



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



KESME DAYANIMI YETERSİZ BETONARME
KİRİŞLERİN GÜÇLENDİRİLMESİNDE OPTİMUM
LİFLİ POLİMER MİKTARININ BELİRLENMESİ

Mohammed ALSDUDI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mohammed ALSDUDI tarafından hazırlanan “**Kesme Dayanımı Yetersiz Betonarme Kirişlerin Güçlendirilmesinde Optimum Lifli Polimer Miktarının Belirlenmesi**” adlı tez çalışması **28 / 01 /2021** 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

İmza

Başkan

Doç. Dr. Ali KÖKEN (Başkan)

Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN (Danışman)

Dr. Öğr. Üyesi Üyesi Fatih SÜTÇÜ

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından 201004038 nolu 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.



Mohammed ALSDUDI

Tarih: 04.01.2021

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

KESME DAYANIMI YETERSİZ BETONARME KİRİŞLERİN GÜÇLENDİRİLMESİNDE OPTİMUM LİFLİ POLİMER MİKTARININ BELİRLENMESİ

Mohammed ALSDUDI

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN
Yardımcı Danışman: Doç. Dr. Lokman GEMİ**

2021, 87 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN-Danışman
Doç. Dr. Ali KÖKEN
Dr. Öğr. Üyesi Fatih SÜTÇÜ**

Bu çalışmada kesme kapasitesi yetersiz denge altı dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin kesme açıklıkları boyunca dıştan CFRP ile güçlendirilmesi sonucunda düşey yük altında değişen davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada yapım yönetmeliklerinde yer alan normlara göre kiriş davranışını gerek dayanım gerekse süneklik açısından ideal seviyeye getirecek olan CFRP'nin optimum şerit genişliği (w_f) / şerit aralıkları (s_f) oranı belirlenmiştir. Deneysel çalışmada, 1/2 ölçekli 8 adet 125 x 250 x 2500 mm boyutlarında betonarme kiriş numunesi hazırlanmıştır. Kirişlerde kesme kapasitesinin yetersiz olması için etriyeler Ø5 / 35 cm olacak şekilde seçilmiştir. Numunelerden bir tanesi güçlendirilmeden referans olarak test edilirken diğer numunelerin kesme açıklıkları boyunca artan CFRP (w_f) / (s_f) oranlarda güçlendirilerek testleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlarına göre (w_f) / (s_f) oranının 0.55'i geçmesi ile beraber kiriş davranışı kesme kırılması yerine eğilme kırılması gözlemlenmiştir. Bununla beraber kirişin yönetmelik normlarına göre yeterli kesme rezerv değerine ulaşabilmesi için (w_f) / (s_f) oranının 0.82'ye kadar çıkarılması gerektiği de görülmektedir. Çalışmada kullanılan CFRP'nin yönü ve gramajının güçlendirmede en önemli etkenlerden biri olduğu ve kullanılan 240 gr/m² lik CFRP'nin kesme bölgelerinde betonun çatlaması ile beraber ani kopmalar yaşadığı görülmüştür. Yönetmeliklerde yer alan kapasite formüllerinde CFRP malzemesi ile ilgili gerek yön gerekse gramaj bilgilerinin bulunmaması ise bir eksiklik olarak düşünülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Karbon fiber malzeme (CFRP), Kesme hasarı, Onarım/Güçlendirme, betonarme kiriş

ABSTRACT

MS

DETERMINATION OF OPTIMUM FRP COMPOSITE AMOUNT IN STRENGTHENING REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH INADEQUATE SHEAR STRENGTH

Mohammed ALSUDI

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering**

**Advisor: Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN
Co-Advisor: Assoc. Prof. Dr. Lokman GEMİ**

2021, 87 Pages

Jury

**Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN (Advisor)
Assoc. Prof. Dr. Ali KÖKEN
Asst. Prof. Dr. Fatih SÜTÇÜ**

In this study, the behavior of the reinforced concrete beams having insufficient shear capacity under vertical loads was experimentally examined and the optimum strip width (w_f) / strip spacing (s_f) ratio of the CFRP, which will bring the behavior to the ideal level according to the code norms, was determined as a result of the strengthening of the beams with CFRP. In the experimental study, 8 samples of 125 x 250 x 2500 mm reinforced concrete beams with $\frac{1}{2}$ scaled were prepared. In order to have insufficient shear capacity in the beams, stirrups were chosen as $\varnothing 5 / 35$ cm. The other specimens were tested at increasing CFRP (w_f) / (s_f) ratios along the shear span, while one of the samples was tested as reference without strengthening. According to the experimental results, when the (w_f) / (s_f) ratio exceeds 0.55, the brittle behavior changes as ductile behavior. However, it is also seen that (w_f) / (s_f) ratio should be increased up to 0.82 in order for the beam to reach sufficient shear capacity according to the code norms. It was observed that the direction and unit weight for per square meter of the CFRP used in the study was one of the most important factors in strengthening and especially the 240 gr / m² CFRP experienced sudden ruptures in the shear areas together with the shear cracks of the concrete.

Keywords: CFRP, reinforced concrete beam, shear deficient, strengthening

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Betonarme kesme kirişlerinin optimum CFRP şerit genişliği (w_f) / şerit aralıkları (s_f) oranının belirlenmesini amaçladığımız tezimin her aşamasında yardım ve desteğini benden esirgemeyen, danışman hocam Sayın Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN'a, yüksek lisans tez aşamamda ikinci danışman olarak görevlendirilen Doç. Dr. Lokman GEMİ'ye ayrıca teşekkürü borç bilirim. Özellikle CFRP şeritlerin betonarme kirişlere uygulanması noktasında Dr. Öğretim Üyesi Şakir YAZMAN hocamız ile beraber tüm detayları benimle paylaştıkları için ve gelişimime katkıları için minnettarım. Deneysel ve analitik çalışmalarımın başından sonuna kadar her aşamasında destek olan bilgi ve tecrübesi ile bana yol gösteren sayın hocam Dr. Ceyhun AKSOYLU'ya ve tezin kurgulanmasında ve nümerik modellemelerinde emeği geçen Dr. Yasin Onuralp ÖZKILIÇ'a da teşekkür ederim. Son olarak İnşaat Mühendisliği Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı teknisyeni Yüksel ÇİFTÇİ'ye fiziki yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

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

Mohammed ALSDUDI
KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç	3
1.2. Kapsam	4
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
3. MATERYAL VE METOT	17
3.1. Deney Numuneleri ve Yükleme Hücresi	18
3.2. Numunelerin Boyutları	19
3.3. Deney Numunelerinin Malzeme Özellikleri	20
3.3.1. Beton	20
3.3.2. Donatı	21
3.3.3. Karbon lifli polimer	22
3.4. Deney Elemanlarının Üretilmesi	24
3.4.1. Kalıpların hazırlanması	25
3.4.2. Donatıların hazırlanması	25
3.4.3. Beton dökümü	26
3.4.4. CFRP Şeritlerin hazırlanması ve uygulanması	27
3.5. Güçlendirilmiş Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması	30
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA	33
4.1. Deney Sonuçları	33
4.1.1. 1 Nolu deney elemanı (B-0)	33
4.1.2. 2 Nolu deney elemanı (B-1)	34
4.1.3. 3 Nolu deney elemanı (B-2)	36
4.1.4. 4 Nolu deney elemanı (B-3)	38
4.1.5. 5 Nolu deney elemanı (B-4)	40
4.1.6. 6 Nolu deney elemanı (B-5)	42
4.1.7. 7 Nolu deney elemanı (B-6)	44
4.1.8. 8 Nolu deney elemanı (B-7)	46
4.2. Deney Elemanların Karşılaştırılması	48
4.2.1. B-0 - B-1 Numunelerin karşılaştırılması	48
4.2.3. B-0 - B-3 Numunelerin karşılaştırılması	51
4.2.4. B-0 - B-4 Numunelerin karşılaştırılması	52
4.2.5. B-0 - B-5 Numunelerin karşılaştırılması	53

4.2.6. B-0 - B-6 Numunelerin karşılaştırılması	54
4.2.7. B-0 - B-7 Numunelerin karşılaştırılması	56
4.3. Deney Sonuçları Değerlendirilmesi	57
5. ANALİTİK HESAP	65
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	68
KAYNAKLAR	73
ÖZGEÇMİŞ	77



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	Kesit alanı
B420c	Nervürlü donatı sınıfı
b_w	Kiriş gövde genişliği
C25	Basınç dayanımı 25 MPa olan beton sınıfı
a ve a_v	Eleman kesme açıklığı
d	Kiriş faydalı yüksekliği
l_p	Plastik mafsallık boyu
M	Moment
P	Deney elemanlarına uygulanan yatay yük
S220	Düz donatı sınıfı
w_f	Lifli polimer şerit genişliği
s_f	FRP şeritlerin, eksenden eksene aralıkları
V_f	FRP şeritlerin karşıladığı kesme dayanımı
n_f	Tek yüzdeki FRP sargı tabaka sayısı
t_f	Bir tabaka FRP için etkili kalınlığı
E_f	FRP elastisite modülünü
E_f	FRP etkin birim uzama sınırı
ρ_f	FRP'nin hacimsel oranı
V_r	Elemanın kesme dayanımı
V_s	Etriyenin kesme dayanım katkısı
$\emptyset$	Donatı çapı
ρ	Kesitteki çekme donatısı oranı
ρ'	Kesitteki basınç donatısı oranı
ρ_b	Kesitteki dengeli donatı oranı
ρ_l	Kesitte sehim hesabı gerektirmeyecek olan sınırdaki donatı oranı
δ_y	Akma anındaki deplasman değeri
δ_u	Yükün %85'ine karşı gelen deplasman değeri
μ	Deplasman süneklik oranı
T_g	Polimerlerde camsı geçiş sıcaklığı

Kısaltmalar

CFRP	Karbon Fiber Takviyeli Polimerler
GFRP	Cam Fiber Takviyeli Polimerler
AFRP	Aramid Fiber Takviyeli Polimerler
FRP	Elyaf Takviyeli Polimerler
GÖ	Göçme Öncesi Hasar
LP	Lifli Polimer
RC	Betonarme
TBDY-2018	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018
TDY-2007	Türk Deprem Yönetmeliği -2007
TS-9967-33233	Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları
ACI 440.2R-17	Guide for the design and construction of externally bonded frp systems for strengthening concrete structures
FIB-2001	Externally bonded FRP reinforcement for RC structures
CSA S806	Canadian Standards Association “Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers”
ISISM03	Univ. of Winnipeg “Canadian network of centers of excellence on intelligent sensing for innovative structures”
JSCE	Japan Society of Civil Engineers “Recommendations for design and construction of concrete structures using continuous fibre reinforced materials”
BISE	British Institution of Structural Engineers “Interim guidance on the design of reinforced concrete structures using fiber composite reinforcement”
Gen	Gen expression programming
LP/FRP	Lifli polimer/Fiber reinforced polymer
FRCM	Fabric-Reinforced Cementitious Matrix
GİP	Gen ifadeli programlama

1. GİRİŞ

Betonarme yapılarda, taşıyıcı elemanlar (döşemeler, kolonlar, kirişler ve temeller) genellikle eğilme, kesme ve eksenel basınç veya eksenel çekme kuvvetlerinin etkisine maruz kalmaktadır. Betonun çekme dayanımı düşük olduğu için özellikle kesme kuvveti nedeniyle oluşan asal çekme gerilmeleri betonun çekme dayanımını kolaylıkla aştığı için taşıyıcı elemanlarda çatlaklar gibi önemli sorunlar oluşturmaktadır. Betonun kesme ve basınç mukavemeti çekme mukavemetinden daha yüksek olduğu için, basit kesme gerilmelerine maruz bir betonarme elemanda yeterli önlem alınmamışsa asal çekme gerilmelerine dik olacak şekilde ani ve gevrek hasar olarak eğik çatlaklar oluşmakta ve taşıyıcı eleman göçmektedir. Kiriş, kolon ve perdelerde asal çekme gerilmesinin oluşturacağı çatlakları önlemek için çatlaklara dik yönde enine donatı yada sargı donatısı kullanılmalıdır.

Günümüzde kullanılan tüm yapı yönetmeliklerinde, kesme gerilmesi ne kadar küçük olursa olsun olası kesme hasarının önüne geçebilmek için minimum seviyede sargı donatısı kullanılması zorunlu tutulmuştur. Kesme donatılarının kullanım amacı, kesme kırılmasını engelleyerek betonarme taşıyıcı elemanlarının eğilme kapasitesine ulaştırarak eğilme güç tükenmesinin oluşmasını sağlamaktır. Bunun tam tersi eğilme açısından ne kadar iyi donatılmış olsa da kesme donatısı yetersiz betonarme kirişlerin eğilme kapasitesine ulaşmadan kesme çatlaklarından dolayı ani bir şekilde göçecektir. Dolayısıyla kesme donatısının amacı kesme kuvveti ile yönde değiştiren asal çekme gerilmelerinden dolayı oluşacak olan çatlakları engellemek ve betonarme elemanların kesme kırılmasına ulaşmadan eğilme yönünden göçmesini sağlayarak kapasite tasarımı gereği sünek bir davranış oluşturabilmektir.

Bir betonarme elemanın kesme dayanımını arttırmak için hem kesmeden dolayı eğik çatlakların kesiştiği sargı donatısı sayısı (ettriye sayısını) hem de etriyenin mekanik özellikleri arttırılmalıdır. Konulan etriyenin mekanik özelliklerin arttırılması üretilen çelik sınıflarının standart olmasından dolayı pek mümkün değildir. Bununla beraber etriye aralıklarının daha geniş olması kesme çatlakların eğimi de dikkate alındığında hasarın oluşması kolaylaşacaktır. Bu nedenle mekanik özellik yerine daha sık etriye donatısı tercih edilmelidir.

Yapı stokunun önemli kısmı betonarme binalardan oluşan Türkiye ve benzeri ülkelerde, yeterli mühendislik hizmeti almamış ve nispeten daha eski yıllarda yapılmış

binaların birçoğunda betonarme elemanlarda yeterli kesme donatısı bulunmaktadır. Bunun temel sebebi yetersiz kontrol ve bilgisizlik olduğu kadar eski yönetmeliklerde kapasite tasarımının çok ayrıntılı yer almamasıdır. 1992 yılında Park ve Paulay tarafından ortaya atılan ve deprem yönetmeliklerince benimsenen bu tasarım 1990 yılların sonuna 1998 deprem yönetmeliğiyle beraber Türkiye’de yapı tasarımında kullanılmaya başlanmıştır. Bunların haricinde kullanılan malzemelerin mekanik özelliklerinin yetersiz olması, yapıların daha sonra kullanım amacının değişmesi, korozyon vs. gibi etkilerden dolayı da yine yapılarda özellikle kesme açısından yetersizlikler görülmektedir. Bu sebepten bahsi geçen yapıların ekonomik sınırlar içinde güçlendirilmesi olası can kaybının önlenmesi adına oldukça önemlidir.

Yetersiz dayanımda ve süneklikte bulunan bir taşıyıcı sistem elemanlarının her biri için ayrı bir güçlendirme senaryosu hazırlanabilir. Günümüzde özellikle pratik ve hızlı güçlendirme tekniklerinin daha ön planda olduğu görülmektedir. Bunun nedeni güçlendirme sırasında yapının çok fazla hasar görmemesi ve mümkün olduğunca kullanıma devam etme isteğidir. Bu yöntemlerin en yaygını lifli polimerler (LP) yada uluslararası adıyla Fiber Reinforced Polymers / Plastic (FRP) ile güçlendirme yöntemidir. Bu güçlendirme yönteminde özellikle kesme dayanımı yeterli olmayan kirişlerde ve kolonlarda kesme dayanımını arttırmak için lifli polimer şeritleri güçlü epoksi reçine yardımıyla elemanlara yapıştırılmaktadır. Kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan lifli polimerler şeritleri genel olarak yönetmeliklerde geçen hesap yöntemlerine, geçmiş çalışmalara ve kirişlerde oluşan kesme kuvvetinin yönü de düşünülerek kiriş gövdesine yapıştırılırken kolonlarda çift yönlü eğilme ve kesme kuvveti etkin olduğu için tüm kesitin kullanılması gerekmektedir. Günümüzde lifli polimerler ile güçlendirme ve ilgili hesap yöntemleri, geliştirilmekte ve üzerindeki araştırmalar devam etmekte olan oldukça sıcak bir konudur.

LP yada FRP’nin en fazla uygulama alanı bulduğu taşıyıcı sistem elemanları kirişlerdir. Özellikle kesme donatısı yetersiz olan kirişlerin güçlendirilmesinde sıklıkla tercih edilen lifli polimerler farklı şekilde kullanılmaktadır. Kirişe dik, tek yönde eğimli ve iki yönde eğimli X şeklinde farklı aralıklar ve genişliklere sahip lifli polimer şeritleri yapıştırılabilirken lifli polimer kirişe tam sarılacak şekilde de yapıştırılabilmektedir. Önemli olan yapışan yüzeyin ve lifli polimerin yönünün kesme dayanımı yetersiz olan

kirişte mesnete yakın yörelerde baskın olan kesme kuvvetini karşılayacak şekilde ve nitelikte olmasıdır.

Yönetmeliklerin tutucu yaklaşımı, tasarımla ilgili kısıtlar ve kabuller ile güçlendirme projesi yapan mühendislerin konuya yatkınlığı ve hâkimiyeti gibi parametreler düşünüldüğü zaman LP/FRP ile yapılan çoğu güçlendirme projesinde eleman kapasitesi açısından oldukça emniyetli tarafta kalındığı görülmektedir. Bu durum kıt ekonomik imkânlar düşünüldüğü zaman LP/FRP'nin gereksiz kullanımı ve artan işçilik maliyetleri olarak ilave bir ekonomik yük getirmektedir. Burada özellikle bu malzemenin optimum tasarımının ve uygulamasının oldukça önemli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu tez kapsamında da bu motivasyonda hareketle kesme kapasitesi yetersiz olan betonarme kirişlerin LP/FRP ile güçlendirilmesinde optimum miktarın bulunması hedeflenmiş ve yapılan deneysel ve analitik çalışma ile LP/FRP şerit genişliği / aralığı ($\frac{w_f}{s_f}$) için optimum oran bulunmaya çalışılmıştır.

1.1. Amaç

Türkiye'de yeterli deprem güvenliği taşımadığı bilinen büyük bir bina stoku bulunduğu bilinmektedir (Tankut, 2005). Betonarme yapı elemanlarının, servis ömürleri boyunca tasarım ve uygulama hataları, zamana bağlı zayıflamalar, kullanım amacının değiştirilmesi ve yeni yönetmeliklere göre yetersiz kalması gibi nedenlerle güçlendirilmesi gerekebilmektedir (Bayülke, 1998). Taşıyıcı sistemi yetersiz bina stokunun çok değişken olması binaların yapım yöntemlerinin farklı olması nedeniyle güçlendirmenin maliyeti açısından bütün betonarme yapıları için uygun olacak çeşitli güçlendirme yöntemlerini belirleme konusunda araştırmalar devam etmektedir. Genel olarak betonun basınç dayanımı düşük olması ve betonarme elemanın kesme gerilmesini karşılayacak etriye donatısının yetersiz olması mevcut betonarme yapılarda en çok karşılanan eksikliklerdir. Bunun neticesinde, yüksek gerilmelerin etkisinin altında kalan betonarme elemanların taşıma kapasitesini ve sünekliliğini olumsuz etkilemektedir. Böylece, taşıyıcı elemanların enerji yutma kapasiteleri beklenen değerlerin çok altında olabilmektedir. Bunun için, taşıyıcı elemanların taşıma kapasitesini, eğilme ve kesme dayanımını arttırmak için LP/FRP şeritleri ve çelik plakalar yapıştırılması, mantolama yapılması, betonarme elemanın dış yüzeyine kelepçe veya ek donatı kullanılması ve betonarme eleman eklemesi gibi çeşitli güçlendirme yöntemleri bulunmaktadır.

Bu güçlendirme yöntemlerinde en çok tercih edilen LP/FRP şeritlerin genişliklerini hesaplamak için yapım yöntemlerinde geçen hesap esasları yeterli olmadığı için geçmiş çalışmalara dayanarak şeritlerin genişliği seçilmektedir. Bu motivasyondan hareketle bu çalışmadaki temel amaçlar şu şekilde özetlenebilir;

- LP/FRP ile güçlendirme yöntemini uygulama açısından aralıklı şeritler ile sürekli sargılama şekillerinin arasındaki kiriş kesme dayanımına ve sünekliğine olan etkilerinin incelenmesi,
- Kirişlerin LP/FRP ile güçlendirilmesinde optimum miktarın bulunması,
- Düşük gramajlı (gr/m^2) LP/FRP'nin tasarıma ve davranışa olan etkisinin irdelenmesi,
- Deneysel ve analitik çalışmaların karşılaştırılması ve yönetmeliklerde bulunan marjların tespit edilmesi.

1.2. Kapsam

Kirişlerin güçlendirmesinde kullanılan optimum LP/FRP (çalışmada karbon esaslı güçlendirilmiş polimer kullanıldığı için metnin içinde bundan sonra CFRP olarak anılacaktır) miktarını belirlemek için $\frac{1}{2}$ geometrik ölçekli kiriş numunelerine farklı CFRP şerit genişliği w_f ve şerit aralığı s_f ile güçlendirme uygulanmıştır. Kirişlerin hepsi özdeş olarak üretilmiş ve etriye aralığı 35 cm olarak seçilmiştir. Çalışmada 1 adet referans (bare, güçlendirilmemiş) numune ve farklı CFRP miktarlarına sahip 7 güçlendirilmiş numune olmak üzere toplamda ise 8 kiriş numunesi üretilmiş ve test edilmiştir. Üretilen kiriş numuneler düşey yükleme hücresinde eğilme-kesme deneyine tabi tutulmuş ve yük-deplasman grafiği, rijitlik, süneklik ve tüketilen enerji kapasitesi değerleri elde edilmiştir. Daha sonra, analitik bölümünde deneysel çalışma sonuçları ACI 440.2R-17 (2008), FIB-2001(2001) ve TBDY-2018(2018) yönetmeliklerine göre hesap edilerek karşılaştırılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu yüksek lisans çalışmasında kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan CFRP güçlendirme yöntemini kullanarak CFRP optimum miktarını araştırılmıştır. Dolayısıyla, literatürde geçen betonarme kirişlerin onarım/güçlendirilmesinde kullanılan farklı FRP yöntemleri ile ilgili geçmiş çalışmaları incelemek son derece önemlidir. Bu bölümde, betonarme kirişleri güçlendirmesinde kullanılan farklı lifli polimerler yöntemlerine ilişkin güncel bazı çalışma sunulmuştur.

Karzad ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada, dıştan yapıştırılmış karbon lifli polimer CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerinin davranışı üzerine devam eden bir araştırmayı ele almıştır. Daha önce kesme hasarına maruz kalmış toplam 5 dikdörtgen kiriş CFRP ile onarılıp güçlendirilmiş ve test edilmiştir. Hasar görmüş kirişlerin büyük çatlakları epoksi ile enjekte edilmiş, kirişler 100 mm genişlik ve 150 mm merkezden merkezi açıklığa CFRP şeritleri ile 2 kat sarılmıştır. Kirişler, üç noktalı yük altında kırılma testi yapılmak için tasarlanmıştır. Ölçülen deney parametreleri kirişlerde eğilme, taşıma kapasitesi, FRP şeritlerindeki gerilme ve kırılma şeklini gözlemlenmiştir. Sonuçlar, CFRP şeritleri uygulamasının kirişin referans kesme kapasitesine göre kesme dayanımını önemli ölçüde arttırdığını göstermiştir. Ayrıca, bu çalışmada kullanılan CFRP şeritlerinin uygulanmasının, hasarlı kirişleri onarmak ve güçlendirmek için kullanılabilir, etkili bir onarım yöntemi olduğu görülmüştür.

Osman ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada, açıklıklarında hasar görmüş betonarme kirişlerini etkili bir şekilde güçlendiren AFRP (Aramid esaslı güçlendirilmiş polimer) şeritlerinin onarım tekniğini araştırılmıştır. Taşıma yükünün neden olduğu hasarı araştırmak ve yapı davranışını analiz etmek için kapsamlı bir deneysel çalışma yapılmıştır. Referans olarak iki güçlendirilmemiş kiriş, AFRP şeritlerin uygulanmasından önce hasar görmüş dört kiriş ve ön hasarı olmadan güçlendirilmiş bir kiriş test edilmiştir. İlk olarak kirişlere hasar verilmiş, ardından belirli yerlerde AFRP şeritleriyle güçlendirilmiş ve yüklenmiştir. Sonuçlara göre; FRP güçlendirme yönteminin etkinliğinin önceden var olan hasar derecesi ve kırılma durumu üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Tüm güçlendirilmiş kirişlerde %21,8'den %66,4'e kadar taşıma kapasitesi arttırılmıştır. Çatlak genişliği kontrol kirişine kıyasla kırılma yükünde %25.6 - %82.7 azalmıştır. Son olarak, ACI 440.2R-08 yöntemini kullanarak deneysel sonuçlar ile beklenen sonuçlar arasında bir karşılaştırma yapılmıştır.

Huo ve ark. (2018), yaptıkları çalışmada, CFRP güçlendirme düzenlemelerinin, CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kritik yükü altında kırılma mekanizmaları üzerindeki etki ve CFRP kesme dayanımı katkısının etkilerini deneysel olarak incelenmiştir. Statik yükler altında 5 kiriş ve ani yükleri altında 10 kiriş test edilmiştir. Uygulanan yükler altında CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin kırılma şeklini ve kesme dayanımı elde edilmiştir. Kırılma işlemi iki aşamaya ayrılmıştır: ani yüklemesi altında açıklık bölüme bitişik kirişlerin yerel kısmının kesmeden dolayı oluşan hasar ve daha sonra yanındaki bölümünün oluşan reaksiyon kuvveti altında kesmeden dolayı oluşan hasardır. Deney sonuçları, CFRP'nin kullanmasının kiriş dinamik davranışında önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Gerilme hızı ve yayılma etkileri göz önüne alındığında, kesme kuvvetine ilk aşamada CFRP katkısı hesaplanmış ve deneysel kesme kuvvetiyle ile doğrulanmıştır. CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin ani yükler altındaki kırılmasını değerlendirmek için kirişlerin dinamik kırılma kriteri önerilmiştir.

Barris ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada, 15 kiriş içeren deneysel bir programın sonuçlarına dayalı olarak GFRP (Cam (Glass) esaslı lifli polimer) ile güçlendirilmiş betonarme elemanlarının çatlama davranışı araştırılmıştır. Çalışmada, donatı malzemesi, σ/ρ_{eff} oranı, paspayının, etriye aralığı ve beton ile donatı arasındaki bağın etkisi incelenmiştir. İki farklı GFRP tipi ve çelik çubuk kullanılmıştır. Eğilme bölgesindeki çatlama davranışı (çatlak genişliği ve aralığı) kırılma noktasına kadar analiz edilmiştir. Çatlak genişliği, dijital görüntü korelasyon tekniği kullanılarak elde edilmiştir. Eğilme bölgesinin 2 doğrultuda yer değiştirmeleri, 4 dijital kamera ve örnek çatlaklarının analiz edilmesini sağlayan ticari bir yazılım kullanılarak kaydedilmiştir. Son olarak, bağ katsayıları, çatlak aralığı ve çatlak genişliği bakımından farklı formülasyonlara ayarlanmıştır.

Young Lee ve ark. (2017), yaptıkları çalışmada, ön gerilmeli CFRP yöntemi ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin etkinliği araştırmıştır. 8 betonarme kiriş 4 nokta yükleme testi altında test edilmiştir. Referans olarak güçlendirilmemiş bir kiriş kullanılmıştır. 3 kiriş ve ön gerilmeli 4 kiriş CFRP ile güçlendirilmiştir. Test sonuçları, öngerilmeli betonarme kiriş güçlendirmesinin, kiriş eğilme dayanımını referans kirişine kıyasla arttırdığını göstermiştir. Ön gerilmeli olmayan kiriş kırılması, çelik akımı ve kritik yükler için kiriş performansında en iyi davranış sağlamıştır. Ön gerilmeli olmayan kirişlerinin deney sonuçları, önerilen modeli doğrulamak için sonlu elemanlar analizi

(FEA) modeliyle karşılaştırılmıştır. Güçlendirilmiş kiriş uzunluğu ve öngerilme kuvveti, önerilen sayısal modelde güçlendirme performansının etkilerini analiz etmek için parametreler olarak kullanılmıştır.

Capozucca ve Magagnini (2018) yapmış oldukları deneysel çalışmada, hasarlı ve hasarsız durumlardaki basit mesnetli ve ölçekli kirişlerin serbest titreşim altındaki dinamik karakteristikleri incelemiştir. Kirişlere hasarlar çentik şeklinde verilmiş ve daha sonra CFRP levha kullanılarak güçlendirilmesi yapılmıştır. Kiriş malzemesi olarak mermer kullanılmıştır. Söz konusu kirişler, mafsallı uçlu olarak mesnetlenmiş ve farklı hasar durumları elde edilecek şekilde yükleme işlemi yapılmıştır. Daha sonra her bir hasar durumu için ayrı ayrı dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Her bir hasar şekline karşılık gelen doğal frekansları belirlemek için deneysel dinamik analiz yönteminin yanı sıra, sonlu elemanlar programı kullanılmış ve “Euler-Bernoulli uniform beam” yaklaşımı uygulanmıştır. Elde edilen bulgular karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Karşılaştırma sonucunda, sonlu elemanlar modeli ve teorik hesaplamaların yapılan deneysel yöntemle farklılıklar gösterdiği belirlenmiş ve bu farklılıkların yapılan mesnet modelinden kaynaklandığı öne çıkarılmıştır. Yapılan çalışmada, artan hasar durumlarında doğal frekans değerlerinin azaldığını dinamik test yoluyla belirlenebildiği, hasarlı ve güçlendirilmiş kirişlerin göçme mekanizmasında kirişlerin basınç bölgesindeki çentiklerin etkili olduğu gibi yeni sonuçlar elde edilmiştir.

Li ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, deneysel ve sayısal yöntemler temelinde CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin yorulma çatlak yayılma denklemi önermişlerdir. Güçlendirilmiş betonarme kirişlerin çatlak yayılma hızını elde etmek için yüklenmeden dolayı oluşan çatlak yayılma deneyleri yapılmıştır. Çatlak düzenini yakalamak için dijital görüntü korelasyon (DIC) yöntemi kullanılmıştır. Karbon fiber takviyeli polimer ile güçlendirilmiş betonarme kirişin sonlu eleman modeli, malzeme davranışı doğrusal olmaması ve tekrarlı yükleme altında malzeme özelliklerinin bozulması dikkate alınarak ana çatlakın J-integralini belirlemek için kurulmuştur. J-integral parametresiyle Paris kuralı yükleme testleri ve sonlu elemanlar temel analizleri geliştirilmiştir. Bu kural, betonarme kirişlerin yorulma ömrünü tahmin etmek için uygulanması önerilmiştir.

Faleschini ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, FRP ile güçlendirilmiş 3 betonarme kirişin davranışını karşılaştıran bir deneyin sonuçlarını sunmuşlardır.

Betonarme kirişleri, kesme gerilmesinden dolayı ciddi hasar görmüştür. Daha sonra, hasarlı numuneler FRP ve FRCM (Fabric-Reinforced Cementitious Matrix) güçlendirme yöntemlerini kullanılarak güçlendirilmiş ve numunelere güçlendirmeden önce uygulanan yükler tekrar güçlendirilmiş numunelere uygulanmıştır. Güçlendirilmeden önceki kirişlerin deneysel performansı ile güçlendirme sonrasındaki kirişlerin deneysel performansları arasında karşılaştırma yapılmıştır. Deneysel sonuçlarında; kirişlerin taşıma kapasitesini, dayanıklılığı, sünekliği, tüketilen enerji ve viskozite oranını bulunmuştur. Sonuç olarak; FRP güçlendirme yönteminin, güçlendirilen kirişlerin genel performansındaki olumlu sonuçlarına dayanarak, hasarlı kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılması önerilmiştir.

Alyousef ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada, tekrarlı yüklemeden dolayı kirişlerde oluşan gerilmenin beton ve çelik arasındaki bağlantı üzerindeki etkisini ve FRP güçlendirme şeritlerinin kirişlerde oluşan yorulma etkisini araştırmışlardır. Kirişlerde oluşan yorulma ömrünü hesaplamak için çatlak büyüme modeli geliştirilmiştir. Model sonuçları, yorulma ve tekrarlı yükleme altında test edilen elli üç kirişin deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yüklemin tekrarlama sayısı, lifli polimerler ile güçlendirilen kirişlerin gerçek yorulma ömrünü açıkça etkilemiştir. Hesaplanan ve deneysel yorulma dayanımı eğrileri arasındaki fark %7'yi geçmemiştir.

Obaidat ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, CFRP şeritleri kullanarak kısmen hasarlı betonarme kiriş kolon bağlantılarının güçlendirmesi konusunda bir deney yapılmıştır. Yapılan deney, temel olarak çeşitli güçlendirme yöntemleri ile tekrarlı yükleme altındaki güçlendirilen betonarme kiriş-kolon bağlantılarının davranışını incelemek için yapılmıştır. Güçlendirme verimliliği, dayanıklılık, rijitlik ve kısmen hasar görmüş kiriş-kolon bağlantılarının davranışını araştırmak için 8 numune hazırlanıp ve test edilmiştir. Numuneler, tekrarlı yükleme altında kırılmasına kadar test edilmiş ve belirtilen parametrelerin sonuçları referans numunesi ile karşılaştırılmıştır. Yedi numune beklenen kırılma yükünün yaklaşık %80'i (önyüklem olarak bilinir) olan belirli bir yük seviyesine yüklenmiştir. Daha sonra, çeşitli CFRP şeritleri kullanılarak kirişler güçlendirilmiş ve tekrar test edilmiştir. Ötelenme oranı, rijitlik, süneklik ve maksimum yük değerleri incelenmiştir. Ayrıca, CFRP şeritlerindeki oluşan gerilme ve deney numunelerinin kırılma şekilleri ölçülmüştür. Sonuçlar, güçlendirilen tüm bağlantı düğümlerinin kesme gerilmesinin yanı sıra dayanıklılıkta da iyileşme olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak,

ortaya çıkan güçlendirilmiş bağlantılar, referans numunelere kıyasla önemli ölçüde daha fazla taşıma yükünü artmıştır.

Qin ve Ark. (2017) yaptıkları çalışmada, karma lif takviyeli oranının betonarme kirişlerin hem yetersiz hem de güçlendirilmiş durumlardaki eğilme performansına etkisi üç boyutlu sonlu elemanlar modelleri kullanılarak incelenmiştir. Sonlu eleman modellerinden elde edilen sonuçlar, uygun karma lif takviyeli oranı tasarımıyla tercih edilen dayanım ve süneklik performansı elde edilebileceğini gösterilmiştir. Bu çalışma, uygun bir karma yeniden takviye oranı aralığını belirlenmesine yardımcı olmuş ve dayanım ve süneklik performansını optimize etmek için FRP ile güçlendirilen kirişleri için bir tasarım kılavuzu sunmuştur.

Acır (2017) yaptığı çalışmada, geçmiş çalışmalardan elde edilen FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin ve döşemelerin kesme dayanımı değeri kullanmış ve Gen programlama yöntemi ile betonun ve etriyelerin kesme dayanımına olan katkısı araştırmak için farklı modeller geliştirmiştir. Çalışma esnasında, ACI 440.1R-15, (2015), CSA S806-12, (2012), ISIS M03-07, (2007), JSCE 97, (1997) ve BISE 99, (1999) tarafından önerilen denklemler ve GİP programlama yöntemi aracılığı ile kesme dayanım sonuçları bulunmuş ve deneysel sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca önerilen denklemler aracılığı ile kesme dayanımını etkileyen boyuna donatı oranı, beton basınç dayanımı, kesme açıklığının etkili derinliğine olan oranı ve etriye yüzdesi gibi farklı değişkenlerin kesme dayanımı üzerine olan etkisi ayrıntılı bir şekilde irdelemek amacıyla parametrik çalışmalar yapılmıştır. Önerilen modellerin uygulanabilirliği, farklı parametrik değişkenlerin değiştirilmesine dayalı olarak test edilmiştir. Sonuç olarak, GİP yöntemi ile geliştirilen modellerin sonuçları, diğer yönetmeliklerin hesap sonuçlarına göre deneysel sonuçlarına daha yakın olduğu görülmüştür.

Kaygusuz (2018) yaptığı çalışmada, betonarme kirişlerin yüksek sıcaklığa maruz bırakmış ve FRP ile güçlendirerek davranışını araştırmıştır. Deneysel çalışmada toplam 8 kiriş numune hazırlanmış daha sonra 3 saat boyunca 600°C sıcaklığı veren fırında bırakılmıştır. Üç numune GFRP ile ve 3 numune CFRP ile güçlendirilerek geriye kalan 2 numune referans olarak seçilmiştir. Yüksek sıcaklık hasarına maruz kalan betonarme kirişleri güçlendirildikten sonra eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Her bir numuneye ait yük-deplasman grafiği, tüketilen enerji değeri, rijitliği ve sünekliği elde edilmiştir. Sonuç olarak güçlendirilmeyen ve yüksek sıcaklık hasarına uğrayan kiriş numune, referans

numunesine kıyasla yük taşıma kapasitesi %16, sehim değeri %46, enerji tüketme kapasitesi %61 ve kesme dayanımı %50 oranında azalmıştır. Ayrıca FRP ile güçlendirilen numunelerin yük taşıma kapasitesinde %4-30 oranların arasında arttığını gözlemlenmiştir.

Sarier (2018) yaptığı çalışmada, FRP donatıları içeren yapı elemanlarının davranışlarını araştırmıştır. Farklı GFRP donatı oranına ve farklı beton sınıfına sahip kiriş numuneler hazırlanmıştır. Üretilen numuneler eğilme deneyine tabi tutulmuş ve her bir numuneye ait yük-deplasman grafiği, rijitliği, sünekliği ve enerji tüketme kapasitesi elde edilmiştir. Sonuç olarak, betonun basınç dayanımının eğilme altında test edilen kirişlerin taşıma kapasitesinde önemli bir artış göstermediği görülmüştür. Efektif donatı oranındaki artış, beton dayanımı farklılaştıkça her iki deney grubunda da dayanım değerinde bir artışa neden olmuştur.

Doğru (2019) yaptığı çalışmada, 8 adet numune hazırlamış ve bu numuneleri FRP ile güçlendirerek FRP'nin korozyon ve eğilme üzerindeki etkisi araştırmıştır. Üretilen numuneler korozyon metodu yardımıyla farklı pas oranlarında paslandırılmıştır. Daha sonra kiriş numuneleri, eğilme deneyine tabi tutulmuş ve numunelerin yük taşıma kapasitesi, çatlak genişliği, eğilme etkisi altındaki davranışı, moment eğrilik ilişkisi ve aderans kayma ilişkisi incelenmiştir. Çalışmanın sonraki aşamasında, paslanmış betonarme kirişler FRP ile güçlendirilerek FRP'nin korozyon ve eğilme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deney sonuçları, farklı pas oranlarına sahip betonarme kirişlerin eğilme dayanımlarının karşılaştırılmasına dayalı olarak yapının sismik performans seviyelerinin daha iyi değerlendirilmesine yardımcı olmuştur.

Akyürek (2019) yaptığı çalışmada, GFRP donatıları T_g sıcaklığına göre yangın etkisine karşı performansını beton, paspayı ve sınıf farklılıkları kullanılarak gözlemiştir. GFRP donatıları çeşitli paspayı ve beton sınıfına sahip numunelere uygulanmış ve yaygın etkisini test etmek için güçlendirilen numuneler fırında yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Numunelerin sıcaklık ölçümü için termokupl (Thermocouple) sıcaklık sensörü kullanılmıştır. İstenilen T_g sıcaklığına ulaştığı anda numuneler çıkarılır ve donatı sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve beton sıcaklığı kaydedilmiştir. Elde edilen veriler grafiğe dökülmüş ve karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, numunelerin T_g sıcaklığına ulaşmasına kadar geçen süre tespit edilerek kritik zaman belirlenmiştir. 6 cm'lik paspayına sahip olan

numune en iyi performansı göstermiştir. Ayrıca, beton sınıfına bağlı olan numuneler biri olarak C40 beton sınıfı en iyi performans göstermiştir.

Gökçen (2019) yaptığı çalışmada, karmaşık sistemlerin modellenmesinde kullanılan bir bilgisayar yardımıyla FRP ile güçlendirilmiş numuneleri sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz edilmiştir. Geçmiş çalışmalarda geçen FRP ile güçlendirilen numunelerin deneysel sonuçları kullanılmış ve sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş ve analiz edilmiştir. Deney sonuçları elde edilen analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Betonarme yük taşıma kapasitesinin, süneklik oranının ve FRP kompozit malzemenin birim şekil değiştirmesinin bağlı olduğu parametreler belirlenmiştir.

Oruç (2019) yaptığı çalışmada, kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin CFRP ile güçlendirmiş ve kirişlerin gösterdiği performans ve dinamik özelliklerini araştırmıştır. Bu amaçla, ikisi kontrol, dördü test elemanı olmak üzere toplam altı betonarme kiriş test edilmiştir. Çalışma, yarı statik yükleme ve dinamik ölçüm olarak iki aşamada gerçekleştirildi. Güçlendirilen numunelerin CFRP şerit aralığı s_f değerleri 50 mm, 100 mm, 150 mm ve 200 mm olarak kullanılmıştır. Deneysel çalışmanın sonuçlarına göre, CFRP'nin s_f değeri kirişin davranışı ve dinamik özelliklerine etkilediğini tespit edilmiştir. CFRP ile güçlendirme tekniği betonarme kirişlerin kesme dayanımını ve süneklik oranını artırmıştır. Ayrıca, s_f değeri azaldıkça kiriş numunelerin dinamik özellikleri üzerinde olumlu etkisi olduğunu görülmüştür.

Boumaaza ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada, 4 noktadan bükülmeye maruz betonarme derin kirişlerin onarımına odaklanmaktadır. Farklı seviyelerde yüklendikten sonra kirişler, GFRP ile takviye edilmiş bir epoksi reçineden yapılmış bir kompozit malzemenin bağlanmasıyla onarılır. Bu çalışmanın temel amacı, yazarlar tarafından geliştirilen ve kayma kuvveti nedeniyle ani kırılmaları önlemek için çatlakların kritik bölgelerde bantlanmasıyla oluşan yeni bir yöntemin ustalığına katkıda bulunmaktadır. Bu yeni teknik, geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, özellikle kirişlerin bantlar veya U şekilli kompozit malzemeler tarafından onarılması durumunda mekanik özellikler açısından daha iyi sonuçlara yol açmıştır. Çalışmada fizibilite, performans ve kirişlerin davranışı incelenmiştir. Sonuç olarak bu yöntemin kullanılmasında yük taşıma gücü ve yer değiştirme sırasıyla 7.1% ve 26% arttırmak mümkündür.

Alam ve ark. (2018) yaptıkları bu deneysel çalışmada, betonarme kirişin kaymaya karşı güçlendirilmesinde olası uygulama için yüksek dayanımlı doğal elyaf bazlı kompozit plakalar geliştirilmiştir. Plakalar, işlenmiş ve işlenmemiş koşullarda kenaf ve jüt malzemelerinden geliştirilen elyafları kullanılarak imal edilmiştir. Yapısal davranışı araştırmak için toplam 8 kiriş numunesi hazırlamışlar. Kirişler muamele edilmiş ve işlenmemiş doğal elyaf kompozit plakalar ve referans kiriş dahil, CFRP şeritler kullanılarak kesilerek güçlendirilmiştir. Çalışmanın sonucunda kirişlerin kırılma yükü, sünekliği ve çatlak düzenleri karşılaştırarak işlenmemiş kenaf, jüt ve jüt donatı kompozit plakaları ile kaymaya karşı güçlendirilmiş kirişler, referans kirişine kıyasla sırasıyla %35, %36 ve %34 daha yüksek dayanım tespit edilmiştir. Doğal elyaf kompozit plakalarla güçlendirilmiş kirişler, CFRP şeritlere kıyasla daha yüksek süneklik ve daha yüksek dayanım gösterilmiştir.

Aksoylu ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada CFRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin eğilme davranışlarını araştırmıştır. Önhasarlı uçlu prefabrik toplam 5 T kesitli kiriş numunesi üretilmiş ve farklı CFRP ile güçlendirilme yöntemi kullanılarak eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak, yarım sargılı %49 ve tam sargılı %60 kesme dayanımında artış gözlemlenmiştir. Ek olarak, yarım sargılı numuneler, tam sargılı numunelere göre daha sünek davranış göstermiştir.

Mofidi (2018) yaptığı çalışmada, T tipi toplam 12 kiriş hazırlamış ve test etmiştir. Kiriş numunelerin CFRP şeritleri ile kesme dayanımını güçlendirerek etriye katkısı, CFRP şerit katkısı ve CFRP şerit rijitliği araştırılmıştır. Bu çalışmanın analitik bölümünde, FRP'nin kesme katkısı üzerindeki diğer etkili parametrelere ek olarak etriye etkisini dikkate almak için yeni tasarım denklemleri önerilmiştir. Bu çalışmada önerilen denklemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar, deneysel olarak bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır.

Siddika ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada, CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin yük-deplasman davranışı beş farklı güçlendirme yöntemi ve iki farklı yüzey işleme türü ile deneysel olarak araştırılmıştır. Sonuçlara göre, referans kirişine kıyasla, CFRP ile güçlendirilmiş kirişler, CFRP'nin sağladığı rijitliği, sünekliği ve yük taşıma kapasitesi açısından önemli ölçüde güçlendirildiği tespit edilmiştir. Beş güçlendirme yöntemi arasında, sürekli U-sargı güçlendirme yöntemi etkili olduğu görülmüştür. Güçlendirilmiş kirişlerin kırılma şekli, büyük ölçüde güçlendirmenin yük taşıma

kapasitesini etkileyen güçlendirme yöntemi ve kullanılan etriye bağlı olduğunu tespit edilmiştir. Deney sonuçları, ACI 440.2R-17 yöntemini kullanarak teori sonuçları ile karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir.

Moradi ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada, FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin kesme dayanımını arttırmak için yeni bir güçlendirme yöntemini araştırmışlardır. Kiriş numuneleri, FRP şeritleri yapıştırılması yerine, kiriş uzunluğu boyunca delikler açılmış ve FRP ile ankraj edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, önerilen güçlendirme yöntemleri, kiriş numunelerin dış yüzeyine yapıştırılan FRP şeritlerin güçlendirme yöntemi ile karşılaştırılarak kesme dayanımı açısından benzer veya daha iyi performans göstermiştir.

Alshlash (2019) yaptığı çalışmada, farklı güçlendirme yöntemlerini kullanarak kiriş numunelerin eğilme ve kesme dayanımını araştırmıştır. 2 adet referans numune, kesme dayanımı güçlendirilmesi için 9 adet numune ve eğilme dayanımı güçlendirilmesi için 9 adet numune toplam 20 adet kiriş numune hazırlanmış ve ön hasar verilerek CFRP, çelik plaka ve mekanik bağlayıcılar ile güçlendirme işlemini gerçekleştirilmiştir. Kesme dayanımı açısından güçlendirilen numunelere referans numunesinin yük taşıma kapasitesine göre %50, %65 ve %85 seviyelerine kadar ön hasar uygulanarak farklı güçlendirme tekniği kullanılmış ve test edilmiştir. Eğilme dayanımı açısından güçlendirilen numunelere referans numunesinin maksimum deplasman değerine göre %1, %2 ve %3 deplasman hasar seviyelerine kadar yüklenerek farklı güçlendirme tekniği kullanılmış ve test edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, maliyet analizine dayanarak mekanik bağlayıcılar yöntemi en etkili güçlendirme yöntemi olduğu görülmüştür.

Bu bölümde sunulan geçmiş çalışmaları daha iyi anlayabilmek için bu çalışmalar, kullanılan kiriş geometri ve tipi, güçlendirme yöntemi, FRP tipi ve güçlendirilme şekline göre Tablo 2.1'de sıralanmıştır.

Literatürde geçen çalışmalar ışığında, kiriş güçlendirilmesinde kullanılan optimum lifli polimerler miktarı ile ilgili araştırmalar çok azdır. Ayrıca, çoğu çalışmada, ısı ve pas gibi birçok faktör kullanılarak kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan FRP güçlendirme yöntemlerinin etkinliğini araştırılmıştır. Bu nedenle, bu çalışmada betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan optimum lifli polimerler miktarı araştırılmıştır. Yanı sıra CFRP malzemesinin üzerine yapılan çok sayıda çalışma

ve betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılması nedeniyle bu çalışmada kirişlerin güçlendirilmesinde CFRP malzemesi kullanılmıştır.

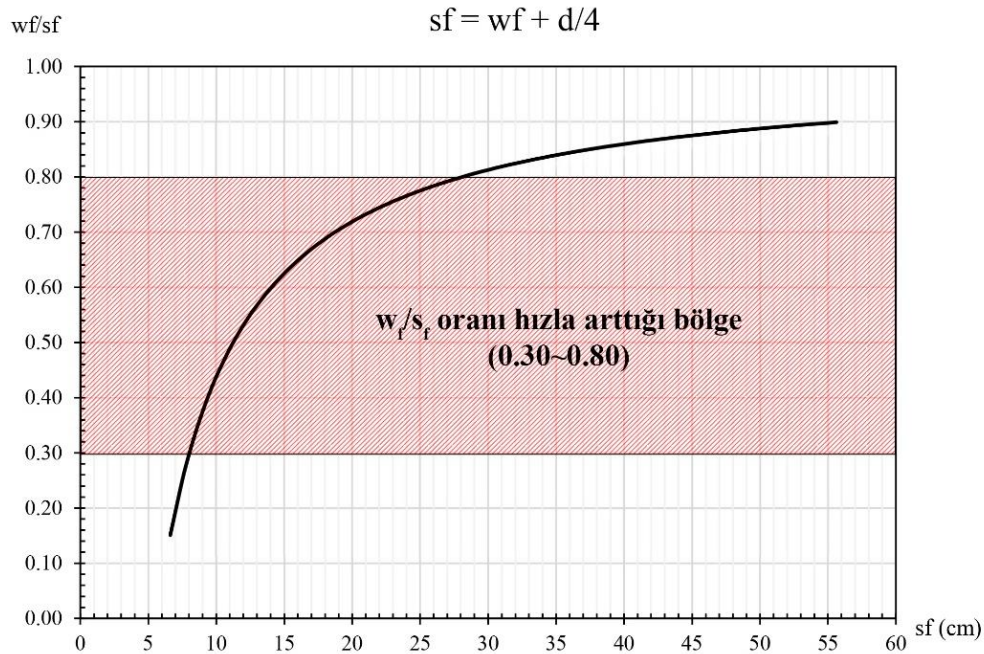


Tablo 2.1. Literatür taramasındaki geçmiş çalışmaların detayları

Yazarlar	Yıl	Özellikler ve Parametreler																				
		NS	Geometri ve Kiriş tipi						Güçlendirme yöntemi				FRP tipi			Güçlendirme şekli						
			D	T	L <2m	2m<L<4 m	L>4m	(a/d>2.5)	PC	BG	E	K	C	A	G	2	U	F	CO	ST	$\alpha=90^{\circ}$	$\alpha\neq90^{\circ}$
Mofidi, A.	2014	20																				
Karzad, ve ark.	2017	5																				
Osman, ve ark.	2017	7																				
Young Lee ve ark.	2017	8																				
Barris ve ark.	2017	15																				
Huo ve ark.	2018	15																				
Oruç, R.	2019	6																				
Siddika ve ark.	2019	6																				
Salah ALSHLASH	2019	20																				
Moradi ve ark.	2020	8																				
Capozucca ve Magagnini	2018	4														CFRP ankrajları ile güçlendirme						
Li, Dongyang, ve ark.	2019	14														Eğilme açıklığında CFRP şeridi ile güçlendirme						
Faleschini ve ark.	2019	3																				
Alyousef ve ark.	2018	9														Kirişin alt yüzeyi						
Obaidat ve ark.	2019	8	Kiriş-kolon bağlantı bölgesi													x ve tekli şeritler						

3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, yükseklikleri 250 mm ve genişlikleri 125 mm olan $\frac{1}{2}$ ölçekli betonarme esme dayanımı yetersiz olan kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan karbon lifli polimer şeritlerin birim boydaki genişliği $\frac{w_f}{s_f}$ oranını teori ve deneysel olarak iki yönden araştırılmıştır. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018 (TBDY-2018)'e göre süreksiz CFRP şeritler halinde kullanıldığında lifli polimer şerit aralığı s_f , $(w_f + d/4)$ değerini geçmemelidir. Sargılamanın sürekli yapılması durumunda, $w_f = s_f$ olarak alınmaktadır. Bundan yola çıkarak, süreksiz CFRP şeritler kullanıldığında maksimum s_f değeri $= w_f + d/4$ olarak, $\frac{w_f}{s_f}$ oranı $= w_f / (w_f + d/4)$ olarak kabul edilebilir. Deneysel olarak kullanılmış faydalı yüksekliği (pas payının 2.5 cm olmasından dolayı) $d=22.5$ cm $(\frac{w_f}{s_f} - s_f)$ eğrisi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. CFRP şeritlerin $\frac{w_f}{s_f} - s_f$ eğrisi

$(\frac{w_f}{s_f} - s_f)$ grafiğe göre w_f / s_f oranı, (0.30-0.80) değerlerin arasında hızla arttığını ve daha sonra gittikçe büyük farklılık göstermediğini anlaşılmaktadır. Onun için deney numuneleri tasarlandığında 1 adet referans numune, (0.30-0.80) değerlerin arasında farklı $\frac{w_f}{s_f}$ oranlarına sahip 6 adet ve bir adet CFRP şeridiyle tam sarılacak ($w_f = s_f$) şeklinde

olmak üzere toplam 8 adet numune hazırlanmıştır. Kirişlerin imalatında varsayılan kabuller aşağıda verilmiştir.

1. Beton dayanımı: Türkiye Bina Deprem yönetmeliği 2018 (TBDY-2018)'inde geçen kıstaslara göre beton dayanımı 25 MPa'den az olmamalıdır. Bunun için numunelerde kullanılan beton sınıfı C25 olarak seçilmesi hedeflenmiştir. Burada özellikle mevcut yapılar düşünülerek beton sınıfının daha da düşük (10 MPa civarı) seçilebilecekken, bu tez çalışmasında sadece lifli polimer oranı bir parametre olarak düşünülmüştür.
2. Donatıları: Etriye donatısı kirişin kesme dayanımı yetersiz olabilmesi için etriye aralıkları bütün numuneler için 35 cm olarak ve etriye çapı numune boyutlarını göz önüne alarak 5 mm olarak seçilmiştir. Boyuna donatısı ise kirişlerin sünek kırılma davranışı gösterebilmesi için dengeli donatı oranı ($\rho_b=0.0209$)'dan küçük olarak tasarlanmış ve donatı tipi B420c olarak seçilmiştir. Burada boyuna donatı oranı daha da yükseltilerek dengeli kırılma sınırına çıkarılabilir ve sadece kesme açısından numuneler incelenebilirdi fakat tez kapsamında gevrek davranıştan sünek davranışa geçişin hangi CFRP oranında olacağı merak edildiği için donatı oranı düşük seçilmiştir.
3. Etriye kancaları: Ülkemizdeki mevcut yapılardaki bir kiriş olarak düşünülmesi ve enine donatıların kancaları henüz 135° olarak kullanılması nedeniyle bu çalışmada etriye donatıların kancaları 90 ° olarak kullanılmıştır.
4. Kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin göçme davranışını etkileyen en önemli faktörlerden biri a_v/d oranıdır. (a_v : kesme açıklığı, d : faydalı yükseklik) (Aksoylu ve ark. (2020, 2021)). Literatüre göre kirişlerde kesme hasarını gözlemek için a_v/d oranı 3 olarak seçilmiştir.

Yukarıdaki dört maddeden görüleceği üzere kirişin sadece kesme donatısı oldukça yetersiz seçilmiş, diğer parametreler ise günümüz koşullarına göre değerlendirilmiştir. Dolayısıyla çalışmadaki temel odak noktası “kesme donatısı yetersiz” betonarme kirişlerin güçlendirilmesini oluşturmaktadır.

3.1. Deney Numuneleri ve Yükleme Hücresi

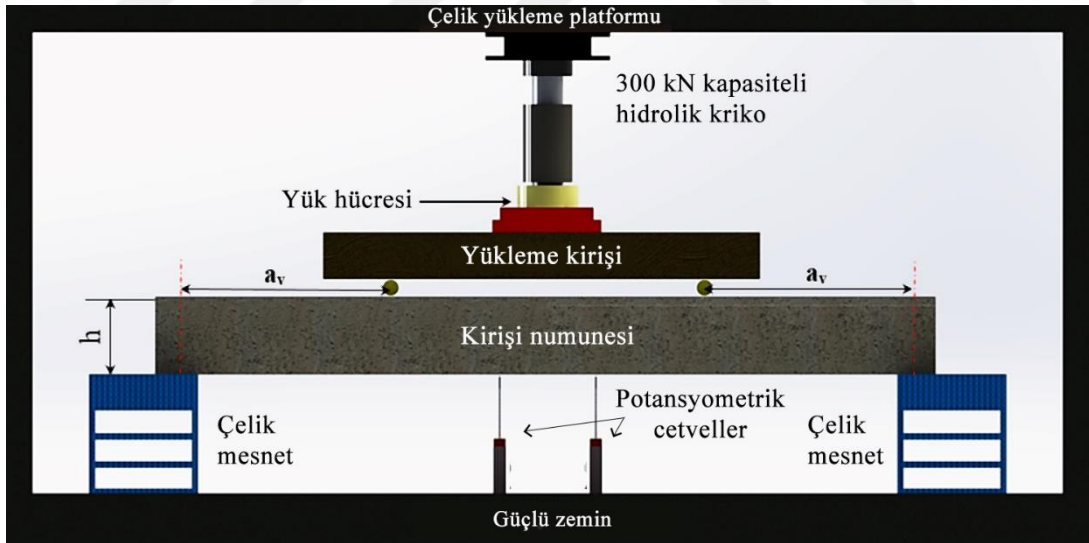
Bu çalışmanın deneyleri Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup deney numunelerin boyutları laboratuvardaki

cihazlarının kapasitelerine göre tasarlanmıştır. Hazırlanan numuneler Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Deney numuneleri

Numuneleri yüklenmek için 300 kN kapasitesine kadar yük verebilen dört noktalı yükleme düzeneğinde yerleştirilmiştir. Deneylerde düşey yükleri ölçebilmesi için yük ölçer (Loadcell) ve yerdeğiştirmeleri ölçebilmesi için potansiyometrik cetveller (LVDT) kullanılmıştır. Numunelerin yük taşıma kapasiteleri ve yerdeğiştirme okumaları kayıt altına alabilmek için 8 kanallı veri okuma sistemi ile bilgisayar kullanılmıştır. Yükleme düzeneği Şekil 3.3’te gösterilmiştir.

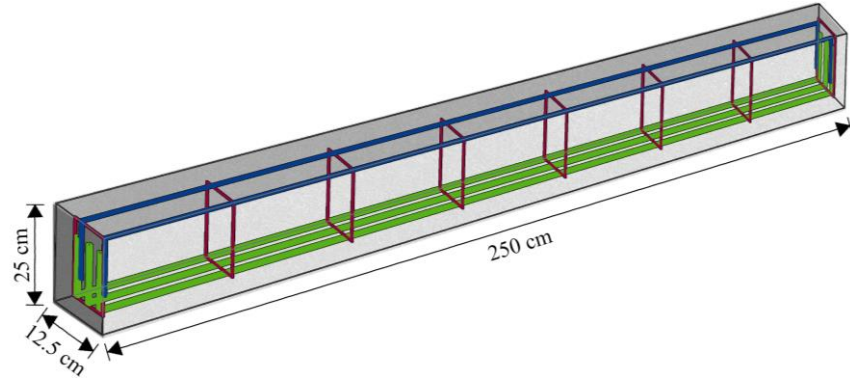


Şekil 3.3. Yükleme düzeneđi

3.2. Numunelerin Boyutları

Bütün kiriş numunelerin boyutları ve donatıları aynı olacak şekilde tasarlanmıştır. Numuneler ½ ölçekli olarak tasarlanmıştır. Kirişlerin uzunlukları 2500 mm, yükseklikleri 250 mm ve genişlikleri 125 mm’dir. Kiriş numunelerin boyutları Şekil 3.4’te

gösterilmiştir. Tekil yükün denk geldiği bölgelerde lokal etriyeler yapılmamış bir önlem alınmamıştır.



Şekil 3.4. Kiriş numune boyutları

3.3. Deney Numunelerinin Malzeme Özellikleri

Deney numunelere farklı CFRP şerit genişlikleri yapıştırarak bulunan sonuçları doğru bir şekilde incelenebilmesi ve karşılaştırılabilmesi için deney numuneleri üretilmesinde mekanik özellikleri ve deney koşulları aynı olması gerekmektedir.

3.3.1. Beton

Deney numunelerin imalatında kullanılan beton özellikleri aynı olabilmesi için beton laboratuvar ortamında hazırlanmamıştır. Onun için yöresel bir hazır beton tesisinden (Konya Çimento A.Ş.) C25 beton sipariş edilmiştir. Betonda kullanılan agrega çapı kalıp ölçülerine uygun olacak şekilde 14 mm'yi geçmemektedir. Betonun kalıp içine iyi yerleşebilmesi için SİKA akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Sipariş edilen betonun 28 günlük 150/300 mm silindir basınç dayanımı 291.3 kg/cm^2 (29.1 MPa) olarak bulunmuştur. Silindir yarma deneylerinden ise yarmada çekme dayanımı 12.8 kg/cm^2 (1.3 MPa) olarak tespit edilmiştir. Şekil 3.5'te beton dökme aşaması ve Şekil 3.6'te silindir numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Beton dökme aşaması

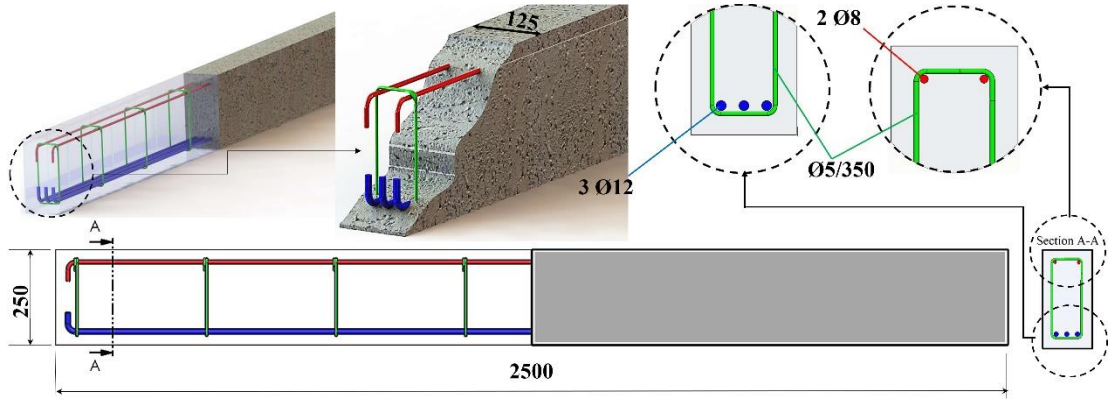


Şekil 3.6. Silindir numuneleri

3.3.2. Donatı

Çalışmada ele alınan kirişlerin kesme kapasitelerinin yetersiz olması istendiği için sadece etriye aralıkları yönetmeliğe göre oldukça fazla seçilerek bu durum sağlanmıştır. Çalışmada imal edilen kirişlerde etriye aralığı 35 cm etriye çapı ise 5 mm olarak seçilmiştir. Ülkemizdeki mevcut yapılardaki bir kiriş olarak düşünülmesi ve enine donatıların kancaları henüz 90 ° olarak kullanılması nedeniyle bu çalışmada etriye donatıların kancaları 90° olarak kullanılmıştır. Kirişlerin sünek kırılma davranışını göstermek için boyuna donatı dengeli donatı oranından ($\rho_l < \rho_b = 0.0209$) daha az olacak şekilde tasarlanmış ve donatı tipi B420c olarak seçilmiştir. Kirişin çekme bölgesinde deneysel akma dayanımı ortalaması 425 MPa olan 3 adet 12 mm çapında boyuna donatı,

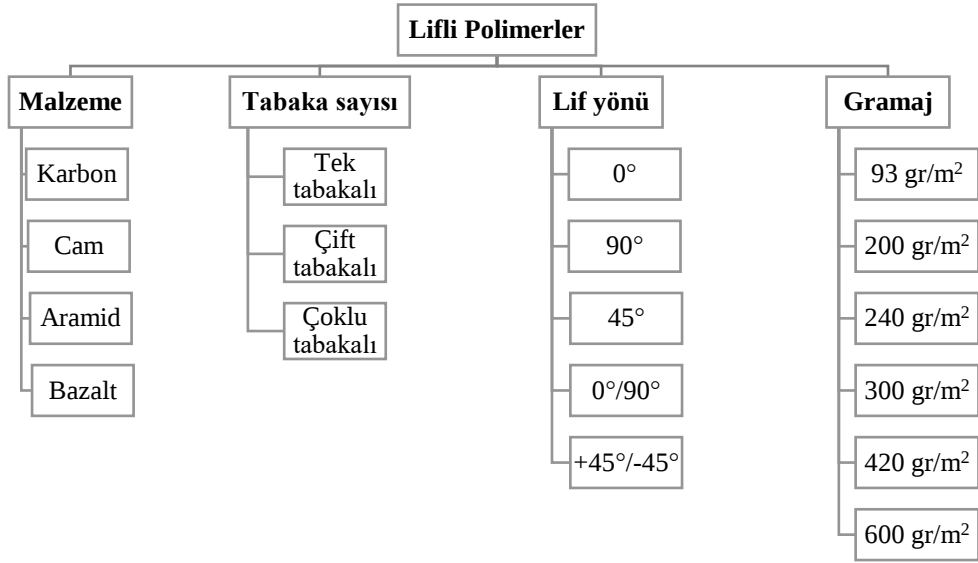
basınç bölgesinde ise deneysel akma dayanımı ortalaması 426 MPa olan 2 adet 8 mm çapında boyuna donatı kullanılmıştır. Numune donatı çizimi Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



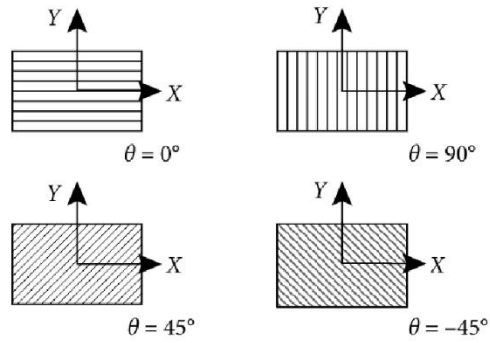
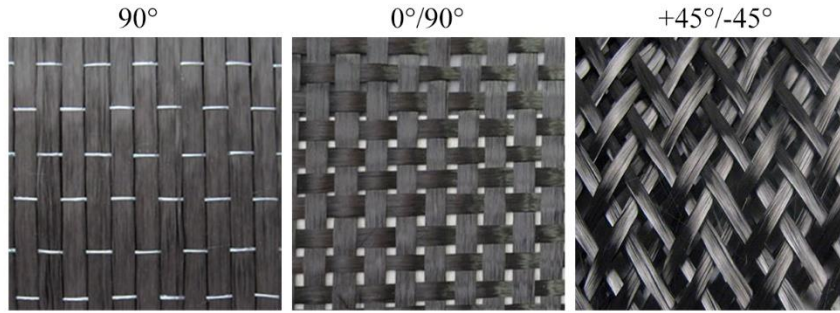
Şekil 3.7. Donatı kafesleri

3.3.3. Karbon lifli polimer

Bu çalışmada $0^\circ/90^\circ$ konfigürasyonunda iki eksenli tek tabakalı 240 gr/m^2 karbon elyaf kumaş kullanılarak kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişler tam sargılama uygulaması ile güçlendirilmiştir. Yapı elemanlarının güçlendirilmesi için farklı malzemeler kullanılarak veya farklı teknikler uygulanarak güçlendirme yapılmaktadır. Özellikle kesme ve eğilme etkisine maruz kalan yapı elemanlarının güçlendirilmesi için CFRP kullanımı oldukça yaygındır. Onun nedeni ise CFRP'nin çok yüksek mukavemetli ve hafif bir malzeme olmasıdır. Lifli Polimerlerin malzemesi, tabaka sayısı, lif yönü ve gramajına göre farklı şekillerde bulunmaktadır. Şekil 3.8’de Lifli polimerler türleri gösterilmiştir. Lifli polimerlerin lif yönü Şekil 3.9’da açıklanmıştır. Her bir güçlendirme numunesinin hazırlanışı Şekil 3.10’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Lifli polimerler türleri



Şekil 3.9. Lifli polimerlerin lif yönü



Şekil 3.10. Kiriş numunelere CFRP şeritlerini uygulama aşaması

CFRP ile güçlendirmede 240 gr/m^2 kumaşın tercih edilme sebebi beton üzerine daha kolay uygulanabilir ve daha az maliyetli olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sayede literatürde yaygın olarak tercih edilen 300 gr/m^2 , 420 gr/m^2 ve 600 gr/m^2 karbon elyaf kumaş yerine daha hafif olanı tercih edilerek deneyler gerçekleştirilmiştir.

3.4. Deney Elemanlarının Üretilmesi

Kirişlerin boyutları gerçek imalatla kullanılan kirişlere yakın olacak şekilde seçilmiştir. Bu kirişlerin kesme dayanımı açısından güçlendirilmesi için tüm kirişlerin kesme dayanımı yetersiz olacak şekilde tasarlanmıştır. Üretim sürecinde tüm numunelerin aynı özelliklere sahip olmasına ve olabildiğince özdeş olmasına özen gösterilmiştir.

3.4.1. Kalıpların hazırlanması

Deney elemanların hazırlanmasının ilk aşamasında tasarlanan beton kirişin ölçülerine göre 8 farklı hazır ahşap kalıp sipariş edilmiştir. Ahşap kalıpların kullanılmasının nedeni üretimi hızlı ve ucuz olmalarıdır. Ahşap kalıplarda beton döküldükten sonra sökölme işlemini kolaylaştırmak için özel bir yağ alınmıştır. Numunelerin hazır kalıpları Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Kiriş numunelerin hazır kalıpları

3.4.2. Donatıların hazırlanması

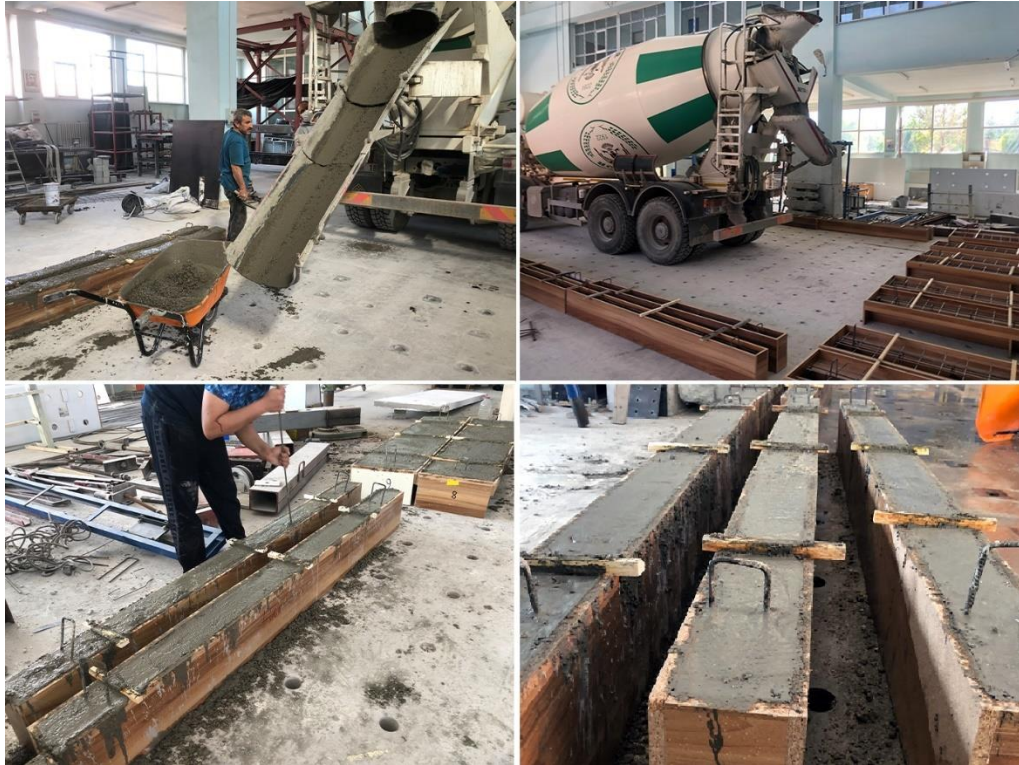
Kiriş numunelerinin tasarımının ardından üretime başlanmıştır. Üretim öncesi tasarımda kirişin güç tükenmesine ilk olarak kesmeden ulaşmasını sağlayabilmek için etriye aralığı, çapı ve kullanılacak boyuna donatıların miktarları tespit edilmiştir. İlk olarak, kirişlerde kullanılacak çekme, basınç ve etriye donatıları sipariş edilmiştir. Daha sonra istenilen kiriş tasarımına göre tüm kirişlerin donatı kafesleri aynı olacak şekilde donatı kafesleri hazırlanmıştır. 90° kancalı $\Phi 5/35$ etriyeler çekme bölgesinde akma dayanımı ortalaması 425 MPa olan 3 adet 12 mm çapında boyuna donatı ve basınç bölgesinde ise deneysel akma dayanımı ortalaması 426 MPa olan 2 adet 8 mm çapında boyuna donatı ile birleştirilerek kafesler hazırlanmıştır. Şekil 3.12’de donatı kafesleri hazırlama aşaması gösterilmiştir. Tüm donatı kafesler hazırlandıktan sonra ahşap kalıplara konulmuş ve 2.5 cm plastik pas payları takılmıştır.



Şekil 3.12. Donatı kafesini hazırlama aşaması

3.4.3. Beton dökümü

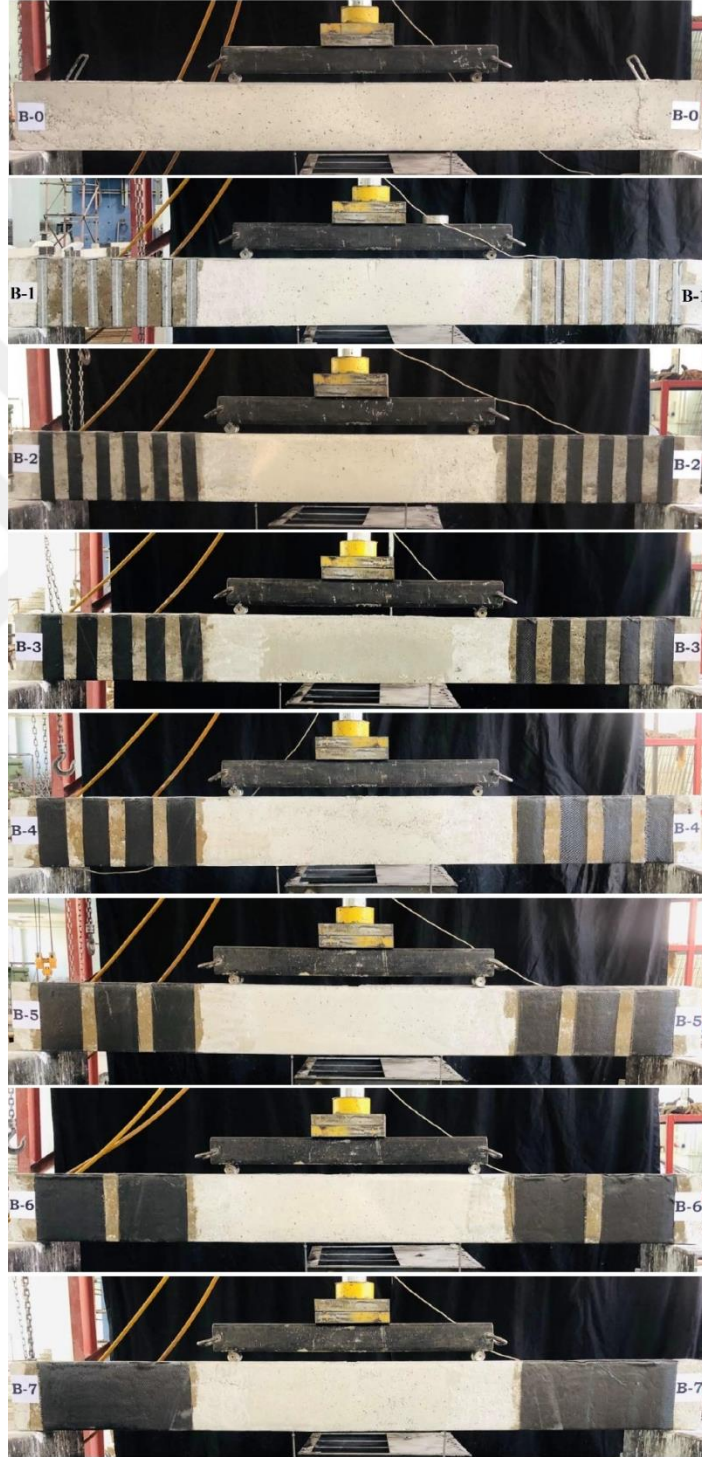
Beton dökme işlemi gerçekleştirilmeden önce ahşap kalıpların yağlanması, donatı kafeslerinin doğru bir şekilde konulması ve plastik pas paylarının takılması kontrol edilmiştir. Beton dökme işlemi sırasında ahşap kalıp içerisine dökülen betonun homojen bir şekilde yayılması için çelik çubuk kullanılarak sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Şekil 3.13’de ahşap kalıplara beton dökme işlemi gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Ahşap kalıplara beton dökme aşaması

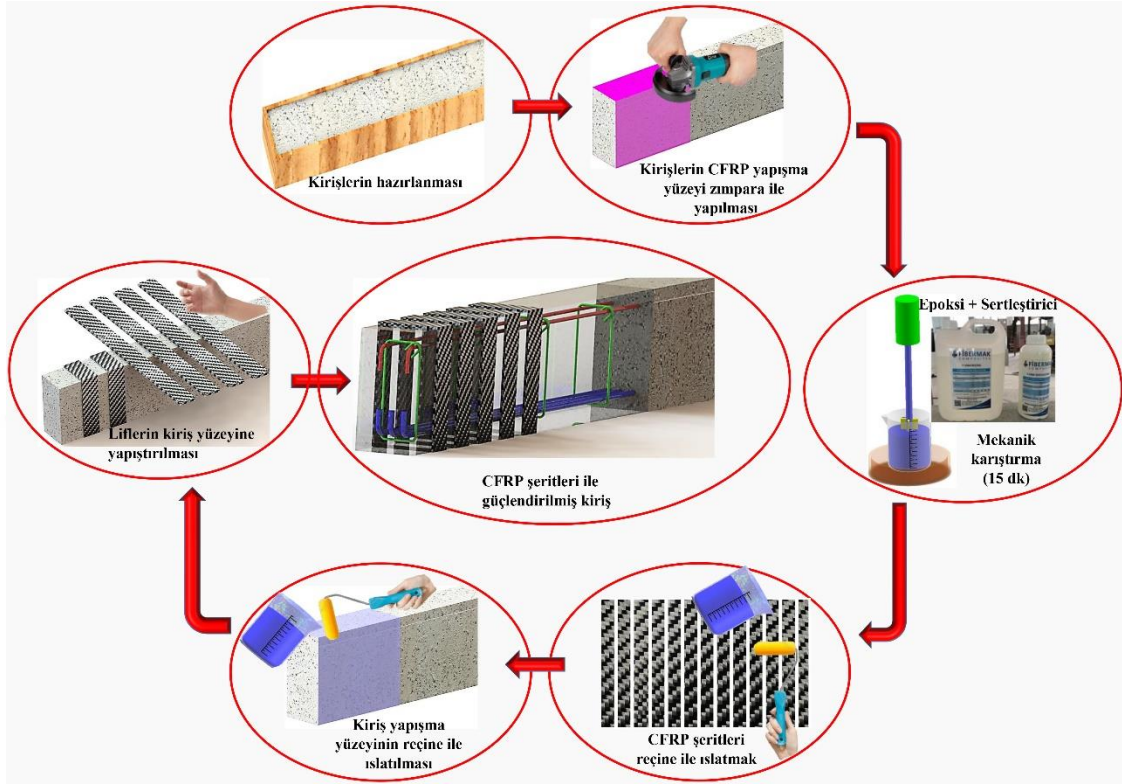
3.4.4. CFRP Şeritlerin hazırlanması ve uygulanması

Hazırlanan deney numunelerin güçlendirilmesinde toplamda 2.07 m² CFRP kumaş kullanılmıştır. 1 adet referans numune ve 7 adet farklı genişlikte CFRP şeritleri ile güçlendirilen numunelerin genel görünümü Şekil 3.14’de gösterilmiştir.



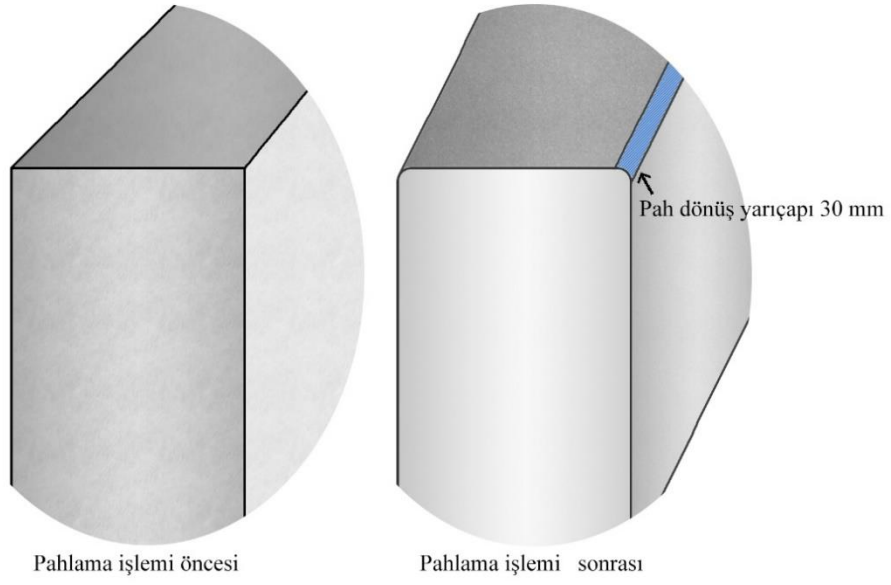
Şekil 3.14. Güçlendirme sonrası deney numunelerinin görünümü

Kiriş yüzeylerine farklı genişlikli CFRP uygulama aşaması Şekil 3.15’de adım adım gösterilmiştir. Kirişler dikdörtgen kesitli oldukları için tüm kirişlerde CFRP şeritler tam sargılama şeklinde uygulanmıştır.

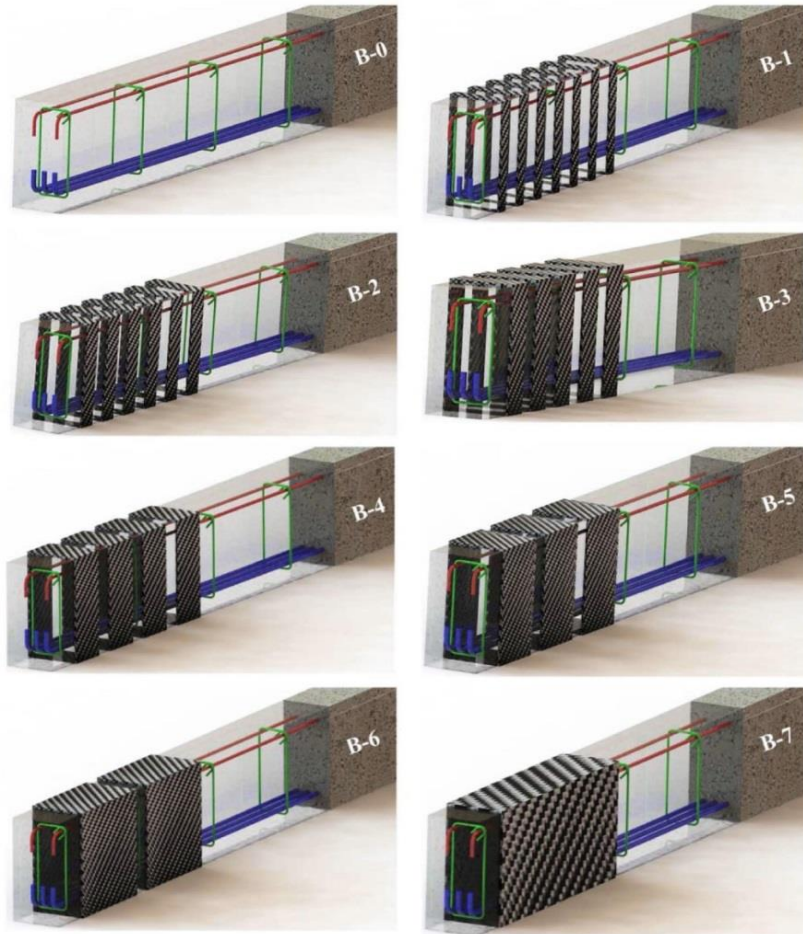


Şekil 3.15. Kiriş numunelere CFRP şeritleri uygulama aşamaları

Farklı genişliğe sahip tek tabaka olarak tam sargılama yapılmış CFRP şeritleri ile güçlendirilen kirişlerin şerit genişliği (w_f) ve şerit aralığı (s_f) bağlı olarak detayları Tablo 3.1’de verilmiştir. Güçlendirme öncesi tüm kirişlerin köşe bölgelerinde gerilme yoğunluğunun oluşmaması ve CFRP şeritleri kopmaması için pahlama yapılmıştır. Pahlama işlemini yapıldığında TBDY-2018 yönetmeliğe göre pahlama dönüş yarıçapı 30 mm olarak uygulanmıştır. Pah öncesi ve sonrası çizimi Şekil 3.16’da gösterilmiştir. Referans ve güçlendirilmiş numunelerin şematik çizimleri Şekil 3.17’de gösterilmiştir.

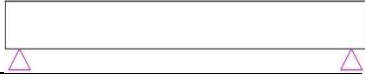
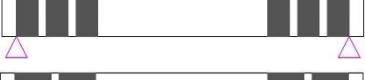
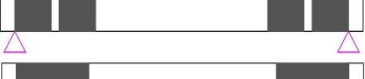
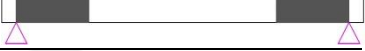


Şekil 3.16. Pah öncesi ve sonrası



Şekil 3.17. Güçlendirilen kiriş numenlerin şematik görüntüleri

Tablo 3.1. Numune detayları

No	Numune kodu	w_f/s_f oranı	ρ_f oranı	Şerit genişliği w_f (cm)	Şerit aralığı s_f (cm)	Numune çizimi
1	B-0	0.00	0.0000	0.00	0.00	
2	B-1	0.35	0.0009	3.00	8.63	
3	B-2	0.47	0.0012	5.00	10.63	
4	B-3	0.55	0.0014	7.00	12.63	
5	B-4	0.64	0.0016	10.00	15.63	
6	B-5	0.73	0.0019	15.00	20.63	
7	B-6	0.82	0.0021	25.00	30.63	
8	B-7	1.00	0.0023	55.63	55.63	

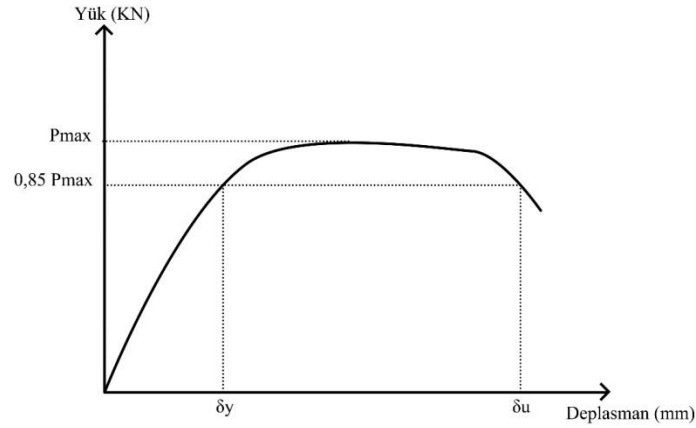
3.5. Güçlendirilmiş Numunelerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

Her bir numunenin deneyi bittikten sonra, veri toplama sisteminden toplanan veri sonuçları ile numune orta noktasından okunan deplasman ile numuneye uygulanan yük arasındaki ilişkiyi veren yük-deplasman eğrisi çizilmiştir. Bu temel grafikten sonra numunelerin sünekliği, enerji tüketme kapasitesi ve rijitliklerin hesaplanması yapılmıştır.

a) Sünekliğin değerlendirilmesi

Süneklik; bir yapının elemanlarının yük taşıma kapasitesinde herhangi bir artış olmadığı halde deplasman miktarının artması şeklinde tanımlanmaktadır (Balık, 2012). Süneklik katsayısı μ , yükün %85'ine karşı gelen deplasman değerinin, akma anındaki deplasman değerine oranıdır. Süneklik sınırları içinde kalan dayanım düşüşü %15 kabul edilmektedir ($P_u = 0.85 \times P_{max}$) (Aykaç ve Yılmaz, 2011). Bu nedenle, numunelerin süneklik oranını hesaplarken, Şekil 3.18'de gösterildiği gibi maksimum yükün %85'ine karşılık gelen δ_y ve δ_u değerinde bulunmuştur. Daha sonra aşağıdaki Denklem 1'i kullanarak süneklik oranının hesaplamasını yapılmıştır. Denklemde δ_y , akma anındaki deplasman değeri (mm), δ_u ise yükün %85'ine karşı gelen deplasman değeri (mm) dir.

$$\mu = \frac{\delta y}{\delta u} \quad (1)$$



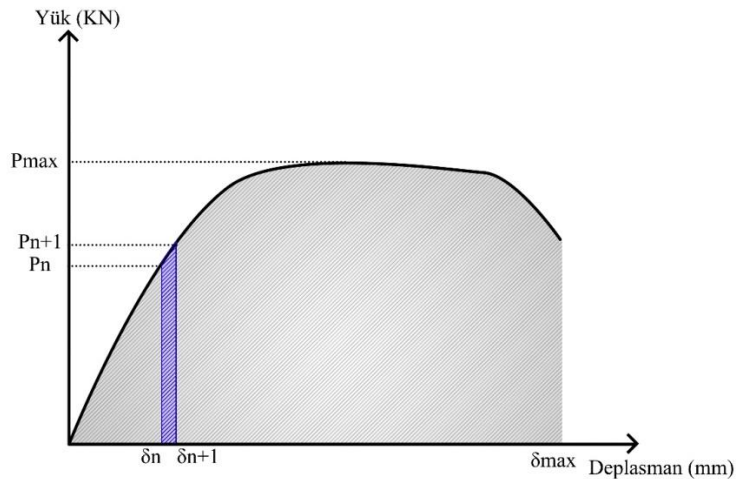
Şekil 3.18. Sistem sünekliğinin değerlendirilmesi grafiği

b) Enerji tüketimi değerlendirilmesi

Betonarme deney kirişlerin enerji tüketim kapasiteleri yük-deplasman eğrilerinin altında kalan alanın hesaplanmasıyla belirlenmektedir (Balık, 2012).

Genel olarak enerji tüketimi, yük ve deplasmanın çarpımıyla hesaplanır. Ancak yük-deplasman grafiğinin altındaki alan yani enerji tüketimi hesabı için önce eğrinin altındaki birim alanları bulunur ve daha sonra toplamını yapılır. Toplam birim alanları Denklem 2’de açıklanmıştır. Toplam enerji tüketimini (TET) hesapladıktan sonra, maksimum yükün anındaki toplam enerji tüketimi, akma anındaki toplam enerji tüketimi ve δ_y ile δ_u arasındaki tüketilen enerji toplamı bulunmuştur. Eğrinin altındaki TET alanı Şekil 3.19’da gösterilmiştir.

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

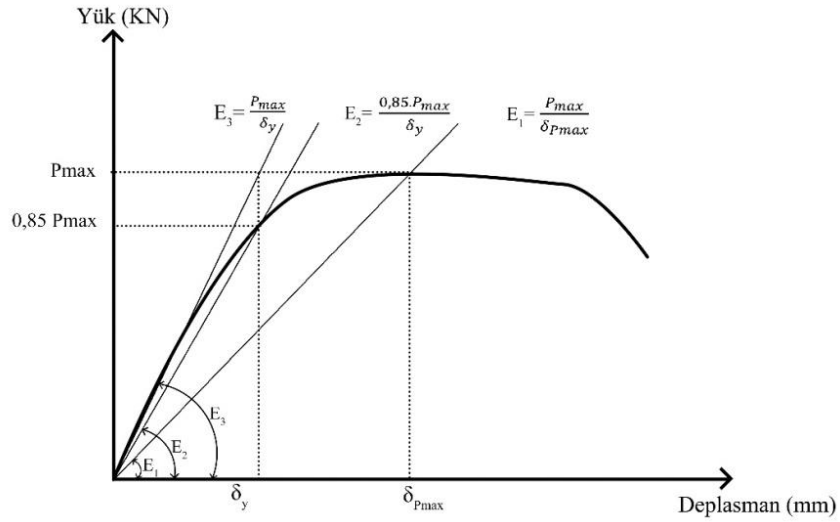


Şekil 3.19. Eğrinin altındaki toplam enerji tüketimi alanı

c) Elemanların rijitliğinin değerlendirilmesi

Rijitlik, yük altındaki yapı elemanının yer değiştirmeye karşı koyma gücü olarak tanımlanmaktadır. Rijitlik (K), Denklem 3 ile hesaplanmıştır. Her bir yük-deplasman grafiği için Şekil 3.20’de gösterildiği gibi 3 farklı şekilde rijitlik değeri bulunmuştur. Bunlar sırasıyla başlangıç rijitliği ($\frac{P_{max}}{\delta_y}$) maksimum yüke denk gelen rijitlik ($\frac{P_{max}}{\delta_{Pmax}}$) ve göçme anına denk gelen rijitlik ($\frac{0,85.P_{max}}{\delta_y}$) değerleridir.

$$K = \frac{P}{\delta} \quad (3)$$



Şekil 3.20. Yük-deplasman grafiği üzerinde rijitlik hesabı

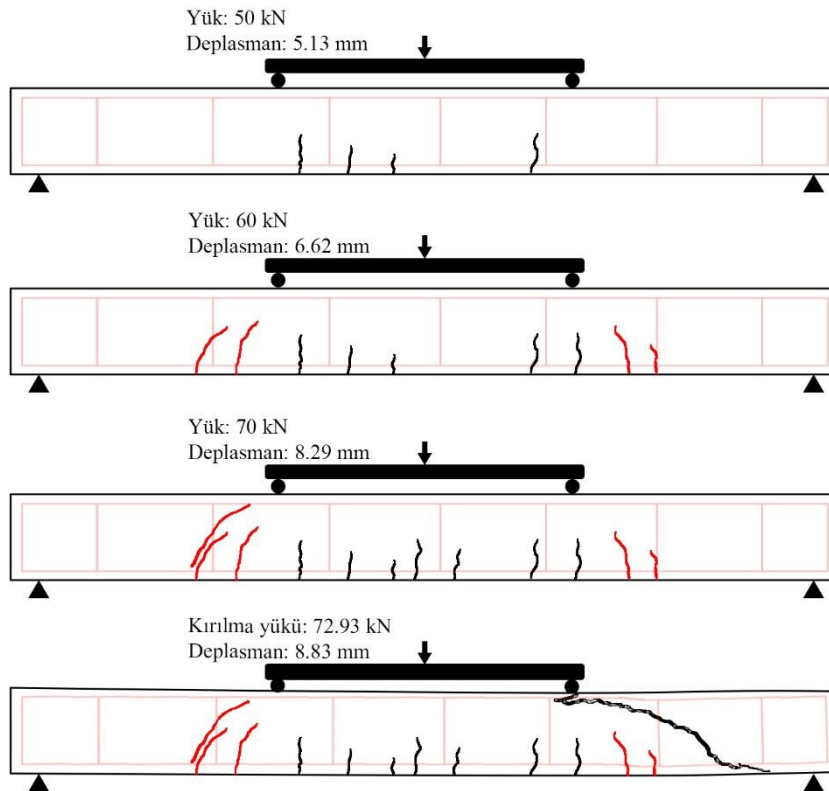
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde test edilen numunelerin deneyleri anlatılmış ve sonuçları sunulmuştur. Numunelerin ulaştığı maksimum yük, maksimum deplasman, ilk çatlamanın meydana geldiği yük, enerji tüketimi, süneklik ve rijitliği açıklanmıştır. Daha sonra bu sonuçlar referans numune ile karşılaştırılması yapılmıştır.

4.1. Deney Sonuçları

4.1.1. 1 Nolu deney elemanı (B-0)

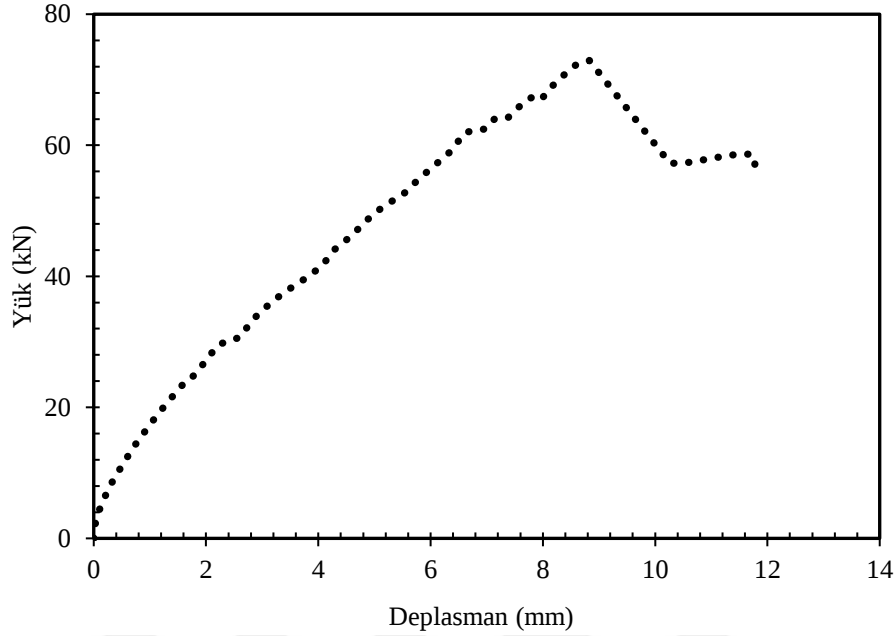
Referans numunesi B-0 olarak kodlanılan ve test edilen ilk numunedir. Referans numunesinin 10 kN'luk periyotlarla artan bir yükleme altında kırılana kadar ulaştığı yük ve yaptığı deplasman kontrol edilmiştir. B-0 numunesinde 50 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Deney esnasında kirişin sağ ve sol tarafında kesme çatlakları oluşması nedeniyle süneklik davranışı göstermeden sağ tarafta oluşan kesme hasarından dolayı göçmüştür. B-0 numunesine ait çatlak çizimi Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. B-0 numunesinin çatlak çizimi

Bu numunenin ulaştığı maksimum yük 72.93 kN ve bu andaki deplasman değeri 8.83 mm olarak gözlenilmiştir. Numune 61.99 kN yükünde akmış ve bu andaki

deplasman değeri 9.83 mm olarak bulunmuştur. B-0 numunesine ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.2'de verilmiştir. Bu numuneye ait rijitlik, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.1'de gösterilmiştir.



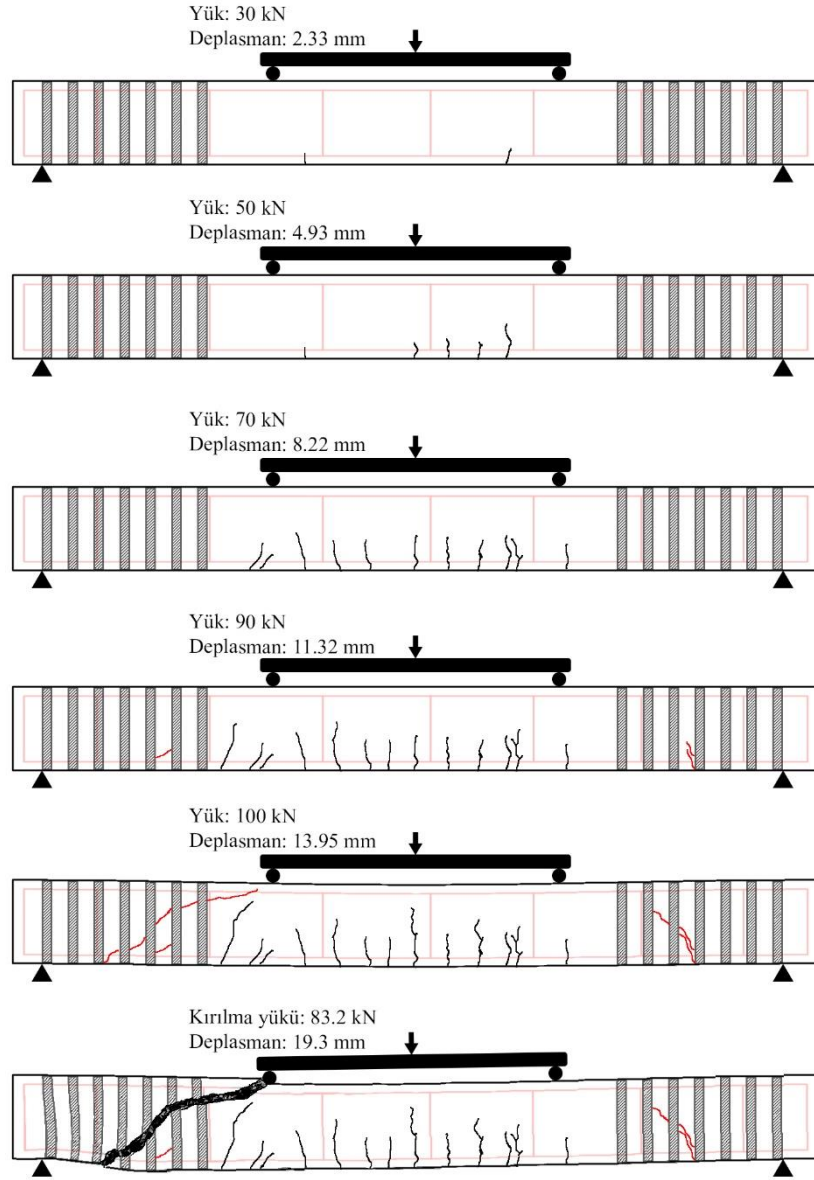
Şekil 4.2. B-0 numunesinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.1. B-0 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85P_{max}$ (kN)	$\delta_{P_{max}}$ (mm)	Süneklik oranı	$0.85P_{max}$ (kN/mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	$\delta y - \delta u$ enerji tüketimi (kN.mm)
72.93	61.99	8.83	1.49	9.37	8.26	565.94	477.97	218.42

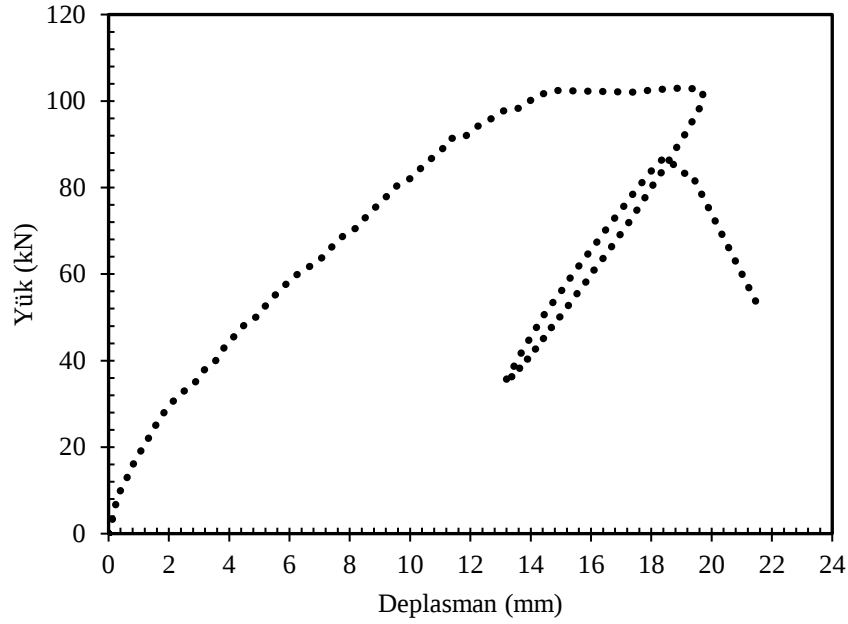
4.1.2. 2 Nolu deney elemanı (B-1)

2 Nolu deney elemanı $\frac{w_f}{s_f} = 0.35$ oranına sahip ve B-1 olarak kodlanılmıştır. Bu numune 10 KN'luk periyotlarla artan bir yükleme altında kırılana kadar ulaştığı yük ve yaptığı deplasman kontrol edilmiştir. B-1 numunesinde 30 KN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Deney esnasında kirişin sağ ve sol tarafında kesme çatlakları oluşması nedeniyle süneklik davranışı göstermeden sol tarafta oluşan kesme hasarından dolayı göçmüştür. B-1 numunesine ait çatlak çizimi Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3. B-1 numunesinin çatlak çizimi

Bu numunenin ulaştığı maksimum yük 102.98 kN ve bu andaki deplasman değeri 18.94 mm olarak gözlenilmiştir. Numune 87.53 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 18.70 mm olarak bulunmuştur. B-1 numunesine ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.4'de verilmiştir. Bu numuneye ait rijitlik, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.2'de gösterilmiştir.



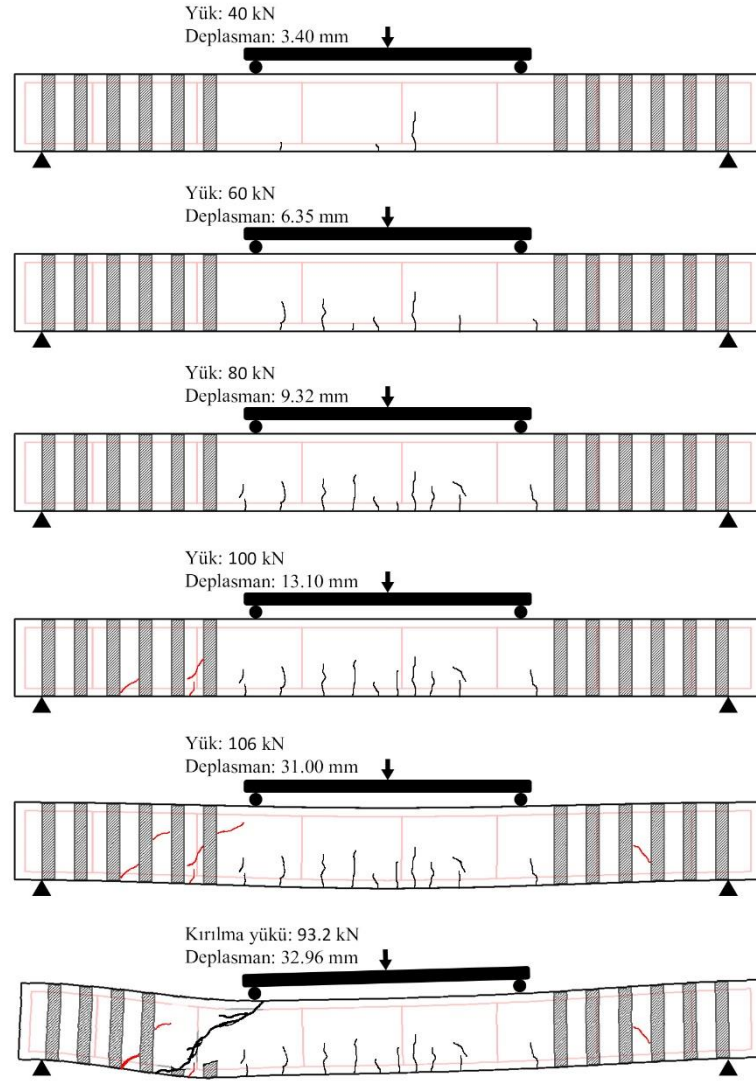
Şekil 4.4. B-1 numunesinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.2. B-1 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85P_{max}$ (kN)	$\delta_{P_{max}}$ (mm)	Süneklik oranı	$0.85P_{max}$ (kN/mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	$\delta y - \delta u$ enerji tüketimi (kN.mm)
102.98	87.53	18.94	1.72	8.07	5.44	1583.88	1376.09	772.74

4.1.3. 3 Nolu deney elemanı (B-2)

3 Nolu deney elemanı $\frac{w_f}{s_f} = 0.47$ oranına sahip ve B-2 olarak kodlanılmıştır. Bu numune 10 kN'luk periyotlarla artan bir yükleme altında kırılana kadar ulaştığı yük ve yaptığı deplasman kontrol edilmiştir. B-2 numunesinde 40 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Deney esnasında kirişin sağ ve sol tarafında kesme çatlakları oluşması nedeniyle süneklik davranışı göstermeden sol tarafta oluşan kesme hasarından dolayı göçmüştür. B-2 numunesine ait çatlak çizimi Şekil 4.5'de verilmiştir.

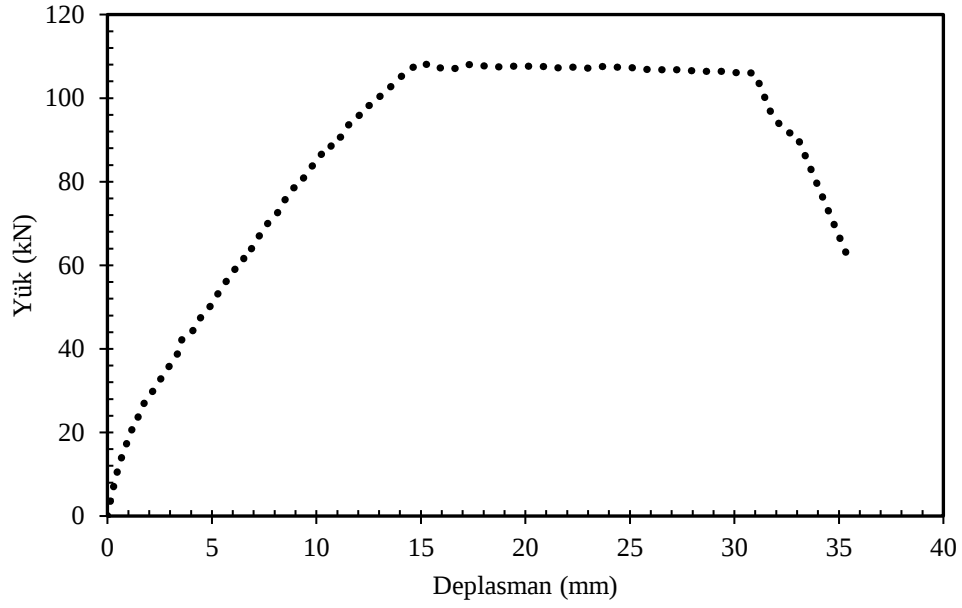


Şekil 4.5. B-2 numunesinin çatlak çizimi

Bu numunenin ulaştığı maksimum yük 108.41 kN ve bu andaki deplasman değeri 14.95 mm olarak gözlenilmiştir. Numune 92.15 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 32.46 mm olarak bulunmuştur. B-2 numunesine ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.6'da verilmiştir. Bu numuneye ait rijitlik, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.3'de gösterilmiştir.

Tablo 4.3. B-2 numunesinin deney sonuçları

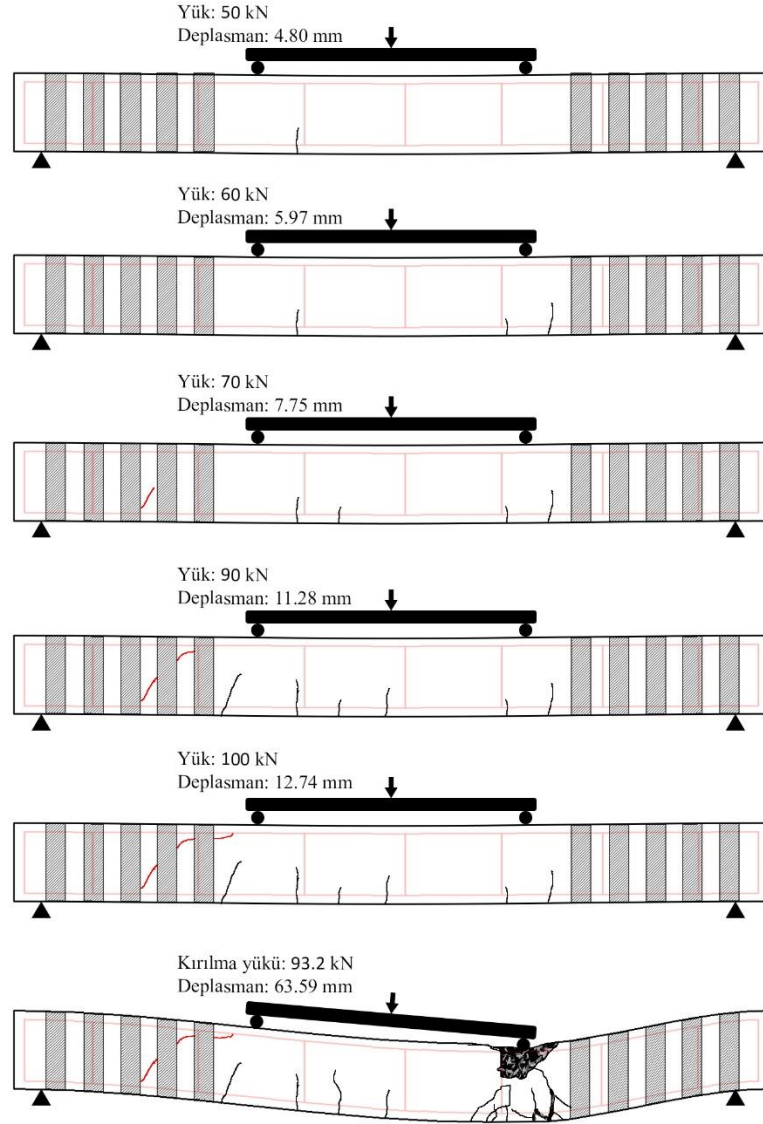
P_{max} (kN)	$0.85P_{max}$ (kN)	$\delta_{P_{max}}$ (mm)	Süneklik oranı	$0.85P_{max}$ (kN/mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	$\delta y - \delta u$ enerji tüketimi (kN.mm)
108.41	92.15	14.95	2.86	8.12	7.25	3084.72	982.10	2220.99



Şekil 4.6. B-2 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.4. 4 Nolu deney elemanı (B-3)

4 Nolu deney elemanı $\frac{w_f}{s_f} = 0.55$ oranına sahip ve B-3 olarak kodlanılmıştır. Bu numune 10 kN'luk periyotlarla artan bir yükleme altında kırılana kadar ulaştığı yük ve yaptığı deplasman kontrol edilmiştir. B-3 numunesinde 50 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Kiriş sol kesme açıklığında kesme çatlağı oluşmuş ve kiriş sağ tarafında uygulanan yükün altındaki basınç bölgesi ezilerek göçmüştür. B-3 numunesine ait çatlak çizimi Şekil 4.7'da verilmiştir.

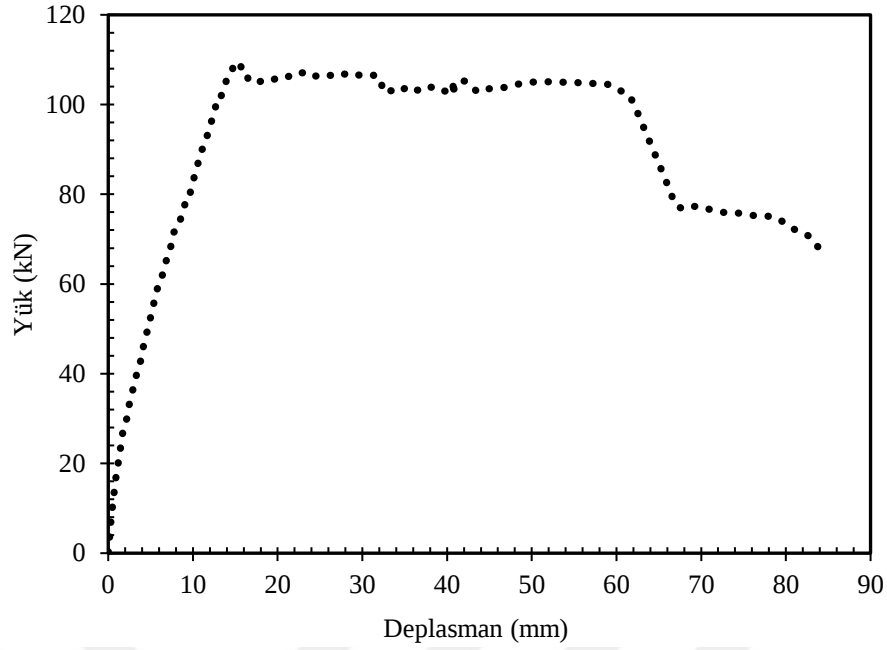


Şekil 4.7. B-3 numunesinin çatlak çizimi

Bu numunenin ulaştığı maksimum yük 109.38 kN ve bu andaki deplasman değeri 15.35 mm olarak gözlenilmiştir. Numune 92.97 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 63.63 mm olarak bulunmuştur. B-3 numunesine ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.8'de verilmiştir. Bu numuneye ait rijitlik, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.4'de gösterilmiştir.

Tablo 4.4. B-3 numunesinin deney sonuçları

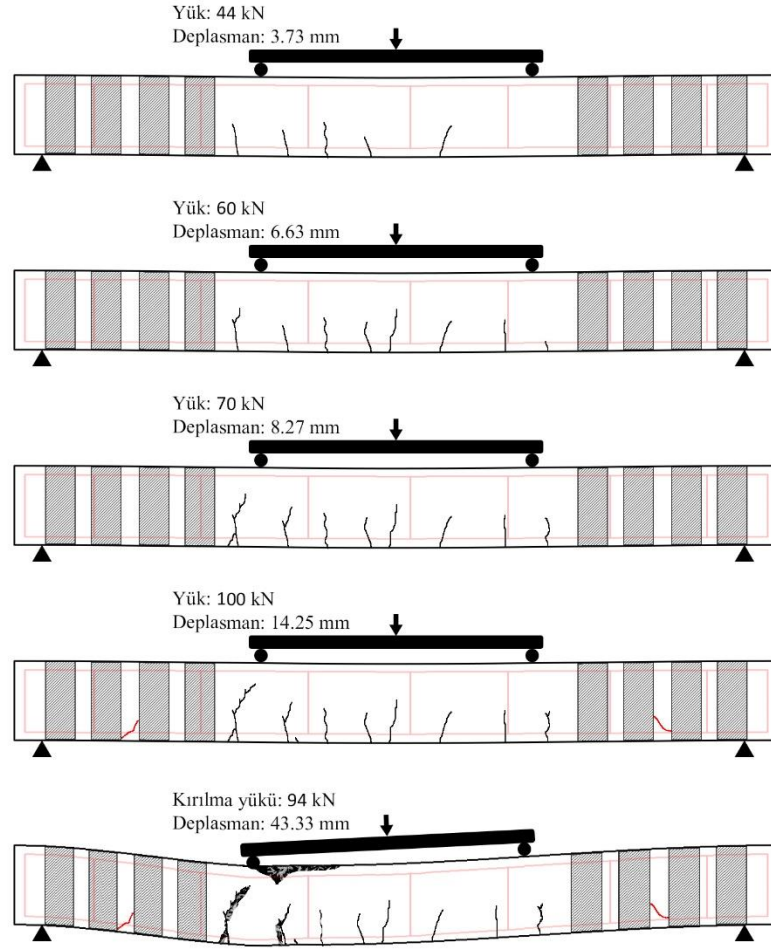
P_{max} (kN)	$0.85P_{max}$ (kN)	$\delta_{P_{max}}$ (mm)	Süneklik oranı	$0.85P_{max}$ (kN/mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	$\delta y - \delta u$ enerji tüketimi (kN.mm)
109.38	92.97	15.35	5.46	7.97	7.12	7637.17	1029.86	5515.95



Şekil 4.8. B-3 numunesinin yük-deplasman grafiği

4.1.5. 5 Nolu deney elemanı (B-4)

5 Nolu deney elemanı $\frac{w_f}{s_f} = 0.64$ oranına sahip ve B-4 olarak kodlanılmıştır. Bu numune 10 kN'luk periyotlarla artan bir yükleme altında kırılana kadar ulaştığı yük ve yaptığı deplasman kontrol edilmiştir. B-4 numunesinde 40 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Kiriş sol kesme açıklığında kesme çatlağı oluşmuş ve kiriş orta açıklığında sol tarafına yakın basınç bölgesi ezilerek göçmüştür. B-4 numunesine ait çatlak çizimi Şekil 4.9'da verilmiştir.

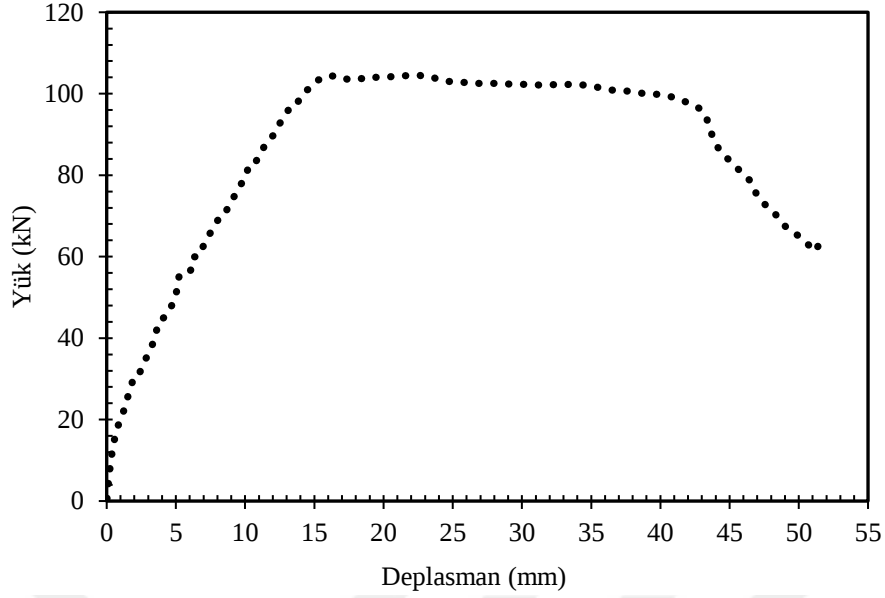


Şekil 4.9. B-4 numunesinin çatlak çizimi

Bu numunenin ulaştığı maksimum yük 104.55 kN ve bu andaki deplasman değeri 22.16 mm olarak gözlenilmiştir. Numune 88.87 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 43.84 mm olarak bulunmuştur. B-4 numunesine ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir. Bu numuneye ait rijitlik, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.5'de gösterilmiştir.

Tablo 4.5. B-4 numunesinin deney sonuçları

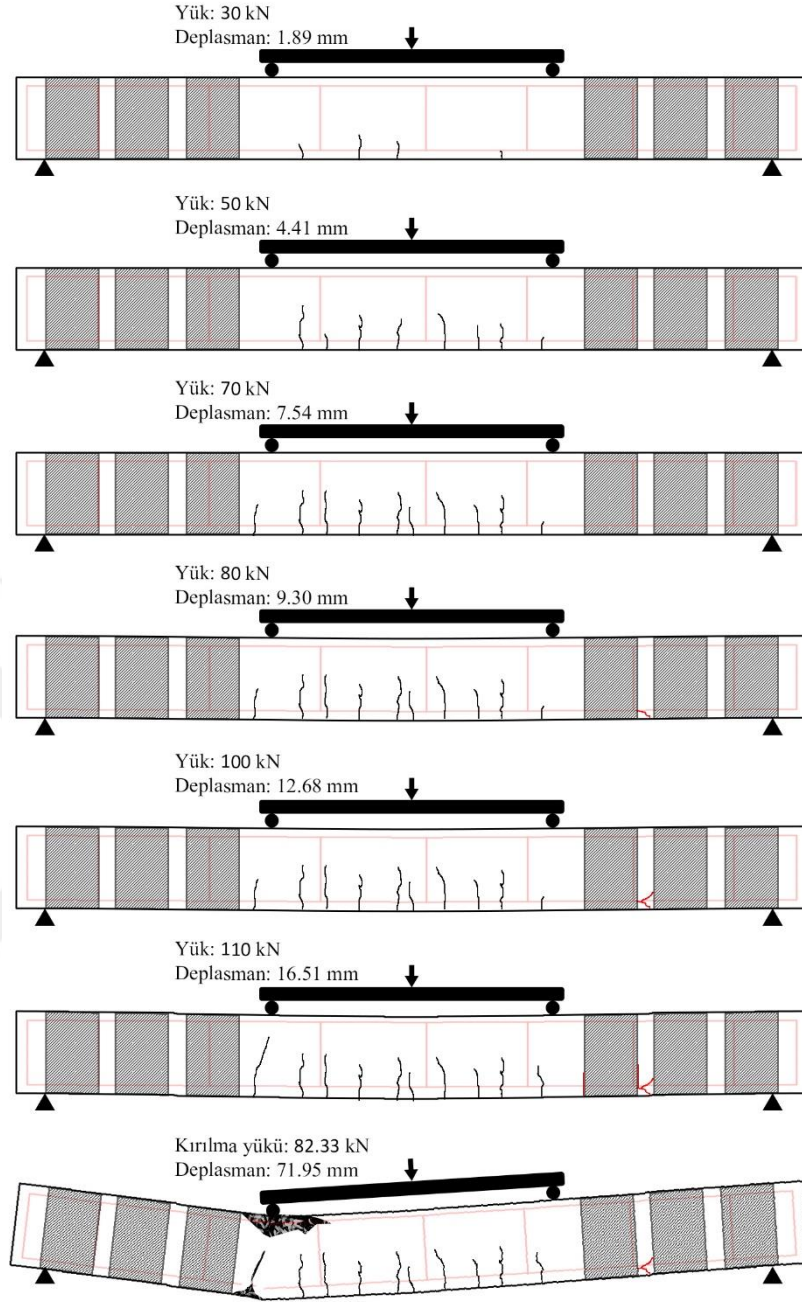
P_{max} (kN)	$0.85P_{max}$ (kN)	$\delta_{P_{max}}$ (mm)	Sünekli k oranı	$0.85P_{max}$ (kN/mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	$\delta y - \delta u$ enerji tüketimi (kN.mm)
104.55	88.87	22.16	3.74	7.58	4.72	4442.64	1698.97	3249.92



Şekil 4.10. B-4 numunesinin yük-deplasman grafiği

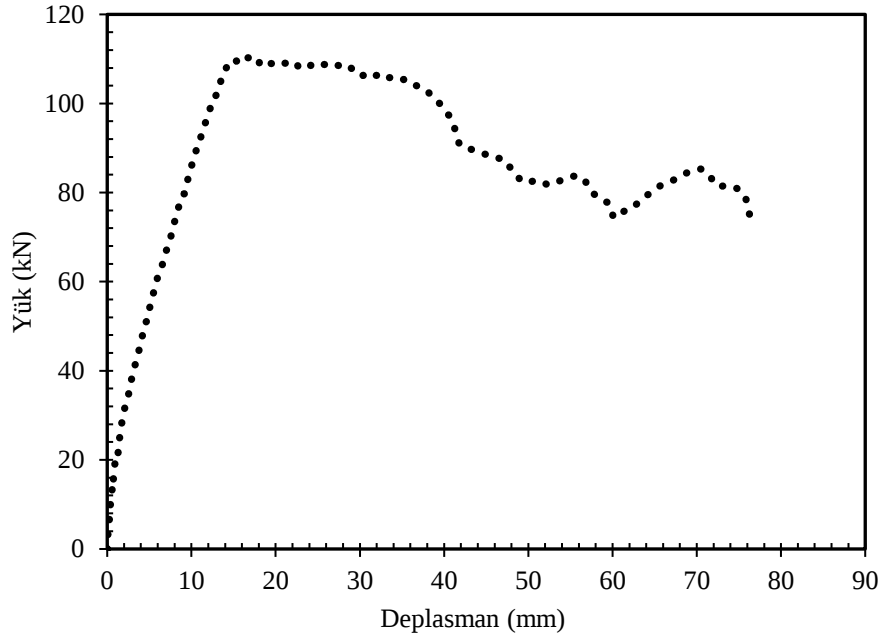
4.1.6. 6 Nolu deney elemanı (B-5)

6 Nolu deney elemanı $\frac{w_f}{s_f} = 0.73$ oranına sahip ve B-5 olarak kodlanılmıştır. Bu numune 10 kN'luk periyotlarla artan bir yükleme altında kırılana kadar ulaştığı yük ve yaptığı deplasman kontrol edilmiştir. B-5 numunesinde 30 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Kiriş sağ kesme açıklığında kesme çatlağı oluşmuş ve kiriş sol tarafında uygulanan yükün altındaki basınç bölgesi ezilerek göçmüştür. B-5 numunesine ait çatlak çizimi Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11. B-5 numunesinin çatlak çizimi

Bu numunenin ulaştığı maksimum yük 110.26 kN ve bu andaki deplasman değeri 16.81 mm olarak gözlenilmiştir. Numune 93.72 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 41.38 mm olarak bulunmuştur. B-5 numunesine ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.12'de verilmiştir. Bu numuneye ait rijitlik, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.6'da gösterilmiştir.



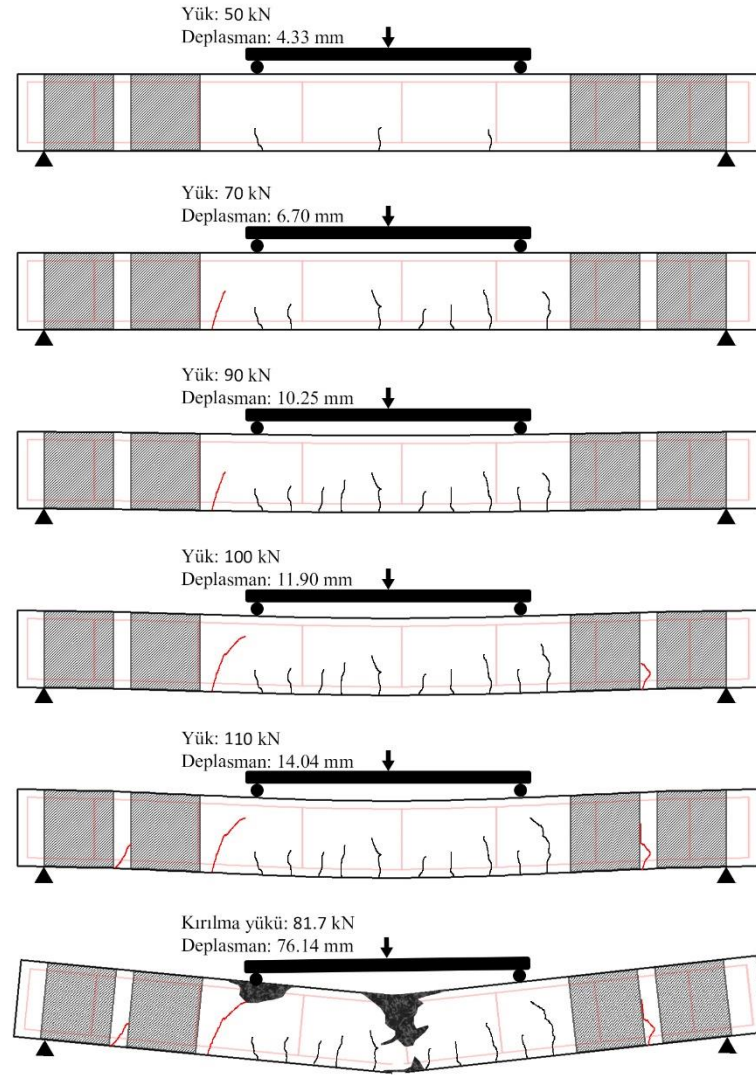
Şekil 4.12. B-5 numunesinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.6. B-5 numunesinin deney sonuçları

P_{max} (kN)	$0.85P_{max}$ (kN)	δP_{max} (mm)	Süneklik oranı	$0.85P_{max}$ (kN/mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	$\delta y - \delta u$ enerji tüketimi (kN.mm)
110.26	93.72	16.81	3.65	8.27	6.56	6724.81	1213.52	3211.70

4.1.7. 7 Nolu deney elemanı (B-6)

7 Nolu deney elemanı $\frac{w_f}{s_f} = 0.82$ oranına sahip ve B-6 olarak kodlanılmıştır. Bu numune 10 kN'luk periyotlarla artan bir yükleme altında kırılana kadar ulaştığı yük ve yaptığı deplasman kontrol edilmiştir. B-6 numunesinde 50 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Kiriş sağ ve sol kesme açıklığında kesme çatlağı oluşmuş ve kiriş sol tarafında uygulanan yükün altındaki basınç bölgesi ve orta açıklıktaki basınç bölgesi ezilerek göçmüştür. B-6 numunesine ait çatlak çizimi Şekil 4.13'de verilmiştir.

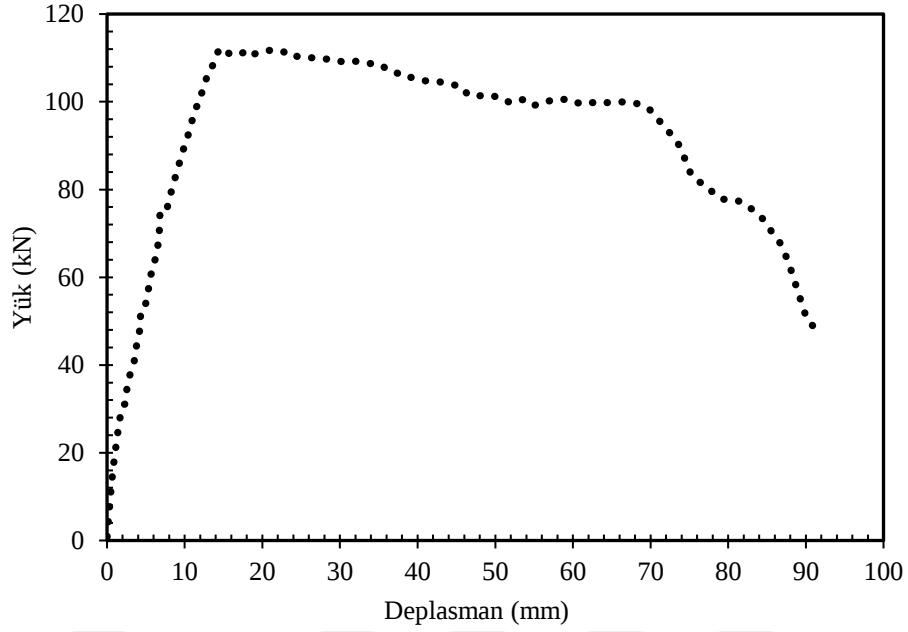


Şekil 4.13. B-6 numunesinin çatlak çizimi

Bu numunenin ulaştığı maksimum yük 112.21 kN ve bu andaki deplasman değeri 14.65 mm olarak gözlenilmiştir. Numune 95.38 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 71.25 mm olarak bulunmuştur. B-6 numunesine ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.14'de verilmiştir. Bu numuneye ait rijitlik, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.7'de gösterilmiştir.

Tablo 4.7. B-6 numunesinin deney sonuçları

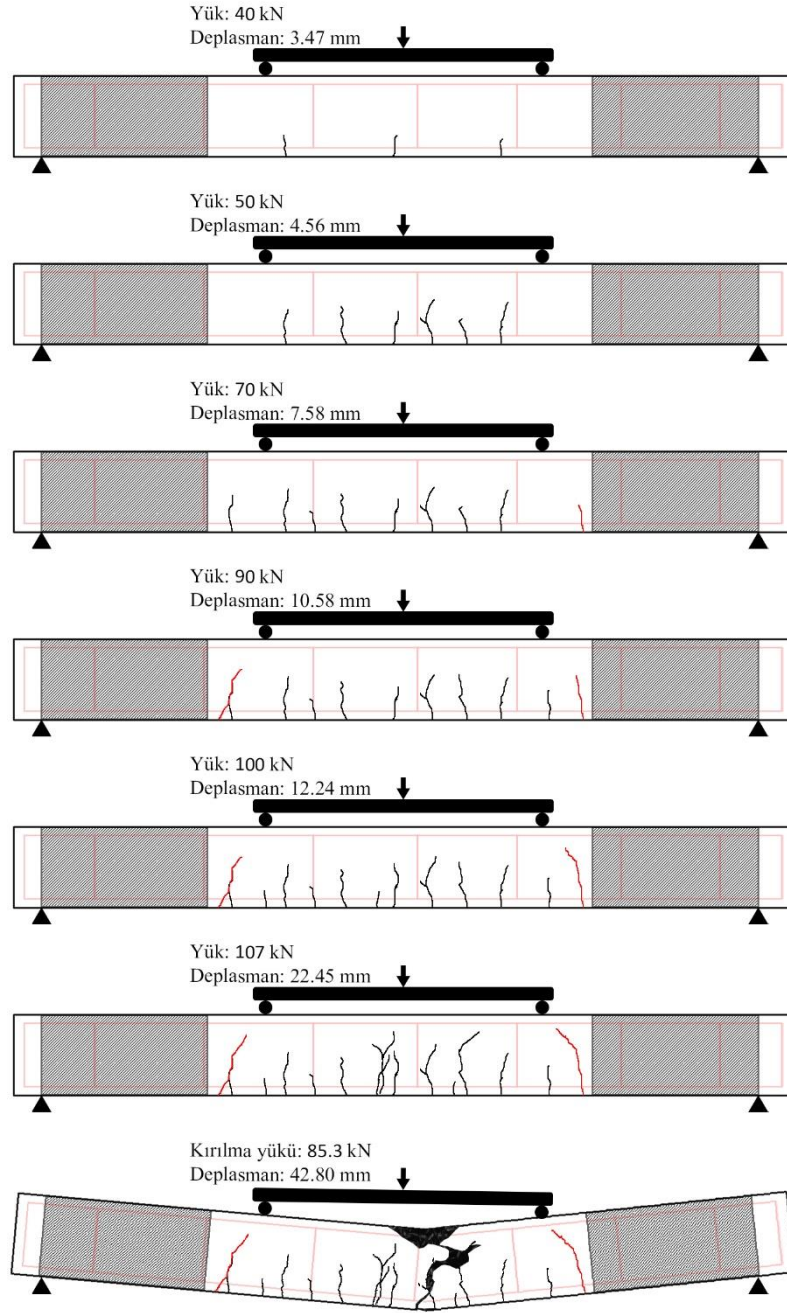
P_{max} (kN)	$0.85P_{max}$ (kN)	$\delta_{P_{max}}$ (mm)	Süneklik oranı	$0.85P_{max}$ (kN/mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	$\delta y - \delta u$ enerji tüketimi (kN.mm)
112.21	95.38	14.65	6.54	8.76	7.66	8487.82	1024.96	6324.53



Şekil 4.14. B-6 numunesinin yük-deplasman grafiği

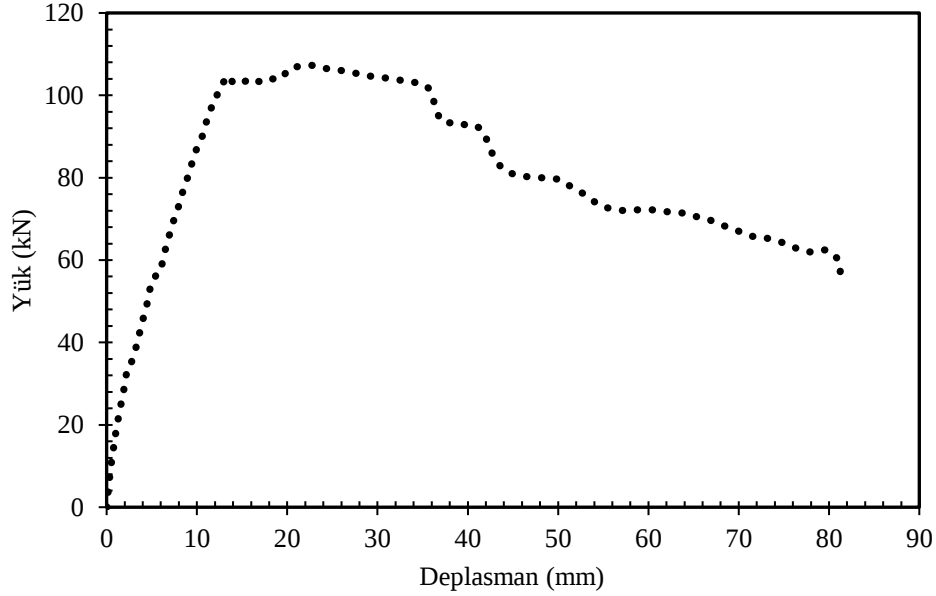
4.1.8. 8 Nolu deney elemanı (B-7)

8 Nolu deney elemanı $\frac{w_f}{s_f} = 1.00$ oranına sahip ve B-6 olarak kodlanılmıştır. Bu numune 10 kN'luk periyotlarla artan bir yükleme altında kırılana kadar ulaştığı yük ve yaptığı deplasman kontrol edilmiştir. B-7 numunesinde 40 kN ile eğilme bölgesinde ilk çatlak gözlenmiştir. Kiriş sağ ve sol kesme açıklığında kesme çatlağı oluşmuş ve orta açıklıktaki basınç bölgesi ezilerek göçmüştür. B-7 numunesine ait çatlak çizimi Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15. B-7 numunesinin çatlak çizimi

Bu numunenin ulaştığı maksimum yük 107.34 kN ve bu andaki deplasman değeri 22.45 mm olarak gözlenilmiştir. Numune 91.24 kN yükünde akmış ve bu andaki deplasman değeri 41.73 mm olarak bulunmuştur. B-7 numunesine ait yük-deplasman grafiği Şekil 4.16'da verilmiştir. Bu numuneye ait rijitlik, toplam enerji tüketimi ve diğer sonuçlar Tablo 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.16. B-7 numunesinin yük-deplasman grafiği

Tablo 4.8. B-7 numunesinin deney sonuçları

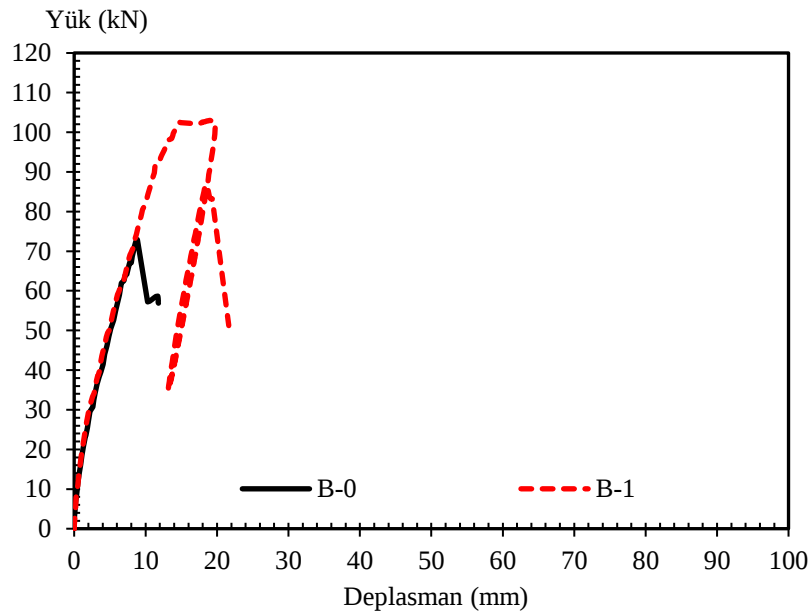
P_{max} (kN)	$0.85P_{max}$ (kN)	$\delta_{P_{max}}$ (mm)	Süneklik oranı	$0.85P_{max}$ (kN/mm)	P_{max} Rijitliği (kN/mm)	Toplam enerji tüketimi (kN.mm)	P_{max} enerji tüketimi (kN.mm)	$\delta y - \delta u$ enerji tüketimi (kN.mm)
107.34	91.24	22.45	3.89	8.51	4.78	6575.91	1825.87	3570.03

4.2. Deney Elemanların Karşılaştırılması

4.2.1. B-0 - B-1 Numunelerin karşılaştırılması

B-1 numunesi, referans kirişin (B-0) dört yüzüne 30 mm genişliğinde 750 mm uzunluğunda ve 0.3 mm kalınlığında CFRP şeritlerin yapıştırılması ile oluşturulmuştur. Kiriş üzerine toplam on dört adet CFRP şerit uygulanarak B-1 kirişi güçlendirilmiştir. Deneye başladıktan sonra, 30 kN yük seviyesinde kiriş orta açıklığında kılcal eğilme çatlakları oluşmaya başlamıştır. Bu çatlaklar 80 kN yük seviyesine kadar eğilme bölgesindeki çatlakların tarafsız eksenin altına kadar uzaması ile devam etmiştir. Bu yük seviyesinde kesme bölgesinde hala çatlak gözlenmemiştir. Bu durum yerleşimi yapılan CFRP şeritlerin kesme dayanımını artırarak hasarın orta bölgeye kaymasını sağladığına işaretler. 80 kN yük seviyesine gidilirken CFRP şeritlerden matris çatlak sesleri duyularak CFRP’de gerilme artışları başlamıştır. 90 kN yük seviyesine ulaşılırken kirişin sağ ve sol kesme açıklığında kesme çatlakları oluşmaya başlamıştır. Ayrıca kiriş üst bölgesinde yapılan CFRP bindirmelerde bir ayrılma gözlenmemiştir. Bu durum CFRP şeritlerin

bindirmeli yapılmasının kesme dayanımının artışında etkili olduğu sonucuna varılmasını sağlamıştır. Düşey yük 100 kN seviyesine ulaştığında ise yaklaşık 14 mm deplasman olduğu görülmüştür. Kesme bölgesine yerleştirilen CFRP şeritlerde gerilme artmaya devam etmiş ve bu durum matris çatlak seslerinin artışı ile tespit edilmiştir. Ayrıca kiriş sağ kesme açıklığında daha önce oluşan kesme çatlaklarında uzama meydana gelirken sol kesme açıklığında yeni kesme çatlağı meydana gelmiştir. Kiriş orta açıklığında ise çatlak uzamaları sınırlanmıştır. Bu durum eğilme bölgesindeki zorlanmanın azaldığını, kesme bölgesinde ise arttığını göstermektedir. Nitekim 110 kN yük seviyesine gidilmek istendiğinde 100 kN yük seviyesine ulaşılmasıyla kirişte kısmi sünek plato oluşmuş ve bu aşamada sol kesme açıklığındaki bir adet CFRP şeridi kopmuştur. Deplasman 14 mm'den 20 mm'ye ulaşmıştır. Bu aşamadan sonra deplasman kontrollü yüklemeye geçilmiştir. Deplasman hedefi olan 30 mm'ye gidilmeye çalışırken kiriş kesme bölgesinde gerilme artışı maksimum seviyeye ulaşmış ve yaklaşık 83 kN yük seviyesinde bir anda dört adet CFRP şeridin kopması sonucu kesme hasarı ile deney sonlanmıştır. Yük-deplasman karşılaştırması Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Her ne kadar yeterli sünek davranış sağlanamamış olsa da uygulanan CFRP şeritlerin B-0'a göre yük taşıma kapasitesinde %41.2 artış göstermesi oldukça önemlidir.

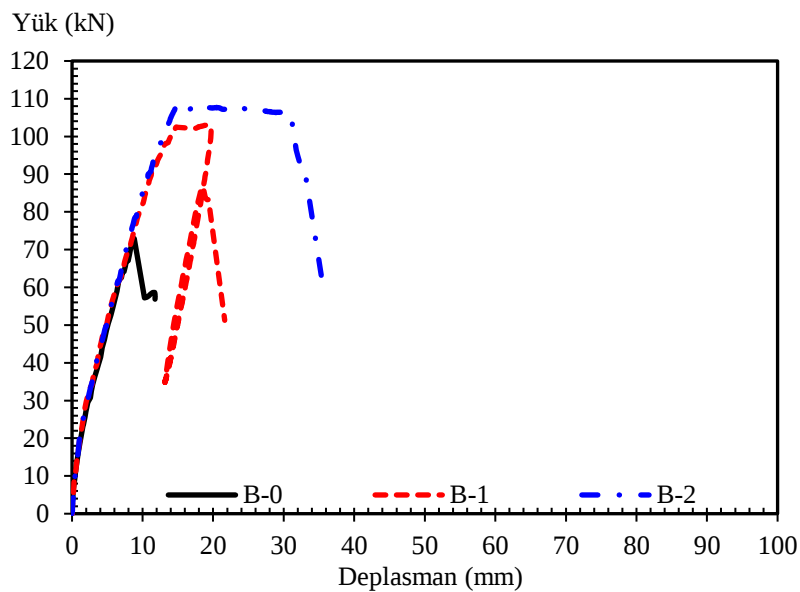


Şekil 4.17. B-0 – B-1 numunelerin yük-deplasman karşılaştırma grafiği

4.2.2. B-0 - B-2 Numunelerin karşılaştırılması

B-2 numunesinde, B-1 numunesinde yetersiz kaldığı görülen 3 cm CFRP şerit genişliği 5 cm'ye çıkarılmıştır. Kiriş üzerine yerleşimi yapılan toplam CFRP şerit sayısı

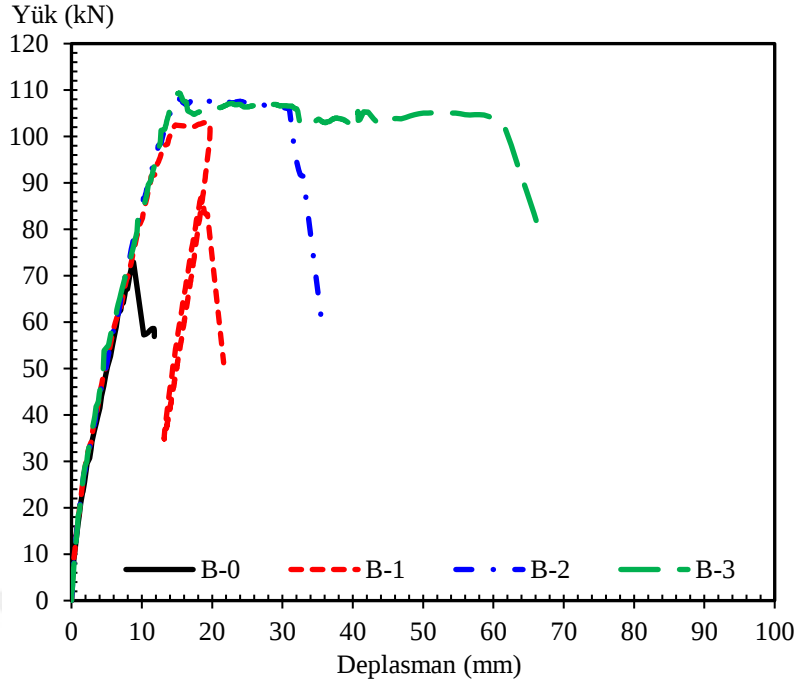
on iki adettir. B-2 numunesinde ilk kılcal çatlaklar 40 kN yük seviyesinde gözlenmiştir. B-2 numunesinde 90 kN yük seviyesine kadar plastikleşme kiriş orta bölgesine yayılmıştır. Ancak ilk kesme çatlağı kirişin sol kesme açıklığında 90 kN yük seviyesinde gözlenmiştir. Kiriş orta açıklığındaki çatlaklarda sınırlanmıştır. Bu durum hasarın kesme bölgesinde yoğunlaşmasıyla devam etmiştir. Yükün 100 kN'a ulaşmasıyla CFRP şeritlerde matris çatlak sesleri duyulmuştur. Ayrıca sol kesme açıklığında yeni kesme çatlakları gözlenmiştir. Numune 108.4 kN yük seviyesinde ve yaklaşık 14.8 mm deplasmana ulaştığında akma meydana gelmiş, deplasman kontrollü yüklemeye geçilmiştir. Kiriş orta açıklığında çatlak ilerlemesi tarafsız eksenin üstüne çıkamamış ve zorlanmalar kesme açıklığına yönelmiştir. Bu durum kesme açıklığına uygulanan CFRP şeritlerin kiriş eğilme kapasitesinin yeterince kullanılmasına katkı sağlamadığını göstermiştir. Son olarak 40 mm deplasman seviyesine ulaşılmaya çalışılırken kiriş sol kesme açıklığındaki iki adet CFRP şeridin kopmasıyla 106 kN yük seviyesinde deney sonlanmıştır. Davranış olarak kesmeli eğilme davranışının gözlemlendiği B-2 numunesi içinde yeterli CFRP şerit genişliğinin ve yeterli sünekliğin sağlandığı söylenememektedir. Ancak yük taşıma kapasitesi B-0 ve B-1 numunelerine göre sırasıyla %48.6 ve %5.2 artış sağlamıştır. B-2 numunesinde gözlenen akma anı, B-1 numunesindeki benzer deplasman seviyesinde gerçekleşmiştir. Bu durum eğilme rijitliği açısından uygulanan güçlendirmelerin kesiti eğilme rijitliği açısından çok değiştirmedeği halde kesitin kesme kapasitenin artmasıyla daha fazla dönme talebine cevap verebildiği ve çekme bölgesinde yer alan donatıların akmaya başladığına delalettir. Şekil 4.18'de B-0, B-1 ve B-2 numunelerinin karşılaştırması gösterilmiştir.



Şekil 4.18. B-0 – B-2 numunelerin yük-deplasman karşılaştırma grafiği

4.2.3. B-0 - B-3 Numunelerin karşılaştırılması

B-2 numunesi ile kısmi sünek davranış gözlenmiş olsa da literatür ışığında yeterli süneklik elde edilemediğinden CFRP şerit genişliği 7 cm'ye çıkarılarak B-3 numunesi oluşturulmuştur. B-3 numunesinde yerleşimi yapılan toplam CFRP şerit sayısı ise on adettir. Monotonik artan yükler ile 50 kN'a gelindiğinde kiriş orta açıklığında eğilme çatlakları tarafsız eksenin altında oluşmaya başlamıştır. Yükün 70 kN'a ulaşması ile yerleşimi yapılan CFRP şeritlerden matris çatlak sesleri gelmiştir. Ayrıca kiriş sol kesme açıklığında kesme çatlağı oluşmuştur. Diğer iki güçlendirme alternatifine göre daha düşük yük seviyesinde CFRP şeritlerin zorlanması kiriş kesme kapasitesinin arttığını ve hasarın orta bölgeye ilerlemesine işaretler. Yükün 90 kN'a ulaşması ile kiriş sol kesme açıklığında meydana gelen kesme çatlağı ilerleyerek tarafsız eksenin üzerine çıkmıştır. Kiriş orta açıklığındaki çatlaklar B-1 ve B-2'ye göre daha sınırlı seviyede kalmıştır. Yük 100 kN'a ulaştığında kiriş sol kesme açıklığındaki kesme çatlağı kiriş üst ucuna kadar ulaşmıştır. Eğilme bölgesinde çatlaklar tarafsız eksenin altında kalmıştır. B-3 numunesi, B-2 numunesine benzer dayanım artışına devam etmiştir. Yükün 109.4 kN'a, deplasmanın 15.3 mm'ye ulaşmasıyla B-3 numunesinde akma meydana gelmiştir. Bu aşamadan sonra deplasman kontrollü yüklemeye geçilmiştir. B-3 numunesinde meydana gelen akma yükü değeri B-2 numunesi ile oldukça yakındır. Bu durum B-2 ve B-3 numunelerinde kiriş eğilme kapasitesinin maksimuma yakın kullanıldığına her iki kirişte de çekme donatısının akmaya başladığına işaretler. Yerleşimi yapılan CFRP şeritler kiriş kesme dayanımını artırarak deney sonuna kadar kirişten ayrılmamıştır. Sonuç olarak B-3 numunesi için belirlenen şerit genişliği literatür ışığında yeterli sünekliğin sağlandığını göstermiştir. B-3 numunesi ile yük taşıma kapasitesindeki artış B-0, B-1 ve B-2 numunelerine göre sırasıyla %50.0, %6.2 ve %0.8 seviyesindedir. Yapılan güçlendirme uygulaması ile CFRP şerit genişliğinin 7 cm olarak alınması uygun olarak değerlendirilmiştir. Şekil 4.19'da B-0, B-1, B-2 ve B-3 numunelerinin karşılaştırması gösterilmiştir.

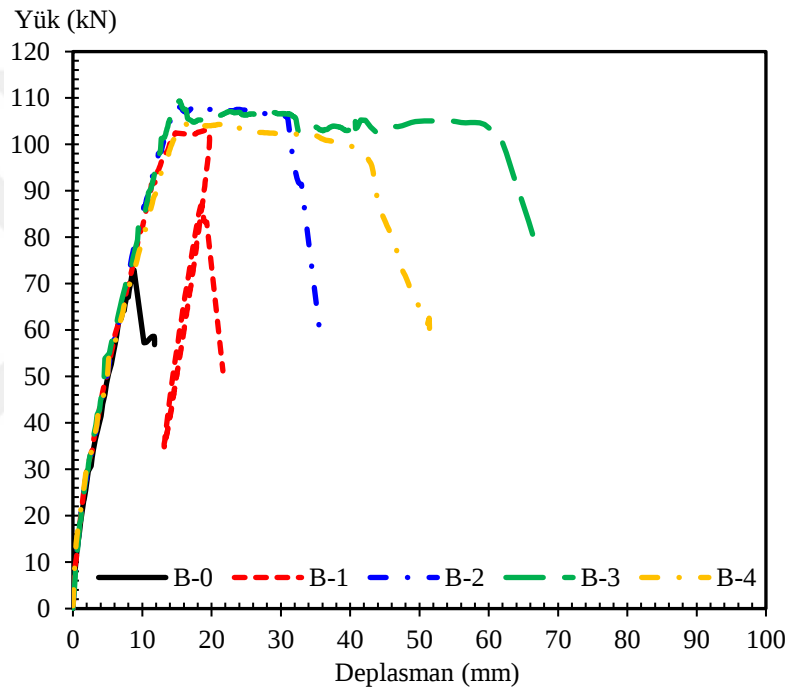


Şekil 4.19. B-0 – B-3 numunelerin yük-deplasman karşılaştırma grafiği

4.2.4. B-0 - B-4 Numunelerin karşılaştırılması

B-3 numunesi ile yeterli sünek davranışın gerçekleştiği belirlendikten sonra B-4 numunesi ile şerit genişliği 10 cm'ye çıkarılarak eğilme kapasitesindeki artış incelenmek istenmiştir. Ayrıca oluşacak sonuç hasarın yerinin değişimi araştırılmıştır. Bu amaçla düşey yük altında B-4 numunesinin deneysel çalışması gerçekleştirilmiştir. B-4 numunesinde CFRP şerit sayısı sekize düşürülmüştür. Yükün uygulandığı elastik sınırlar içerisinde çatlak gözlenmemiştir. Yükün 44 kN'a ulaşmasıyla kirişin eğilme bölgesinde kılcal çatlak oluşumları başlamıştır. Bu çatlaklar yaklaşık 80 kN yük seviyesine kadar artarak ve uzayarak devam etmiştir. Bu yük seviyesinde matris çatlak sesleri de duyulmuştur. Yükün 90 kN'a ulaşması ile eğilme bölgesindeki çatlaklar tarafsız eksenin üzerine doğru ilerlemiştir. Bu durum yerleşimi yapılan CFRP şeritlerin kiriş kesme kapasitesinin zorlanmasını sağladığını ve hasarın eğilme bölgesinde yoğunlaşacağını göstermiştir. Kesme bölgesinde hasar gözlenmemiştir. Ancak yükün 100 kN'a ulaşmasıyla kesme bölgesine yerleştirilen CFRP şeritler'den duyulan matris çatlak sesleri artmıştır. Ayrıca kiriş sol kesme açıklığında kesme çatlağı da gözlenmiştir. Kiriş üzerindeki düşey yük değeri 104.5 kN ve deplasman değeri 23.3 mm olduğu anda akma meydana gelmiştir. Kiriş orta bölgesinde deplasman artmaya devam ederek beton basınç bölgesinde ezilme başlamıştır. Yük değerinde belirgin bir azalma gözlenmeden deplasman değerinin 43.3 mm'ye ulaşması ile beton basınç bölgesi ezilerek ve basınç

donatısı burkularak deney sonlanmıştır. Kirişlere uygulanan CFRP şeritler’de deney sonunda herhangi bir hasar gözlenmemiştir. Beton basınç hasarının yeri B-3 numunesine benzer şekilde gerçekleşmiştir. B-4 numunesinin yük taşıma kapasitesi B-3 numunesine göre %4.4, B-2 numunesine göre ise % 3.5 daha az çıkmıştır. Ancak B-4 numunesi B-0 ve B-1 numunelerine göre sırasıyla yük taşıma kapasitesinde %43.4 ve % 1.5 artış sağlamıştır. B-2 numunesinin yük taşıma kapasitesi B-4’ten fazla olmasına rağmen CFRP şerit genişliğinin az olması kesme hasarına uğramasına yol açmışken, B-4 numunesi sünek davranış sergileyerek CFRP şerit genişliğinin önemini ortaya koymuştur. Şekil 4.20’de B-0, B-1, B-2, B-3 ve B-4 numunelerinin karşılaştırması gösterilmiştir.

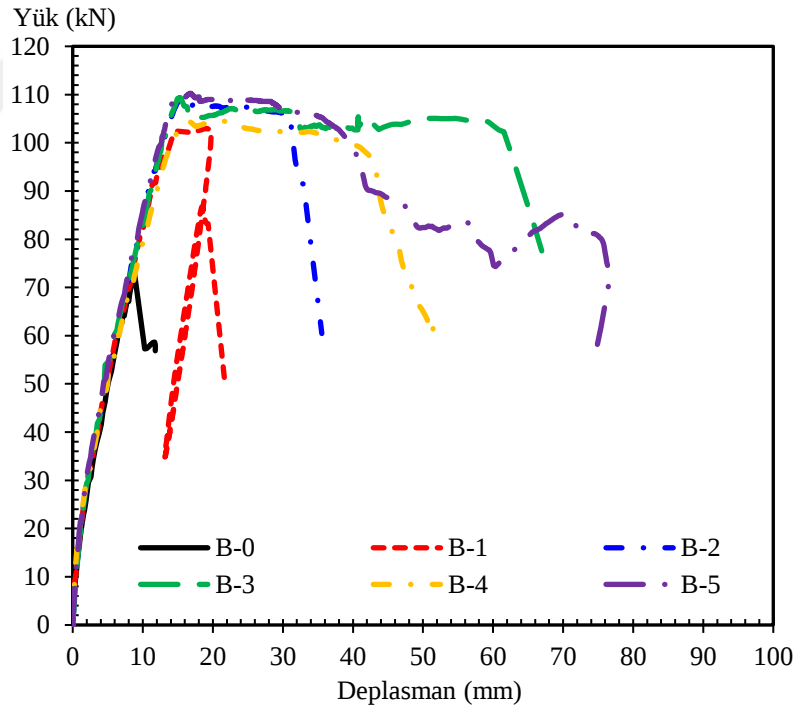


Şekil 4.20. B-0 – B-4 numunelerin yük-deplasman karşılaştırma grafiği

4.2.5. B-0 - B-5 Numunelerin karşılaştırılması

B-5 numunesi CFRP şerit genişliği 15 cm olan güçlendirme alternatifi olarak düşünülmüştür. CFRP şerit sayısı altıya düşürülmüş ancak CFRP yerleşimi kesme açıklığını kapsayacak şekilde diğer güçlendirme alternatiflerine benzer şekilde uygulanmıştır. Kiriş üzerinde ilk çatlaklar 30 kN yük seviyesinde kiriş orta açıklığında gözlenmiştir. Kesme bölgesindeki CFRP şerit genişliğinin artmasıyla ya da B-1 gibi sık yerleştirilmesi ile kiriş orta açıklığında oluşan çatlaklar daha erken yük seviyesinde gözlemlendiği tespit edilmiştir. Bu andan itibaren 80 kN yük seviyesine kadar kiriş orta açıklığında meydana gelen çatlak sayısı ve çatlak uzunlukları tarafsız eksene kadar

artmıştır. Bu yük değerinde kiriş sağ kesme açıklığında kesme çatlağı ilk kez oluşmuştur. Ancak CFRP şeritlerden matris sesleri duyulmamıştır. Bu durum matrislerin çatlayacak kadar yük taşımadığını göstermiştir. Düşey yükün artmasıyla 110 kN'a ulaşıldığında akma meydana gelerek deplasman kontrollü yüklemeye geçilmiştir. Bu aşamadan sonra deplasman değeri 42 mm'ye ulaştığı anda kiriş sol mesnedi altında beton ezilmesi başlamıştır. Deplasmanın 60 mm'ye ulaşması ile kiriş sol kesme açıklığındaki bir adet CFRP şeridin kopması sonucu kirişin bir miktar daha yük taşıdığı görülmüştür. Bu durum kopmayan diğer iki CFRP şeridin kesme dayanıma katkı sağlaması ile açıklanmaktadır. Artan yükün 86.9 kN ve deplasmanın 47.5 mm 'ye ulaşması ile ani yük düşüşü gerçekleşerek deney sonlanmıştır. Kiriş basınç bölgesinde yer alan boyuna donatıda burkulma gözlenmiştir. B-5 numunesi yük taşıma kapasitesi açısından B-0, B-1, B-2, B-3 ve B-4'e göre sırasıyla %51.1, %7.0, %1.7 ve %5.5 artış sağlamıştır. Güçlendirilen B-5 kirişinin dayanım açısından etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca deplasman artışına bağlı olarak yükün %15'ten fazla düşüşü sünekliliği kısıtlamaktadır. Şekil 4.21'de B-0, B-1, B-2, B-3, B-4 ve B-5 numunelerinin karşılaştırması gösterilmiştir.

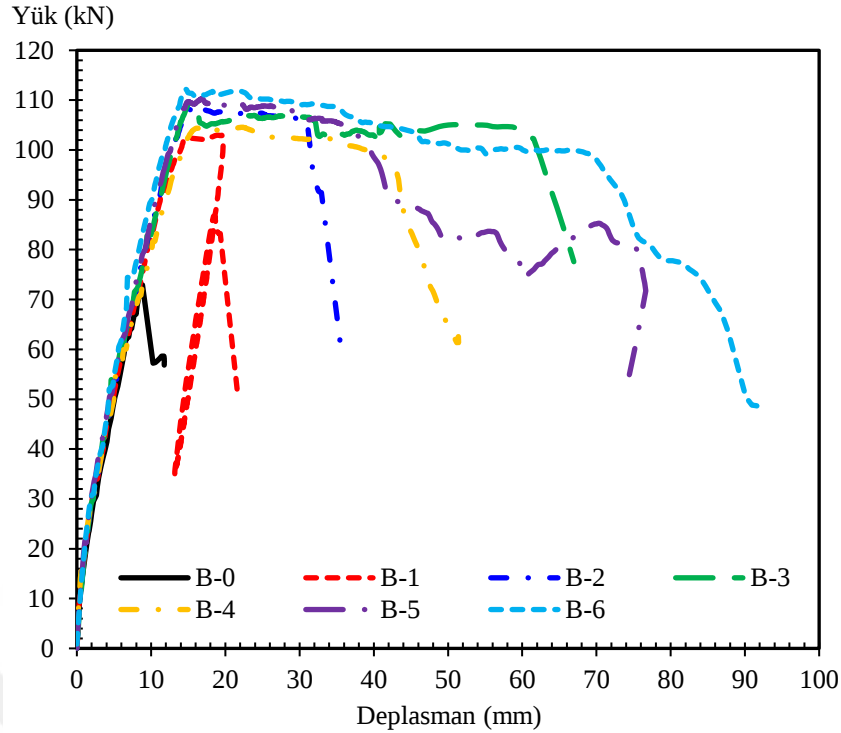


Şekil 4.21. B-0 – B-5 numunelerin yük-deplasman karşılaştırma grafiği

4.2.6. B-0 - B-6 Numunelerin karşılaştırılması

Bir diğer güçlendirme uygulaması olarak düşünülen B-6 kirişinde CFRP şerit genişliği 25 cm'ye çıkarılmış ve CFRP şerit sayısı ise dörde düşürülmüştür. B-6

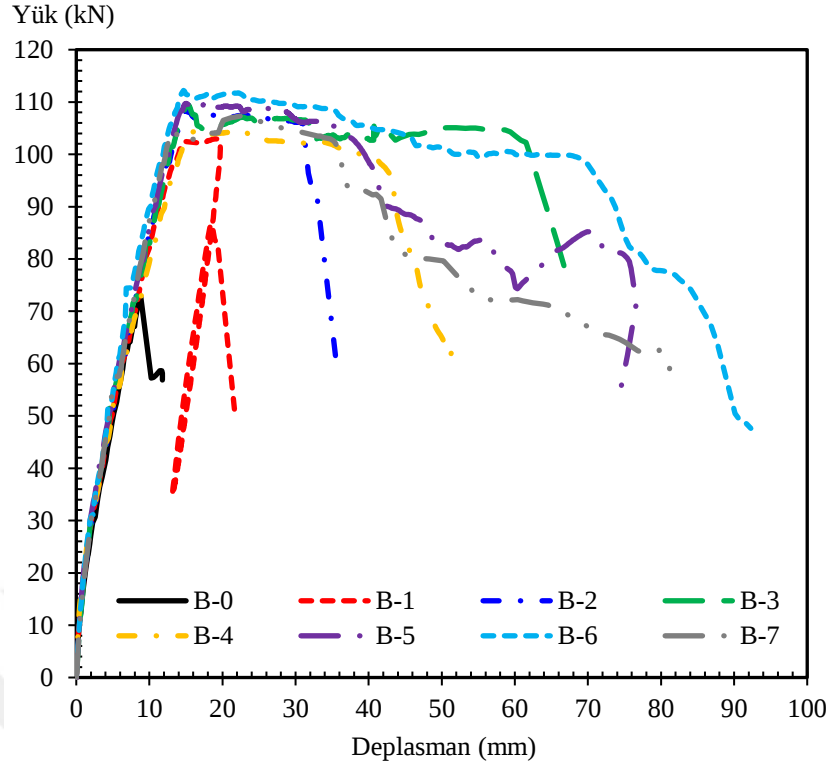
numunesinde ilk çatlak 40 kN yük seviyesinde diğer numunelere benzer şekilde kiriş orta açıklığında gözlenmiştir. Bu çatlaklar 70 kN yük seviyesine kadar kiriş eğilme bölgesinden başlayarak tarafsız eksen üstüne doğru tırmanmaya devam etmiştir. Ayrıca bu yük değerinde kiriş sol kesme açıklığındaki CFRP şeridin sağından başlamak üzere kesmeli eğilme çatlağı oluşmuştur. Yük değeri 80 kN'a ulaştığında elyafların zorlanması ile matris çatlak sesleri duyulmuştur. Ancak kiriş kesme açıklığında belirgin bir kesme çatlağı gözlenmemiştir. Kiriş üzerindeki yük değeri 100 kN olduğunda kiriş sağ kesme açıklığında CFRP şeritler arasında kesme çatlağı meydana gelmiştir. Yük değerinin 112.2 kN ve deplasman değerinin de 14.6 mm olmasıyla numunede akma gerçekleşmiştir. B-6 numunesindeki göçme hasarı kirişin tam ortasında donatı burkulması ile gerçekleşmiştir. Bu durum kiriş eğilme bölgesindeki donatıların aktığının işaretidir. Yani kiriş maksimum eğilme kapasitesine ulaşmış ve beton 0.003 birim deformasyonu aşarak göçme gerçekleşmiştir. Deneylerde strain gauge (gerinim ölçer) kullanılmadığından birim deformasyon değerleri hesaplanmamıştır. Oluşan göçme hasarının yerinin kiriş orta açıklığında betonun ezilmesiyle gerçekleşmesi tipik eğilme kiriş davranışının oluşumu ile açıklanabilir. CFRP şeritlerde ise deney sonunda herhangi bir hasar gözlenmemiştir. Bu durum CFRP şeritlerin tam kapasite ile kesme dayanımına katkı sağladığının yani CFRP'nin kesme donatısı görevini üstlendiğinin göstergesidir. Kirişlerin eğilme kapasitelerinin çalışmaya başladığı ve bu sayede sünek davranışın literatür ışığında gözlemlendiği ilk numune B-3 olarak tespit edilmişti. Sonra CFRP genişliği artırılarak eğilme kapasitesi B-6 numunesinde maksimum seviyeye ulaştığı görülmüştür. Burada yerleşimi yapılan toplam dört adet CFRP şeritler sayesinde deney sonunda tipik eğilme kiriş davranışı elde edilmiştir. Kesme yönünden yetersiz tasarlanan kiriş B-6 tipi güçlendirme ile maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Bu durum dayanıma katkısı ile diğer güçlendirme numuneleri arasında B-6 tipi güçlendirmeyi ön plana çıkarmaktadır. Sonuç olarak kirişin eğilme kapasitesi kesme kapasitesini yenerek deney sonlanmıştır. Şekil 4.22'de numunelerinin karşılaştırması gösterilmiştir.



Şekil 4.22. B-0 – B-6 numunelerin yük-deplasman karşılaştırma grafiği

4.2.7. B-0 - B-7 Numunelerin karşılaştırılması

B-7'nin diğer güçlendirme tiplerinden farkı, kesme açıklığı boyunca tamamen CFRP ile sargılamanın yapılmış olmasıdır. Bu sayede CFRP şeritler ile sargılama durumu ve şeritsiz sargılama durumunda davranış net olarak görülmek istenmiştir. Bunun için CFRP genişliği B-7 numunesinde 55 cm olarak dikkate alınmıştır. Bu numunede de ilk çatlaklar kiriş orta açıklığında 40 kN yük seviyesinde meydana gelmiştir. Yük değeri 40 kN ile 80 kN arasında eğilme bölgesindeki çatlaklar uzayarak artmıştır. Bu yük değerinden sonra çatlaklar tarafsız eksenin üzerine doğru uzayarak devam ederken, CFRP'nin bittiği yerde kesmeli eğilme çatlakları da gözlenmeye başlamıştır. Ancak kesme açıklığı komple sargılandığından eğilme hasarlarının kiriş orta açıklığında toplanmasıyla eğilme davranışı gözlenmeye başlamıştır. Yük değeri 107.3 kN ve deplasman değeri 22.4 mm olduğu anda numunede akma meydana gelmiştir. Akma esnasında kiriş orta noktasında beton basınç hasarı (ezilme) 40 mm deplasman değerinde oluşmuştur. Son olarak 85 mm deplasman değerine gelindiğinde beton basınç bölgesindeki donatıların burkulması ile deney sonlandırılmıştır. Şekil 4.23'de numunelerinin karşılaştırması gösterilmiştir.



Şekil 4.23. B-0 – B-7 numunelerin yük-deplasman karşılaştırma grafiği

4.3. Deney Sonuçları Değerlendirilmesi

Mevcut yapılar düşünülerek beton sınıfının daha da düşük (10 MPa civarı) seçilebilecekken, sadece lifli polimer oranı bir parametre olarak düşünülmüştür. Yapılan deneysel çalışma sonucunda CFRP miktarının etkili kullanımı oldukça önemlidir. Yapılan tasarımda CFRP'nin yerleşimi, ağırlık/m²'si davranışın değişimi üzerine etkilidir. Tüm numunelerin deney sonu hasar görünümü Şekil 4.24'de gösterilmiştir.

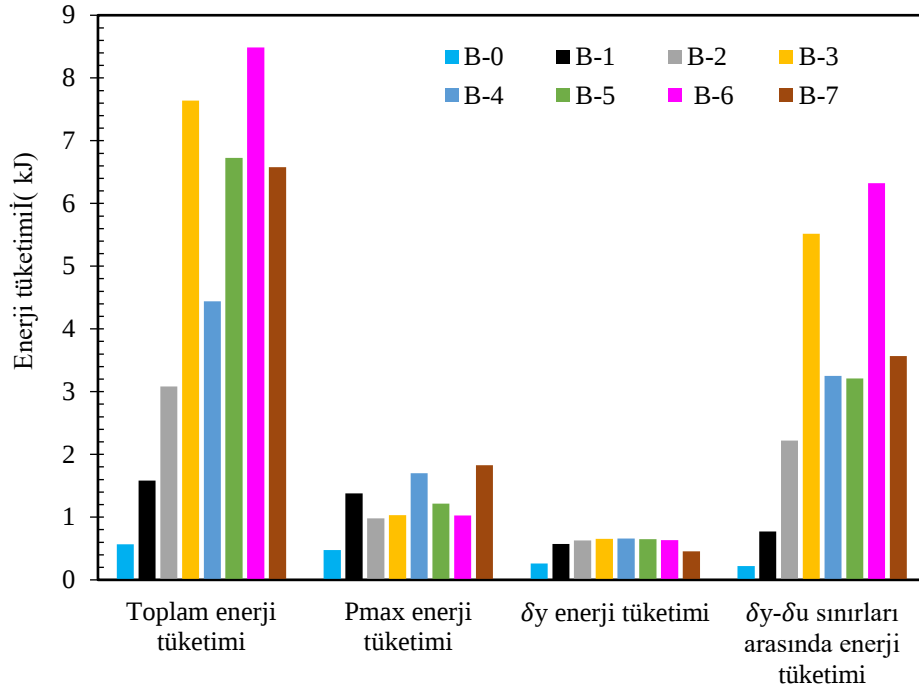


Şekil 4.24. Tüm numunelerin deney sonu hasar görünümü

CFRP ile güçlendirmede 240 gr/m^2 kumaşın tercih edilme sebebi beton üzerine daha kolay uygulanabilir ve daha az maliyetli olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sayede literatürde yaygın olarak tercih edilen 300 gr/m^2 , 420 gr/m^2 ve 600 gr/m^2 karbon elyaf kumaş yerine daha hafif olanı tercih edilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Burada 240 gr/m^2 olarak seçilen CFRP'nin tam sargılama ile etkili bir alternatif olacağı anlaşılmıştır.

Literatürde kullanılan 300, 400 ve 600 gr/m²'nin aksine maliye olarak düşünüldüğünde tercih edilebileceği söylenebilir. Ayrıca 8 farklı numunenin mekanik davranışının yorumlanabilmesi için tüm numunelerde dayanım, süneklik, rijitlik ve enerji tüketme değerleri elde edilerek karşılaştırma tablosu hazırlanmıştır. Süneklik hesabı için her bir numunenin maksimum yükünün %85'i dikkate alınarak tespit edilen noktadan yatay bir doğru deplasman eksenine paralel olarak çizilmiştir. Bu doğrunun eğriyi kestiği noktalardaki deplasman değerleri (δ_u , δ_y) kayıt altına alınmıştır. Daha sonra bu deplasmanlar oranlanarak (δ_u/δ_y) süneklik katsayısı (μ) hesap edilmiştir. Literatürde kirişlerde deplasman süneklik oranının 4~5 civarında olması yeterli süneklik olarak değerlendirilmektedir. Literatür ışığında numunelerin deplasman süneklikleri incelendiğinde B-0 ve B-1'de süneklik gözlenmezken, B-2, B-4 ve B-5'te kısmi süneklik gözlemlendiği söylenebilir. Tipik bir eğilme kiriş davranışının ise yalnızca B-3 ve B-6 numunelerinde gözlemlendiği anlaşılmaktadır. B-7 numunesi eğilme kapasitesine ulaşarak göçmüş olsa da süneklik açısından sınırlı seviyede kalmıştır. Bu durum gereğinden fazla CFRP kullanımının süneklik üzerinde olumsuz etkisini açıkça göstermektedir. Dolayısıyla yeterli ve etkili CFRP yerleşim seçimi oldukça önemlidir.

Tablo 4.9'dan takip edileceği gibi her bir numunenin süneklik oranları, referans kiriş olan B-0 deney elemanının süneklik oranı "1" kabul edilerek göreceli süneklik olarak da hesap edilmiştir. Deney elemanlarının toplam enerji kapasiteleri elemanlara ait yük deplasman eğrilerinin altında kalan alanların kümülatif toplamından hesaplanmıştır. Burada sırasıyla deney sonunda grafiğin altında kalan toplam, maksimum yükteki, akma anındaki ve plastik seviyede tüketilen enerji değerleri gösterilmiştir. Her bir yük-deplasman eğrisinin altındaki alanların toplamı ile toplam enerji tüketme kapasitesi hesaplanmıştır. Maksimum yük değerine kadar eğri altında kalan alan hesap edilerek ayrı bir enerji tüketme kapasitesi hesaplanmıştır. Daha sonra her bir numunenin $0.85 \times P_{max}$ değeri altında kalan ve δ_y ile sınırlanan alan hesap edilerek teorik akma anındaki enerji tüketme kapasitesi hesap edilmiştir. Son olarak eğri altında δ_y ve δ_u tarafından sınırlandırılan alan hesaplanarak plastik enerji tüketme kapasitesi hesap edilmiştir. Bu hesap kısaca δ_u değerine kadar olan eğri alanından δ_y değerine kadar olan eğri alanın çıkarılması ile elde edilmiştir. Bu hesaplara göre enerji tüketim karşılaştırması Şekil 4.25'de verilmiştir.



Şekil 4.25. Tüm numunelerin enerji tüketimi karşılaştırılması

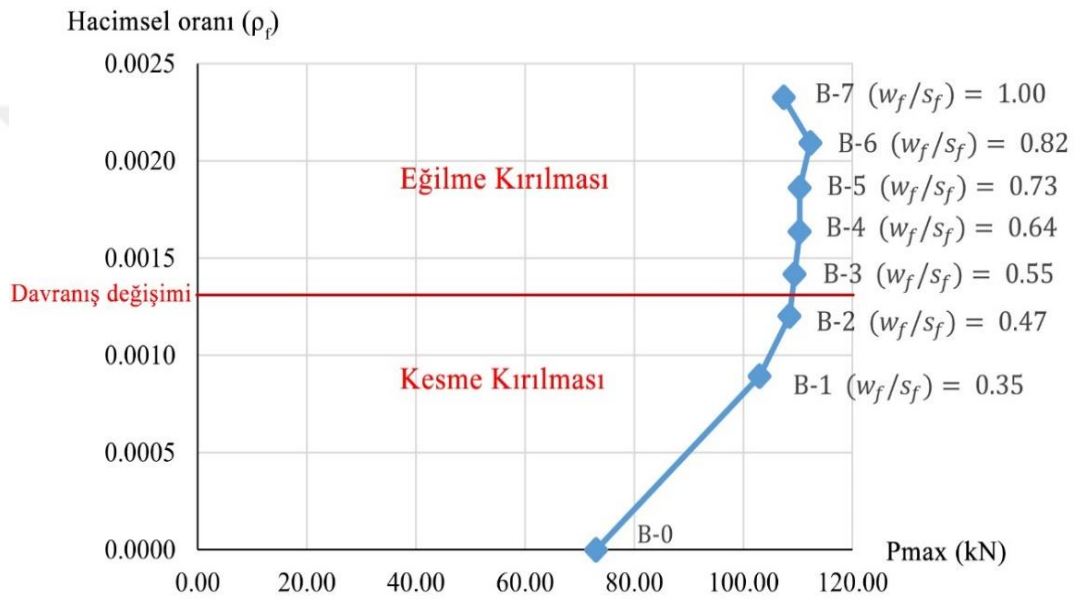
Tablo 4.9. Deneysel çalışma sonuçları

Numune	P _{max} (kN)	0.85P _{max} (kN)	Süneklik (δ _u / δ _y)	B-0'e göre süneklik	0.85P _{max} rijitlik (KN/mm)	Artış oranı	P _{max} rijitlik (KN/mm)	Artış oranı
B-0	72.93	61.99	1.49	1	9.37	-	8.26	-
B-1	102.98	87.53	1.72	1.15	8.07	0.86	5.44	0.66
B-2	108.41	92.15	2.86	1.92	8.12	0.87	7.25	0.88
B-3	109.38	92.97	5.46	3.66	7.97	0.85	7.12	0.86
B-4	104.55	88.87	3.74*	2.51*	7.58	0.81	4.72	0.57
B-5	110.26	93.72	3.65*	2.45*	8.27	0.88	6.56	0.79
B-6	112.21	95.38	6.54	4.39	8.76	0.93	7.66	0.93
B-7	107.34	91.24	3.89*	2.61*	8.51	0.91	4.78	0.58

*: CFRP'de meydana gelen lokal kopmalardan dolayı sünek plato üzerinde güç kaybı meydana gelmiştir.

Deneysel çalışmanın sonuçlarına göre, $\frac{w_f}{s_f} = 0.35$ en düşük oranına sahip olan B-1 numunesinin maksimum taşıma kapasitesi referans numuneye göre %41, diğer numunelerin maksimum taşıma kapasiteleri %48-53 arasında artış göstermiştir. $\frac{w_f}{s_f} = 0.47$ oranı geçtikçe kiriş hasarı eğilme bölgesine doğru kaydığı gözlenmiştir. Ayrıca, $\frac{w_f}{s_f} = 0.55$ oranına sahip olan B-3 numunesinin süneklik oranı = 5.45 ve $\frac{w_f}{s_f} = 0.82$ oranına sahip

olan B-6 numunesinin süneklilik oranı = 6.54 olarak bulunmuştur. $\frac{w_f}{s_f} = 0.35$ en düşük oranına sahip olan B-1 numunesinin süneklilik davranışı göstermeden kesmeden kırılmıştır. Diğer numuneler ise süneklilik oranı 2.9-3.9 arasında değişmektedir. Deney sonuçlarına dayanarak, kiriş numunelerinin yük taşıma kapasitesinde büyük farklılık gözlenmediği için optimum $\frac{w_f}{s_f}$ oranı belirlendiğinde ekonomi, süneklilik ve yük taşıma kapasitesi açısından en uygun olan $\frac{w_f}{s_f} = 0.55$ oranı optimum oranı olarak seçilmiştir. Şekil 4.26'de Hacimsel CFRP oranı (ρ_f) – P_{max} grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.26. Hacimsel CFRP oranı (ρ_f) – P_{max} grafiği

Deney numunelerinde oluşan ilk çatlak, göçme şekli ve CFRP şeritlerin durumu açısından karşılaştırılmıştır. Tablo 4.10'da deney sonuçların değerlendirilmesi verilmiştir.

Tablo 4.10. deney sonuçların değerlendirilmesi

Numune No	İLK ÇATLAK				GÖÇME			CFRP şeridi	Nihai Gözlem ve Özel Durum
	Yükü (kN)	Tipi	Açısı	Yeri	Yükü (kN)	Şekli	Çatlak Genişliği (mm)		
B-0	50	Eğilme	90°	Eğilme açıklığı	72.93	Kesme	3.2	-	Sağ tarafta kesme kırılması ile deney sonlandı
B-1	30	Eğilme	90°	Eğilme açıklığı	83.20	Kesme	47.2	5 adet şerit koptu	Sol tarafta kesme kırılması ile deney sonlandı
B-2	40	Eğilme	90°	Eğilme açıklığı	93.20	Kesme	3.5	2 adet şerit koptu	Sol tarafta kesme kırılması ile deney sonlandı
B-3	50	Eğilme	90°	Eğilme açıklığı	93.20	Eğilme	4.4	Şeritler hasar görmedi	Orta açıklıkta eğilme kırılması ile deney sonlandı
B-4	44	Eğilme	90°	Eğilme açıklığı	94.00	Eğilme	7.5	Şeritler hasar görmedi	Orta açıklıkta eğilme kırılması ile deney sonlandı
B-5	30	Eğilme	90°	Eğilme açıklığı	82.33	Eğilme	6.3	1 adet şerit koptu	Orta açıklıkta eğilme kırılması ile deney sonlandı
B-6	50	Eğilme	90°	Eğilme açıklığı	81.70	Eğilme	6.5	Şeritler hasar görmedi	Orta açıklıkta eğilme kırılması ile deney sonlandı
B-7	40	Eğilme	90°	Eğilme açıklığı	85.30	Eğilme	9.7	Şeritler hasar görmedi	Orta açıklıkta eğilme kırılması ile deney sonlandı

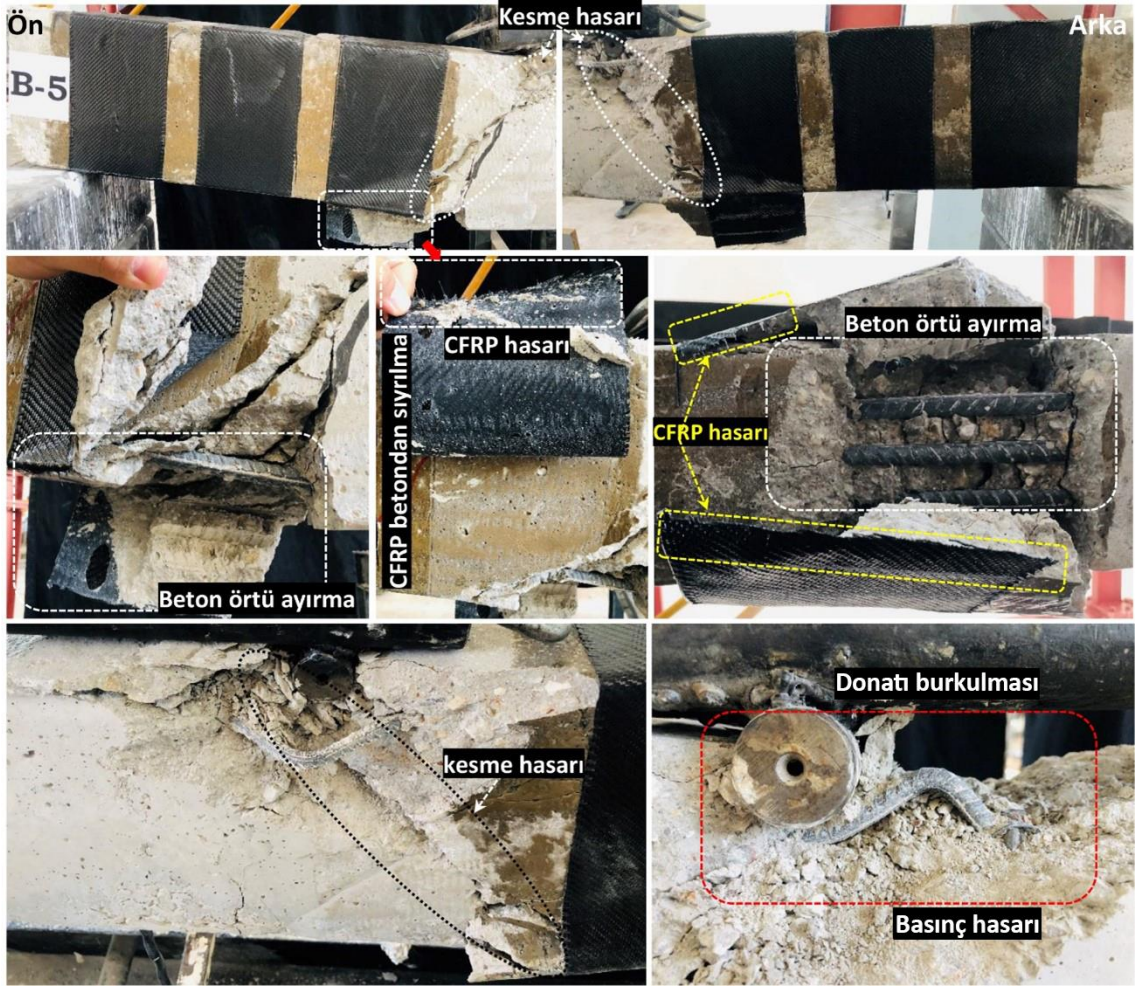
Deney sonunda kiriş elemanlarına yapılan hasar incelemesinde B-1, B-2 ve B-5 numunelere ait hasar görüntüleri Şekil 4.27’de gösterilmiştir.



a) B-1 numunesi



b) B-2 numunesi



c) B-5 numunesi

Şekil 4.27. B-1, B-2 ve B-5 numunelere ait hasar görüntüleri

5. ANALİTİK HESAP

Yapılan çalışmada CFRP'nin farklı genişliği dikkate alınarak bir dizi deneysel çalışma yapılmıştır. Bu bölümde, yapılan deneysel çalışma sonuçları ACI 440.2R-17, FIB-2001 ve TBDY-2018 yönetmeliklerine göre hesap edilerek karşılaştırılmıştır. Analitik hesap kısmında dikkate alınan parametreler Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Analitik hesabı için dikkate alınan parametreler

CFRP Şerit Özellikleri	Parametrik Değeri*
Kalınlık (mm)	0.3
Çekme dayanımı (MPa)	1850
Elastisite modülü (MPa)	105000
Maksimum kopma birim şekil değiştirme (%)	1.76
Reçine ve Sertleştirici	(F-1564, F-3486)
Epoksi çekme dayanımı (MPa)	55
Elastisite modülü (MPa)	2090
Maksimum kopma birim şekil değiştirme (%)	4.06±1.27

* Bu değerler laboratuvar ortamında yapılan çekme testi ile elde edilmiştir.

Genel olarak betonarme bir kirişin CFRP uygulamasında kesme dayanımı (V_r) tayin edilirken, betonun dayanımı (V_c), etriye donatısının dayanımı (V_s) ve lifli polimerin dayanımı (V_f) dikkate alınarak denklem 4 ile hesaplanmaktadır.

$$V_r = V_c + V_s + V_f \quad (4)$$

Her üç yönetmeliğe göre kiriş kesme kapasitesi hesabı Tablo 5.2'de verilmiştir. Burada sırasıyla ACI 440.2R-17 (ACI 440, 2008), FIB-2001 (CEB-FIP, 2001), ve TBDY-2018 yönetmeliklerindeki hesap prosedürü özetlenmiştir. İlk olarak ACI 440.2R-17 yönetmeliği incelendiğinde, FRP'nin kesme kuvvetine katkısı (V_f), Tablo 5.2'deki Denklem 5- 7'deki gibi hesaplanmaktadır. Ayrıca Denklem 8 ile hesapta dikkate alınan ε_{fe} belirlenmiştir. CFRP şeridin aksenal çekme testi sonucu $\varepsilon_{fu}=0.0176$ olarak hesap edilmiştir.

FIB-2001'de FRP'nin kesme kuvvetine katkısı (V_f), Tablo 5.2'deki Denklem 9'daki gibi hesaplanmaktadır. CFRP ile Tam sargı numuneler için etkili CFRP $\varepsilon_{fd,e}$ 'nin değeri, Denklem 10'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

TBDY-2018 yönetmeliği oldukça sınırlı bir anlatımla kirişlerin FRP ile güçlendirilmesinden bahsetmektedir. Burada CFRP'nin kesme kuvvetine katkısı (V_f), Denklem. 12'deki gibi hesaplanmaktadır. ACI 440 yönetmeliği ile aynı şekilde, sürekli

sargı durumunda FRP aralığı s_f değeri, FRP genişliği w_f değerine eşit olmalıdır. Etkili birim uzama ε_f değeri Denklem 13 ile belirlenen değerlerin en küçüğü olarak alınmalıdır.

Tablo 5.2. Farklı yönetmelikler ve tasarım denklemleri

Yönetmelik	Genel denklem	Tam sargı	Sürekli sargı
	$V_f = \frac{A_{fv} \cdot f_{fe} \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) \cdot d_{fv}}{s_f} \quad (5)$		
ACI 440.2R-17	$A_{fv} = 2 \cdot n \cdot t_f \cdot w_f \quad (6)$ $f_{fe} = \varepsilon_{fe} \cdot E_f \quad (7)$	$\varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \cdot \varepsilon_{fu} \quad (8)$	$s_f = w_f$
FIB-2001	$V_{fd} = 0.9 \varepsilon_{fd,e} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \quad (9)$	$\varepsilon_{fd,e} = 0.17 \left(\frac{f_c^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0.30} \cdot \varepsilon_{fu} \quad (10)$	$\rho_f = 2 \cdot t_f \cdot \frac{\sin \alpha}{b_w}$ $\rho_f = 2 \cdot \left(\frac{t_f}{b_w} \right) \cdot \left(\frac{b_f}{s_f} \right) \quad (11)$
TBDY-2018	$V_f = \frac{2 \cdot n_f \cdot t_f \cdot w_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_f \cdot d}{s_f} \quad (12)$	$\varepsilon_{fe} \begin{cases} \leq 0.004 \\ \leq 0.5 \varepsilon_{fu} \end{cases} \quad (13)$	$s_f = w_f$

CFRP'nin kesme kuvvetine katkısında dikkate alınan kopma birim uzaması her bir yönetmelik için farklılık ifade etmektedir. Her bir yönetmelik için dikkate alınan birim deformasyon hesabı Tablo 5.3'de, deneysel ve analitik kesme kuvveti karşılaştırması Tablo 5.4'de verilmiştir. Ayrıca, Şekil 5.1'de farklı yönetmeliklere göre karşılaştırma grafiği gösterilmiştir.

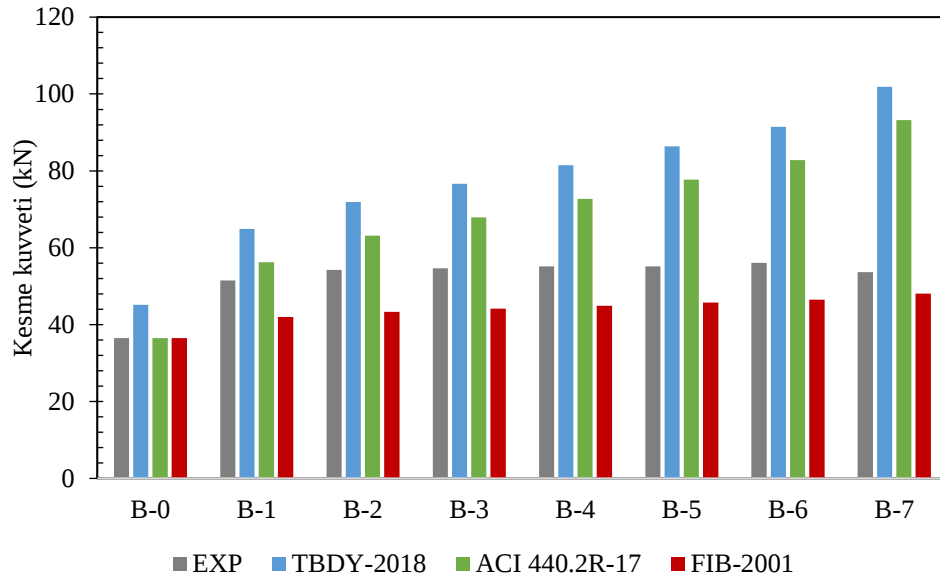
Table 5.3. Hesaplamalarda dikkate alınan birim deformasyon değerleri

Numune	Deneysel sonuç $\varepsilon_{fu}, \%$	ACI440.2R-17 $\varepsilon_{fe}, \%$	FIB-2001 $\varepsilon_{fe}, \%$	TBDY-2018 $\varepsilon_{fe}, \%$
B-0	-	-	-	-
B-1	1.76	0.4	0.125	0.4
B-2	1.76	0.4	0.114	0.4
B-3	1.76	0.4	0.108	0.4
B-4	1.76	0.4	0.104	0.4
B-5	1.76	0.4	0.100	0.4
B-6	1.76	0.4	0.096	0.4
B-7	1.76	0.4	0.093	0.4

Tablo 5.4. Deneysel ve analitik maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması

		Deneysel									
Numune		kesme kuvveti (P/2)	TBDY 2018				ACI440.2R-17			FIB-2001	
Kod	w_f/s_f	V_r	V_f	V_c+V_s	V_r	V_f	V_c+V_s	V_r	V_f	V_c+V_s	V_r
B-0	-	36.47	-	45.19	45.19	-	36.48	36.48	-	36.48	36.48
B-1	0.35	51.49	19.72	45.19	64.91	19.72	36.48	56.20	5.53	36.48	42.00
B-2	0.47	54.21	26.68	45.19	71.87	26.68	36.48	63.16	6.83	36.48	43.31
B-3	0.55	54.69	31.44	45.19	76.62	31.44	36.48	67.91	7.66	36.48	44.14
B-4	0.64	55.13	36.29	45.19	81.47	36.29	36.48	72.76	8.47	36.48	44.95
B-5	0.73	55.13	41.24	45.19	86.42	41.24	36.48	77.71	9.26	36.48	45.74
B-6	0.82	56.10	46.29	45.19	91.47	46.29	36.48	82.76	10.04	36.48	46.52
B-7	1.00	53.67	56.70	45.19	101.89	56.70	36.48	93.18	11.57	36.48	48.05

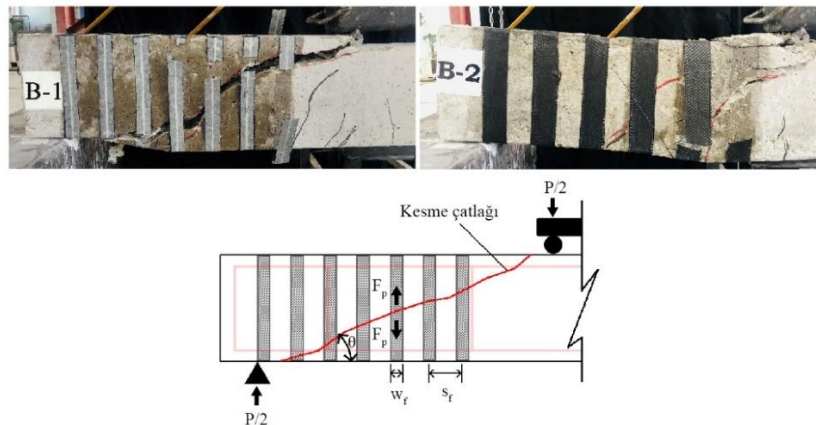
* V kesme değerleri kN cinsinden verilmiştir.

**Şekil 5.1.** Deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılması

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin davranışları incelenerek kirişlerin güçlendirmesinde kullanılan CFRP şeritlerinin optimum w_f/s_f oranı belirlenmesi amaçlanmıştır. Deneysel çalışmada, $\frac{1}{2}$ ölçekli 125 x 250 x 2500 mm boyutlarında 8 adet dikdörtgen kesitli kiriş kesme açısından yeterli olmaması için Ø5 / 35 cm etriyeli olacak şekilde üretilmiştir. Düşey yükler altında numunelerden bir tanesi referans olarak test edilmiş diğer numunelerin ise kesme açıklıklarında artan CFRP oranlarında güçlendirilerek testleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada $0^\circ / 90^\circ$ konfigürasyonunda iki eksenli tek tabakalı 240 gr/m² karbon elyaf tam sargılama uygulaması ile yapılarak güçlendirme yapılmıştır. Çalışma sonunda aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

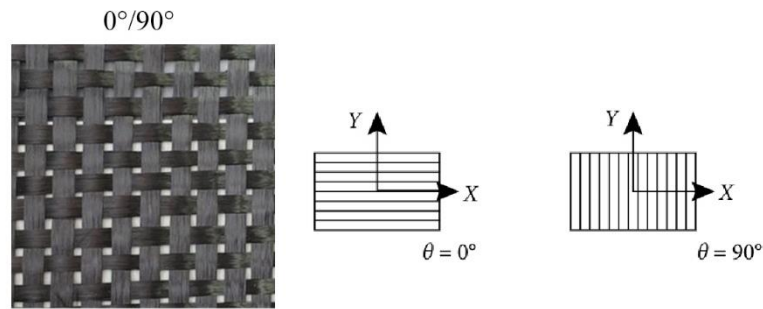
1. Kesme donatısı yetersiz olan ve herhangi bir önlem alınmamış olan B-0 kirişinde beklediği gibi gevrek kırılma meydana gelmiş ve kiriş düşük yük seviyesinde kesme bölgesinden hasar görerek taşıma kapasitesine erişmiştir.
2. CFRP sargılarda w_f/s_f oranının kademli olarak artırılması sonucunda B-1 ve B-2 numunelerinde kesme kapasitesinin de w_f/s_f oranına bağlı bir şekilde artış meydana gelmiştir. Fakat bu kirişler istenilen kapasite ve sünekliğe ulaşamadıkları için kullanılan CFRP'nin yeterli olmadığı görülmüştür. B-1 ve B-2 numunelerinin düşey yük altındaki davranışında sünek plato oluşmamış ve gevrek güç tükenmesi ile kapasiteye erişilmiştir. Bu durum B-1 ve B-2 numunelerinde uygulanan sargılama miktarının kiriş davranışını eğilme davranışına çeviremediğini ve yetersiz kaldığının bir göstergesidir. Şekil 6.1'de B-1 ve B-2 numunelerde oluşan kesme hasarı gösterilmiştir.



Şekil 6.1. B-1 ve B-2 numunelerde oluşan kesme hasarı

3. B-3 numunesi ile beraber kirişin düşey yük taşıma kapasitesinde önemli değişiklik olmasa da deformasyon yapabilme kabiliyetinde bir iyileşme olduğu görülmüştür. Bu durum B-3 güçlendirmesinde seçilen CFRP w_f/s_f oranının özellikle süneklik açısından yeterli olduğunu göstermektedir. Collins ve Roper (1990)'ın dediği gibi, kesme açısından yetersiz olan denge altı kirişlerde yeterli CFRP uygulaması ile kesme açısından yetersiz olan denge altı kirişlerin davranışı sünek kırılma ile sonuçlanmaktadır.
4. B-3 ve sonrasındaki numunelerin hepsinde davranışın sünek kırılma olduğu gözlemlenmiştir. Boyuna donatı oranının denge donatısı oranın altında olması ve yeterli hale gelen kesme kapasite ile beraber kesit sünek davranışa zorlanmıştır. Fakat donatı oranın sehim sınırı olarak tanımlanan donatı oranına yakın olması (%1.12 mertebesinde) donatı akması ile beraber gelişen çekme kırılması şeklide gözlemlenen davranışın ve hasarın zamanla basınç kırılmasına dönüşmesine neden olmuştur. Bu durum kirişlerde çekme bölgesinde kullanılan donatının azalması ile beraber davranışın daha sünek olacağını da göstermektedir.
5. B-4, B-5 ve B-7 numunelerinde betonarme kiriş üzerinde kesme bölgesinde meydana gelen çatlak genişliğinin artması ile liflere güç aktarımı olmuş ve yüke yakın bölgedeki liflerde kopma sınırının aşılmasıyla yırtılma meydana gelmiştir. Bu durum grafiklerde kademeli olarak taşıma kapasitesinde düşmeye neden olmuş. Bu nedenle matematiksel olarak, sargılamanın hiç hasar görmeyeceği düşüncesiyle sünekliğin giderek artması beklentisi, B-4, B-5 ve B-7 numaralı deneylerde tam olarak gözlemlenmemiştir. Bu nedenle özellikle $0^\circ/90^\circ$ konfigürasyonunda iki eksenli tek tabakalı 240 gr/m^2 karbon elyaf malzemesinin yapışma yüzeyi alanı, yön ve gramajı ile ilgili kuşku oluşmuştur. Literatürde lifli polimerin gramajının ve kullanılan malzemedeki lif yönlerinin güçlendirilen elemanın davranışını değiştireceğinden bahsedilmektedir. Örneğin, Corolin ve Taljsten (2003) ve Corolin (2003) yaptıkları kesme dayanımı yetersiz kiriş güçlendirmesi çalışmalarında 125, 200 ve 300 gr/m^2 'lik elyaf kullanmışlardır. 125 ve 200 gr/m^2 'lik elyaflarda deney sırasında kopma gözlemlenirken 300 gr/m^2 'lik elyaflarda bir kopma gözlemlenmemişlerdir.

6. Yapılan sargılamanın kesme açıklığının tamamını yayılmaması (tekil yük noktası ile en son CFRP arsanda bir miktar boşluk var) bu dar bölgede kemerlenmeye sebep olmuştur. Bu nedenle gerçek binalarda kirişlerdeki çatlağın kolon yüzünden kiriş etkili yüksekliği olan “d” kadar içeride ve 45 derece açı ile oluşması beklendiği için CFRP sargılama işlemlerinde özellikle kiriş yüksekliğinin iki katı kadar olan ($2 \times h$) bölgenin oldukça önemli olduğu görülmektedir.
7. B-5’te kesme bölgesinde de hasar meydana gelmiş ve bu hasarla beraber kirişin rijitliği azalarak orta deplasman artmıştır. Eğer bu çatlağın ilerleyip gevrek güç tükenmesinin önüne geçilirse belki bu durum kirişin orta deplasmanı için daha da iyi olabilir. Ama kesme çatlağının gelişim şekli nedeniyle bunun durması ve kontrol edilmesi çok zor ve bu nedenle bu çatlak kesinlikle önlenmelidir.
8. Kirişlerin eğilme kapasitesine ulaştıktan sonra artan deformasyonla beraber kesme çatlakları da gözlemlenmektedir. Meydana gelen çatlaklarla beraber elyaf ve beton yüzey ayrılmakta ve lifli polimer boşa çıkmaktadır. Bu durumda adeta iki ucundan eksenel yüklerle çekilen bir çubuk şeklinde davranan ve kaldıraç vasıfesi gören yüksek gerilmeye maruz CFRP’ler ($0^\circ/90^\circ$ olan liflerde meydana gelen çekme ile beraber uzama istemine karşılık veremedikleri için) de kopmalar meydana gelmiştir. Hasarın özellikle düşey yükün temas ettiği bölgeye yakın CFRP’de olması bu elemanlarda daha çok çekme kuvveti oluştuğunun bir göstergesidir. $0^\circ/90^\circ$ yönlü lifli polimer Şekil 6.2’de gösterilmiştir.

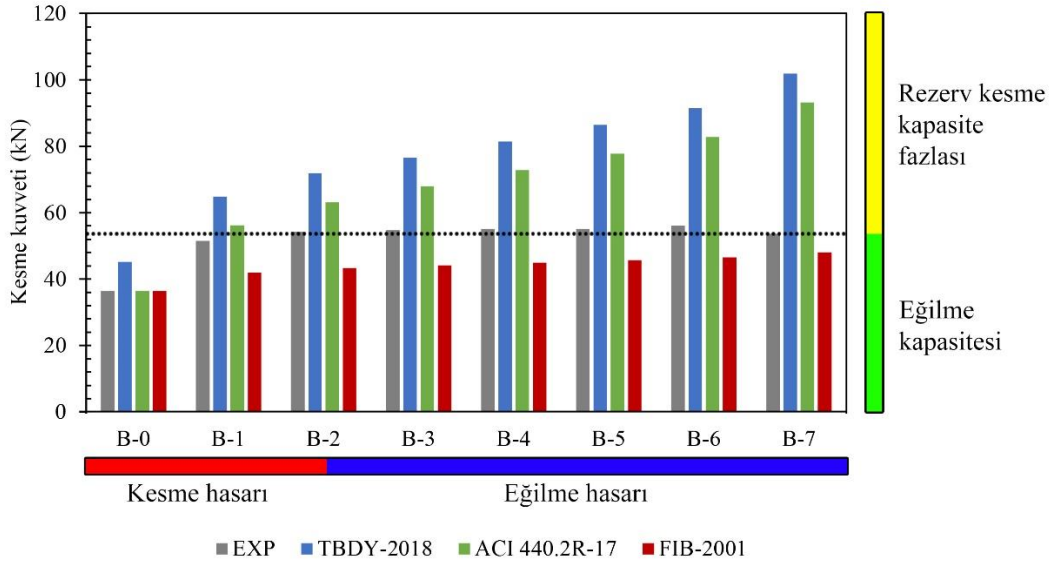


Şekil 6.2. $0^\circ/90^\circ$ yönlü lifli polimer.

9. B-3 numunesi ve sonrasında tüm numunelerde eğilme hasarı meydana geldiği için uygulanan CFRP’nin yeterli olduğu görülmektedir. Bilindiği gibi eğilme

kapasitesine ulaşmış bir elemanda süneklik kapasitesi devreye gireceği için donatının akmasından sonra taşıma kapasitesinde bir değişiklik meydana gelmez. Bununla beraber deneysel yük taşıma kapasitesi değişmezken artan sargılama miktarı ile beraber yönetmeliklerde kesme bazlı hesaplanan ve teorik olarak bulunan taşıma kapasitesi değeri artmaktadır. Bu durum özellikle B-3' numunesinden sonra daha çok dikkat çekmektedir. Örneğin TBDY-2018 yaklaşımı ile hesap edilen kesme kapasitesi deneysel kapasiteden yaklaşık 2.0 kat daha fazladır. Bu durum deprem yönetmeliklerinde yer alan ve süneklik düzeyi yüksek elemanlarda 2.0~3.0 aralığında seçilen dayanım fazlalılığı katsayısının mantığını da açıklamaktadır. Al-Sulaimani ve ark. (1994)'un söylediği gibi, kirişlerde kesmeye karşı belirli bir marjın olmaması durumunda kirişlerde ani kesme kırılması oluşabilmektedir. Burada belirtilen marj kapasite tasarımı gereği bulunan ve yönetmeliklerde bahsedilen dayanım fazlalığı katsayısıdır. Yönetmelikler bu açıdan kesmeye karşı her zaman daha marjlı (daha tutucu, konservatif) tasarım yaptırmaktadırlar. Örneğin bu kirişin gerçek bir uygulamada güçlendirilmesi durumunda yönetmeliğin isteği B-6 yada B-7 türü bir güçlendirmedir. Başka bir ifade ile B-3 numaralı kirişte davranışın sünek olmasına rağmen yönetmelik normlarına göre yeterli olmadığı ve optimum sargı oranına sahip numunenin B-6 olduğu düşünülmektedir. Başka bir ifade ile optimum oran hem yeterli dayanım hemde sünekliği sağlayabilmesi ile açıklanabilir. B-3 numunesinin grafiklerden süneklik açısından da yeterli performansı verdiği görülmekle beraber ($w_f/s_f = 0.55$) yönetmelik tabanlı bir yaklaşımda optimum seviye B-6'da test edilen CFRP miktarıdır ($w_f/s_f = 0.82$).

10. Bu çalışmada, CFRP şeritlerinin birim uzaması analitik çalışmada sabit bir değer olarak kabul edilmiştir. Fakat kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan tüm CFRP şeritlerin deformasyon değerlerinin birbirinden farklı olduğu açıktır. Bu nedenle ileride yapılacak çalışmalarda, lifli polimerler şeritlerinin deformasyonu ölçülerek geliştirilecek olan nümerik çalışmalar daha gerçekçi sonuçlara ulaşabilecektir. Yönetmeliklerdeki verilen denklemlerden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçları belli bir düzeyde karşılamaktadır. Özellikle CFRP limit uzama deformasyon değerleri analitik hesaplamalarda en etkili parametre olarak görülmektedir. Deney numunelerinin sonuçları karşılaştırılması Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Deney numunelerin sonuçları karşılaştırılması.

11. Bu çalışmada elde edilen bulgular test parametreleri ile sınırlıdır. Örneğin beton dayanımının ve boyuna donatının değişim miktarı davranışı değiştirecek ana parametrelerdir. Benzer şekilde yükleme şekli, yükün uygulandığı nokta, kesme açıklığı (a_v/d) da yine davranışa etkin parametrelerdir. Kirişlerin uygulamada genellikle tablalı olarak imal edilmesi nedeniyle CFRP uygulama şekli ve kabuller değişecektir. CFRP'nin farklı ankraj tipleri ile kiriş gövdesine farklı noktalardan sabitlenmesi de davranışı değiştirebilecek parametreler arasındadır. Bu sebeplerden dolayı bahsedilen tüm parametrelerin etkisi ayrı çalışmalarda denenerek optimum lifli polimer miktarı ile ilgili genel bir yargıya varılabilir.

KAYNAKLAR

- 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.
- Acır, Ş., 2017, Prediction of shear strength of FRP-reinforced concrete beams based on gene expressing programming. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı
- Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y., Gemi, L. ve Arslan, M. H., 2019, İnceltirilmiş Uçlu Betonarme Prefabrik Aşıkların Kesme Kapasitelerinin CFRP uygulaması ile Artırılması, International Science and Academic Congress (INSAC'19), Konya, 285-291.
- Akyürek, M., 2019, The effect of concrete cover and concrete strength on concrete with FRP bars exposed to high temperature. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Alam, M. A., Al Riyami, K. J. C. ve Materials, B., 2018, Shear strengthening of reinforced concrete beam using natural fibre reinforced polymer laminates, 162, 683-696.
- Alshlash. S., 2019, Betonarme kirişlerde onarım ve güçlendirme yöntemlerinin deneysel olarak irdelenmesi ve maliyet analizi. Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
- Al-Sulaimani GJ, Sharif AM, Basunbul IA, Baluch MH, Ghaleb BN., 1994, Shear repair for reinforced concrete by fiberglass plate bonding. ACI Struct J 1994;91(3):458–64
- Alyousef, R., Topper, T., & Al-Mayah, A. 2018, Crack growth modeling of tension lap spliced reinforced concrete beams strengthened with fibre reinforced polymer wrapping under fatigue loading. Construction and Building Materials, 166, 345-355.
- 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).
- Balık, F. S., 2012, Betonarme dolgu duvarla güçlendirilmiş deprem davranışı yetersiz betonarme çerçevelerin davranışına pencere boşluklarının etkisi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Barris, C., Torres, L., Vilanova, I., Miàs, C., & Llorens, M., 2017, Experimental study on crack width and crack spacing for Glass-FRP reinforced concrete beams. Engineering Structures, 131, 231-242.
- Bayülke, N., 1998. Structural damage in 27 June 1998 Adana-Ceyhan earthquake, General Directorate of Disaster Affairs, ERD.

- Boumaaza, M., Bezazi, A., Bouchelaghem, H., Benzennache, N., Amziane, S. ve Scarpa, F., 2017, Behavior of pre-cracked deep beams with composite materials repairs.
- British Institution of Structural Engineers (BISE)., 1999, “Interim guidance on the design of reinforced concrete structures using fiber composite reinforcement”, IstructE, SETO Ltd., London.
- C. Aksoylu, Y.O. Özkılıç, M.H. Arslan, 2020, Damages on prefabricated concrete dapped-end purlins due to snow loads and a novel reinforcement detail, *Engineering Structures* 225 111225.
- C. Aksoylu, Y.O. Özkılıç, Ş. Yazman, G. Lokman, M. Arslan, 2021, İnceltilmiş Uçlu Önüretimli Aşık Kirişlerinin Yük Taşıma Kapasitelerinin Deneysel Ve Numerik Olarak İrdelenmesi Ve Çözüm Önerileri, *Teknik Dergi* 32(3).
- 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.
- C. Aksoylu, Y.O. Özkılıç, Ş. Yazman, L. Gemi, M. Arslan, 2021, İnceltilmiş Uçlu Önüretimli Aşık Kirişlerinin Yük Taşıma Kapasitelerinin Deneysel ve Numerik Olarak İrdelenmesi ve Çözüm Önerileri, *Teknik Dergi* 32(3).
- Capozucca, R. ve Magagnini, E., 2018, Experimental vibration response of homogeneous beam models damaged by notches and strengthened by CFRP lamina. *Composite Structures*, 206, 563–577.
- Carolín, A. 2003, Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements (Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet).
- Carolín, A., & Täljsten, B., 2003, Behaviour of concrete structures strengthened in shear with Cfrp. In *Fibre-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures: (In 2 Volumes)* (pp. 467-476).
- Collins, F. & Roper, H. 1990, Laboratory Investigation of Shear Repair of Reinforced Concrete Beams Loaded in Flexure. *ACI Material Journal* 87(2): 149-159.
- CSA S806-12, 2012, Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers, Canadian Standards Association.
- Doğru, E., 2019, Paslanmaya maruz kalmış betonarme kirişlerin eğilme etkisi altında frp ile güçlendirilmesi. Erzincan binalı yıldırım üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Faleschini, F., Gonzalez-Libreros, J., Zanini, M. A., Hofer, L., Sneed, L., & Pellegrino, C. 2019, Repair of severely-damaged RC exterior beam-column joints with FRP and FRCM composites. *Composite Structures*, 207, 352-363.
- FIB, 2001, “Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures”, (CEB-FIP) Technical Report, Bulletin 14.

- Gökçen, C., 2019, Analysing Of Debonding Behaviour Of Frp In Reinforced Concrete Members Strengthened With Frp. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Huo, J., Li, Z., Zhao, L., Liu, J., & Xiao, Y. 2018, Dynamic Behavior of Carbon Fiber-Reinforced Polymer-Strengthened Reinforced Concrete Beams without Stirrups under Impact Loading. *ACI Structural Journal*, 115(3).
- ISISM03-07, 2007, Canadian network of centers of excellence on intelligent sensing for innovative structures, Univ. of Winnipeg, Winnipeg, Man.
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE)., 1997, Machida, A., editor, “Recommendations for design and construction of concrete structures using continuous fibre reinforced materials”, Concrete Engineering Series 23, Tokyo, Japonya.
- Karzac, A. S., Al Toubat, S., Maalej, M., & Estephane, P. 2017, Repair of reinforced concrete beams using carbon fiber reinforced polymer. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 120, p. 01008). EDP Sciences.
- Kaygusuz, M., 2018, Repair and strengthening of elevated temperature damaged rc beams with FRP. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Lee, H. Y., Jung, W. T., & Chung, W. 2017, Flexural strengthening of reinforced concrete beams with pre-stressed near surface mounted CFRP systems. *Composite Structures*, 163, 1-12.
- L. Gemi, C. Aksoylu, Ş. Yazman, Y.O. Özkılıç, M.H. Arslan, 2019, Experimental investigation of shear capacity and damage analysis of thinned end prefabricated concrete purlins strengthened by CFRP composite, *Composite Structures* 229, 111399.
- Li, D., Huang, P., Guo, X., Zheng, X., Lin, J., & Chen, Z. 2018, Fatigue crack propagation behavior of RC beams strengthened with CFRP under cyclic bending loads. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 41(1), 212-222.
- Mofidi, A., ve Chaallal, O. 2014, Tests and design provisions for reinforced-concrete beams strengthened in shear using FRP sheets and strips. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(2), 117-128.
- Moradi, E., Naderpour, H., & Kheyroddin, A. 2020, An experimental approach for shear strengthening of RC beams using a proposed technique by embedded through-section FRP sheets. *Composite Structures*, 238, 111988.
- Obaidat, Y. T., Abu-Farsakh, G. A., & Ashteyat, A. M. 2019, Retrofitting of partially damaged reinforced concrete beam-column joints using various plate-configurations of CFRP under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 198, 313-322.
- Oruç, R., 2019, Static and dynamic investigation of shear deficient reinforced concrete beams strengthened with carbon fiber reinforced polymer strips. Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.

- Osman, B. H., Wu, E., Ji, B., & Abdulhameed, S. S. 2017, Repair of pre-cracked reinforced concrete (RC) Beams with openings strengthened using FRP sheets under sustained load. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 11(1), 171-183.
- Qin, R., Zhou, A., & Lau, D. 2017, Effect of reinforcement ratio on the flexural performance of hybrid FRP reinforced concrete beams. *Composites Part B: Engineering*, 108, 200-209.
- Sarier, Z., 2018, Flexural behavior of gfrp reinforced hybrid beams used in different concrete grades. Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Siddika, A., Saha, K., Mahmud, M. S., Roy, S. C., Al Mamun, M. A., & Alyousef, R. 2019, Performance and failure analysis of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) strengthened reinforced concrete (RC) beams. *SN Applied Sciences*, 1(12), 1617.
- Tankut, T. 2005, Türkiye'deki Bina Yapıları İçin Güçlendirme Stratejisi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara
- TBDY, 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Resmi Gazete,

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mohammed ALSDUDI
Uyruğu : FİLİSTİN
Doğum Yeri ve Tarihi : GAZZE – 14.10.1993
Telefon : 05059911259
Faks : -
E-Posta : engmuhammedsd@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı	İlçe	İl	Bitirme Yılı
Lise :	Beer Al-Saba	Rafah	Gazze	2011
Üniversite :	Belıkesir Üni.	Karisi	Balıkesir	2017
Yüksek Lisans :	Konya Teknik Üniv.		Konya	2021
Doktora :				

BECERİLER

- MS Office (Excel. Word. Excess. Power point ...)
- AutoCAD
- Photoshop

YABANCI DİLLER

- Arapça
- İngilizce
- Türkçe

YAYINLAR

Alsdudi, M., Arslan, MH., Özkılıç, Y., Yazman, S., Aksoylu, C., Gemi, L. (2020). Determination of Optimum CFRP composite Amount in Strengthening Reinforced Concrete Beams with Inadequate Shear Strength. Conference: ICCS23 - 23rd International Conference on Composite Structures & MECHCOMP6 - 6th International Conference on Mechanics of Composites At: Faculty of Engineering, University of Porto, Portugal