülmektedir. U tipi sargılamanın 10 MPa ve üzeri kirişler için süneklik sağladığı iki yüzeyden yapılan S tipi güçlendirimin ise sadece 20 MPa ve üzeri basınç dayanımına sahip kirişlerde süneklik kazanımına neden olduğu görülmektedir. Bu nedenle TBDY-2018 de oldukça emniyetli bir yaklaşımla sadece F tipi sargılamanın önerilmesi mevcut yapı stokunda yer alan binaların beton basınç dayanımlarının ortalamasının 8-10 MPa olmasından dolayı oldukça mantıklı görülmektedir.

4.2.2. Sargılama şeklinin karşılaştırılması

Çalışmada farklı CFRP sargılama türlerinin (F, U ve S) kesme açısından yetersiz olan betonarme kirişlerin davranışı nasıl değiştireceğini daha iyi tartışabilmek için aşağıdaki karşılaştırmalar yapılmıştır.

4.2.2.1. B₁-0, BF₁-1, BU₁-1, BS₁-1 Numunelerin karşılaştırılması

B₁-0, BF₁-1, BU₁-1, BS₁-1 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 5 MPa-10 MPa olan beton ve 300 g/m² gramajlı CFRP ile sırasıyla referans, F, U ve S sargılama uygulanmış numunelerdir.

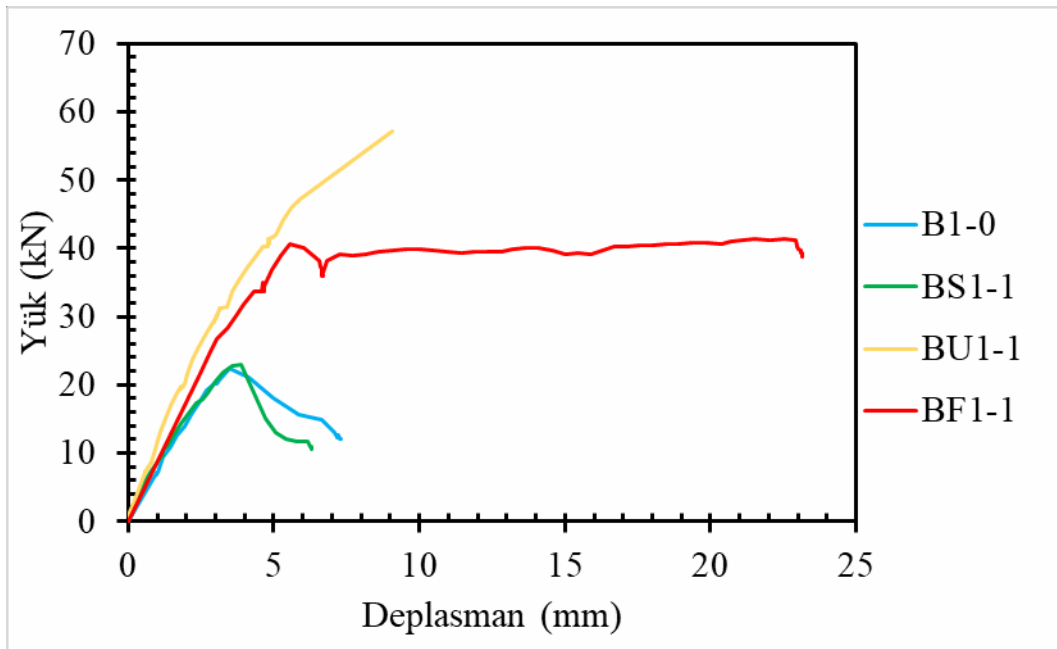
Referans numuneye göre tam sargı (F), U sargı ve yan sargının (S) yük taşıma kapasitesine katkısı sırasıyla % 83,80, % 154,33 ve % 2,39'dur. Bu durum farklı sargılama ile uygulanmış CFRP şeritlerin, kesme çatlağının oluşumunu ve ilerlemesini geciktirdiğini ve kesme kapasitesinin artmasına katkı sağladığını göstermektedir.

Maksimum yüke ulaşana dek yük-deplasman eğrisinin yatayla yaptığı açıya bakıldığında, U sargı ile yapılan uygulamada güçlendirimin rijitliğe katkısı daha

yüksektir. Başlangıç rijtliğinin F tipine göre bir miktar daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Hedef beton basınç dayanımı 5MPa-10 MPa olan beton ile imal edilen bu karşılaştırma grubunda yan sargının önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bununla beraber beklenmeyen bir sonuç olarak U tipinin F tipine göre daha fazla dayanıma ulaşması şaşırtıcı olmakla beraber, beklenen bir şekilde F tipinin U tipine göre deformasyon kapasitesini ve sünekliğini artırdığı görülmektedir. Bu durum oldukça düşük beton dayanımlı kirişlerde düşük gramajlı CFRP tercih edilecekse sadece bu veriler göz önüne alındığı zaman U tipinin kesme açısından istenilen dayanıma ulaştırdığı ama süneklik kaygısını gideremediğini göstermektedir. Bununla beraber mevcut betonarme yapılarda döşemelerin varlığı nedeniyle yapılan bu tarz güçlendirmelerde (U tipi) sargılamamanın kirişin kesme kapasitesi V_r 'ye katkısının oldukça yüksek olacağını ama süneklik iyileştirmesine faydasının çok fazla olmayacağını göstermektedir. Bu durum uygulamada bu tip sargılamalarda ankrajları gerekli kılmaktadır.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.78. 'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.45. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.78. Numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.45. B₁-0, BF₁-1, BU₁-1 ,BS₁-1 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85*P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₁ -0	22,49	19,12	1,54	3,48	6,46	109,21	7,10	56,99	47,29
BF ₁ -1	41,34	35,13	4,91	22,53	1,83	827,78	7,44	818,66	738,28
BU ₁ -1	57,20	48,62	1,54	9,08	6,30	327,50	8,24	327,50	166,04
BS ₁ -1	23,03	19,57	1,73	3,87	5,95	90,03	7,17	70,27	45,75

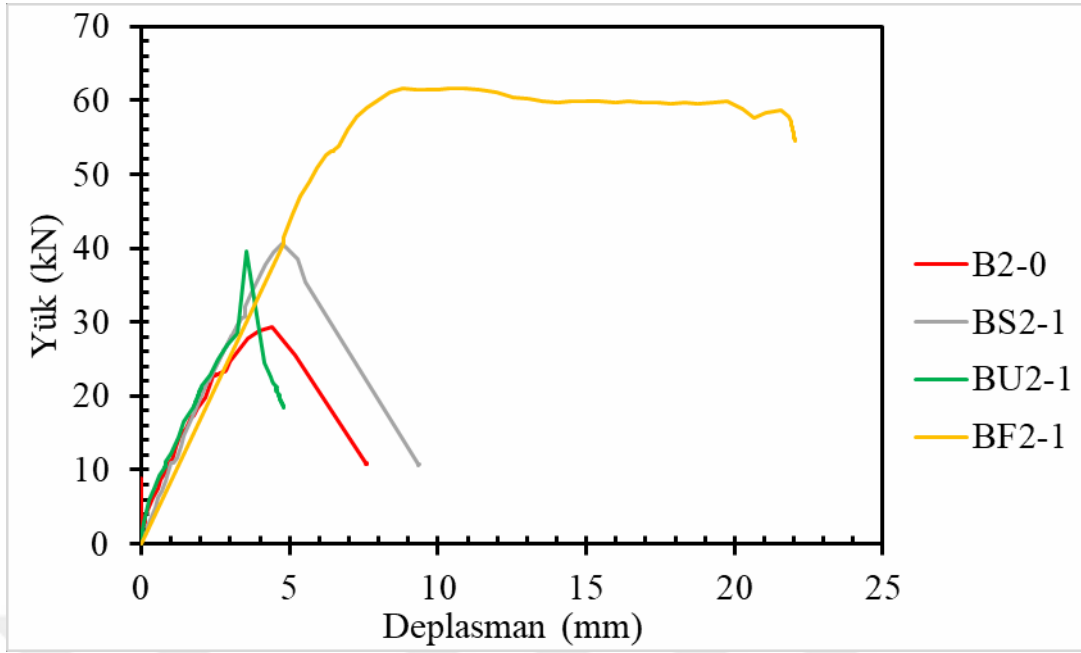
4.2.2.2. B₂-0, BF₂-1, BU₂-1, BS₂-1 Numunelerin karşılaştırılması

Beton dayanımının artması ile güçlendirme tiplerindeki davranışlar bir miktar değişmektedir. Bu grup B₂-0, BF₂-1, BU₂-1 ve BS₂-1 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 10 MPa-20 MPa olan betonda ve 300 g/m² gramajlı CFRP ile sırasıyla referans, tam, U, yan yüz sargılama uygulanmış numunelerdir.

Referans numuneye göre tam sargı, U sargı ve yan sargının yük taşıma kapasitesine katkısı sırasıyla % 109,42, % 34,57 ve % 38'dir.

Hedef beton basınç dayanımı 10 MPa- 20 MPa olan beton ile imal edilen bu karşılaştırma grubunda yan sargının dahi önemli miktarda etkisinin olduğu görülmektedir. Tam sargılamanın U sargıya göre taşıma kapasitesine katkısının oldukça yüksek olması, ACI 440.2R-17'da belirtilen 17 MPa dayanımlı betonlara konulmuş sınırlamalar için tam sargılamanın tercih edilmesini doğrular niteliktedir.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.79. 'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.46. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.79. B₂-0, BF₂-1, BU₂-1 ,BS₂-1 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.46. B₂-0, BF₂-1, BU₂-1 ,BS₂-1 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₂ -0	29,42	25,01	1,71	4,42	6,66	148,51	8,28	104,27	96,30
BF ₂ -1	61,61	52,37	3,53	10,91	5,65	1108,62	8,40	174,23	942,08
BU ₂ -1	39,59	33,65	1,12	3,56	11,13	54,88	9,98	85,21	35,33
BS ₂ -1	40,60	34,51	1,48	4,73	8,58	223,42	9,23	125,06	156,54

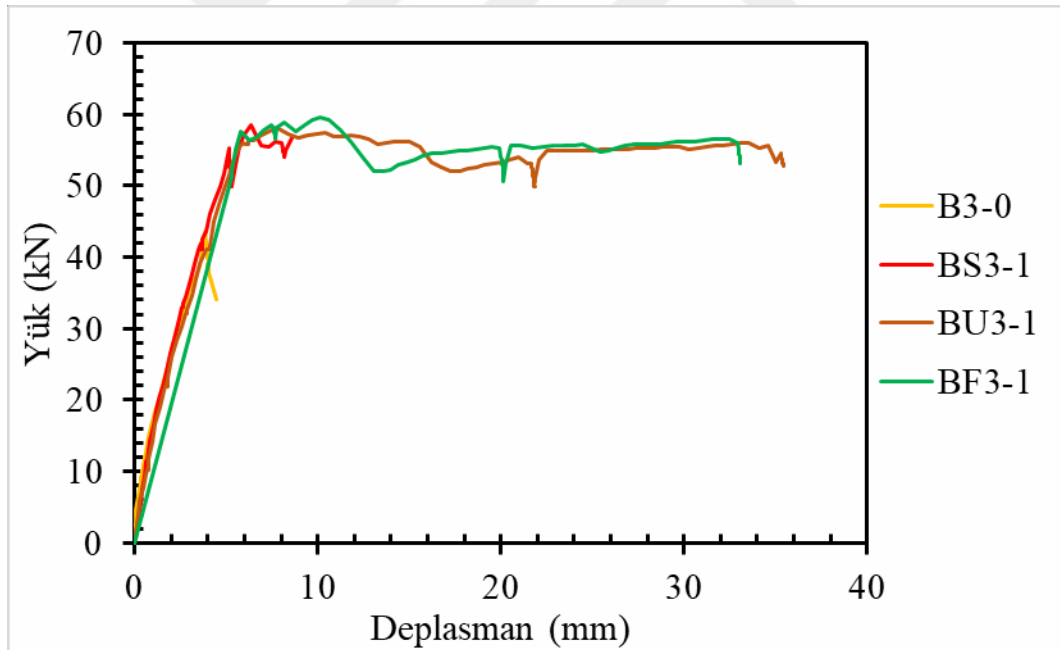
4.2.2.3. B₃-0, BF₃-1, BU₃-1, BS₃-1 Numunelerin karşılaştırılması

B₃-0, BF₃-1, BU₃-1, BS₃-1 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 20 MPa-, 30 MPa olan betonla ve 300 g/m² gramajlı CFRP ile sırasıyla referans, tam, U, yan yüz sargılama uygulanmış numunelerdir.

Referans numuneye göre tam sargı, U sargı ve yan sargının yük taşıma kapasitesine katkısı sırasıyla % 36,39, % 33,53 ve % 34,38'dir.

Hedef beton basınç dayanımı 20 MPa-30 MPa olan betonla imal edilen bu karşılaştırma grubunda yük taşıma kapasitesi için tüm sargı şekillerinden yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum nispeten yeni yapılan ve beton dayanımı yüksek olan binalarda eğer güçlendirme bir sebep için gerekecekse (örneğin yapının kullanım tipi değişebilir, gelen yük tasarımdan daha fazla olabilir vs.) her tip güçlendirmenin de benzer dayanım artışlarına neden olacağını göstermiştir.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.80. 'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.47. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.80. B₃-0, BF₃-1, BU₃-1, BS₃-1 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.47. B₃-0, BF₃-1, BU₃-1 ,BS₃-1 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85*P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₃ -0	43,51	36,98	1,62	3,83	11,36	44,06	3,87	100,87	46,64
BF ₃ -1	59,55	50,62	3,26	20,14	2,96	1681,74	5,00	968,75	1267,41
BU ₃ -1	58,09	49,38	7,30	7,74	7,50	1819,93	10,17	330,79	1685,11
BS ₃ -1	58,47	49,70	3,42	6,34	9,22	350,38	10,68	257,67	216,73

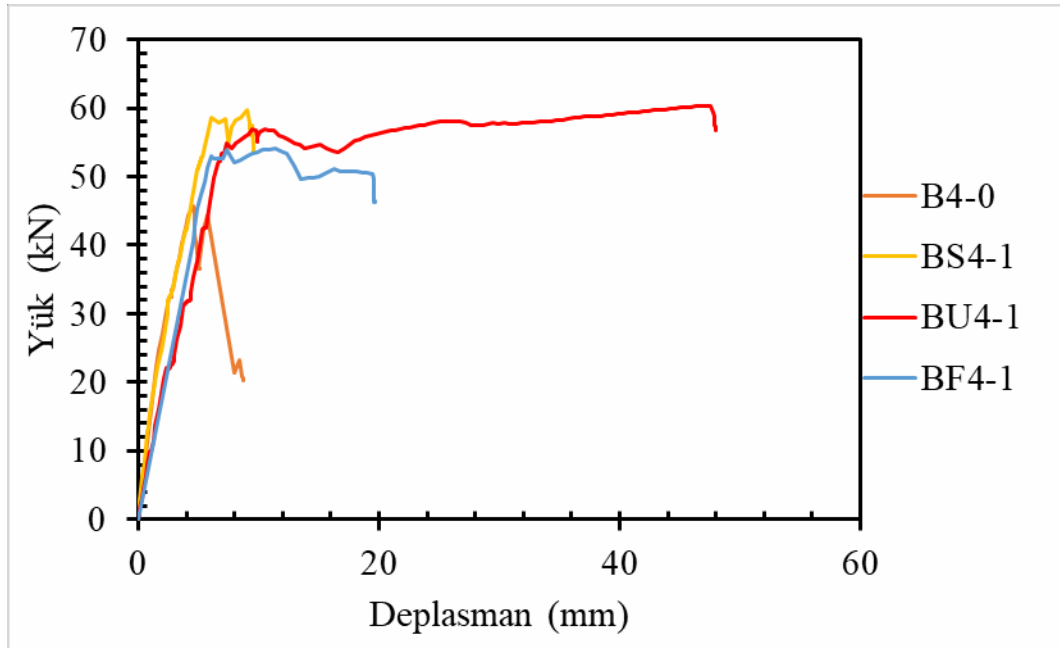
4.2.2.4. B₄-0, BF₄-1, BU₄-1, BS₄-1 Numunelerin karşılaştırılması

B₄-0, BF₄-1, BU₄-1, BS₄-1 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 30 MPa-40 MPa olan betonla ve 300 g/m² gramajlı CFRP ile sırasıyla referans, tam, U, yan yüz sargılama uygulanmış numunelerdir.

Referans numuneye göre tam sargı, U sargı ve yan sargının yük taşıma kapasitesine katkısı sırasıyla % 18,31, % 31,87 ve % 30,38'dir.

Hedef beton basınç dayanımı 30 MPa-40 MPa aolan betonla imal edilen bu karşılaştırma grubunda yük taşıma kapasitesi için tüm sargıların kiriş davranışını sünekleştirdiği görülmektedir.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.81. 'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.48. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.81. B₄-0, BF₄-1, BU₄-1 ,BS₄-1 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.48. B₄-0, BF₄-1, BU₄-1 ,BS₄-1 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85*P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₄ -0	45,74	38,87	1,46	4,53	10,10	263,33	11,08	127,16	68,18
BF ₄ -1	54,11	46,00	4,00	11,34	4,78	868,42	9,38	471,65	760,21
BU ₄ -1	60,31	51,26	7,35	47,14	1,28	2552,07	7,85	2527,02	2378,22
BS ₄ -1	59,63	50,69	2,05	8,99	6,64	409,19	10,82	388,54	278,78

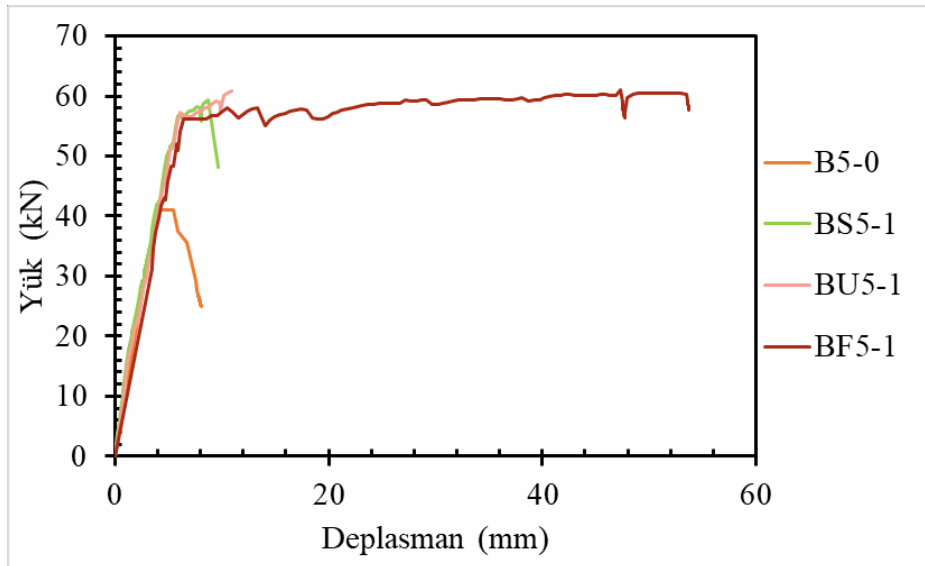
4.2.2.5. B₅-0, BF₅-1, BU₅-1, BS₅-1 Numunelerin karşılaştırılması

B₅-0, BF₅-1, BU₅-1, BS₅-1 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 40 MPa-50MPa olan betonla ve 300 g/m² gramajlı CFRP ile sırasıyla referans, tam, U, yan yüz sargılama uygulanmış numunelerdir.

Referans numuneye göre tam sargı, U sargı ve yan sargının yük taşıma kapasitesine katkısı sırasıyla % 46,70, % 46,30 ve % 42,79' dur.

Hedef beton basınç dayanımı 40 MPa-50 MPa olan beton ile imal edilen bu karşılaştırma grubunda yük taşıma kapasitesi için tüm sargı şekillerinden yakın sonuçlar elde edilmiştir. Yüksek sınıflı betonlar için sargılama türünün 300g/m² CFRP uygulaması için çok önemli bir fark oluşturmadığı söylenebilir.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.82 'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.49. 'de gösterilmiştir.

**Şekil 4.82.** B₅-0, BF₅-1, BU₅-1 ,BS₅-1 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.49. B₅-0, BF₅-1, BU₅-1 ,BS₅-1 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85*P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₅ -0	41,57	35,34	1,91	4,21	9,87	232,74	10,07	95,54	162,92
BF ₅ -1	60,99	51,84	9,35	47,33	47,33	2962,68	9,03	2590,66	2810,56
BU ₅ -1	60,82	51,70	1,96	10,94	5,56	470,31	9,25	470,31	309,58
BS ₅ -1	59,36	50,46	1,91	8,67	6,85	398,39	10,01	398,39	256,87

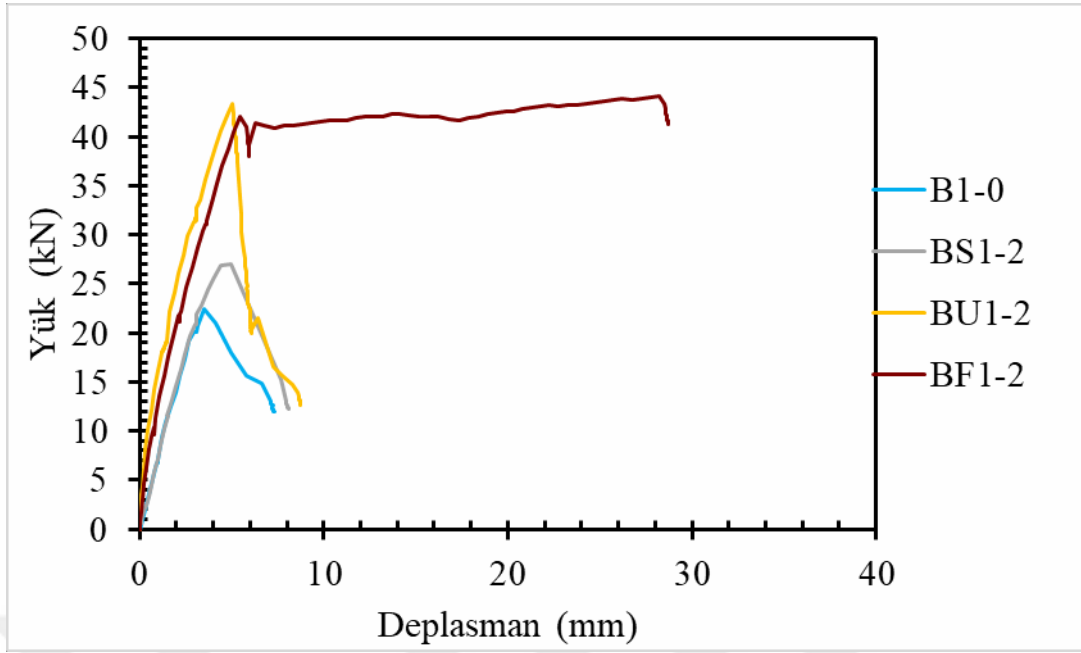
4.2.2.6. B₁-0, BF₁-2, BU₁-2, BS₁-2 Numunelerin karşılaştırılması

B₁-0, BF₁-2, BU₁-2, BS₁-2 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 5 MPa-10 MPa olan betonla ve 900 g/m² gramajlı CFRP ile sırasıyla referans, tam, U, yan yüz sargılama uygulanmış numunelerdir.

Referans numuneye göre tam sargı, U sargı ve yan sargının yük taşıma kapasitesine katkısı sırasıyla % 96,20, % 92,95 ve % 20,21'dir.

4.2.2.1'e benzer şekilde hedef beton basınç dayanımı 5 MPa-10 MPa olan betonla imal edilen bu karşılaştırma grubunda yük taşıma kapasitesi için özellikle tam ve U sargı şekillerinden oldukça yüksek oranda katkı sağladığı görülmektedir. Düşük sınıflı betonlar için sargılama türünün önemli bir fark oluşturduğu görülmüştür. ACI 440.2R-17 için 17 MPa dayanım şartı ve tam sargılama tercih edilmesi gerektiğinin ana sebebinin süneklik kaygısı olduğu düşünülmektedir. , bu kıyaslamada bir kez daha doğrulanmıştır.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.83. 'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.50. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.83. B₁-0, BF₁-2, BU₁-2, BS₁-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.50. B₁-0, BF₁-2, BU₁-2, BS₁-2 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₁ -0	22,49	19,12	1,54	3,48	6,46	109,21	7,10	56,99	47,29
BF ₁ -2	44,13	37,51	6,37	28,21	1,56	1118,55	8,33	1111,53	1021,75
BU ₁ -2	43,39	36,89	1,48	5,04	8,62	214,56	10,27	138,64	66,14
BS ₁ -2	27,04	22,98	1,74	4,96	5,46	144,71	6,78	139,17	101,40

4.2.2.7. B₂-0, BF₂-2, BU₂-2, BS₂-2 Numunelerin karşılaştırılması

B₂-0, BF₂-2, BU₂-2, BS₂-2 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 10 MPa-20 MPa olan betonla ve 900 g/m² gramajlı CFRP ile sırasıyla referans, tam, U, yan yüz sargılama uygulanmış numunelerdir.

Referans numuneye göre tam sargı, U sargı ve yan sargının yük taşıma kapasitesine katkısı sırasıyla % 99,74, % 73,96 ve % -15,57'dir.

BF₂-2 numunesinde yük artışıyla CFRP sargının betondan ayrılması, bu numunedeki güçlendirmenin katkısının tam sağlanmadığını göstermektedir.

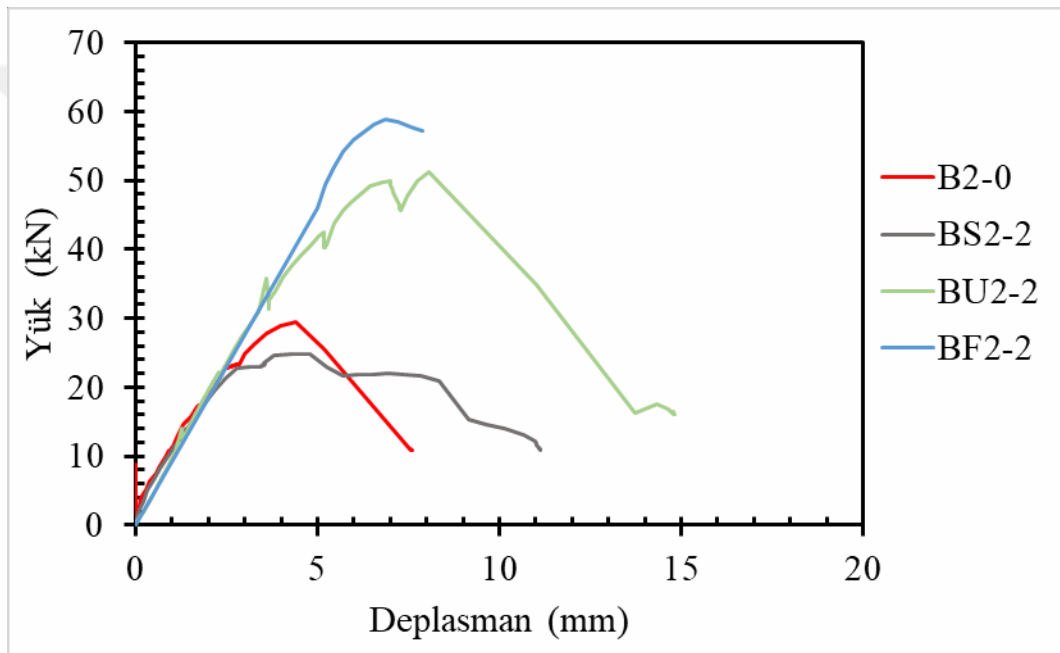
Maksimum yüke ulaşana dek yük-deplasman eğrisinin yatayla yaptığı açığa bakıldığında, tam sargının rijitliğe katkısının daha fazla olduğu görülmektedir.

Hedef beton basınç dayanımı 10 MPa-20 MPa olan betonla imal edilen bu karşılaştırma grubunda yük taşıma kapasitesi ve rijitlik için tam ve U sargı şekillerinden

oldukça yüksek oranda katkı sağladığı görülmektedir. Yan sargıda uygulamada sorun olabileceği ve beton imalatında yeterli yerleşme ve diğer aynı sınıf numuneler ile benzer sonuçlar vermediği göz önüne alındığında her sargı türü için numunenin yük taşıma kapasitesini düşürmesi söz konusu değildir.

900 g/m² sonuçları ile 300 g/m² kıyaslandığında tam sargılamada yaklaşık %10 oranında kapasite katkısı görülmektedir. Bu da maliyet için düşük gramajlı CFRP kumaşların sonuçlarına göre kıyaslanarak tercih edilebileceğini göstermektedir.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.84. 'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.51. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.84. B₂-0, BF₂-2, BU₂-2, BS₂-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.51. B₂-0, BF₂-2, BU₂-2, BS₂-2 numunelerinin deney sonuçları

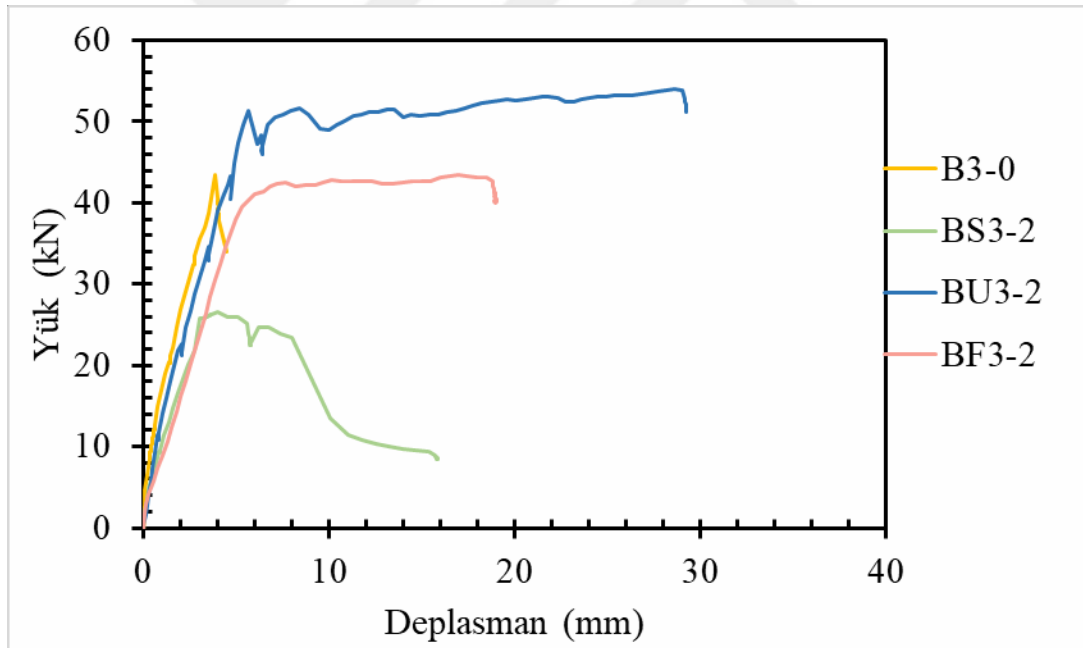
	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₂ -0	29,42	25,01	1,71	4,42	6,66	148,51	8,28	104,27	96,30
BF ₂ -2	58,76	49,95	1,51	6,88	8,54	276,48	9,56	236,82	150,75
BU ₂ -2	51,18	43,50	1,73	8,06	6,35	473,92	7,97	386,64	321,67
BS ₂ -2	24,84	21,11	2,59	7,84	3,17	205,99	4,91	163,92	132,67

4.2.2.8. B₃-0, BF₃-2, BU₃-2, BS₃-2 Numunelerin karşılaştırılması

B₃-0, BF₃-2, BU₃-2, BS₃-2 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 20 MPa-30 MPa olan betonla ve 900 g/m² gramajlı CFRP ile sırasıyla referans, tam, U, yan yüz sargılama uygulanmış numunelerdir. Referans numuneye göre tam sargı, U sargı ve yan sargının yük taşıma kapasitesine katkısı sırasıyla % -0,25, % 24,14 ve % -38,80'dir.

Hedef beton basınç dayanımı 20 MPa-30 MPa olan betonla imal edilen bu karşılaştırma grubunda 300 g/m² sonuçlarıyla kıyaslandığında beklenen katkının sağlanmadığı görülmektedir. Bu kıyaslama gramaj etkisinin hedef beton basınç dayanımı 20 MPa-30 MPa olan beton için 900 g/m² sonuçları ile 300 g/m² kıyaslandığında tam sargılamada yaklaşık %10 oranında kapasite katkısı görülmektedir. Bu da maliyet için düşük gramajlı CFRP kumaşların sonuçlarına göre kıyaslanarak tercih edilebileceğini, çok büyük farklar oluşturmadığını göstermektedir.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.85. 'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.52. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.85. B₃-0, BF₃-2, BU₃-2, BS₃-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.52. B₃-0, BF₃-2, BU₃-2 ,BS₃-2 numunelerinin deney sonuçları

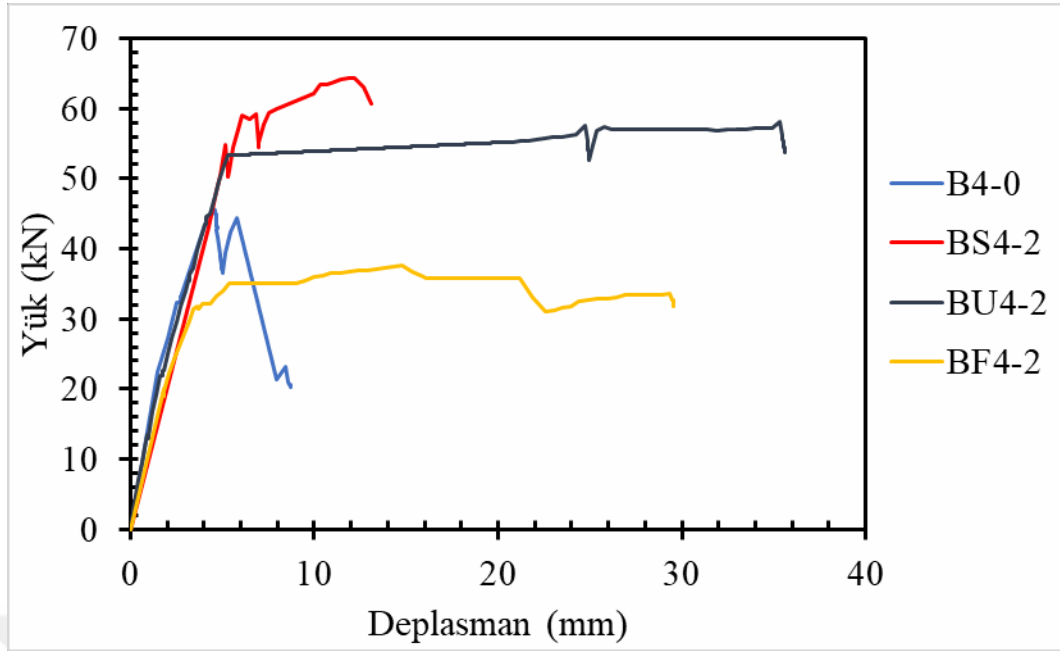
	P_{max} (kN)	$0.85*P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₃ -0	43,51	36,98	1,62	3,83	11,36	44,06	3,87	100,87	46,64
BF ₃ -2	43,40	36,89	4,04	16,97	2,56	692,17	7,86	627,14	603,30
BU ₃ -2	54,01	45,91	5,98	28,61	1,89	1381,41	9,39	1371,42	1258,03
BS ₃ -2	26,63	22,63	2,90	3,98	6,69	264,30	8,25	82,46	169,33

4.2.2.9. B₄-0, BF₄-2, BU₄-2, BS₄-2 Numunelerin karşılaştırılması

B₄-0, BF₄-2, BU₄-2, BS₄-2 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 30 MPa-40 MPa olan betonla ve 900 g/cm² gramajlı CFRP ile sırasıyla referans, tam, U, yan yüz sargılama uygulanmış numunelerdir.

300 g/cm² CFRP uygulama sonuçları için referans numuneye göre tam sargı, U sargı ve yan sargının yük taşıma kapasitesine katkısı sırasıyla % 18,31, % 31,87 ve % 30,38 olduğunu görmüştük. 900 g/cm² için referans numuneye göre tam sargı, U sargı ve yan sargının yük taşıma kapasitesine katkısı sırasıyla % 17,92, % 27,11 ve % 40,71 dir. Yan sargılama için yaklaşık % 10 oranında bir artış olduğu, tam ve U sargılamanın yaklaşık değerleri vermesi yüksek beton sınıfları için iki tür gramaj için taşıma kapasitesine katkı açısından çok büyük farklar oluşturmadığı görülmektedir. Malzeme seçiminde maliyet açısından düşük gramajlı CFRP tercih edilebileceği düşünülmüştür.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.86. 'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.53. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.86. B₄-0, BF₄-2, BU₄-2 ,BS₄-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.53. B₄-0, BF₄-2, BU₄-2 ,BS₄-2 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₄ -0	45,74	38,87	1,46	4,53	10,10	263,33	11,08	127,16	68,18
BF ₄ -2	37,54	31,91	7,51	14,76	2,54	967,48	8,12	483,02	891,26
BU ₄ -2	58,13	49,41	7,40	35,33	1,65	1836,49	10,27	1829,21	1703,94
BS ₄ -2	64,36	54,70	2,54	12,23	5,26	626,12	10,59	596,25	496,95

4.2.2.10. B₅-0, BF₅-2, BU₅-2, BS₅-2 Numunelerin karşılaştırılması

B₅-0, BF₅-2, BU₅-2, BS₅-2 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 40 MPa-50 MPa olan betonla ve 900 g/m² gramajlı CFRP ile sırasıyla referans, tam, U, yan yüz sargılama uygulanmış numunelerdir.

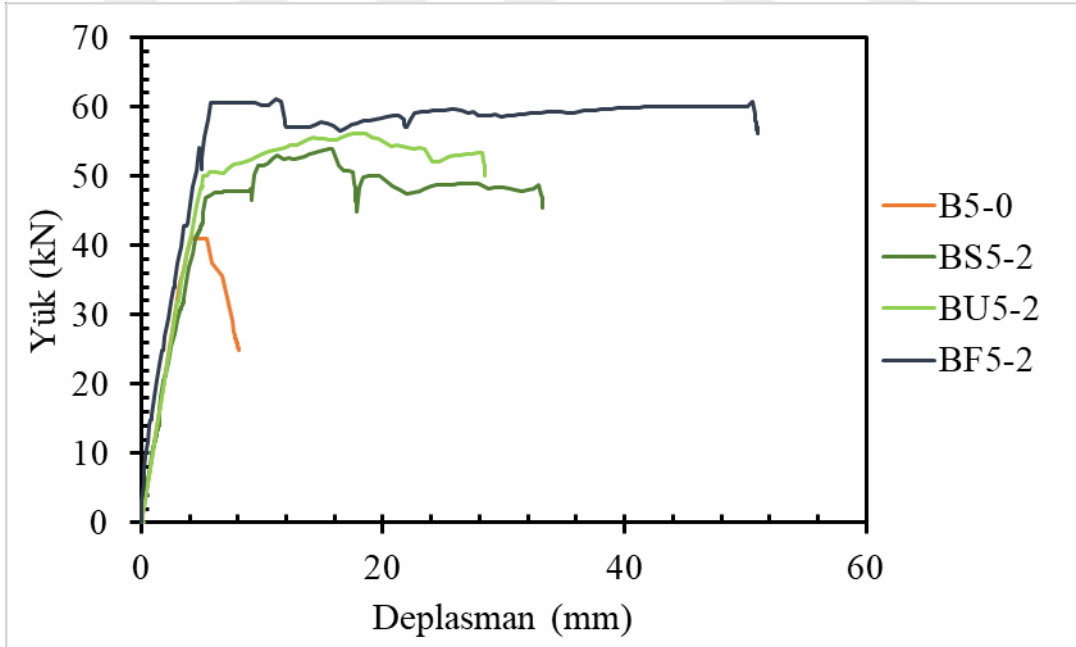
Referans numuneye göre tam sargı, U sargı ve yan sargının yük taşıma kapasitesine katkısı sırasıyla % 47,23, % 35,21 ve % 29,73'tür.

Maksimum yüke ulaşana dek yük-deplasman eğrisinin yatayla yaptığı açıya bakıldığında, tam sargının rijitliğe daha fazla katkı sağladığı görülmüştür.

Hedef beton basınç dayanımı 40 MPa-50 MPa olan betonla imal edilen bu karşılaştırma grubunda 300 g/m² sonuçlarıyla kıyaslandığında taşıma kapasitesine tam sargılamada çok yakın oranda katkısı olduğu, U ve yan sargılamada düşük gramajla yapılan çalışmanın daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Yüksek beton sınıfları için CFRP kumaşın gramaj etkisi oldukça azdır. Bu durum maliyet açısından olumlu sonuçlar vermektedir.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.87. 'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.54. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.87. B₅-0, BF₅-2, BU₅-2, BS₅-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.54. B₅-0, BF₅-2, BU₅-2 ,BS₅-2 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85*P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₅ -0	41,57	35,34	1,91	4,21	9,87	232,74	10,07	95,54	162,92
BF ₅ -2	61,21	52,03	10,83	11,10	5,51	2879,05	11,05	555,04	2745,36
BU ₅ -2	56,21	47,78	5,86	17,55	3,20	1388,07	9,84	828,03	1266,39
BS ₅ -2	53,93	45,84	6,44	15,86	3,40	1517,57	8,89	696,35	1389,78

4.2.3. CFRP gramaj etkisinin karşılaştırılması

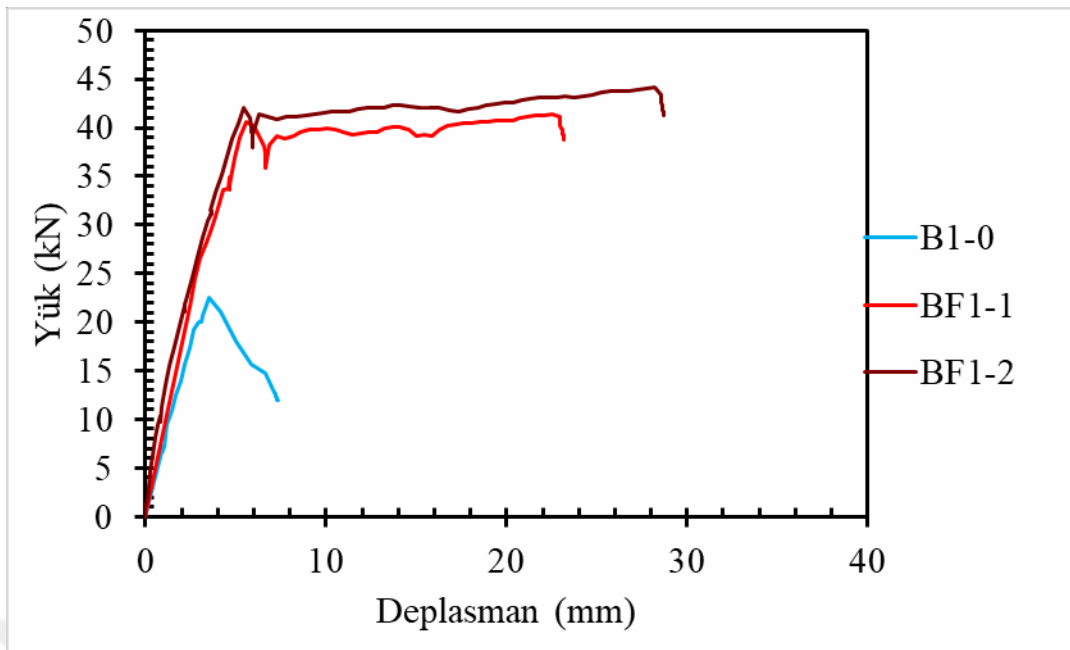
Çalışmanın bir diğer araştırma sorusu olan güçlendirmede farklı gramajlarda CFRP kullanılmasının taşıma kapasitesi, süneklik, rijitlik gibi özellikler için elemanda oluşturacağı farkın ne olacağının daha iyi anlaşılabilir olması için aşağıdaki karşılaştırmalar yapılmıştır.

4.2.3.1. B₁-0, BF₁-1, BF₁-2 Numunelerin karşılaştırılması

B₁-0, BF₁-1, BF₁-2 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 10 MPa20 MPa olan betonla ve tam sargılama yapılmış sırasıyla referans, 300 g/m², 900 g/m² CFRP uygulanmış numunelerdir.

300 ve 900 g/cm² gramajındaki CFRP uygulamalarının, tam sargılamada referans numunelere göre yük taşıma kapasitesine sırayla % 83,80 ve % 96,20 oranlarında katkısı olmuştur. Düşük beton sınıfı için gramaj katkısı farkı çok yüksek olmamakla birlikte tam sargılamanın kapasiteye etkisi oldukça yüksektir. Bu beton sınıfında düşük gramajlı CFRP kumaşların yüksek gramajlılara tercih edilebileceği düşünülmektedir.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.88'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.55'de gösterilmiştir.



Şekil 4.88. B₁-0, BF₁-1, BF₁-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.55. B₁-0, BF₁-1, BF₁-2 numunelerinin deney sonuçları

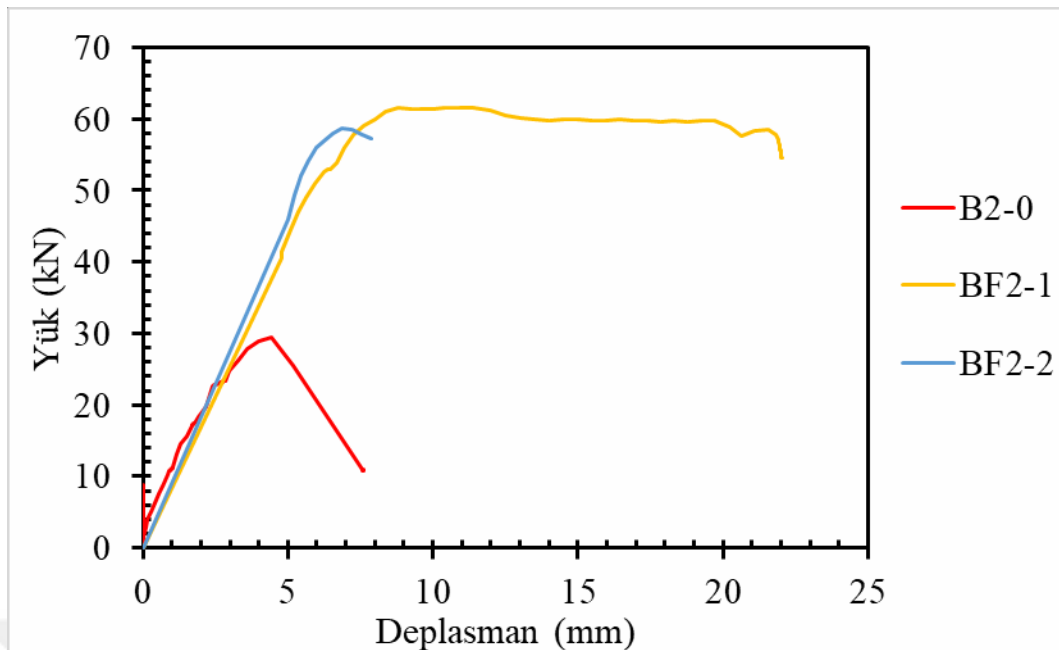
	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₁ -0	22,49	19,12	1,54	3,48	6,46	109,21	7,10	56,99	47,29
BF ₁ -1	41,34	35,13	4,91	22,53	1,83	827,78	7,44	818,66	738,28
BF ₁ -2	44,13	37,51	6,37	28,21	1,56	1118,55	8,33	1111,53	1021,75

4.2.3.2. B₂-0, BF₂-1, BF₂-2 Numunelerin karşılaştırılması

B₂-0, BF₂-1, BF₂-2 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 10 MPa-20 MPa olan betonla ve tam sargılama yapılmış sırasıyla referans, 300 g/m², 900 g/m² CFRP uygulanmış numunelerdir.

300 ve 900 g/cm² gramajındaki CFRP uygulamalarının, tam sargılamada referans numunelere göre yük taşıma kapasitesine sırayla % 109,42 ve % 99,74 oranlarında katkısı olmuştur. Düşük beton sınıfı için gramaj katkısı farkı çok yüksek olmamakla birlikte tam sargılamanın kapasiteye etkisi oldukça yüksektir. Bu beton sınıfında düşük gramajlı CFRP kumaşların maliyet açısından yüksek gramajlılara tercih edilebileceği düşünülmüştür.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.89'de, rijitlik, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.56. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.89. B₂-0, BF₂-1, BF₂-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.56. B₂-0, BF₂-1, BF₂-2 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₂ -0	29,42	25,01	1,71	4,42	6,66	148,51	8,28	104,27	96,30
BF ₂ -1	61,61	52,37	3,53	10,91	5,65	1108,62	8,40	174,23	942,08
BF ₂ -2	58,76	49,95	1,51	6,88	8,54	276,48	9,56	236,82	150,75

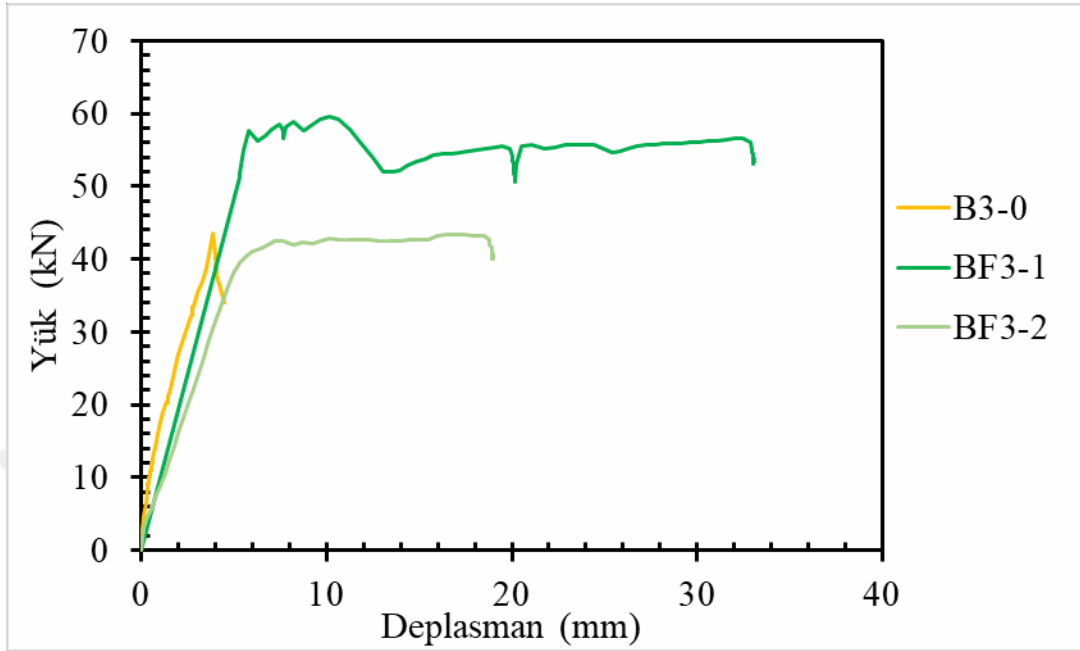
4.2.3.3. B₃-0, BF₃-1, BF₃-2 Numunelerin karşılaştırılması

B₃-0, BF₃-1, BF₃-2 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 20 MPa-30 MPa olan betonla ve tam sargılama yapılmış sırasıyla referans, 300 g/m², 900 g/m² CFRP uygulanmış numunelerdir.

300 ve 900 g/ cm² gramajındaki CFRP uygulamalarının, tam sargılamada referans numunelere göre yük taşıma kapasitesine sırayla % 36,89 ve % -0,25 oranlarında katkısı olmuştur. BF₃-1 numunesi deney sırasında sünek davranış göstermiş ve numunede eğilme çatlakları görülmüştür. Güçlendirmenin katkısının olmamasının, uygulama koşulları ve beton üretim aşamasında şartlardan kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

900 g/ cm² CFRP ile yapılan güçlendirme sonucuna göre hedef beton basınç dayanımı 20 MPa-30 MPa olan beton için taşıma kapasitesine katkısı hedef beton basınç dayanımı 5MPa-20 MPa olan betona göre oldukça düşüktür.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.90. 'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4. 57. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.90. B₃-0, BF₃-1, BF₃-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.57. B₃-0, BF₃-1, BF₃-2 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₃ -0	43,51	36,98	1,62	3,83	11,36	44,06	3,87	100,87	46,64
BF ₃ -1	59,55	50,62	3,26	20,14	2,96	1681,74	5,00	968,75	1267,41
BF ₃ -2	43,40	36,89	4,04	16,97	2,56	692,17	7,86	627,14	603,30

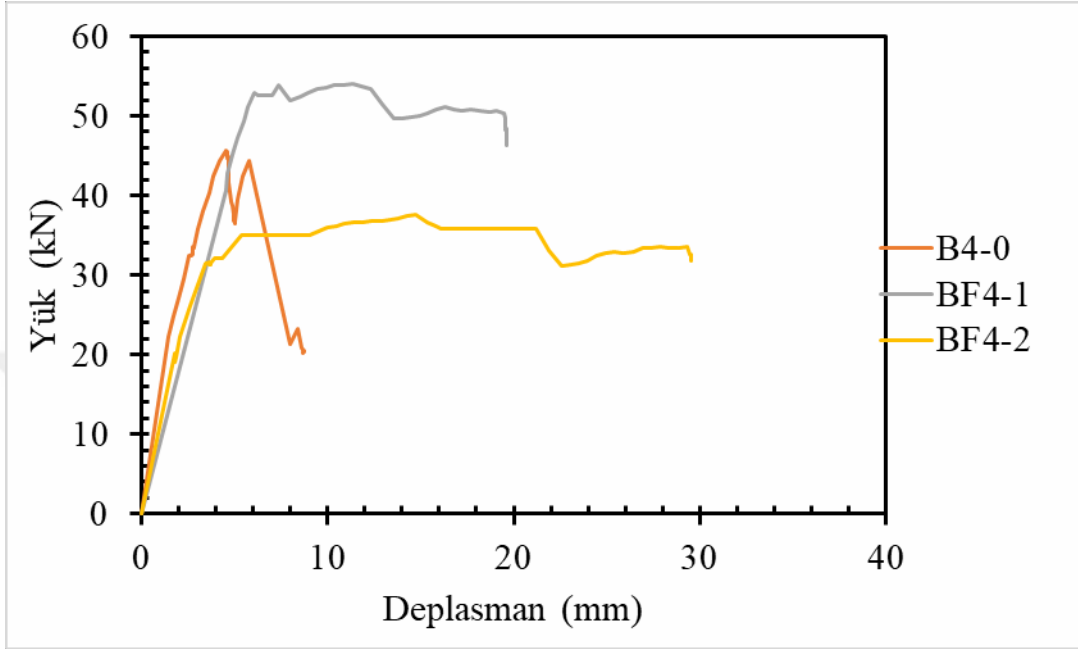
4.2.3.4. B₄-0, BF₄-1, BF₄-2 Numunelerin karşılaştırılması

B₄-0, BF₄-1, BF₄-2 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 30 MPa-40 MPa olan betonla ve tam sargılama yapılmış sırasıyla referans, 300 g/m², 900 g/m² CFRP uygulanmış numunelerdir.

300 ve 900 g/cm² gramajındaki CFRP uygulamalarının, tam sargılamada referans numunelere göre yük taşıma kapasitesine sırayla % 30,38 ve % 40,72 oranlarında katkısı olmuştur. Tam sargılamanın hedef beton basınç dayanımı 30 MPa- 40 MPa olan beton için taşıma kapasitesine katkısı hedef beton basınç dayanımı 5 MPa-20 MPa olan beton için oldukça düşüktür.

Yüksek dayanımlı betonlarda düşüklere nazaran CFRP ile güçlendirmenin taşıma kapasitesine katkısının çok az olduğu yine görülmektedir.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.91. 'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.58. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.91. B₄-0, BF₄-1, BF₄-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.58. B₄-0, BF₄-1, BF₄-2 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₄ -0	45,74	38,87	1,46	4,53	10,10	263,33	11,08	127,16	68,18
BF ₄ -1	54,11	46,00	4,00	11,34	4,78	868,42	9,38	471,65	760,21
BF ₄ -2	37,54	31,91	7,51	14,76	2,54	967,48	8,12	483,02	891,26

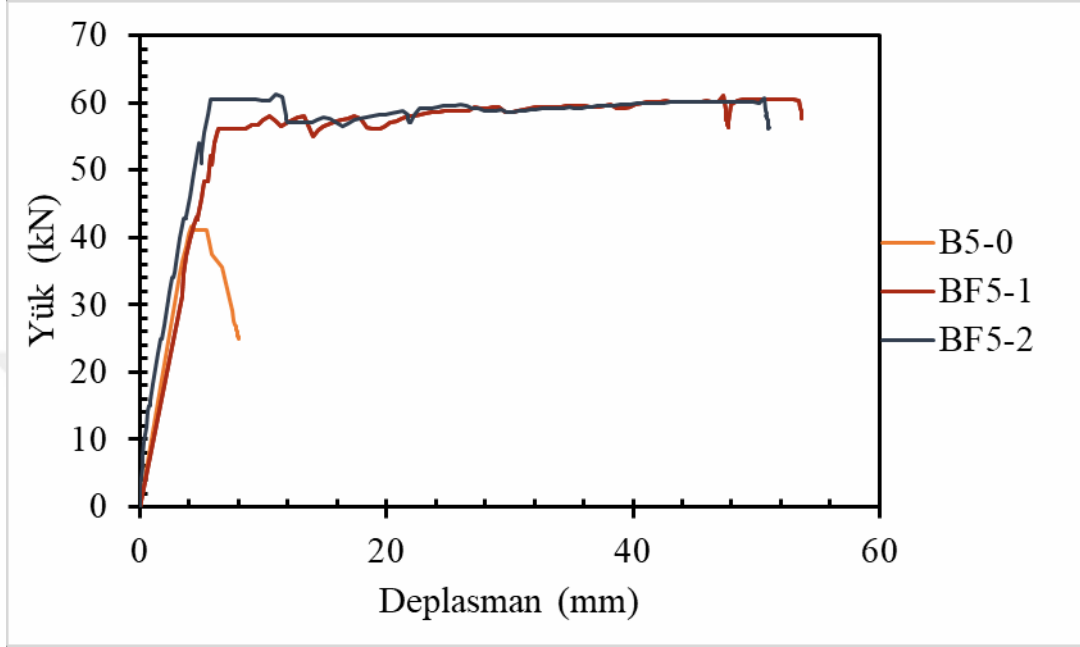
4.2.3.5. B₅-0, BF₅-1, BF₅-2 Numunelerin karşılaştırılması

B₅-0, BF₅-1, BF₅-2 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 40 MPa-50 MPa olan betonla ve tam sargılama yapılmış sırasıyla referans, 300 g/m², 900 g/m² CFRP uygulanmış numunelerdir.

300 ve 900 g/cm² gramajındaki CFRP uygulamalarının, tam sargılamada referans numunelere göre yük taşıma kapasitesine sırasıyla % 46,30 ve % 35,21 oranlarında katkısı olmuştur. Yüksek sınıflı betonlarda gramaj farkının taşıma kapasitesine etkisi düşünüldüğünde düşük gramajın tercih edilebileceği düşünülmüştür.

Tam sargılamamanın hedef beton basınç dayanımı 40 MPa-50 MPa olan beton için taşıma kapasitesine katkısı yine düşük beton sınıflarına göre oldukça az olmuştur.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.92'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.59. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.92. B₅-0, BF₅-1, BF₅-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.59. B₅-0, BF₅-1, BF₅-2 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₅ -0	41,57	35,34	1,91	4,21	9,87	232,74	10,07	95,54	162,92
BF ₅ -1	60,99	51,84	9,35	47,33	47,33	2962,68	9,03	2590,66	2810,56
BF ₅ -2	61,21	52,03	10,83	11,10	5,51	2879,05	11,05	555,04	2745,36

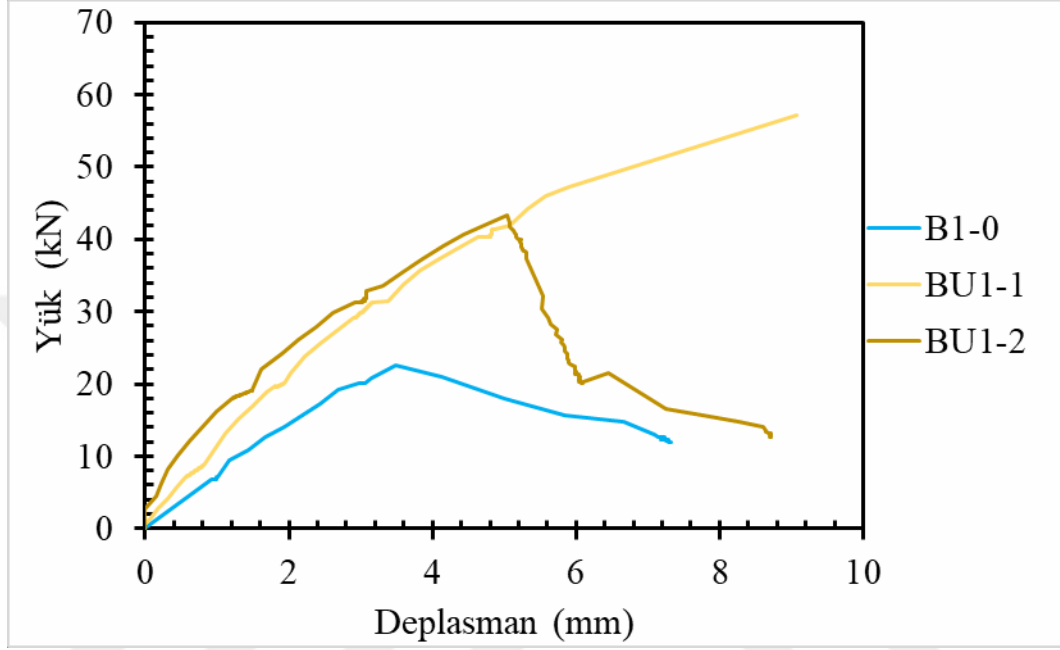
4.2.3.6. B₁-0, BU₁-1, BU₁-2 Numunelerin karşılaştırılması

B₁-0, BU₁-1, BU₁-2 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 5 MPa-10 MPa olan betonla ve U sargılama yapılmış sırasıyla referans, 300 g/m², 900 g/m² CFRP uygulanmış numunelerdir.

300 ve 900 g/cm² gramajındaki CFRP uygulamalarının, tam sargılamada referans numunelere göre yük taşıma kapasitesine sırasıyla % 154,33 ve % 92,85 oranlarında katkısı olmuştur. Düşük sınıflı betonlarda gramaj farkının taşıma kapasitesine etkisi düşünüldüğünde düşük gramajın tercih edilebileceği düşünülmüştür.

U tipi sargılamamanın hedef beton basınç dayanımı 5 MPa-10 MPa olan beton için taşıma kapasitesine katkısı oldukça yüksektir. İstenilen sünek davranış her iki gramaj için de sağlanamamıştır.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.93. 'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4. 60. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.93. B₁-0, BU₁-1, BU₁-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.60. B₁-0, BU₁-1, BU₁-2 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₁ -0	22,49	19,12	1,54	3,48	6,46	109,21	7,10	56,99	47,29
BU ₁ -1	57,20	48,62	1,54	9,08	6,30	327,50	8,24	327,50	166,04
BU ₁ -2	43,39	36,89	1,48	5,04	8,62	214,56	10,27	138,64	66,14

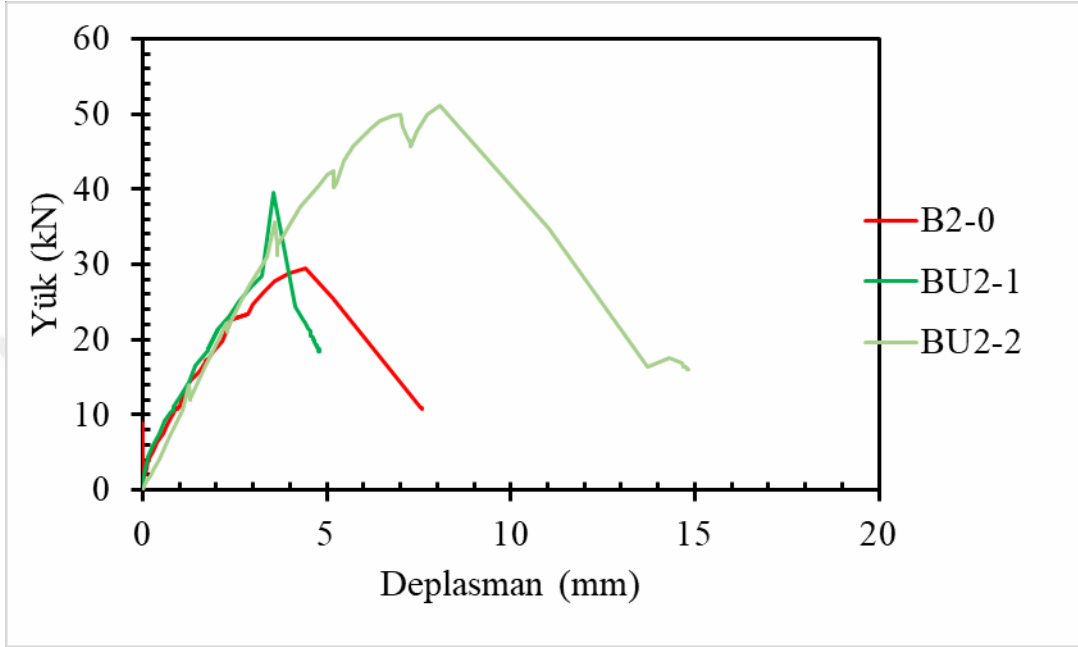
4.2.3.7. B₂-0, BU₂-1, BU₂-2 Numunelerin karşılaştırılması

B₂-0, BU₂-1, BU₂-2 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 10 MPa-20 MPa olan betonla ve U sargılama yapılmış sırasıyla referans, 300 g/m², 900 g/m² CFRP uygulanmış numunelerdir.

300 ve 900 g/cm² gramajındaki CFRP uygulamalarının, tam sargılamada referans numunelere göre yük taşıma kapasitesine sırasıyla % 34,57 ve % 73,97 oranlarında katkısı

olmuştur. Hedef beton basınç dayanımı 10 MPa-20 MPa olan betonla yüksek gramajlı CFRP kullanımının düşük gramaja göre taşıma kapasitesine katkısı çok daha fazladır.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.94'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.61. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.94. B₂-0, BU₂-1, BU₂-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.61. B₂-0, BU₂-1, BU₂-2 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₂ -0	29,42	25,01	1,71	4,42	6,66	148,51	8,28	104,27	96,30
BU ₂ -1	39,59	33,65	1,12	3,56	11,13	54,88	9,98	85,21	35,33
BU ₂ -2	51,18	43,50	1,73	8,06	6,35	473,92	7,97	386,64	321,67

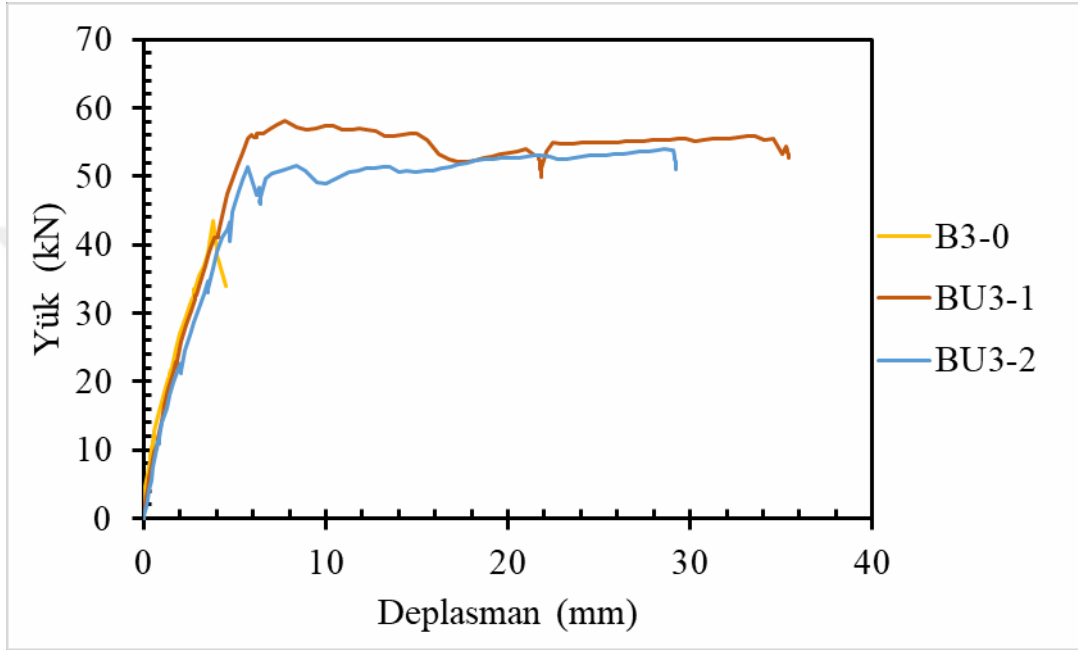
4.2.3.8. B₃-0, BU₃-1, BU₃-2 Numunelerin karşılaştırılması

B₃-0, BU₃-1 ve BU₃-2 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 20 MPa-30 MPa olan betonla ve U sargılama yapılmış sırasıyla referans, 300 g/m², 900 g/m² CFRP uygulanmış numunelerdir.

300 ve 900 g/cm² gramajındaki CFRP uygulamalarının, tam sargılamada referans numunelere göre yük taşıma kapasitesine sırasıyla % 33,53 ve % 24,14 oranlarında katkısı olmuştur. Hedef beton basınç dayanımı 20 MPa-30 MPa olan beton için düşük gramajlı

CFRP kullanımının yüksek gramaja göre taşıma kapasitesine katkısı çok daha fazladır. Hedef beton basınç dayanımı 5MPa-10 MPa olan beton için aynı sargılamanın etkisinin % 154,33 olduğu düşünüldüğünde U sargılamada beton dayanımı yükseldikçe taşıma kapasitesine katkı oranının oldukça düşük olduğu görülmektedir.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.95 'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4. 62'de gösterilmiştir.



Şekil 4.95. B₃-0, BU₃-1, BU₃-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.62. B₃-0, BU₃-1, BU₃-2 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₃ -0	43,51	36,98	1,62	3,83	11,36	44,06	3,87	100,87	46,64
BU ₃ -1	58,09	49,38	7,30	7,74	7,50	1819,93	10,17	330,79	1685,11
BU ₃ -2	54,01	45,91	5,98	28,61	1,89	1381,41	9,39	1371,42	1258,03

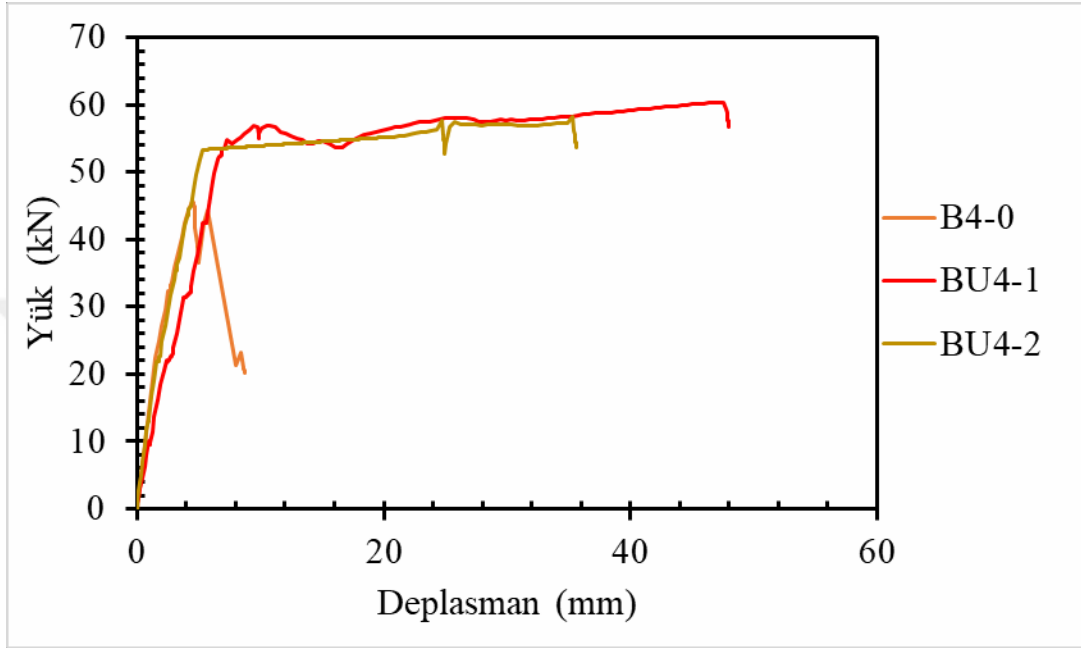
4.2.3.9. B₄-0, BU₄-1, BU₄-2 Numunelerin karşılaştırılması

B₄-0, BU₄-1 ve BU₄-2 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 30 MPa-40 MPa olan betonla ve U sargılama yapılmış sırasıyla referans, 300 g/m², 900 g/m² CFRP uygulanmış numunelerdir.

300 ve 900 g/cm² gramajındaki CFRP uygulamalarının, tam sargılamada referans numunelere göre yük taşıma kapasitesine sırayla % 31,87 ve % 27,11 oranlarında katkısı

olmuştur. Hedef beton basınç dayanımı 30 MPa-40 MPa olan beton için düşük gramajlı CFRP kullanımının yüksek gramaja göre taşıma kapasitesine katkısı daha fazladır. İki gramaj türünün de sünek davranışa katkısı istenen oranlardadır.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.96'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.63. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.96. B₄-0, BU₄-1, BU₄-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.63. B₄-0, BU₄-1, BU₄-2 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₄ -0	45,74	38,87	1,46	4,53	10,10	263,33	11,08	127,16	68,18
BU ₄ -1	60,31	51,26	7,35	47,14	1,28	2552,07	7,85	2527,02	2378,22
BU ₄ -2	58,13	49,41	7,40	35,33	1,65	1836,49	10,27	1829,21	1703,94

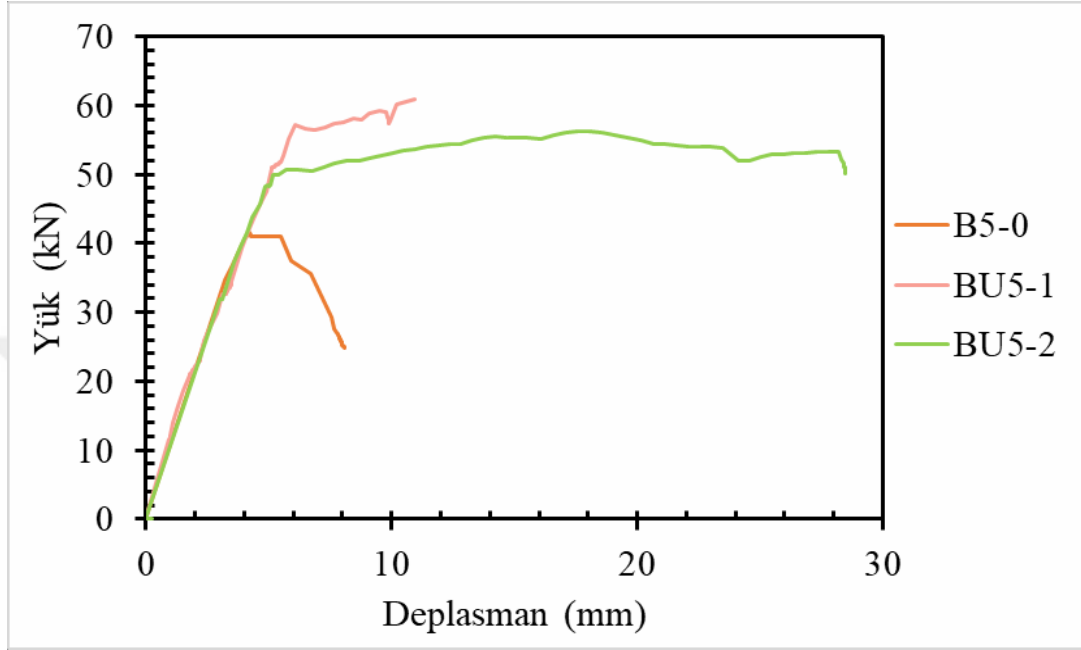
4.2.3.10. B₅-0, BU₅-1, BU₅-2 Numunelerin karşılaştırılması

B₅-0, BU₅-1 ve BU₅-2 numuneleri hedef beton basınç dayanımı 40 MPa-50 MPa olan betonla ve U sargılama yapılmış sırasıyla referans, 300 g/m², 900 g/m² CFRP uygulanmış numunelerdir.

300 ve 900 g/cm² gramajındaki CFRP uygulamalarının, tam sargılamada referans numunelere göre yük taşıma kapasitesine sırayla % 46,30 ve % 35,21 oranlarında katkısı

olmuştur. Hedef beton basınç dayanımı 40 MPa-50 MPa olan beton için düşük gramajlı CFRP kullanımının yüksek gramaja göre taşıma kapasitesine katkısı daha fazladır.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.97’de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.64’de gösterilmiştir.



Şekil 4.97. B₅-0, BU₅-1, BU₅-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.64. B₅-0, BU₅-1, BU₅-2 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₅ -0	41,57	35,34	1,91	4,21	9,87	232,74	10,07	95,54	162,92
BU ₅ -1	60,82	51,70	1,96	10,94	5,56	470,31	9,25	470,31	309,58
BU ₅ -2	56,21	47,78	5,86	17,55	3,20	1388,07	9,84	828,03	1266,39

4.2.3.11. B₁-0, BS₁-1, BS₁-2 Numunelerin karşılaştırılması

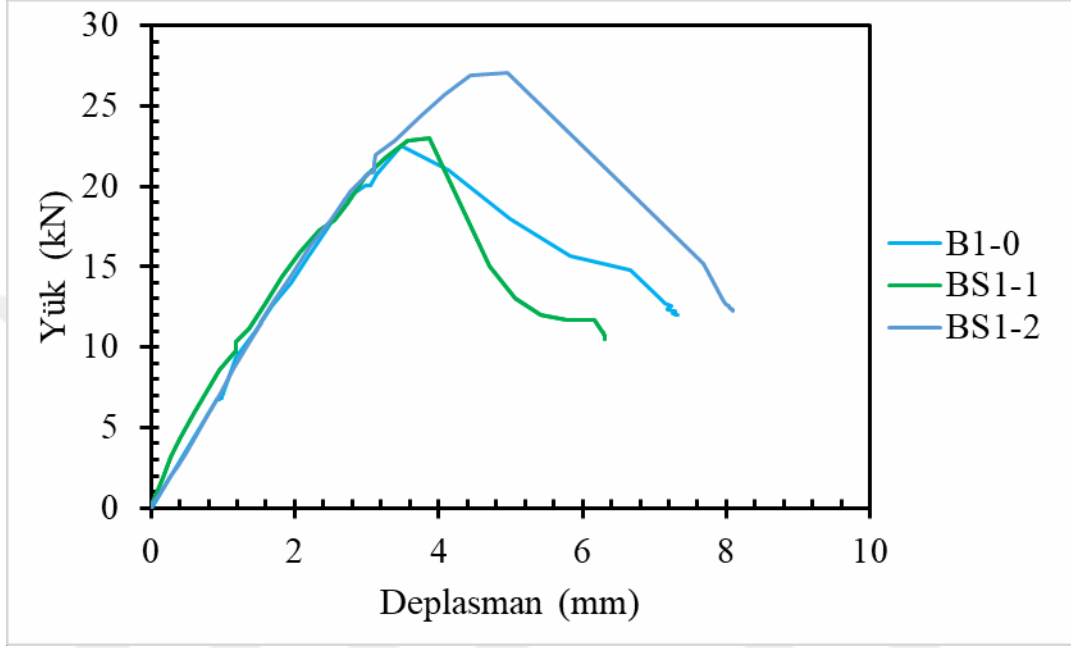
Bu numuneler hedef beton basınç dayanımı 5 MPa-10 MPa olan betonla ve yan yüz (S) sargılama yapılmış sırasıyla referans, 300 g/m², 900 g/m² CFRP uygulanmış numunelerdir.

300 ve 900 g/cm² gramajındaki CFRP uygulamalarının, yan sargılamada referans numunelere göre yük taşıma kapasitesine sırayla % 2,39 ve % 20,22 oranlarında katkısı

olmuştur. Yan sargılama için düşük sınıflı betonlarda gramaj farkının taşıma kapasitesine etkisi oldukça farklıdır ve yüksek gramajlı CFRP tercih edilebileceği görülmektedir.

Yan sargılamanın tam sargılamaya göre taşıma kapasitesine katkısı çok düşüktür.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.98'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.65. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.98. B₁-0, BS₁-1, BS₁-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.65. B₁-0, B MPaS₁-1, BS₁-2 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₁ -0	22,49	19,12	1,54	3,48	6,46	109,21	7,10	56,99	47,29
BS ₁ -1	23,03	19,57	1,73	3,87	5,95	90,03	7,17	70,27	45,75
BS ₁ -2	27,04	22,98	1,74	4,96	5,46	144,71	6,78	139,17	101,40

4.2.3.12. B₂-0, BS₂-1, BS₂-2 Numunelerin karşılaştırılması

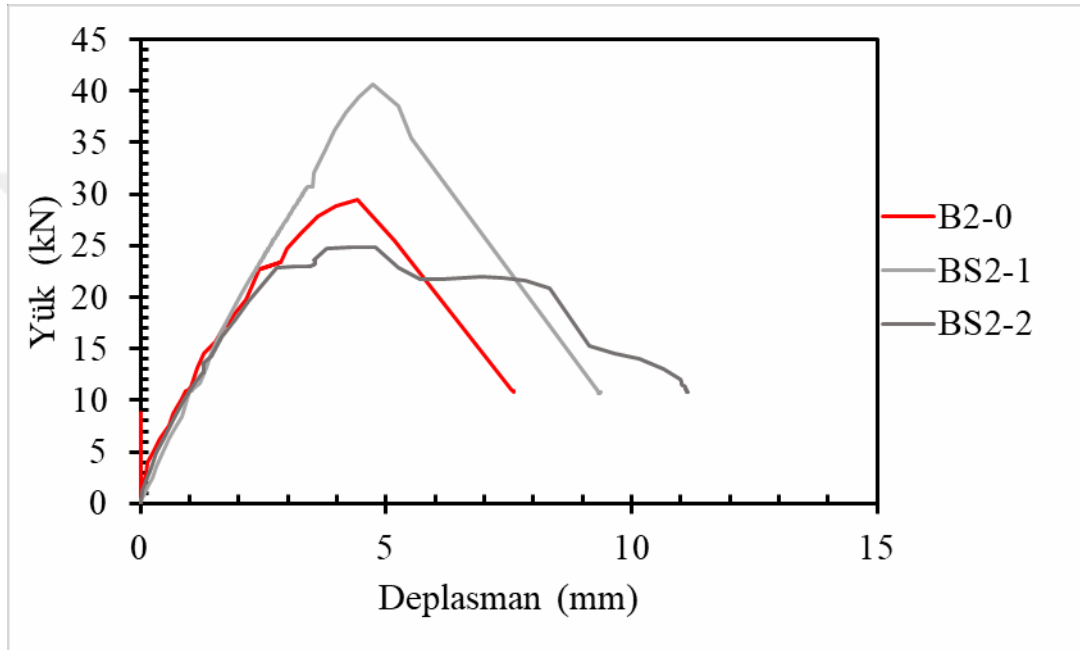
Bu numuneler hedef beton basınç dayanımı 10 MPa-20 MPa olan betonla ve yan yüz (S) sargılama yapılmış sırasıyla referans, 300 g/m², 900 g/m² CFRP uygulanmış numunelerdir.

300 ve 900 g/cm² gramajındaki CFRP uygulamalarının, yan sargılamada referans numunelere göre yük taşıma kapasitesine sırayla % 38,01 ve % -15,57 oranlarında

katkısı olmuştur. Uygulama koşulları da düşünülürse yüksek gramajlı CFRP uygulamasının yan sargılamada hedef beton basınç dayanımı 10 MPa-20 MPa olan beton için etkisinin olmadığı söylenebilir. ($P_{max}=29,42$ ve $24,84$ t)

Yan sargılamanın tam sargılamaya göre taşıma kapasitesine katkısı oldukça düşüktür.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.99'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.66. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.99. B₂-0, BS₂-1, BS₂-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.66. B₂-0, BS₂-1, BS₂-2 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₂ -0	29,42	25,01	1,71	4,42	6,66	148,51	8,28	104,27	96,30
BS ₂ -1	40,60	34,51	1,48	4,73	8,58	223,42	9,23	125,06	156,54
BS ₂ -2	24,84	21,11	2,59	7,84	3,17	205,99	4,91	163,92	132,67

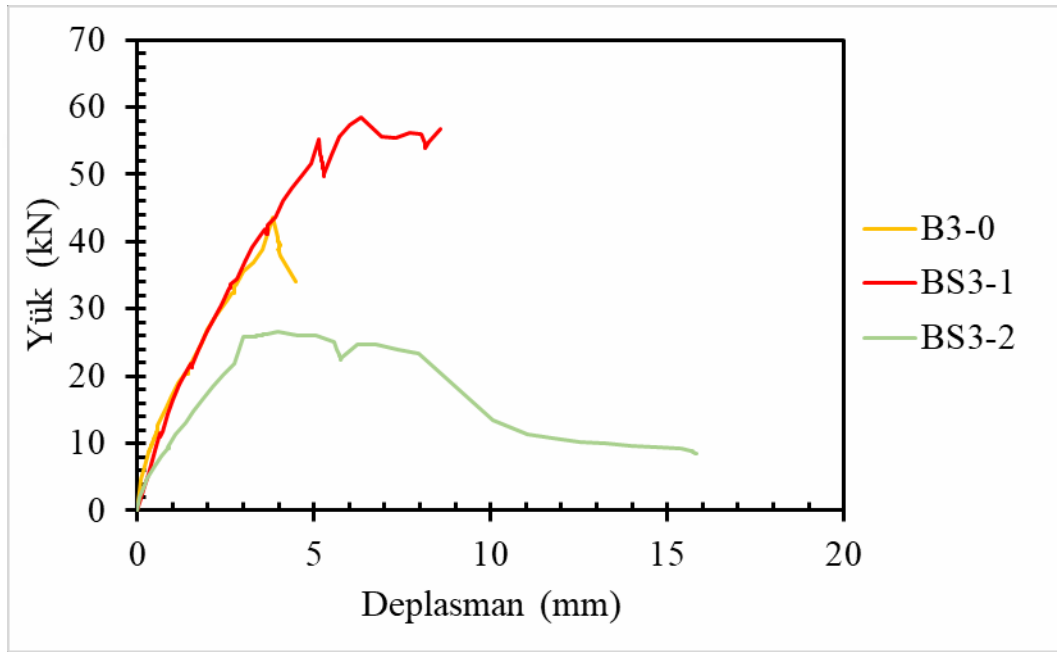
4.2.3.13. B₃-0, BS₃-1, BS₃-2 Numunelerin karşılaştırılması

Bu numuneler hedef beton basınç dayanımı 20 MPa-30 MPa olan betonla ve yan yüz (S) sargılama yapılmış sırasıyla referans, 300 g/m², 900 g/m² CFRP uygulanmış numunelerdir.

300 ve 900 g/cm² gramajındaki CFRP uygulamalarının, yan sargılamada referans numunelere göre yük taşıma kapasitesine sırayla % 34,38 ve % -38,80 oranlarında katkısı olmuştur. Uygulama koşulları düşünülürse yüksek gramajlı CFRP uygulamasının yan sargılamada hedef beton basınç dayanımı 20 MPa-30 MPa olan beton için etkisinin olmadığı söylenebilir.

Yan sargılamamanın tam sargılamaya göre taşıma kapasitesine katkısı çok düşüktür.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.101'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4. 68'de gösterilmiştir.



Şekil 4.100. B₃-0, BS₃-1, BS₃-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.67. B₃-0, BS₃-1, BS₃-2 numunelerinin deney sonuçları

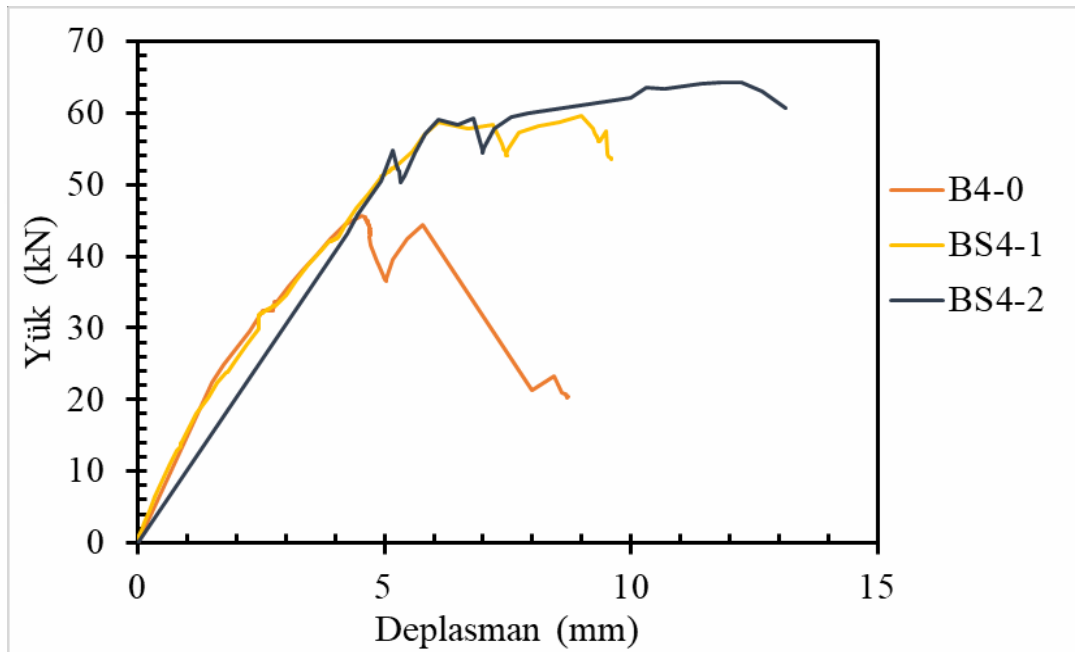
	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₃ -0	43,51	36,98	1,62	3,83	11,36	44,06	3,87	100,87	46,64
BS ₃ -1	58,47	49,70	3,42	6,34	9,22	350,38	10,68	257,67	216,73
BS ₃ -2	26,63	22,63	2,90	3,98	6,69	264,30	8,25	82,46	169,33

4.2.3.14. B₄-0, BS₄-1, BS₄-2 Numunelerin karşılaştırılması

Bu numuneler hedef beton basınç dayanımı 30 MPa-40 MPa olan betonla ve yan yüz (S) sargılama yapılmış sırasıyla referans, 300 g/m², 900 g/m² CFRP uygulanmış numunelerdir.

300 ve 900 g/cm² gramajındaki CFRP uygulamalarının, yan sargılamada referans numunelere göre yük taşıma kapasitesine sırayla % 30,38 ve % 40,72 oranlarında katkısı olmuştur. Yan sargılama için hedef beton basınç dayanımı 30 MPa-40 MPa olan beton için gramaj farkının taşıma kapasitesine etkisi farklıdır ve yüksek gramajlı CFRP tercih edilebileceği görülmektedir.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.101'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.67. 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.101. B₁-0, BS₄-1, BS₄-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.68. B₁-0, BS₄-1, BS₄-2 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₄ -0	45,74	38,87	1,46	4,53	10,10	263,33	11,08	127,16	68,18
BS ₄ -1	59,63	50,69	2,05	8,99	6,64	409,19	10,82	388,54	278,78
BS ₄ -2	64,36	54,70	2,54	12,23	5,26	626,12	10,59	596,25	496,95

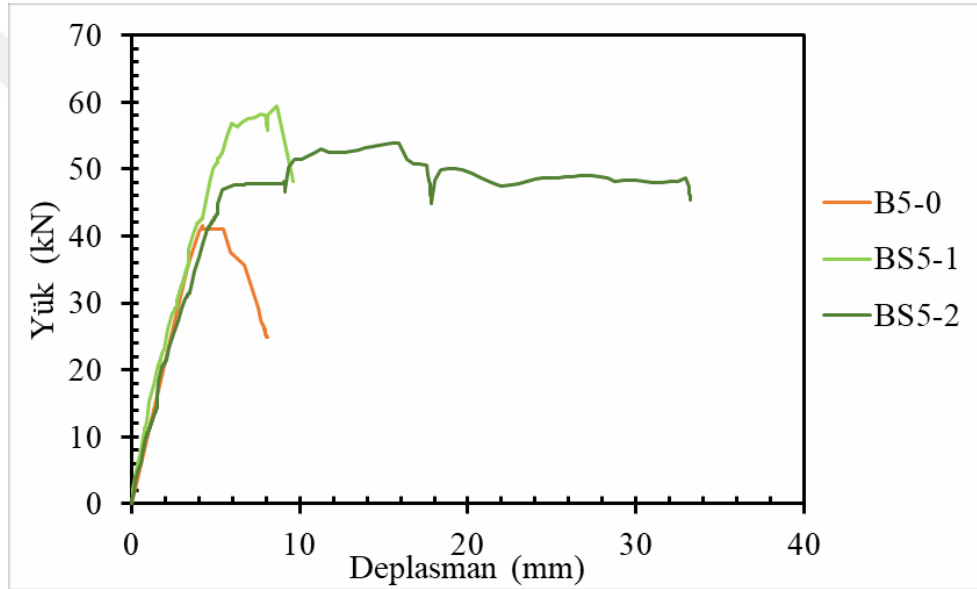
4.2.3.15. B₅-0, BS₅-1, BS₅-2 Numunelerin karşılaştırılması

Bu numuneler hedef beton basınç dayanımı 40 MPa-50 MPa olan betonla ve yan yüz (S) sargılama yapılmış sırasıyla referans, 300 g/m², 900 g/m² CFRP uygulanmış numunelerdir.

Bu numuneler hedef beton basınç dayanımı 30 MPa-40 MPa olan beton için ve yan yüz (S) sargılama yapılmış sırasıyla referans, 300 ve 900 g/cm² CFRP uygulanmış numunelerdir.

300 ve 900 g/cm² gramajındaki CFRP uygulamalarının, yan sargılamada referans numunelere göre yük taşıma kapasitesine sırayla % 42,79 ve % 29,73 oranlarında katkısı olmuştur. Yan sargılama için hedef beton basınç dayanımı 40 MPa-50 MPa olan beton için gramaj farkının taşıma kapasitesine etkisi farklıdır ve düşük gramajlı CFRP tercih edilebileceği görülmektedir.

Bu numunelere ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.102'de, süneklik oranı, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.69'de gösterilmiştir.



Şekil 4.102. B₅-0, BS₅-1, BS₅-2 numunelerinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.69. B₅-0, BS₅-1, BS₅-2 numunelerinin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)
B ₅ -0	41,57	35,34	1,91	4,21	9,87	232,74	10,07	95,54	162,92
BS ₅ -1	59,36	50,46	1,91	8,67	6,85	398,39	10,01	398,39	256,87
BS ₅ -2	53,93	45,84	6,44	15,86	3,40	1517,57	8,89	696,35	1389,78

Tüm numunelere ait veriler ise özet bir tablo olacak şekilde Tablo 4.70'te verilmiştir.

Tablo 4.70. Tüm numunelerin deney sonuçları

	P_{max} (kN)	$0.85 \cdot P_{max}$ (kN)	Süneklik oranı	δP_{max} (mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	$0.85 P_{max}$ rijitlik (kN/mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	Plastik enerji tüketimi (kN.mm)	Nihai Hasar Türü (Kesme/ Eğilme)
	(kN)	(kN)		(mm)	(kN/mm)	(kN.mm)	(kN/mm)	(kN.mm)	(kN.mm)	
B ₁ -0	22,49	19,12	1,54	3,48	6,46	109,21	7,10	56,99	47,29	K
B ₂ -0	29,42	25,01	1,71	4,42	6,66	148,51	8,28	104,27	96,30	K
B ₃ -0	43,51	36,98	1,62	3,83	11,36	44,06	3,87	100,87	46,64	K
B ₄ -0	45,74	38,87	1,46	4,53	10,10	263,33	11,08	127,16	68,18	K
B ₅ -0	41,57	35,34	1,91	4,21	9,87	232,74	10,07	95,54	162,92	K
BF ₁ -1	41,34	35,13	4,91	22,53	1,83	827,78	7,44	818,66	738,28	E
BF ₂ -1	61,61	52,37	3,53	10,91	5,65	1108,62	8,40	174,23	942,08	E
BF ₃ -1	59,55	50,62	3,26	20,14	2,96	1681,74	5,00	968,75	1267,41	E
BF ₄ -1	54,11	46,00	4,00	11,34	4,78	868,42	9,38	471,65	760,21	E
BF ₅ -1	60,99	51,84	9,35	47,33	1,29	2962,68	9,03	2590,66	2810,56	E
BF ₁ -2	44,13	37,51	6,37	28,21	1,56	1118,55	8,33	1111,53	1021,75	E
BF ₂ -2	58,76	49,95	1,51	6,88	8,54	276,48	9,56	236,82	150,75	K
BF ₃ -2	43,40	36,89	4,04	16,97	2,56	692,17	7,86	627,14	603,30	E
BF ₄ -2	37,54	31,91	7,51	14,76	2,54	967,48	8,12	483,02	891,26	E
BF ₅ -2	61,21	52,03	10,83	11,10	5,51	2879,05	11,05	555,04	2745,36	E
BU ₁ -1	57,20	48,62	1,54	9,08	6,30	327,50	8,24	327,50	166,04	K
BU ₂ -1	39,59	33,65	1,12	3,56	11,13	54,88	9,98	85,21	35,33	K
BU ₃ -1	58,09	49,38	7,30	7,74	7,50	1819,93	10,17	330,79	1685,11	K
BU ₄ -1	60,31	51,26	7,35	47,14	1,28	2552,07	7,85	2527,02	2378,22	E
BU ₅ -1	60,82	51,70	1,96	10,94	5,56	470,31	9,25	470,31	309,58	K
BU ₁ -2	43,39	36,89	1,48	5,04	8,62	214,56	10,27	138,64	66,14	K
BU ₂ -2	51,18	43,50	1,73	8,06	6,35	473,92	7,97	386,64	321,67	K
BU ₃ -2	54,01	45,91	5,98	28,61	1,89	1381,41	9,39	1371,42	1258,03	E
BU ₄ -2	58,13	49,41	7,40	35,33	1,65	1836,49	10,27	1829,21	1703,94	E
BU ₅ -2	56,21	47,78	5,86	17,55	3,20	1388,07	9,84	828,03	1266,39	E
BS ₁ -1	23,03	19,57	1,73	3,87	5,95	90,03	7,17	70,27	45,75	K
BS ₂ -1	40,60	34,51	1,48	4,73	8,58	223,42	9,23	125,06	156,54	K
BS ₃ -1	58,47	49,70	3,42	6,34	9,22	350,38	10,68	257,67	216,73	K
BS ₄ -1	59,63	50,69	2,05	8,99	6,64	409,19	10,82	388,54	278,78	K
BS ₅ -1	59,36	50,46	1,91	8,67	6,85	398,39	10,01	398,39	256,87	K
BS ₁ -2	27,04	22,98	1,74	4,96	5,46	144,71	6,78	139,17	101,40	K
BS ₂ -2	24,84	21,11	2,59	7,84	3,17	205,99	4,91	163,92	132,67	K
BS ₃ -2	26,63	22,63	2,90	3,98	6,69	264,30	8,25	82,46	169,33	K
BS ₄ -2	64,36	54,70	2,54	12,23	5,26	626,12	10,59	596,25	496,95	K
BS ₅ -2	53,93	45,84	6,44	15,86	3,40	1517,57	8,89	696,35	1389,78	E

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin davranışları incelenmiş, farklı sınıfta betonlarla hazırlanan betonarme kirişler CFRP şeritlerle güçlendirilerek CFRP gramajının ve sargı tipinin farklı beton sınıfları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Özellikle güçlendirme yapılacak binalarda beton dayanımını çok düşük olmasının güçlendirmeye ne ölçüde etki edeceği (bu durumla ilgili yönetmeliklerde genel bazı sınırlamalar vardır) , kullanılan lifli polimerdeki gramajın (birim ağırlığın) güçlendirmedeki etkinliği ki bu durum yönetmeliklerde belirtilmemiştir, sargılamının konfigürasyonunun güçlendirmeye nasıl etki edeceği çalışmanın ve araştırma sorusunun temel hedefi olmuştur. Bu sorulara cevap verebilmek amacıyla kapsam ve deneyler kısmında da belirtildiği şekliyle, farklı beton basınç dayanımlarına sahip kesme kirişlerinde, farklı gramajlarda CFRP ve farklı güçlendirme şekilleri ile çalışılmıştır. Deneysel çalışmada, 100 x 150 x 1000 mm boyutlarında 35 adet dikdörtgen kesitli kiriş kesme açısından yetersiz olması için her bir kirişte 9 Ø 6 etriye kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen önemli bulgular şu şekildedir;

1. Beş farklı beton sınıfı için hazırlanan kirişlerde taşıma kapasiteleri ve rijitlikleri (EI ile orantılı olarak) beklendiği şekilde beton sınıfı arttıkça arttığı görülmüştür.
2. 300 ve 900 gr/m² gramajlı CFRP kumaşların tam ve U sargılama ile güçlendirmede taşıma kapasitesine katkısı, süneklik ve enerji tüketimi değerleri düşük beton sınıfları için oldukça yüksek çıkarken, yüksek sınıflı betonlarda sonuçlarda daha az katkı sağladığı görülmüştür. Yüksek dayanımlı beton ile hazırlanan numunelerde her iki gramajda CFRP kullanımının, taşıma kapasitesine katkısı oransal olarak yakın seyrettiği ve U sargılamasının, tam sargılamadan daha iyi sonuçlar verdiği için uygulama kolaylığı bakımından U sargılamasının tercih edilebileceği düşünülmüştür.
3. Beton hazırlık aşamasında yeteri kadar homojen yerleştirememeye gibi üretim kaynaklı hatalardan dolayı bazı numunelerde beklenenden daha düşük taşıma kapasitesinin elde edildiği düşünülmüştür.
4. Farklı sargılama ile uygulanmış CFRP şeritlerin, kirişin yük taşıma kapasitesi ve rijitliğinde artış sağlaması, kirişte kesme çatlaklarının oluşumunu ve ilerlemesini geciktirdiğini ve kesme kapasitesinin artmasına katkı

sağladığını göstermektedir. Sargılama şekillerinin taşıma kapasitesine katkısı en fazla tam sargılamada görülürken en az artış yan sargıda görülmüştür.

5. F tipi sargının deneydeki tüm beton sınıflarında kesme kapasitesi yetersiz kirişlerin davranışını kesme kırılmasından eğilme kırılmasına dönüştürdüğü görülmüştür.
6. U tipi sargının düşük beton dayanımlı ve düşük gramajlı CFRP kullanılan kirişlerde, güçlendirme uygulamasının kirişi kesme açısından istenen dayanıma ulaştırdığı fakat süneklik için yeterli olmadığı görülmüştür.
7. 300 ve 900 gr/m² gramajlı CFRP kumaşların yan sargılama ile güçlendirmede ise taşıma kapasitesine, sünekliğe, enerji tüketim kapasitesine katkısı bakımından sonuçlar tüm beton sınıflarında çok az katkı sağladığı görülmüştür. Özellikle hedef beton basınç dayanımı 5 MPa-10 MPa olan betonla için yan sargının uygun olmadığı söylenebilir. Yan sargının düşük yük değerlerinde kirişten ayrılması sebebiyle LP'nin işlevini tam olarak yerine getiremediği görülmüştür. Yan sargının daha yüksek verimle çalışması ve katkısını görmek için ankraj vb. destekleyici uygulamalarla çalışmalar yapılabilir.
8. Bugün Türkiye'de mevcut yapıların çoğunlukla hedef beton basınç dayanımı 5 MPa - 30 MPa aralığında olan betonda göz önüne alındığında tam ve U sargılama ile maliyet açısından düşük gramajlı CFRP uygulamasının tercih edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.
9. Hedef beton basınç dayanımı 5MPa-20 MPa olan beton için hem 300 gr/m² hem 900 gr/m² gramajlı CFRP kumaşları ile tam ve U sargılama ile güçlendirmede elde edilen sonuçlar yan sargıya oranla büyük oranda taşıma kapasitesi ve sünekliğe katkı sağlamıştır. Fakat 30 MPa ve daha yüksek dayanımlı beton sınıfları için iki gramaj türü için de sonuçlar birbirine çok yakın çıkmış, bu da yüksek beton sınıflarında sargılama şeklinin çok az etkisi olduğunu ve mevcut yapıların düşük beton dayanımında olmasından dolayı tam ve U sargının tercih edilmesi gerektiği söylenebilir.

Yukarıda özetlenen, çalışma sonunda ulaşılan bulgular bu deneyde belirlenen parametreler için geçerlidir. Deneysel çalışma sırasında meydana gelen imalat ve yükleme problemlerinden dolayı deneysel aşamada bazı kirişlerde yeniden üretimde yapılmıştır. Buna rağmen deney elemanlarının her bir tip için sadece bir tane üretilmiş olması birkaç numune için sonuçların bir kısmında yazarın yorumunu zorlaştırmıştır.

Fakat elde edilen bulgular ACI ve TBDY-2018, özellikle düşük dayanımlı (5-20 MPa arası) betona sahip kirişlerde mutlaka tam sargının tercih edilmesi gerektiğini göstermektedir. Uygulamada kirişlerin tablalı olması tam sargılamayı zorlaştıran önemli bir etkidir. Bu durum KTÜN İnşaat Mühendisliği Bölümünde tamamlatılan Hamad, A., (2021)'ın tezinde de detaylı incelenmiştir. Özellikle tablalı kirişlerde tabla köşelerinden ya da kiriş gövdesinden CFRP'nin betona spike ankrajlarla bağlanması güçlendirilmiş kirişin davranışında tam sargılamaya yakın bir iyileştirme yapmaktadır.

Yazarın tez aşamasında dikkatini çeken en önemli nokta ise, özellikle deprem yönetmeliğinde lifli polimer ile yapılacak güçlendirmeler için bazı detayların (liflerin yönü ve kullanılan epoksinin mekanik özellikler vs. gibi) verilmemiş olmasıdır. Elyafın kopma ve elastisite modülü değeri elbette önemli olmakla beraber, kapasitenin tam olarak kullanılabilmesi için bahsedilen bu parametrelere uygulama sırasında azami dikkat edilmesi gerekmektedir.

İleriki çalışmalarda, kesme donatısı miktarı, sıklığı, CFRP kumaş genişliği, sıklığı gibi farklı uygulamalarla bu deneyde elde edilenlerden farklı sonuçlar elde edilebileceği düşünülmektedir. Ayrıca üretim aşamasında oluşabilecek etkilerle istenilen düzeyde sonuçları görmek için aynı özelliklere sahip daha fazla numune hazırlanarak daha fazla sonuca ulaşılabilir. Bu çalışmaya ek olarak ankraj uygulamasının özellikle C20 ve daha düşük dayanımlı beton sınıflarında oluşturacağı fark incelenebilir. Farklı bir çalışmada şerit genişliğinin sonuçlar üzerindeki etkisi görmek adına şerit genişliği artırılarak ya da aralıksız CFRP uygulanarak sonuçlar karşılaştırılabilir. Farklı yönlü dokumaya sahip CFRP çeşitleri ile hazırlanacak numunelerin sonuçları kıyaslanabilir. Kullanılan FRP türü için farklı kat adediyle ve/veya plakalarla güçlendirme yapılarak FRP kat

adedinin sonuçlar üzerindeki etkisi irdelenebilir. Uygulamada farklı miktarlarda epoksinin, CFRP kumaşın alt ve üst yüzeyine uygulanarak süneklik ve kirişin kesme ve eğilme kapasitesine katkısı ile ilişkisi hakkında veriler elde edilebilir.



KAYNAKLAR

Abodan, B., 2019, Betonarme Kirişlerin Kesmeye Karşı Farklı Sarım Yöntemi Kullanarak BFRP İle Güçlendirilmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya.

ACI 440, 2008. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, American Concrete Institute Committee 440, ACI 440, Miami.

Aksoylu, C. (2021). Experimental analysis of shear deficient reinforced concrete beams strengthened by glass fiber strip composites and mechanical stitches. *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 40(2), 267-285.

Aksoylu, C., Özkılıç, Y. O., & Arslan, M. H. (2022). Mechanical Steel Stitches: An Innovative Approach for Strengthening Shear Deficiency in Undamaged Reinforced Concrete Beams. *Buildings*, 12(10), 1501.

Aksoylu, C., (2022). Shear strengthening of reinforced concrete beams with minimum CFRP and GFRP strips using different wrapping technics without anchoring application. *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 44(6), 831-851.

Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y., Gemi, L. ve Arslan, M. H., 2019, İnceltilmiş Uçlu Betonarme Prefabrik Aşıkların Kesme Kapasitelerinin CFRP uygulaması ile Artırılması, International Science and Academic Congress (INSAC'19), Konya, 285-291.

C. Aksoylu, Ş. Yazman, Y.O. Özkılıç, L. Gemi, M.H. Arslan, 2020, Experimental analysis of reinforced concrete shear deficient beams with circular web openings strengthened by CFRP composite, *Composite Structures* 249, 112561.

Al-shalif, S., A., H., 2022, Cam Fiber Takviyeli Polimer Kompozit Levhalar Kullanılarak Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerde Kesme Davranışının Deneysel ve Analitik Olarak İncelemesi, Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Konya.

Çeledir, E., 2022, Gövde Boşluklu Prefabrik Betonarme Aşıkların Düşey Yükler Altında Davranışı, Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Konya.

Aldhabır, W.,M., 2019, Eğilmeye Karşı FRP Kompozitler ile Güçlendirilen Betonarme Kirişlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya.

Al-Rousan, R.Z., Haddad, R.H. and Swesi, A.O., 2015. Repair of shear-deficient normal weight concrete beams damaged by thermal shock using advanced composite materials. *Composites: Part B*, 70, 20–34.

Alzate, A.,Arteaga,A.,Diego,D.A. and Perera,R.,(2009)." Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Fibre Reinforced Polymers (FRP)", European Journal of Environmental And Civil Engineering,10

Arabacı, R. M., 2018 Betonarme Kirişlerin Çelik Levhalarla Güçlendirilmesinin Dayanım Değişimine Etkisinin İncelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Aykaç, S. ve Yılmaz, M., 2011, Düzenli Üçgen veya Dairesel Boşluklara Sahip Betonarme Kirişlerin Davranış ve Dayanımı, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 26 (3).

Bukhari, I.A., Vollum, R.L., Ahmad, S. and Sagaseta J., (2010)."Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with CFRP", Magazine of Concrete Research 62(1): 65-77.

Chalioris, C., 2003, Experimental investigation of the contribution of bonded CFRP jackets to shear capacity of RC beams, Role of Concrete In Sustainable Development: Proceedings of the International Symposium dedicated to Professor Surendra Shah, Northwestern University, USA held on 3–4 September 2003 at the University of Dundee, Scotland, UK, 689-696.

Ersoy U, Özcebe G, 2001, Betonarme, Evrim Yayınevi ve Tic. Ltd. Şti..

Ersoy, U., Özcebe, G., 2002, Betonarme Temel İlkeler, TS 500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine Göre Hesap, Evrim Yayınevi, Kadıköy, İstanbul.

Hamad, A., 2021, Kesme Açısından Yetersiz Olan Tablalı Betonarme Kirişlerin CFRP ile Güçlendirilmesi ve Çözüm Önerileri, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Konya.

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.

Jayaprakash, J., Samad, A.A.A., Abbasovich, A.A., ve Ali, A.A.A., 2008. Shear capacity of precracked and non-precracked reinforced concrete shear beams with externally bonded bi-directional CFRP strips, Construction and Building Materials, 22, 6, 1148-1165.

Kankal, Z., Ç., 2011, Betonarme Kirişlerin Cam Fiber Plakalarla Kesmeye Karşı Güçlendirilmesinde Ankraj Sayısının Etkisi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.

Kaya,T., 2019, Kesme Dayanımı Yetersiz CFRP İle Güçlendirilmiş Kolon – Kiriş Birleşimlerinin Çarpma Davranışının İncelenmesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bilecik.

Kaya, E., M., 2010, İki ve Üç Boyutlu CFRP'lı Eğilme Kirişlerinde Boyut Etkisi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Kaygusuz, M., A., 2018, Yüksek Sıcaklık Hasarına Uğramış Betonarme Kirişlerin FRP ile Onarım ve Güçlendirilmesi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Bilim Dalı, Erzurum.

Kırteke, M., 2019, Epoksi Esaslı Onarım Harçlarıyla Güçlendirme, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Malatya.

Oruç, R., 2019, Kesme Kapasitesi Yetersiz Betonarme Kirişlerin Karbon Lifli Polimerler ile Güçlendirilmesinin Statik ve Dinamik Olarak İncelenmesi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray.

Özkal, F., M., 2017, Kesme Açıklığı Küçük Olan Betonarme Kirişlerin Etriye Düzeni ve Kenetlenme Yönünden İncelenmesi, 20. Ulusal Mekanik Kongresi, 05-09 Eylül 2017, Uludağ Üniversitesi, Bursa.

Sağiroğlu, S., Almahdia, F., Vardar, İ., 2017, Farklı a/d oranına sahip betonarme kirişlerin eğilme davranışlarının üzerine deneysel ve nümerik bir çalışma, 20. Ulusal Mekanik Kongresi, Uludağ Üniversitesi, Bursa.

Şengün, K., 2016, CFRP ile güçlendirilen çelik lifli betonarme kirişlerde dayanım artışlarının irdelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Yapı Programı, İstanbul.

TBDY, 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Resmi Gazete.