



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KARBON FİBER İPLİKLER KULLANARAK
KESME KAPASİTESİ YETERSİZ
BETONARME KİRİŞLERİN YENİLİKÇİ
YÖNTEMLE GÜÇLENDİRİLMESİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Abdul Basir SALIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Abdul Basir SALIMI tarafından hazırlanan “**Karbon Fiber İplikler Kullanarak Kesme Kapasitesi Yetersiz Betonarme Kirişlerin Yenilikçi Yöntemle Güçlendirilmesinin Araştırılması**” adlı tez çalışması 26/06/2025 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

Prof. Dr. Ercan IŞIK
(Bitlis Eren Üniversitesi)

.....

Danışman

Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

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.

Abdul Basir SALIMI

Tarih: 26/06/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

KARBON FİBER İPLİKLER KULLANARAK KESME KAPASİTESİ YETERSİZ BETONARME KİRİŞLERİN YENİLİKÇİ YÖNTEMLE GÜÇLENDİRİLMESİNİN ARAŞTIRILMASI

Abdul Basir SALIMI

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

**Danışman: Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU
İkinci Danışman: Doç. Dr. Boğaçhan BAŞARAN**

2025, 84 Sayfa

**Jüri
Doç. Dr. Ceyhun AKSOYLU
Prof. Dr. Ercan IŞIK
Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN**

Bu tez çalışmasıyla kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişlerin karbon fiber demet/iplik ile farklı konfigürasyonlarda güçlendirilmesinin kiriş davranışına etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında toplam on iki adet betonarme kiriş düşey yük altında test edilmiştir. Bunlardan iki tanesi referans niteliğinde olup, gerisi farklı ip türleri, ip aralıkları ve epoksi kullanımı gibi değişken parametrelerin dikkate alınmasıyla güçlendirilmiştir. Yapılan testler sonucunda referans numuneler eğik çekme kırılmaları sonucu göçmüştür. Özel üretimli karbon fiber ip ve epoksi kullanılarak güçlendirilen kirişlerde %92'ye varan yük taşıma kapasitesi artışı gözlemlenmiştir. Ayrıca, kesme çatlaklarının sınırlandırıldığı ve daha sünek davranışın sergilendiği tespit edilmiştir. İp aralığının etkisi incelendiğinde, d/4 aralığa sahip güçlendirmeler d/3 ve d/2'ye göre daha yüksek yük taşıma kapasitesine ve sünekliğe sahiptir. Ayrıca özel üretimli ip ile güçlendirilen numunelerin, karbon fiber demetiyle/ipiyle güçlendirilen numunelere göre daha rijit bir davranış ortaya koyduğu belirlenmiştir. Özel üretimli ip ile yapılan güçlendirmelerde deney sırasında herhangi bir kopma gözlenmemiştir. Bu durum deneylerde tercih edilen 6mm çaplı özel üretim ipin yeterli olduğunu ortaya koymuştur. Karbon fiber demet/ip kullanılan numunelerde ise kopmayı önlemek adına ip çapının uygun şekilde artırılması gerektiği anlaşılmıştır. Numunelerin tüm enerji tüketim kapasiteleri açısından epoksi kullanımının oldukça etkili olduğu belirlenmiştir. Özellikle epoksili numunelerde plastik enerji tüketim kapasitesinin 128 kata kadar artış göstermesi önemlidir. Sonuç olarak, yenilikçi bir teknikle yapılan bu güçlendirme uygulamasının, kesme kapasitesi zayıf betonarme kirişlerin taşıma gücü ve sünekliğinin artırılması için etkili, uygulanabilir olduğunu ortaya koyarken gelecek araştırmalar için değerli katkılar sağlayacağını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Güçlendirme, karbon fiber ip, kesme kirişi, epoksi, özel üretim ip

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF INNOVATIVELY STRENGTHENING REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH INSUFFICIENT SHEAR CAPACITY USING CARBON FIBER STRANDS

Abdul Basir SALIMI

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

**Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ceyhun AKSOYLU
Co-Advisor: Assoc. Prof. Dr. Boğaçhan BAŞARAN**

2025, 84 Pages

**Jury
Assoc. Prof. Dr. Ceyhun Aksoylu
Prof. Dr. Ercan IŞIK
Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN**

In this thesis, the effect of strengthening of reinforced concrete beams with insufficient shear capacity with carbon fiber bundles/strands in different configurations on the beam behavior was experimentally investigated. Within the scope of the study, a total of twelve reinforced concrete beams were tested under vertical load. Two of them were used as reference specimens and the remaining ten beams were strengthened with variable parameters such as different types of strands, strand spacings and the use of epoxy. The reference specimens failed due to diagonal tension failure. Beams strengthened with specially produced carbon fiber strands and epoxy showed an increase of up to 92% in load carrying capacity. It was also observed that shear cracks were confined and more ductile behavior was exhibited. When the effect of strand spacing is analyzed, beams strengthened with $d/4$ spacing have higher load carrying capacity and ductility compared to $d/3$ and $d/2$. In addition, it was determined that the specimens strengthened with specially produced strands exhibited a more rigid behavior than the specimens strengthened with carbon fiber bundles or strands. During the test, no rupture was observed in the specimens strengthened with specially produced strands. These findings indicate that the 6 mm diameter specially produced strand preferred in the experiments was sufficient. In the specimens strengthened with carbon fiber bundles or strands, it was concluded that the strand diameter should be appropriately increased to prevent rupture. The use of epoxy was found to be highly effective in improving the energy dissipation capacity of the specimens. A notable finding is the up to 128-fold increase in plastic energy dissipation capacity observed in the epoxy-strengthened specimens. As a result, the findings demonstrate that this strengthening application with an innovative technique is effective and feasible for increasing the load-carrying capacity and ductility of reinforced concrete beams with insufficient shear capacity, while providing valuable insights for future research.

Keywords: Strengthening, carbon fiber strand, shear beam, epoxy, special production strand

ÖNSÖZ

Bilgi ve tecrübeleriyle bana rehberlik eden, tez çalışmam boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen bu tezin ortaya çıkmasında ve tamamlanmasında büyük paya sahip olan değerli danışman hocam Doç. Dr. Ceyhun Aksoylu'ya en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Ayrıca bu süreçte ikinci danışmanım olarak yer alan, yardım ve tecrübelerine başvurduğum, tezi hazırlarken yönlendirmelerinden istifade ettiğim tez çalışmamın daha iyi hale gelmesi için bana yardım eden saygıdeğer hocam Doç. Dr. Boğaçhan Başaran'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasında kullanılan özel üretimli karbon fiber iplerin temini konusunda verdikleri kıymetli katkılar için Gama Metalurji firmasına; özellikle de firma ortakları Sayın Dr. Mehmet Barış Daryal ve Sayın Adem Koştu'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca karbon fiber demeti/ipi temini konusundaki değerli destekleri için Beşoğlu Endüstri firması CEO'su Sayın Murat Beşoğlu'na da çok teşekkür ederim. Sağlanan bu malzeme destekleri, çalışmanın uygulanabilirliğine ve bilimsel derinliğine önemli ölçüde katkı sağlamıştır.

Tezin hazırlanmasında yardımlarına başvurduğum ve her zaman desteklerini esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Yusuf Uysal ve Yüksek İnşaat Mühendisi Youssoufa Mahamadou Sidiibe'ye teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmaların yürütülmesinde desteklerini esirgemeyen Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı çalışanlarına, özellikle Uğur Sarıkaya, Mehmet Emin Gürhan ve emekli teknisyen Yüksel Çiftçi'ye şükranlarımı sunarım.

Bu çalışmayı, her daim yanımda olan ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan aileme ithaf ediyorum.

Abdul Basir SALIMI
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı.....	3
1.2. Tezin Önemi	3
1.3. Tezin İçeriği.....	4
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	17
3.1. Deney Numuneleri	18
3.1.1. Deney numunelerinin boyutları	19
3.1.2. Deney numunelerinin donatı detayları.....	20
3.1.3. Deney numunelerinin malzeme özellikleri	21
3.3. Numunelerin Güçlendirme Metodu	27
3.4. Deney Mekanizması	29
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	32
4.1. Deneysel Çalışma Sonuçları	33
4.1.1. S-N-4.0-N-NE numunesi	33
4.1.2. N-N-0-0-N-NE numunesi	35
4.1.3. U-CF-4.0-16-NE numunesi	37
4.1.4. U-CF-2.0-16-NE numunesi	40
4.1.5. U-CF-4.0-8-NE numunesi	43
4.1.6. U-CF-3.0-16-NE numunesi	45
4.1.7. U-OCF-3.0-OZ-NE numunesi	48
4.1.7. U-OCF-4.0-OZ-NE numunesi	50
4.1.8. U-CF-3.0-16-E numunesi	53
4.1.9. U-OCF-3.0-OZ-E numunesi	55
4.1.10. U-CF-4.0-16-E numunesi	58
4.1.11. U-OCF-4.0-OZ-E numunesi	60
4.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi	63
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	71
5.1. Sonuçlar	71
5.2. Öneriler	73
KAYNAKLAR	74

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

a_v	: Yükleme noktasının mesnet yüzüne uzaklığı, mm
$B420c$	: Akma dayanımı en düşük 420 MPa olan nervürlü donatı tipi
$C20$	: 28 gün suda bekletilmiş ortalama silindir basınç dayanımı 20 MPa olan beton
d	: Kesitin faydalı yüksekliği, mm
P_{max}	: Maksimum yük değeri, kN
S_y	: Nominal akma noktasındaki rijitlik, kN/mm
δ_{max}	: Maksimum yük seviyesindeki deplasman değerini, mm
δ_u	: Kopma anındaki deplasman değeri, mm
δ_y	: Akma anındaki deplasman değeri, mm
$\emptyset$	: Donatı çapı, mm
μ	: Süneklik katsayısı

Kısaltmalar

S	Delik var
N	Dikiş yok
U	U Sargı
CF	Standart karbon fiber demet/ip
OCF	Özel üretimli karbon fiber demet/ip
d/x	x=2.0, 3.0, 4.0
CFRP	Karbon Elyaf Takviyeli Polimer
MÇD/MSS	Mekanik Çelik Dikiş/Mechanical Steel Stitches
PLC	Potansiyometrik Lineer Cetvel
TBDY-2018	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018
TDY-2007	Türk Deprem Yönetmeliği 2007
E	Epoksi var
NE	Epoksi yok
S-N-4.0-N-NE	delikli, dikişsiz, d/4 aralıklı, epoksisiz referans kiriş numunesi
N-N-0.0-N-NE	deliksiz, dikişsiz, epoksisiz referans kiriş numunesi
U-CF-4.0-16-NE	U şeklinde, delikli, karbon fiber demet/ip, d/4 aralıklı, 16 kat epoksisiz güçlendirilen kiriş numunesi
U-CF-2.0-16-NE	U şeklinde, delikli, karbon fiber demet/ip, d/2 aralıklı, 16 kat, epoksisiz güçlendirilen kiriş numunesi
U-CF-4.0-8-NE	U şeklinde, delikli, karbon fiber demet/ip, d/4 aralıklı, 8 kat, epoksisiz güçlendirilen kiriş numunesi
U-CF-3.0-16-NE	U şeklinde, delikli, karbon fiber demet/ip, d/3 aralıklı, 16 kat, epoksisiz güçlendirilen kiriş numunesi
U-OCF-3.0-OZ-NE	U şeklinde, delikli, özel üretimli karbon fiber ip, d/3 aralıklı, epoksisiz güçlendirilen kiriş numunesi
U-OCF-4.0-OZ-NE	U şeklinde, delikli, özel üretimli karbon fiber ip, d/4 aralıklı, epoksisiz güçlendirilen kiriş numunesi
U-CF-3.0-16-E	U şeklinde, delikli, karbon fiber demet/ip, d/3 aralıklı, 16 kat, epoksili güçlendirilen kiriş numunesi
U-OCF-3.0-OZ-E	U şeklinde, delikli, özel üretimli karbon fiber ip, d/3 aralıklı, epoksili güçlendirilen kiriş numunesi
U-CF-4.0-16-E	U şeklinde, delikli, karbon fiber demet/ip, d/4 aralıklı, 16 kat, epoksili güçlendirilen kiriş numunesi
U-OCF-4.0-OZ-E	U şeklinde, delikli, özel üretimli karbon fiber ip, d/4 aralıklı, epoksili güçlendirilen kiriş numunesi

1. GİRİŞ

Merkez üssü sırasıyla Kahramanmaraş'ın Pazarcık ve Elbistan ilçeleri olan ve dokuz saat arayla meydana gelen 6 Şubat 2023 depremleri, Türkiye tarihindeki yıkıcı depremler arasında yerini almıştır. Bu iki deprem, ciddi can ve mal kayıplarına yol açmış olup deprem sonrası mevcut yapı stokunun durumu yeniden gündeme gelmiştir. Özellikle 2000 yılı öncesi ve sonrası mevcut yapı stoklarının değerlendirilmesi gerekliliği tartışılmaya devam etmektedir.

Binalarda düşey ve yatay taşıyıcı elemanlar depreme karşı dayanıklı, sünek ve rijit olmak zorundadır. Bu durum mühendislik hizmeti almış bir binadan beklenen en temel durumdur. Deprem anında hasarın öncelikle kirişlerde olması da beklenen bir durumdur. Çünkü bu durum, ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde güçlü kolon zayıf kiriş ilkesi ile tanımlanmıştır. Yapı elemanlarında gözlenen hasarın tanımı plastik mafsallaşma ile ifade edilmektedir. Plastik mafsalların öncelikle kirişlerde oluşması da yönetmeliklerin istediği bir durumdur. Oluşan plastik mafsallar, sabit bir moment altında kiriş uçlarında dönmenin gerçekleşmesiyle meydana gelmelidir. Bu durum kirişlerde sünek kırılmanın meydana geldiğine de işaret etmektedir. Eğer kiriş yeterli süneklikte tasarlanmadıysa kirişlerde istenmeyen ani ve gevrek kırılma gözlenmektedir. Bu kırılma kesme kırılması olarak tanımlanmaktadır. Yani kirişin kesme açıklığında yeterli etriyenin (sargı donatısının) olmaması durumunda diğer bir adıyla eğik çekme kırılması gözlenmektedir. Bu da kirişlerde istenilmeyen bir kırılma türüdür. Diğer bir ifade ile, kirişlerin yeterli kesme dayanımına sahip olmaması deprem gibi dinamik yükler altında ani ve gevrek kırılmasına yani istenmeyen bir kırılma türünün ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu da kapasite tasarımları ilkesine uyulmadan inşa edilen yapıları temsil eden bir durumdur.

Mevcut binaların onarım ve güçlendirilmesi için geleneksel ve yenilikçi yöntemler mevcuttur. Yenilikçi yöntemler malzeme teknolojisinin de gelişmesiyle hızlanmıştır. Esasen eleman bazlı ve sistem bazlı güçlendirme tekniklerinin ayırt edilmesi de gereklidir. Aksi halde yapılan güçlendirmenin deprem anında etkili olamayacağı da açıktır. Bunun için mevcut yapının performans durumunun doğru tespit edilmesi ilk adım olarak değerlendirilmelidir. Daha sonra yapılan değerlendirmelere bağlı olarak eleman ve sistem bazlı güçlendirme alternatifleri ilgili yapıya uygulanmalıdır. Ancak bu sayede mevcut yapı depreme dayanıklı hale gelebilmektedir. Bilindiği üzere geleneksel güçlendirme yöntemleri içerisinde betonarme elemanlara yeni beton veya donatı ilavesi, mantolama veya çelik plakalarla sarma gibi uygulamalar en çok bilinen tekniklerdir.

Ancak bu yöntemlerin genellikle işçilikleri zor ve zahmetlidir. Ayrıca uygulama süresinin uzunluğu, yapıya getirdiği ek yükler ve estetik kayıplar gibi dezavantaj olarak sayılabilir. Son yıllarda daha hafif, yüksek dayanımlı ve uygulama açısından daha pratik yapı malzemeleri için araştırmalar artmıştır. Bu bağlamda, fiber takviyeli polimer (FRP) malzemelerle yapılan güçlendirme teknikleri maliyet ve ulaşılabilirlik açısından büyük ilgi görmektedir. Özellikle karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) sistemleri, yüksek çekme dayanımı, düşük özgül ağırlığı ve korozyona karşı dirençli yapısı ile öne çıkmaktadır. Ancak bu malzeme ile yapılan güçlendirmenin eleman bazlı bir güçlendirme olduğu yani sistem bazlı bir güçlendirme olmadığı bilinmelidir.

Uygulamada farklı formlarda üretilen karbon fiberin, laminat (prepreg plaka şeklinde) ve kumaş (dokuma/örgü formunda) formu yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca, FRP'nin iplik (filament) olarak kullanımı farklı alanlarda mümkündür. Özellikle basınca çalışan borular, tanklar ve silindirik yapılar gibi elemanların üretiminde ön plana çıkmaktadır. Betonarme yapı elemanlarında yaygın olarak kumaş ile el yatırma yöntemi yaygındır. Bununla birlikte özellikle döşeme ve kirişlerin eğilme dayanımlarının artırılması için laminat plaka kullanımı dikkat çekmektedir.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TBDY-2018), FRP kompozit malzemesi ile yapılan yapısal güçlendirme yöntemine ilişkin teknik esaslara yer vermektedir. Türk Deprem Yönetmeliği 2007 (TDY-2007)'de var olan haliyle TBDY-2018'de yerini korumuştur. Ancak, bu yöntemin uygulanması ve malzeme seçimi açısından oldukça sınırlı bir bilginin varlığı düşündürücüdür. Özellikle kiriş elemanlarda yalnızca tam sargılama yöntemine müsaade edilmesi dikkat çekicidir. Çünkü tam sargılama uygulaması ile döşemelerin kırılıp tekrardan imal edilmesi gerekmektedir. Bu durum pratik olan güçlendirme yönteminin zorlaştırılmasına yol açmaktadır. Başka bir deyişle, güçlendirme tekniğinin pratikliği ortadan kalkmaktadır. Bunun için daha pratik ve etkili yöntemlerin araştırılması önem kazanmaktadır.

1.1. Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, kesme kapasitesi zayıf betonarme kiriş elemanların yenilikçi bir teknikle güçlendirilmesidir. Bu teknik Aksoylu ve ark. (2024) tarafından geliştirilen ve patentli bir güçlendirme tekniği olarak ortaya çıkmıştır. Bu güçlendirme yaklaşımında, epoksi içeren ve içermeyen karbon fiber demet/iplik ile özel üretim FRP iplik çeşitli konfigürasyonlarda kullanılarak kirişlerin kesme dayanımının artırılması hedeflenmiştir. Diğer bir ifade ile kesme kapasitesi zayıf betonarme kiriş elemanlar kesme açıklığı boyunca karbon fiber demet iplik ile dikilmek suretiyle güçlendirilmiştir. Bu sayede uygulamada döşeme sisteminin kırılmasına gerek kalmadan mevcut kirişin görünen yüksekliği üzerinde açılan delikler kullanılarak güçlendirme uygulaması gerçekleştirilebilmektedir. Literatür için ilk çalışmayı temsil eden bu tez hem yapısal performans hem de uygulama kolaylığı açısından oldukça dikkat çekici sonuçlar ortaya koymuştur.

1.2. Tezin Önemi

Literatürde kesme kapasitesi zayıf betonarme kirişlerin güçlendirilmesine yönelik çalışmalar mevcuttur. Bu kapsamda, son yıllarda ortaya çıkan patentli Mekanik Çelik Dikiş (MÇD) veya İngilizce adıyla Mechanical Steel Stitches (MSS) tekniği, pratik uygulama kolaylığı, düşük maliyetli olması ve etkili performans iyileştirmesiyle dikkat çekmektedir. Söz konusu teknik, geleneksel ve zaman alıcı güçlendirme yöntemlerine alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında ise karbon fiber demet/iplik ile güçlendirilen kirişlerin kesme dayanımlarındaki değişim ve hasar davranışları araştırılmıştır. Literatürde ilk kez uygulanan bu güçlendirme tekniği, ortaya koyduğu sonuçlar bakımından gelecekte yapılacak çalışmalar açısından önemli bir referans niteliği taşımaktadır. Bu sayede, eleman bazlı geleneksel ve zahmetli yöntemlere alternatif olarak sunulan bu teknik, pratik ve etkili olmasıyla dikkat çekmektedir.

1.3. Tezin İçeriği

Bu tez çalışması ile yeni bir güçlendirme tekniği tanıtılmaktadır. Geliştirilen bu güçlendirme tekniği farklı yapı elemanlarına uygulanabilir nitelikte olmakla birlikte, bu tez çalışmasında yalnızca kesme kapasitesi yetersiz betonarme kiriş elemanlar üzerinde deneysel olarak incelenmiştir. Bu yönüyle çalışma, söz konusu yöntemin literatürde ilk sistematik uygulamasını temsil etmektedir.

Bu tez çalışması beş ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, düşey ve yatay yükler etkisi altında yapıların maruz kaldığı hasarlar ele alınmış, çalışmanın amacı ve önemi vurgulanmıştır. İkinci bölümde, literatürde yer alan güçlendirme yöntemleri incelenmiş, özellikle kesme kapasitesi yetersiz kirişlerin güçlendirilmesi üzerinde durulmuştur. nc bölümde, karbon fiber demet/iplik ile yapılan güçlendirme tekniğinin betonarme kesme kirişleri üzerinde uygulanmasına yönelik deneysel çalışmalar anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, düşey yükler altında yapılan deneysel çalışma sonuçları detaylı biçimde analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Beşinci ve son bölümde ise karbon fiber demet/iplik ile yapılan güçlendirmenin kiriş kesme kapasitesine olan etkisi değerlendirilmiş ve gelecekte yapılacak çalışmalar için tavsiyelerde bulunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Betonarme kirişlerin kesme ve eğilme dayanımlarının iyileştirilmesi için onarım ve güçlendirmeye ihtiyaç duyabilir. Literatürde kirişlerin güçlendirilmesine yönelik farklı çalışmalar mevcuttur. Bu bölümde özellikle son on yıldaki güçlendirme çalışmaları sunulmuştur. Bu sayede literatürdeki güçlendirme yöntemleri ortaya konulmuş ve bu tez çalışmasında önerilen güçlendirme tekniğinin önemi ve özgünlüğü ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Literatürde, yapı elemanlarının taşıma kapasitesini, eğilme ve kesme dayanımını artırmak amacıyla hem geleneksel hem de yenilikçi güçlendirme yöntemlerini araştıran çok sayıda araştırmacı bulunmaktadır. Geleneksel güçlendirme yöntemleri arasında betonarme mantolama ve çelik levha ile sarma gibi teknikler incelenmişken, son yıllarda maliyet avantajları nedeniyle lifli polimerler (FRP) ile güçlendirme ve mekanik çelik dikiş teknikleri (Uysal, 2024) gibi nispeten daha yeni yaklaşımlar betonarme kirişler üzerinde test edilmiştir. Literatürdeki çalışmaların bir kısmı hasarlı kirişlerin onarılmasına yönelik olduğu gibi bir kısmı ise hasarsız kirişlerin güçlendirilmesi üzerine olduğu görülmektedir. Mevcut hasarlı kirişlerde, çatlaklar üzerinden çelik plakalar veya karbon fiber malzemeler özelliklerine göre ankraj veya kimyasal yapıştırıcılar kullanılarak betonarme kiriş üzerinde sabitlenerek çeşitli onarım ve güçlendirilme işlemleri yapılmaktadır (Çetinkaya ve ark., 2004; Alshlash ve ark., 2019) .

Literatür incelendiğinde, Ali (2022) çalışmasında, olası bir deprem durumunda saplamalı kirişin ana kirişte oluşturduğu hasar ve bu hasarı önleme yöntemlerini araştırmıştır. Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kullanımının betonarme kirişlerin kesme kapasitesi ve davranışını nasıl etkilediğini incelemek amacıyla deneysel bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada, farklı beton basınç dayanım seviyeleri, CFRP ağırlığı veya gramajı gibi değişkenlerin kirişlerin taşıma kapasitesi, süneklik ve enerji tüketimi üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında toplam altı farklı numune üretilmiş ve test edilmiştir. İlk dört numune üzerinde, etriye aralığının ve yatay pilye kullanımının ana kirişin yapısal davranışı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Son iki numunede ise, karbon ve cam elyaf takviyeli polimer (FRP) sistemlerinin ve donatı düzenlemelerinin ana kiriş performansına etkisi incelenmiştir. Deneysel bulgular, özellikle yeni inşa edilen yapılarda ana kiriş ile saplamalı kirişin kesişim bölgesinde enine donatı yoğunluğunun artırılmasının ve yatay pilye kullanımının, kesme davranışının iyileştirilmesi açısından etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, çelik

çubukla takviye edilmiş karbon elyaf polimer (SB-CFRP) ve cam elyaf polimer kumaşla güçlendirilmiş (SB-GFRP) numunelerin yapısal performansları karşılaştırılmış; SB-CFRP numunesinin daha düşük enerji tüketimi ile birlikte daha sünek bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir.

Alav (2022) yaptığı çalışmada kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişlerin, farklı beton dayanımları ve çeşitli sarma yöntemleri ile Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP) kullanılarak güçlendirilmesinin davranışsal etkilerini incelemiştir. Çalışma, tam sarma, U tipi sarma ve yan yüz sarma gibi CFRP uygulama şekillerinin yanı sıra farklı beton sınıfları ve CFRP gramajlarının kirişlerin taşıma kapasitesi, sünekliği ve enerji tüketimi üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmaktadır. Çalışmada kullanılan CFRP'nin, kirişlerin (kesme kırılmasından değil) eğilme kapasitesine ulaşmasını sağlayabildiği veya betonun çatlaması ile beraber ani kopmalar yaşadığı görülmüştür. Bu çalışmada da özellikle 5- 20 MPa beton dayanımları için tam sargılamanın iki ve üç taraftan sargıya göre kirişin dayanımı ve davranışı konusunda daha etkili olduğu görülmüştür. Yönetmeliklerde güçlendirme yapılacak yapı elemanlarının beton sınıfı ve CFRP'nin gramaj bilgileriyle ilgili detaylı bilgilerin olmaması bir eksiklik olarak düşünülmüş, özellikle düşük beton dayanımlı mevcut binaların güçlendirilmesi konusundaki ihtiyaçlar vurgulanmakta ve yönetmeliklerin gereklilikleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak en etkili güçlendirme yöntemleri değerlendirilmektedir.

Kaya ve ark. (2017), tarafından gerçekleştirilen çalışmada, farklı biçimlerde uygulanan CFRP şeritlerin epoksi ile birlikte kullanılmasıyla betonun basınç dayanımı ile kirişlerin eğilme dayanımının artırılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda, 28 günlük karakteristik basınç dayanımı 30 MPa olan beton ile 100×100×500 mm boyutlarında kiriş numuneleri ve 150×150×150 mm boyutlarında küp numuneler üretilmiştir. Deneysel sonuçlar, CFRP uygulamasının hem beton küp numunelerdeki basınç dayanımını hem de kiriş numunelerdeki eğilme dayanımını anlamlı düzeyde artırdığını göstermektedir. Ayrıca, bu tür bir güçlendirmenin betonun ani kırılma eğilimini azaltarak daha kontrollü bir hasar davranışına katkı sağlayabileceği belirtilmiştir.

Aykaç ve ark. (2014) , çalışmada süneklik açısından etkili olan CFRP ile hem süneklik hem de dayanım açısından etkili olan çelik plakaların kullanımını araştırmıştır. Bu uygulamaların hem süneklik hem de dayanımın istendiği durumlarda birbirlerinin eksikliklerini giderecek şekilde davranabileceğini amaçlamıştır. Çalışmada toplam 11 adet (150×300×3200 mm) boyutlarında kiriş numunesi 1 adet güçlendirilmemiş referans ve 2 adet CFRP kumaş ile güçlendirilerek test etmiştir. Geri kalan numuneler ise hem

CFRP kumaş hem de çelik plaka ile güçlendirme yaparak test etmiştir. Sonuç olarak CFRP ve çelik plakaların birlikte güçlendirmede kullanılmasının kirişlerdeki dayanımı artırdığı ve kiriş davranışını önemli ölçüde iyileştirdiği bulunmuştur.

Panda ve ark. (2013), çalışmasında kesme dayanımı zayıf olan T kesitli kirişlerin, farklı konfigürasyonlarla ve yönlerde cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) ile güçlendirme yaparak kiriş kesme kapasitesini artırmayı araştırmıştır. Bu amaçla 2500 mm uzunluğunda 12 adet T kesitli kiriş üretilmiştir. Bu seride 3 adet güçlendirme yapılmamış referans kiriş ve geri kalan 9 adet kiriş ise GFRP ile güçlendirilmiştir. Güçlendirilen kirişlerde, etriye aralığına göre, etriye olmadan, etriye aralığı 200 mm ve etriye aralığı 300 mm, şerit açısı 90° ve 45° uygulama şekli U olarak ve sadece yan yüzeylere uygulama yaparak incelemelerde bulunulmuştur. Deneysel çalışma sonunda, 45° açıyla uygulanan GFRP uygulamasının, 90° açıyla uygulanan GFRP uygulamasına göre çok daha etkili olduğu görülmüştür.

Miruthun ve ark. (2020) , çalışmasında GFRP (cam elyaf takviyeli polimer) ile güçlendirilmek üzere 150×250×3000 mm boyutlarında dikdörtgen betonarme kiriş numuneleri üretmiştir. Bu numuneleri 3 farklı konfigürasyon (aralıklı, diyagonal ve eğimli) kullanarak GFRP ile güçlendirmiştir. Test sonuçlarının arasında karşılaştırma yapmış ve kesme kapasitesini en çok artıran güçlendirme yöntemi aralıklı GFRP sarma yöntemi olmuştur.

Alshlash ve ark. (2019) tarafından yapılan çalışmada, kesme dayanımı yetersiz kirişlerin CFRP ile güçlendirilmesi incelenmiştir. Bu çalışmada ön hasarlı kesme kirişlerinin CFRP ile onarım/güçlendirmesi (O/G) araştırılmıştır. Bunun için biri referans toplam 4 adet kesme kirişi üretilmiştir. Boyutları 12.5×25×250 cm olan kesme kirişleri, Ø5/35cm etriye ve %1.17 boyuna donatı oranına sahiptir. Çalışmada ilk olarak referans kiriş göçme moduna kadar yüklenmiştir. Ardından diğer üç kiriş sırasıyla referans kiriş kapasitesinin %50, %65 ve %85 kapasitelerine kadar ön hasara uğratılmıştır. Ön hasarlı kirişler karbon fiber malzemesi ile 5 cm'lik şeritler halinde yarım sargılı olarak kirişlerin kesme bölgelerine epoksi esaslı yapıştırıcı ile yapıştırılarak O/G'si gerçekleştirilmiştir. %50, %65 ve %85 seviyelerinde hasarlı kirişlerin O/G'si yapıldıktan sonra referans kirişe göre sırasıyla kapasitelerinde %41, %43 ve %46 artış sağlandığı belirlenmiştir. Ayrıca yük-deplasman ve rijitlik değerleri karşılaştırılarak sunulmuştur.

Demir (2019), çalışmasında, 150×300×2000 mm boyutlarındaki 3 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Farklı donatı düzenlemeleri uygulayarak, çelik tel örgülerin kesme donatısı olarak kullanılmasının betonarme kirişlerin davranışlarına etkileri deneysel

olarak araştırılmış ve dört nokta eğilme testine tabi tutulmuştur. Sonuçta, çelik tel örgülerin kirişin çatlama mekanizmasını iyileştirerek geniş çatlakları azaltıp kılcal çatlakları artırdığı görülmüştür. Ancak, kesme donatısı olarak yalnızca çelik tel örgü kullanımının çatlamış kirişte erken dayanım kaybına neden olduğu belirlenmiştir. Kesme donatısı olarak etriyelere ilaveten çelik tel örgülerin kullanılması durumunda ise betonarme kirişlerin yük taşıma kapasiteleri, başlangıç rijitlikleri ve yer değiştirme süneklikleri önemli oranda artmıştır.

Özkal (2017) tarafından yapılan çalışmada, küçük kesme açıklığına sahip betonarme kirişlerin davranışı incelenmiştir. Özellikle kesme davranışı ve gergili kemer etkisi araştırılmış, farklı etriye yerleşimlerinin etkisi değerlendirilmiştir. Bu amaçla, boyutları 250 x 400 x 1500 mm olan 9 betonarme kiriş üretilmiş ve dört noktalı yükleme deneyine tabi tutulmuştur. Sonuçlara göre, etriyesiz kirişler beklenenden yüksek yüklerde kırılmış ve bu durum gergili kemer etkisini doğrulamıştır. Etriyeleli kirişler ise eğilme kapasitesine yakın dayanım göstermiştir. Ayrıca, 135° kancalı etriyelerin diğerlerine göre daha iyi performans gösterdiği, dayanım ve süneklik açısından daha avantajlı olduğu belirlenmiştir.

Sevinç (2008) yaptığı çalışmada, betonarme kirişlerin taşıma kapasitesini artırmak için farklı malzemelerle yapılan güçlendirme yöntemlerini karşılaştırmıştır. Bu malzemeler, CFRP (karbon fiber takviyeli polimer), çelik levhalar ve betonarme levhalardır. Çalışmada, bu malzemelerin moment ve kesme dayanımına etkileri, birleşim detayları ve ilk yükleme durumundaki davranışları ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Güçlendirme yapılmadan önce ve yapıldıktan sonra taşıma kapasiteleri dört farklı sayısal model ile değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, özellikle yük altında olan kirişlerde CFRP kullanıldığında daha fazla malzeme gerekmiştir. CFRP levhalar yüksek çekme dayanımına, az hacim kaplama özelliğine ve kimyasal ya da sıcaklık gibi dış etkilere karşı yüksek dayanıklılığa sahiptir. Ancak, ilk şekil değişimlerinden en çok etkilenen malzeme olduğu belirlenmiştir. Çelik ve betonarme levhalar ise daha az şekil değişiminde daha kararlı sonuçlar vermiştir. Ayrıca bu malzemeler uygulama kolaylığı ve ekonomik açıdan bazı avantajlara sahiptir. Sonuç olarak, kirişlerin güçlendirme yöntemi seçilirken, elemanın mevcut hasar durumu ve yük altındaki hali dikkatlice değerlendirilmelidir.

Ojaimi (2021), yaptığı çalışmada betonarme kirişlerin kesme dayanımını artırmak için farklı beton mantolama yöntemlerini deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, boyutları 200 x 250 x 1700 mm olan toplam beş betonarme kiriş üretilmiştir. Bu kirişlerden biri referans olarak kullanılmış, diğer dört kiriş ise farklı yöntemlerle

güçlendirilmiştir. Bütün kirişler, a/d oranı 2 olacak şekilde tasarlanmış ve dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Güçlendirme için etriyesiz çelik lifli kendiliğinden yerleşen beton mantolama, etriyeli kendiliğinden yerleşen beton mantolama, ferrocement kaplama ve dıştan çelik çubuklarla desteklenmiş ferrocement kaplama teknikleri kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, bu yöntemlerle güçlendirilen kirişlerin taşıma kapasitesi, referans kirişe göre %6 ile %59 arasında artmıştır. Etriye kendiliğinden yerleşen betonla güçlendirilmiş kiriş, rijitlik ve taşıma kapasitesi açısından en iyi performansı göstermiştir. Ferrocement kaplama ise çatlama yükünü artırma açısından en uygun yöntem olarak öne çıkmıştır.

Hussain ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada, doğal lif takviyeli polimer kompozitlerin (NFRRP), betonarme kirişlerin kesme dayanımını artırmadaki etkisi incelenmiştir. Güçlendirme için düşük maliyetli kenevir ve pamuk ipinden yapılmış iki farklı kompozit malzeme kullanılmıştır. Deneylerde, boyutları 1500 mm x 120 mm x 150 mm olan toplam yedi betonarme kiriş test edilmiştir. Bunlardan biri referans olarak bırakılmış, diğer altı kiriş ise pamuk veya kenevir kompozitlerle farklı şekillerde güçlendirilmiştir. Sonuçlar, NFRRP ile güçlendirilen kirişlerin, referans kirişe göre daha dayanıklı olduğunu ve daha fazla enerji tükettiğini göstermiştir. Ayrıca, hangi lifin kullanıldığı (kenevir ya da pamuk) ve donatı düzeninin, kirişlerin performansında etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca yapılan bilgisayar analizleri (sonlu elemanlar yöntemi), deney sonuçlarını desteklemiş ve bu yöntemle yapılan tahminlerin güvenilir olduğunu ortaya koymuştur.

Esen ve ark. (2022) yaptığı çalışmada, beton dayanımı, etriye aralığı ve çekme donatısı miktarının betonarme kirişlerin kesme kapasitesi üzerindeki etkileri araştırmıştır. Bu amaçla, 150×300×2200 mm boyutlarında toplam 16 adet kiriş üretilmiş ve üç noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Kirişlerde beton dayanımı 5, 7, 9 ve 20 MPa; çekme donatısı miktarı 2Ø12 ve 3Ø12; etriye aralığı ise 100 mm ve 300 mm olacak şekilde farklılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, dayanımı düşük olan (5 MPa) betonlarda etriye sıklaştırması çok fazla etkili olmazken, 7 ve 9 MPa betonlarda bu etki daha belirgin olmuştur. Genel olarak, artan beton dayanımı ile birlikte yük taşıma kapasitesi, süneklik, rijitlik ve enerji tüketim kapasitesinde olumlu gelişmeler gözlenmiştir. Ayrıca, etriye aralığının azaltılması, kiriş davranışında belirgin bir iyileşme sağlamıştır.

Li ve ark. (2017) yaptığı çalışmada, U şeklinde yerleştirilen CFRP şeritlerle güçlendirilen betonarme kirişlerin kesme davranışına, kesme açıklığı ve faydalı yükseklik oranının (a_v/d) etkisini incelemiştir. Deneysel çalışma kapsamında, uzunlukları 2000 mm

ile 2400 mm arasında değişen ve a_v/d oranları 1.0 ile 3.5 arasında olan toplam 12 betonarme kiriş test edilmiştir. Kirişler, biri güçlendirilmemiş (referans), diğeri 150 mm aralıklarla yerleştirilmiş 60 mm genişliğinde CFRP şeritlerle güçlendirilmiş iki grup halinde değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, CFRP uygulamasının kesme dayanımına olan katkısının büyük ölçüde a_v/d oranına bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle a_v/d oranı 2.0 ve 2.5 olan kirişlerde CFRP şeritlerin daha etkili olduğu, ancak çok düşük ya da çok yüksek oranlarda etkinliğin azaldığı belirlenmiştir.

Siddika ve ark. (2019) yaptığı çalışmada, 150×150×700 mm boyutlarında, betonarme kirişlerin eğilme ve kesme kapasitelerini CFRP ile artırmayı hedeflemiştir. Bu amaçla, beş farklı CFRP güçlendirme konfigürasyonu ve iki farklı yüzey işlemi türü kullanılarak deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Güçlendirilmiş kirişlere ait yük-deplasman ilişkileri incelenmiş ve CFRP uygulamalarının rijitlik ve süneklik kapasitesi üzerinde olumlu etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Ancak, CFRP şeritlerin etriyelerle çakıştığı durumlarda, bu durumun kiriş mukavemetini olumsuz etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca, ACI 440.2R-17 standardına göre yapılan analitik hesaplamaların deney sonuçlarına göre daha emniyetli tarafta kaldığı ifade edilmiştir.

Gemi ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada, 3200 mm uzunluğundaki ince uçlu aşıklarında karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kullanılarak güçlendirme etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Toplamda beş numune test edilmiştir. Biri güçlendirilmemiş referans olmak üzere, diğer dördü ise farklı CFRP konfigürasyon ile güçlendirilmiştir. P2 ve P3 numuneleri her iki uçta tam veya yarım CFRP sargısına sahiptir. P4 ve P5 numunelerinde ise CFRP sargısı uçlarda kısmen ya da tamamen uygulanmış ve sargılama eğilme bölgesini de kapsamıştır. Sonuçlar, CFRP güçlendirmesinin P2’de %47, P3’te %39 oranında kesme kapasitesini artırdığını göstermiştir. P3 numunesi en iyi sünekliği gösterirken, P4 ve P5’te aşırı CFRP kullanımı eğilme bölgesinde daha kırılgan davranışa neden olmuştur.

Tokgöz ve ark. (2014), yaptıkları çalışmada, eğilme etkisi ve çekme gerilmelerinin oluştuğu betonarme kirişlerin alt yüzeyleri ile kesme gerilmelerinin oluştuğu L/4 mesafesindeki yan yüzeylerinin CFRP ile güçlendirilmesi amacıyla 9 adet betonarme kiriş üretilmiş ve yük-deplasman davranışları, süneklikleri ve enerji tüketim kapasiteleri incelenmiştir. Kesme açısından yetersiz üretilen 3 adet kiriş, kesme bölgelerinde 90° ve 45° açılarla güçlendirilmiş ve bunun sonucunda kirişlerin kesme kapasiteleri %60 oranında artmıştır. 45° ve 90° CFRP uygulamaları arasında çok fazla fark olmadığı görülmüştür.

Çetinkaya ve ark. (2004) çalışmasında, dört adet betonarme kirişin FRP malzemelerle onarım ve/veya güçlendirilmesi (O/G) yapılmıştır. Deneysel çalışmada 2 adet kiriş numunesini hiç onarım ve güçlendirme (O/G) yapmadan test etmiş taşıma kapasiteleri 42.4- 42.8 kN yükle ve 45.6mm- 50mm deplasmana ulaşmıştır. Dört adet betonarme kiriş üzerinde ise farklı yöntemlerle onarım ve güçlendirme yapmıştır. İlk olarak 1.2×50 mm boyutlarında FRP Plakalar, ile onarım ve güçlendirme yapılmıştır. Bu sayede yük taşıma kapasitesi 98.9 kN'ye, deplasmanı da 23mm'ye ulaşarak hiç onarım ve güçlendirme (O/G) yapılmayan numunelere kıyasla taşıma kapasitesinde %132,2 oranında sünek bir davranışla artış göstermiştir. Daha sonra boyuna 1,2×50 mm boyutlarında FRP Plaka ve enine FRP dokuma ile birlikte onarım ve güçlendirme O/G yapılmış olup numuneler sırasıyla 110.2 kN- 166.3kN yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Burada da benzer durumda hiç onarım ve güçlendirme (O/G) yapılmayan numunelere kıyasla taşıma kapasitesinde %224,5 oranında sünek bir davranışla artış göstermiştir. Son olarak boyuna 1,2×50 mm boyutlarında FRP Plaka ve enine FRP dokuma ile sadece güçlendirmede en büyük taşıma kapasitesine 183.3 kN yükle, 39.3mm deplasmana ulaşmış ve %330,2 artışla en etkili güçlendirme olmuştur. Çalışmada ayrıca biri yalın diğeri FRP dokuma ile sarılmış iki adet silindir numune gerilme – şekil değiştirmesinin karşılaştırması yapılmıştır Yalın silindir numunede 31.7MPa gerilme altında 0.003mm/mm şekil değiştirme gözlenirken, FRP dokuma ile sarılmış silindir numunede ise gerilme 37.9 MPa ve şekil değiştirme 0.011mm/mm olarak belirlenmiştir. Bu durum hem kapasitenin %19,6 hem de sünekliğin %266,7 oranında belirgin olarak arttığını göstermiştir. Bu çalışma sonucunda FRP malzemelerle yapılan O/G'nin betonarme kirişlerin taşıma gücünü çok büyük ölçüde arttırdığı belirlenmiştir.

Alsdudi ve ark. (2021) çalışmasında, düşey yükler altında yeterli kesme kapasitesine sahip olmayan denge altı dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin, kesme açıklıkları boyunca dıştan CFRP ile güçlendirilerek yük altındaki davranış değişimini deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışmada, ½ ölçekli 8 adet 125 × 250 × 2500 mm boyutlarında betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Kirişlerde kesme kapasitesinin yetersiz olması için etriyeler Ø5/350mm olarak seçilmiştir. Numunelerden bir tanesi güçlendirilmeden referans olarak test edilirken diğer numunelerin kesme açıklıkları boyunca artan CFRP w_f/s_f oranlarda güçlendirilerek testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, CFRP için optimum şerit genişliği (w_f)/şerit aralığı (s_f) oranı belirlemeyi el almıştır. Elde edilen sonuçlara göre w_f/s_f oranının 0,55'i aşması ile kiriş davranışı kesme kırılması yerine eğilme kırılması göstermiştir. Güçlendirmede en önemli etkenlerden biri de kullanılan

CFRP'nin yönü ve gramajı olduğu belirtilmiştir. 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 değerlendirilmiştir.

Anil ve ark. (2011) çalışmasında, CFRP şeritler ile güçlendirilmiş kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin kesme dayanımlarındaki ve süneklik düzeylerindeki artışı incelemiştir. Çalışmada kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişleri sünek eğilme davranışı sergileyecek düzeye çıkartmak için T kesitli, ½ ölçekli, 7 adet basit mesnetli kiriş deney elemanı üretilmiştir. Bir deney elemanı güçlendirilmeden referans elemanı olarak test edilmiş, kalan 6 adet deney elemanı U şeklinde ankrajlı ve ankrajsız CFRP şeritler ile güçlendirilmiştir. Çalışmada üç farklı CFRP şerit aralığı seçilmiştir ($s_f=125$ mm, 150 mm, 200 mm). CFRP şeritlerin uçlarındaki ankrajların betonarme kirişlerin kesme kapasitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ankrajsız CFRP şeritler ile güçlendirilen deney elemanlarında kesme kapasitelerinin artış gösterdiği, ancak sünek eğilme davranışı sergileyecek düzeye çıkamadıkları görülmüştür. Deney elemanları CFRP şeritlerin beton kiriş yüzeyinden soyulması ile gevrek kesme kırılması sergileyerek göçmüşlerdir. Ankrajlı CFRP şeritler ile güçlendirilen deney elemanlarında kesme dayanımı önemli oranlarda artmış ve süneklik düzeyi de artarak deney elemanları sünek eğilme davranışı sergilemişlerdir. Ankrajsız ve ankrajlı CFRP şeritlerden ölçülen birim deformasyon değerleri karşılaştırıldığında, ankrajlı CFRP şeritlerle güçlendirilen deney elemanlarında, değerlerin %44 daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.

Aksoylu (2021) çalışmasında, betonarme kirişlerin kapasitesini arttırmak için yeni bir teknik olan mekanik dikiş yönteminin uygulanabilirliğini sunmak amacı ile bir dizi deneysel test gerçekleştirmiştir. Bu sayede yeni bir yöntem olan “Mekanik Dikiş (MD veya MS)” tanıtılmıştır. Çalışmada betonarme kirişlerin yetersiz enine donatı kullanılması sonucu güçlendirme ihtiyacının doğmasına istinaden inceleme yapılmıştır. Bir referans kiriş olmak üzere dört farklı ½ ölçekte kiriş üretilmiştir. E0 referans kiriş, E1 mekanik dikiş (MS) ile güçlendirilmiş olan kiriş, E2 cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) ile güçlendirilmiş olan kiriş, E3 cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) ve mekanik dikiş (MS) bir arada kullanılarak güçlendirildiği hibrit kiriş olarak isimlendirilmiştir. Deney için U şeklinde mekanik dikişler kullanılmıştır. E0 doğrudan kesme hasarı gösteren bir göçme moduyla sonuçlanmıştır. E1 ve E2 kirişleri tipik bir eğilme kiriş davranışı göstermiştir. E1 ve E2 kirişinin yük taşıma kapasiteleri E0'a göre %16,8 ve %18,1 oranında arttığı, enerji tüketim kapasiteleri ise %592 ve %466 arttığı belirtilmiştir.

Hibrit E3 kirişinde ise yük taşıma kapasitesinde %19,2 artmasına rağmen kirişin kesme hasarı ile gevrek göçtüğü ifade edilmiştir. Deney sonunda E1 ve E2 kirişlerinde hem dayanım artışı hem de yeterli sünek davranışın gözlemlenmesi sebebi ile kullanılabilecek güçlendirme yöntemleri olduğu belirtilmiştir. Basit uygulanabilir olması ile işçiliği azalttığı için performans/maliyet göz önüne alındığında $E1 > E2 > E3$ şeklinde olduğundan mekanik dikiş yönteminin kullanılması önerilmiştir.

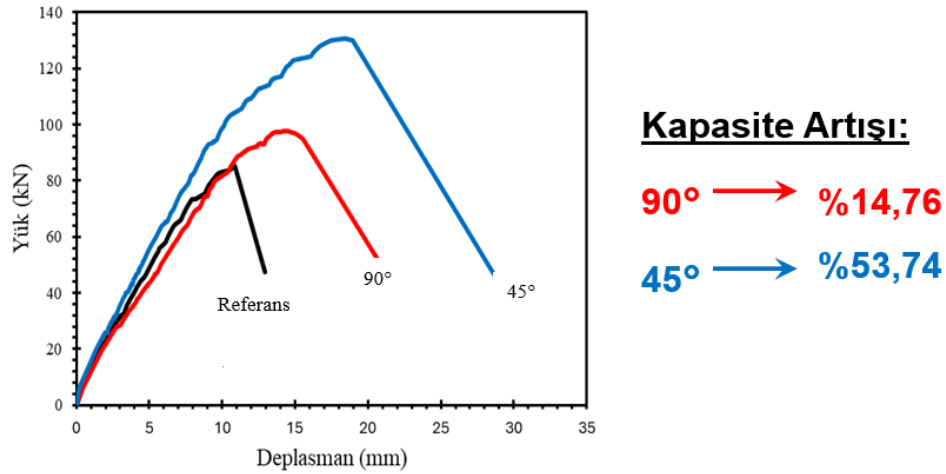
Alshlash (2019) deneysel çalışmasında, betonarme yapılarda önemli bir yeri olan kirişlerin eğilme ve kesme etkileri altındaki davranışlarını incelemiştir. Bu amaçla, öncelikle kirişlere ön hasar verilmiş ve daha sonra karbon fiber takviyeli polimer (CFRP), çelik levha ve mekanik bağlantı elemanları ile onarım/güçlendirme yöntemleri denenmiştir. Deneysel çalışmada, 1/2 ölçekli toplam 20 adet kiriş numunesi hazırlanmıştır. Numuneler, çekme bölgesinde 3Ø12, basınç bölgesinde 2Ø8 olarak 125×250×2500 mm dikdörtgen kesitli olarak üretilmiş olup, eğilme için Ø5/100 mm, kesme için Ø5/350 mm etriye aralıkları kullanılmıştır. Eğilme ve kesme kirişleri için bir adet referans kirişler belirlendikten sonra geriye kalan 9 adet eğilme ve 9 adet kesme kirişleri üçerli gruplara ayrılmıştır. Eğilme kirişleri için ayrılan her bir grup %1, %2 ve %3 deplasman hasar seviyelerine kadar düşey olarak yüklenmiştir. Ardından üç farklı malzeme ile onarım/güçlendirme yapılarak kiriş kapasitelerindeki değişim incelenmiştir. Kesme kirişleri ise referans numunenin maksimum yük taşıma kapasitesi belirlendikten sonra %50, %65 ve %85 seviyelerine kadar yüklenerek ön hasar deneylerine tabi tutulmuştur. Ardından üç farklı onarım/güçlendirme malzemeleri yardımıyla güçlendirildikten sonra yeniden teste tabi tutularak kapasitedeki değişim gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmanın ardından eğilme kirişlerinde %1 hasar seviyesi için kapasitedeki %20 artışla karbon fiber ile onarım/güçlendirme yöntemi, %2 hasar seviyesi için %28 artışla karbon fiber ile onarım/güçlendirme yöntemi, %3 hasar seviyesi için %23 artışla karbon fiber ile onarım/güçlendirme yönteminin en etkili olduğu görülmüştür. Kesme kirişleri için ise %50 hasar seviyesi için %41 artışla karbon fiber ile onarım/güçlendirme yöntemi, %65 hasar seviyesi için %47 artışla mekanik dikiş ile onarım/güçlendirme yöntemi ve %85 hasar seviyesi için %50 artışla mekanik dikiş ile onarım/güçlendirme yönteminin en başarılı yöntem olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan onarım ve güçlendirme çalışmalarında ise maliyet bakımından optimum sonucu mekanik dikiş ile güçlendirme tekniğinin verdiği tespit edilmiştir.

Aksoylu ve ark. (2022) yaptığı çalışmasında, ön hasarsız kesme kirişlerinde mekanik dikiş ile güçlendirme yöntemini kullanarak en kapsamlı çalışmaları başlatmıştır.

Çalışmada, boyutları 125×250×2500 mm olan toplam altı kiriş test edilmiştir. Bu kirişlerden biri referans numunesi (S0) olmak üzere, diğer beşi ise MÇD ile farklı aralıklarla güçlendirilmiştir (S1–S5). Kirişlerde 6 mm çaplı etriyeler 350 mm aralıkla yerleştirilmiş olup, bu düzen yetersiz enine donatı olarak değerlendirilmiştir. MÇD’ler ise 6 mm çapında ve 150 mm uzunluğunda olup, aralıkları 220 mm’den 110 mm’ye düşürülerek (%0.0020–0.0041 arasında) hacimsel donatı oranları sağlanmıştır. Dört noktalı eğilme testleri sonucunda, 90° açılı MÇD’lerin kesme dayanımını %2–31 oranında artırdığı, ancak süneklikte anlamlı bir iyileşme sağlamadığı belirlenmiştir. MÇD’ler, kesme çatlaklarının yönünü değiştirerek çatlakların MÇD bulunmayan alanlara doğru ilerlemesine neden olmuştur. MÇD’lerde sıyrılma oluşmaması, 60 mm ankraj boyunun yeterli olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, MÇD’lerin daha sık yerleştirildiklerinde çatlamaya karşı daha dayanıklı oldukları belirlenmiştir. Ayrıca, literatürde önerilen 45° açılı MÇD uygulamasının 90°’ye göre daha etkili olduğu da doğrulanmıştır.

Uysal ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada, betonarme kirişlerin her iki yüzüne, kesme açıklıkları boyunca 45° ve 90° açılarla Mekanik Çelik Dikişler (MÇD) yerleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı, betonarme kirişlerin güvenliği için önemli olan sünek davranışı koruyarak, kirişlerin taşıma kapasitesini ve enerji tüketimini artırmaktır. Ayrıca en uygun MÇD uygulama açısının araştırılmasıdır. Güçlendirme işleminin etkilerini görmek için, kirişler dört noktalı eğilme yükü altında test edilmiştir. Toplamda üç adet betonarme kiriş üretilmiştir. Kirişlerin boyutları 125 x 250 x 2500 mm olup, enine donatı Ø6/350 mm olarak seçilmiştir, böylece kesme kapasitesi yetersiz olacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca, MÇD’nin kesme dayanımına etkisini değerlendirmek için uygun eğilme kapasitesini yüksek tutacak boyuna donatılar kullanılmıştır. Bu sayede kirişler eğilme kapasitelerine ulaşmadan güçlendirmelerin etkinliği ile kesme kapasitesini ne oranda artırdığı belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, 45° açılı MÇD ile güçlendirilmiş kirişin yük taşıma kapasitesi, referans kirişe göre %53.74 oranında artmıştır. 90° açılı MÇD kullanılan kirişte ise bu artış %14.76 olmuştur. Enerji tüketim kapasitesi açısından incelendiğinde, 45° açıyla MÇD uygulanan kiriş %261.6 daha fazla enerji tüketmiştir. 90° açıyla MÇD uygulanan kirişte ise bu oran %93.73’tür. Bu sonuçlar, 45° açılı MÇD’nin kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinde 90°’ye göre çok daha etkili olduğunu ortaya koymuştur. Bunun sebebi ise kirişin çekme bölgesinden başlayıp ilerleyen çatlakların (45° açılı MÇD uygulamasında) daha fazla dikiş tarafından

engellenmesinden kaynaklanmıştır. Yani, çatlakların ilerleyememesi yük taşıma kapasitesi ve enerji tüketim kapasitesinin artmasını sağlamıştır.



Şekil 2.1. Deney Sonucunda Mekanik Dikişlerin Katkısı (Uysal ve ark., 2022)

Bu çalışma, literatürde nispeten yeni bir güçlendirme alternatifi olan ve ulusal ve uluslararası düzenlemelerde yer almayan MÇD'nin optimum tasarımına yönelik yeni çalışmaların oldukça önemli olduğunu göstermektedir.

Aksoylu ve ark. (2023), kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişlerin, 45° açıyla yerleştirilen mekanik çelik dikişler (MSS) ile güçlendirilmesini incelemiştir. Çalışmada, biri referans olmak üzere toplam sekiz adet 125×250×2500 mm boyutlarında kiriş üretilmiştir. Güçlendirme, 6 mm çapındaki MSS'lerin d/5 (45 mm) ile d (220 mm) arasında değişen aralıklarla yerleştirilmesiyle uygulanmıştır. Deneyler sonucunda, en sık MSS kullanılan kirişte kesme kapasitesinde %54, nominal akma enerjisinde %144 ve toplam enerji tüketiminde %366 oranında artış gözlenmiştir.

Aslan ve ark. (2024), yaptığı çalışmada, karbon fiber takviyeli polimer (CFRP), çelik levha (SP) ve mekanik çelik dikişler (MSS) gibi çeşitli onarım/güçlendirme teknikleri kullanılarak farklı eğilme ve kesme hasarı seviyelerine sahip kirişlerin onarımı ve güçlendirilmesi için deneysel çalışmalar yürütmüştür. Bu amaçla, 125×250 mm kesitinde ve 2500 mm uzunluğunda toplam 20 kiriş üretilmiştir. Kirişler eğilme ve kesme hasarına göre iki gruba ayrılmıştır. Hasar sonrası CFRP, SP ve MSS ile güçlendirme uygulanmış ve dört noktalı eğilme testleri yapılmıştır. Sonuçlar, %3 hasarlı eğilme kirişlerinde CFRP'nin, %85 hasarlı kesme kirişlerinde ise MSS'nin en etkili yöntem olduğunu göstermiştir. Maliyet analizi, MSS'nin özellikle kesme hasarlı elemanlarda ekonomik ve uygulanabilir bir seçenek olduğunu ortaya koymuştur.

Baş (2024) tarafından yapılan çalışmada, kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişleri güçlendirmek için yenilikçi bir yöntem olan mekanik çelik dikişlerin (MÇD), kirişlerde kesme açıklığı/faydalı yükseklik ($a_v/d = 2.5, 3.3$ ve 4.9) oranı ile kiriş yüksekliği ($h=250$ ve 360 mm) değişimlerdeki performansları deneysel ve karşılaştırmalı olarak iki bölümde incelenmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde, a_v/d oranının incelenmesi için 11 adet $125 \times 250 \times 2500$ mm ölçülerinde deney kirişi hazırlanmıştır. Çalışma sonucunda $a_v/d=2.5$ olan deney kirişlerinde MÇD uygulaması, referans kirişlere kıyasla kesme kapasitesinde %40 ile %86 arasında artış sağlamıştır. Buna karşın, $a_v/d=3.3$ olan deney kirişlerinde kesme kapasitesi artış oranı %29 ile %54 arasında gözlemlenmiştir. En yüksek a_v/d oranına sahip olan deney kirişlerinde ise ($a_v/d=4.9$), MÇD uygulamasının kesme kapasitesine etkisi daha sınırlı kalmış, bu oran %-1.8 ile %15 arasında değişmiştir. MÇD'ler düşük a_v/d oranlarında daha iyi performans göstermişlerdir. Ancak a_v/d oranı 2.5'ten 4.9'a doğru arttıkça kirişlerde kesme kuvveti talebi azalmakta ve kirişlerin gitgide eğilme kirişi olarak davranmaları sonucunda oluşan eğilme çatlakları dikleşmekte ve MÇD'ler daha etkisiz kalmaktadır. Çalışmanın ikinci bölümünde kiriş yüksekliğindeki değişimin etkisini araştırmak için $125 \times 360 \times 2500$ mm boyutlarında 1 referans 5 adet güçlendirilmiş olmak üzere toplam 6 deney kirişi ($a_v/d=3.3$) hazırlanmıştır. Hazırlanan kirişler $125 \times 250 \times 2500$ mm boyutlarına sahip kirişler ($a_v/d=3.3$) ile kıyaslanmıştır. Çalışma sonucunda 360 mm yüksekliğe sahip kiriş numunelerinde, 250 mm yüksekliğe sahip kiriş numunelerine kıyasla, değişen MÇD aralıkların %5 ile %27 oranları arasında kesme kapasitesinde daha az artış gözlenmiştir. Ancak bu durum her iki deney grubunda aynı MÇD oranına sahip olmasından kaynaklanmıştır. Daha yüksek kirişlerde betonun kesme kapasitesine katkısının daha fazla olmasından dolayı toplam kesme kapasitesi artmaktadır. Bu nedenle esasen MÇD'lerin kesme kapasitesine etkisi neredeyse aynı olmasına karşın, toplam kesme kuvveti içindeki MÇD'nin payı azaldığından MÇD'nin kesme kapasitesine daha az oranda katkıda bulunuyor gibi algılanmasına yol açmaktadır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Kesme kapasitesi zayıf betonarme kirişlerin yenilikçi teknikler ile güçlendirilmesi son yıllarda popüler hale gelmiştir. Bu araştırmada patentli yeni bir teknik olan karbon fiber demeti/ipi ile güçlendirme araştırılmıştır. Bu teknikle kesme kapasitesi zayıf betonarme kirişler karbon fiber demetle/iple dıştan sarılarak güçlendirilmiştir.

Düşey yükler altında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar için Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı kullanılmıştır. Donatı ve geometri bakımından numune tasarımları yapılırken laboratuvar imkanları dikkate alınmıştır.

Bu çalışma kapsamında, 100×150×1000 mm boyutlarında toplam on iki adet betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Bunlardan iki tanesi güçlendirilmemiş referans numuneyi temsil ederken, geriye kalan on numune farklı konfigürasyonlarla güçlendirilmiştir. Güçlendirme esnasında farklı karbon fiber demet/ip türü ve aralığı ile güçlendirme de epoksinin kullanılması ve kullanılmaması gibi durumlar dikkate alınmıştır. Çalışmada kesme kapasitesi zayıf olan betonarme kirişlerin üzerinde açılan deliklerden karbon fiber demetin/ipin geçirilmesiyle güçlendirme gerçekleştirilmiştir. Güçlendirmeler 8 kat (yaklaşık 4 mm çaplı) ve 16 kat (yaklaşık 6 mm çaplı) karbon fiber demeti/ipi ve özel üretilmiş 6 mm çapında karbon fiber ip kullanılarak uygulanmıştır. Kirişlerin uç kısmından ve üstten 50 mm yandan ise 60 mm mesafe bırakılarak sırasıyla faydalı yükseklik cinsinden $d/2$, $d/3$ ve $d/4$ aralıklarla 6 mm ve 8 mm çaplı delikler açılmış olup ardından 16 kat, 8 kat karbon fiber demeti/ipi ve özel üretilmiş 6 mm çaplı karbon fiber ip deliklerden geçirilerek güçlendirme yapılmıştır. Kiriş üzerinde üst boyuna donatının altında olacak şekilde açılan 8 mm çaplı delikler özel üretilmiş karbon fiber ip için oluşturulmuştur.

Uygulanan her bir güçlendirmenin kiriş kesme kapasitesine katkısını daha iyi anlayabilmek için farklı güçlendirme konfigürasyonu araştırılmıştır. Bu doğrultuda güçlendirme şekli U olarak yapılmış olup, bazı numunelerde demetle/iple birlikte kompozit malzeme olması için epoksi uygulanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, kiriş numunelerinin dört noktalı eğilme deneyi altında test edilmesiyle, güçlendirme uygulamasında kullanılan demetin/ipin optimum aralıklarının ve epoksinin güçlendirmede kesmeye karşı olan katkısının belirlenmesidir.

3.1. Deney Numuneleri

Bu çalışmada, betonarme kirişlerin kesme kapasitesini artırmak amacıyla karbon fiber demet/İp ve epoksi kullanılarak yapılan güçlendirme uygulamalarının etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında, tüm kirişler Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı'nda üretilmiş olup, kirişler $100 \times 150 \times 1000$ mm boyutlarında tasarlanmıştır. Deney numunelerinin eğilme dayanımı yüksek tutulmuş ve bu sayede güçlendirme sonrası kirişlerin kesme dayanımına olan katkısı daha net bir şekilde gözlenmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda karbon fiber demet/İp, özel üretim karbon İp ve epoksi uygulaması ile güçlendirilen kirişlerin kesmeye karşı davranışını nasıl etkilediği anlaşılmaya çalışılmıştır. Kirişlerin kesme kapasitesinin yetersiz olması için kesme açıklığında $\varnothing 6/350$ mm aralıklarla B420c sınıfı etriyeler yerleştirilmiştir. Çizelge 3.1'de deney numunelerinin isimlendirilmesi ve Çizelge 3.2'de ise her bir deney numunesinin detayları verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan numune isimleri, her bir kirişin dikiş şekli, dikiş türü, dikiş aralığı, dikiş ipliği kat sayısı, epoksi olma ve olmama durumunu yansıtmaktadır. Örneğin, N-N-0.0-N-NE numunesi, sırasıyla delik yok, dikiş yok, dikiş yok, delik yok, dikiş yok, epoksi yok özelliklerine sahip olduğunu göstermektedir. S-N-4-0-N-NE numunesi, sırasıyla delik var dikiş yok, dikiş yok, d/4 aralıklı, dikiş yok, epoksi yok özelliklerine sahip olduğunu belirtmektedir. Yani S ifadesi kirişin delikli olduğunu, N ifadesi dikişin olmadığını, 4.0 ifadesi delik aralığının d/4 olduğunu ve NE ifadesi epoksinin olmadığını belirtmektedir. Bir diğer numune olarak U-OCF-4.0-OZ-E incelendiğinde, U ifadesi, U şeklinde dikiş olduğunu, OCF ifadesi, özel üretilmiş karbon fiber İp kullanıldığını, 4.0 ifadesi delik aralığının d/4 olduğunu, OZ ifadesi özel İp kullanıldığını, E ifadesi ise epoksi kullanıldığını belirtmektedir.

Çizelge 3.1. Deney numunelerinin isimlendirilmesi

Örnek Numuneler	U-CF-2.0-16-E	
	N-N-0.0-N-NE	
	S-N-4.0-N-NE	
	U-OCF-3.0-OZ-NE	
Dikiş özellikleri	Dikiş şekli	N (Dikiş yok), S (Delik var dikiş yok), U (U dikiş),
	Dikiş türü	N (Dikiş yok), CF (Standart karbon fiber demet/İp), OCF (Özel üretilmiş karbon fiber İp)
	Delik aralığı*	x=2.0, 3.0, 4.0 (d/x)
	Dikiş ipliği sayısı	N (Dikiş yok), 08, 16, OZ (özel)
	Epoksi olma durumu	E (epoksi var), NE (epoksi yok)

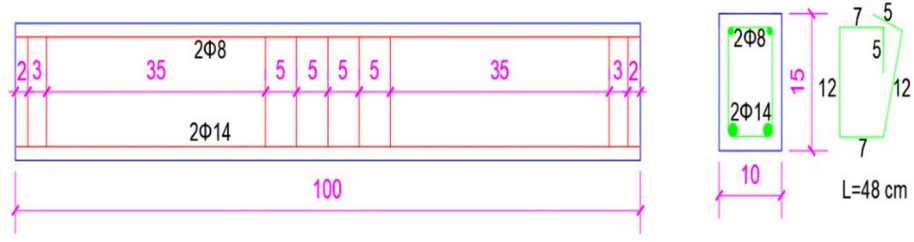
*Örneğin 2.0 yazması halinde delik aralığı d/2.0'dır.

Çizelge 3.2. Güçlendirme Tipi, Donatı Detayı / Etriye Aralığı (mm), Numune boyutları

$L=1000$ mm, $h=150$ mm, $b_w=100$ mm, $d'=28$ mm, $d=122$ mm, mesnet mesafesi=50 mm, $a_v=350$ mm, $a_v/d=2.86$, beton dayanımı yaklaşık 20-25 MPa, boyuna donatı üstte 2Ø8, altta 2Ø14, etriye aralığı Ø6/350mm, karbon fiber demet/ip çapı yaklaşık 6mm ve delik çapı 6mm, özel üretimli karbon fiber ip çapı 6mm ve delik çapı 8mm. Not: hesaplarda $d=120$ mm alınmıştır.	
Numune Adı	Güçlendirme Tipi/ Donatı Detayı / Etriye Aralığı (mm)
S-N-4.0-N-NE	delikli, dikişsiz, $d/4$ aralıklı, epoksisiz referans kiriş numunesi
N-N-0.0-N-NE	deliksiz, dikişsiz, epoksisiz referans kiriş numunesi
U-CF-4.0-16-NE	U şeklinde, delikli, karbon fiber demet/ip, $d/4$ aralıklı, 16 kat epoksisiz güçlendirilen kiriş numunesi
U-CF-2.0-16-NE	U şeklinde, delikli, karbon fiber demet/ip, $d/2$ aralıklı, 16 kat, epoksisiz güçlendirilen kiriş numunesi
U-CF-4.0-8-NE	U şeklinde, delikli, karbon fiber demet/ip, $d/4$ aralıklı, 8 kat, epoksisiz güçlendirilen kiriş numunesi
U-CF-3.0-16-NE	U şeklinde, delikli, karbon fiber demet/ip, $d/3$ aralıklı, 16 kat, epoksisiz güçlendirilen kiriş numunesi
U-OCF-3.0-OZ-NE	U şeklinde, delikli, özel üretimli karbon fiber ip, $d/3$ aralıklı, epoksisiz güçlendirilen kiriş numunesi
U-OCF-4.0-OZ-NE	U şeklinde, delikli, özel üretimli karbon fiber ip, $d/4$ aralıklı, epoksisiz güçlendirilen kiriş numunesi
U-CF-3.0-16-E	U şeklinde, delikli, karbon fiber demet/ip, $d/3$ aralıklı, 16 kat, epoksili güçlendirilen kiriş numunesi
U-OCF-3.0-OZ-E	U şeklinde, delikli, özel üretimli karbon fiber ip, $d/3$ aralıklı, epoksili güçlendirilen kiriş numunesi
U-CF-4.0-16-E	U şeklinde, delikli, karbon fiber demet/ip, $d/4$ aralıklı, 16 kat, epoksili güçlendirilen kiriş numunesi
U-OCF-4.0-OZ-E	U şeklinde, delikli, özel üretimli karbon fiber ip, $d/4$ aralıklı, epoksili güçlendirilen kiriş numunesi

3.1.1. Deney numunelerinin boyutları

Deney numunelerinin boyutlandırılmasında mevcut laboratuvar koşulları dikkate alınarak kesme kapasitesi zayıf fakat eğilme kapasitesi yüksek kirişler üretilmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda dikdörtgen kesitli deney kirişleri tasarlanmış, kirişlerin uzunluğu 1000 mm ve kesit boyutları ise 100 mm × 150 mm olarak belirlenmiştir. Tüm deney numunelerinde aynı boyutlar kullanılmıştır. Deney kirişlerinin boyutları ve donatı detayları Şekil 3.1’de gösterilmektedir. Ayrıca tüm deney kirişlerinin imalat sürecinde dikdörtgen kesitli ahşap plywood kalıplar kullanılmıştır. Şekil 3.2’de kullanılan ahşap kalıplar gösterilmiştir.



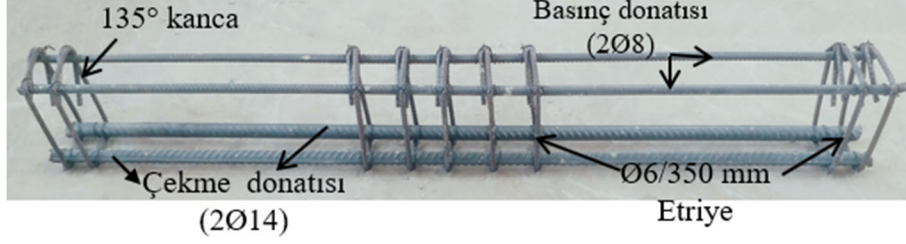
Şekil 3.1. Deney kirişlerinin boyutları donatı detayı



Şekil 3.2. Deney kirişlerinin kalıplarının hazırlanması

3.1.2. Deney numunelerinin donatı detayları

Tüm deney kirişlerinde, çekme bölgesi için alt donatı olarak 2Ø14, basınç bölgesi için ise üst donatı olarak 2Ø8 boyuna donatılar kullanılmıştır. Numunelerin kesme kapasitesinin zayıf olması istendiğinden dolayı, Ø6 çapında etriyeler 350 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Böylece, deneysel çalışmada test edilecek kesme kapasitesi zayıf kirişler elde edilmiştir. Kiriş numunelerine ait tüm donatı detayları Şekil 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.3. Deney numunelerinin donatı detayları

3.1.3. Deney numunelerinin malzeme özellikleri

Bu deneysel çalışmada, betonarme kirişlerin kesme kapasitesini artırmak amacıyla karbon fiber demet/iplik, özel üretimli iplik ve epoksi kullanılarak gerçekleştirilen güçlendirme uygulamalarının etkileri incelenmiştir. Numuneler arasında sağlıklı bir karşılaştırma yapabilmek amacıyla, belirtilen parametreler dışında kalan tüm test koşulları sabit tutulmuş ve bu koşullar ilgili alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

3.1.3.1. Beton

Deney kirişlerinin beton dökümü Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Beton dökülmeden önce kalıpların iç yüzeyleri kalıp yağı ile yağlanmış olup kiriş yüzeylerinin düzgün ve pürüzsüz bir geometriye sahip olması sağlanmıştır. Betonun karıştırılması 0,35 m³ kapasiteli beton mikseri kullanılarak laboratuvar ortamında elle karışım olarak gerçekleştirilmiştir. Beton mikserinin hacminin sınırlı olması ve karıştırma işleminin hassasiyeti nedeniyle beton dökümü iki ayrı aşamada yapılmıştır.

Çalışmada hedef beton basınç dayanımı yaklaşık 20-25 MPa olan 12 adet 100mm × 150mm × 1000mm geometrik boyutlara sahip kiriş numunesi üretmek için kovalar, terazî, kürek, sıva malası, el arabası, temiz su, çimento, agregalar hazırlanmıştır. Kirişlerin kalıptan çıkarılırken düzgün bir geometriye sahip olması ve yeterli miktarda beton örtüsünün sağlanması için plastik paspayı kullanılmıştır. Belirli oranlarda hazırlanan malzemeler betoniye içerisine yerleştirilerek karıştırma işlemi başlatılmıştır. Karıştırma işlemi tamamlandıktan hemen sonra el arabası ve kürek yardımıyla kirişlere döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan beton, kalıplara yerleştirilirken kalıp içindeki donatının konumunun bozulmamasına dikkat edilmiştir. Kalıplara dökülen

betonun homojen bir şekilde yayılması ve betonun içindeki hava kabarcıklarını çıkararak betonun sıkıştırılması için vibratör kullanılmıştır. Betonun kalıplara yerleştirilmesinden sonra kiriş yüzeyleri mala yardımıyla düzeltilmiştir. Şekil 3.4’te beton döküm aşamaları verilmiştir.



Şekil 3.4. Deney numuneleri için betonun karıştırılması ve kalıplara yerleştirilme aşamaları

Çizelge 3.3’te deney kirişlerinde kullanılan betonun 1 m³ hacim başına karışım miktarları ve her bir karışımın çimento miktarına oranla hesaplanan kütle oranları verilmiştir. Karışıma kimyasal katkı ilave edilmemiştir. Beton üretiminde nispeten düşük dayanımlı beton istendiğinden dolayı su/çimento oranı 0.58 olarak seçilmiş ve beton karışımında dayanım sınıfı 32.5 MPa olan çimento kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan en büyük agrega çapı 12 mm’dir.

Çizelge 3.3. Deney kirişlerinin beton karışım miktarları (1 m³ beton için)

Beton Karışım Malzemeleri	Ağırlık (kg)	Kütlesel oranı (%)
Çimento	431.7	1
Su	251.3	0.58
İnce Agrega (0-4mm)	753.7	1.75
Orta Agrega (5-12mm)	862.9	2.00
Toplam	2300	-

Beton dökülürken basınç testleri için 9 adet küp numune alınmıştır. Küp numuneler için geometrik boyutları 15cm × 15cm × 15cm olan hazır kalıplar kullanılmış

olup, bu kalıplar Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Test için alınan küp numuneler, test kırımlarıyla aynı koşullar altında kürlenmiştir. Çalışma kapsamında Konya'da bulunan Alyans Yapı Müh. Ltd. Şti firmasında eksenel basınç testleri yapılmıştır.



Şekil 3.5. Basınç dayanımının belirlenmesi için kullanılan küp numuneler

Beton dökümünün ardından, hedeflenen karakteristik basınç dayanımına (20-25MPa) ulaşılmadan önce betonun erken yaş dayanımını kontrol etmek amacıyla 7 günlük küp numuneler üzerinde basınç testi uygulanmıştır. Bu sayede zamanla değişen beton dayanımı takibi yapılabilmektedir. Bu kapsamda, 15cm × 15cm × 15cm boyutlarında hazırlanan toplam üç küp numune test edilmiştir. Ortalama küp basınç dayanımı 17.90MPa olarak elde edilmiştir. Küp numunelerden elde edilen ortalama basınç dayanımı, standart dönüşüm katsayısı olan 0.80 ile çarpılarak eşdeğer silindir numunesi basınç dayanımı 14.3MPa olarak belirlenmiştir. Daha sonra kalan altı küp numune 28. gün sonunda test edilerek ortalama basınç dayanımı 25.58MPa ve standart sapması 1.608 olarak bulunmuştur. Bu değerin silindire dönüştürülmüş hali ise 20.46MPa olarak elde edilmiştir. Elde edilen kırılma verileri Çizelge 3.4'te; dijital basınç test cihazında yapılan deneylere ait görseller ise Şekil 3.6'da sunulmuştur.

Çizelge 3.4. Deney numunelerinde ortalama beton basınç dayanımları

Küp Numuneler	Basınç Dayanımları (MPa)	Ortalama Küp Basınç Dayanımları (MPa)	Eşdeğer Ortalama Silindir Basınç Dayanımları (MPa)
1	24.86	25.58	20.46
2	27.61		
3	23.76		
4	24.02		
5	26.13		
6	27.08		

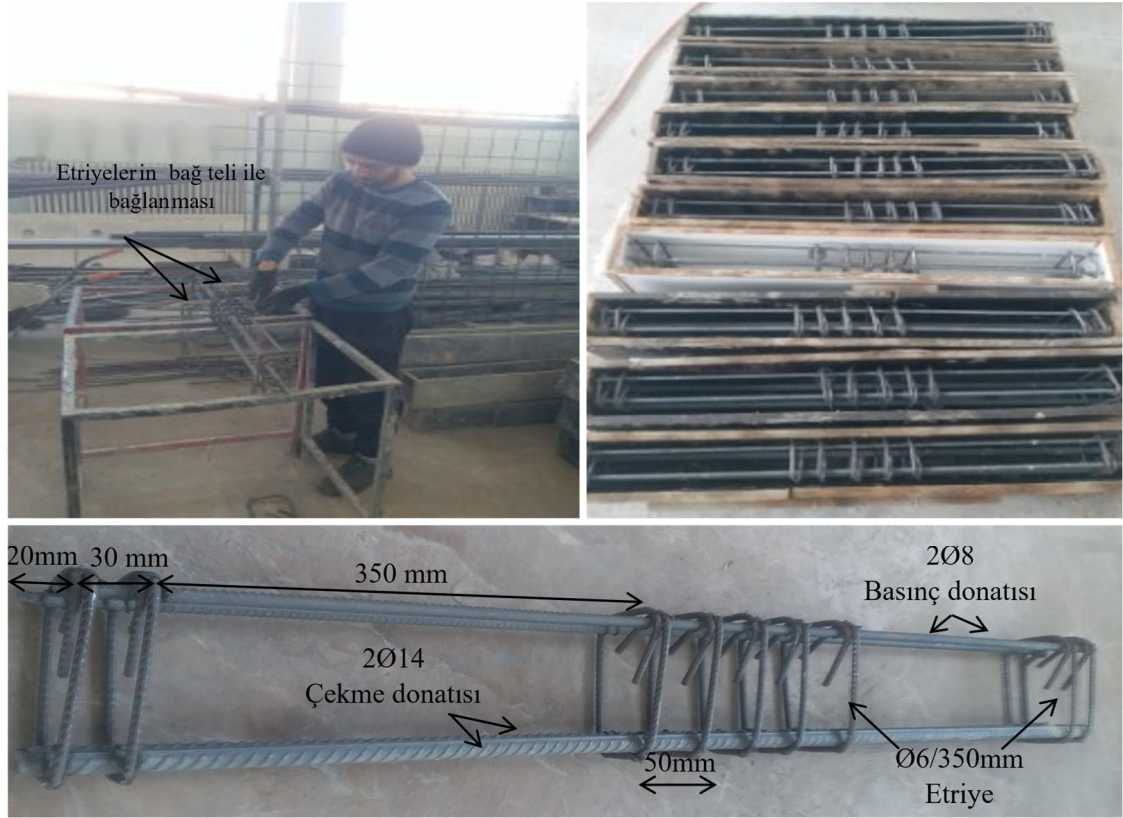


Şekil 3.6. Beton basınç dayanımının belirlenmesi

3.1.3.2. Donatı

Tüm kirişlerin imalatında 14 mm, 8 mm ve 6 mm çaplarında olmak üzere üç farklı donatı kullanılmıştır. Boyuna donatılar, kirişin çekme bölgesinde 2Ø14 ve basınç bölgesinde 2Ø8 olacak şekilde yerleştirilmiştir. Deneysel çalışmada kirişlerin kesme kapasitesinin yetersiz olması amaçlandığından, enine donatı olarak Ø6 çapında nervürlü etriyeler tercih edilmiştir. Etriyeler, uç bölgelerde sıklaştırılmış olarak 2 adet Ø6/30 mm aralıkla, orta bölgede ise 5 adet Ø6/50 mm aralıkla yerleştirilmiş; böylece her bir kirişte

toplam 9 adet etriye kullanılmıştır. Kesme açıklığında ise 350mm aralıkla etriye yerleşimi yapılmıştır. Şekil 3.7’de kirişlerin donatılarının hazırlanması gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Kirişlerin donatılarının hazırlanması

Kiriş numunelerinde istenilen paspayını/beton örtüsünü sağlamak için (kiriş alt ve yan bölgelerinde 15 mm) boyutunda plastik beton örtü aparatı kullanılmıştır. Şekil 3.8’de deney kirişlerinde kullanılan plastik beton örtü aparatları kiriş donatıları ile birlikte gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Deney kirişlerinde kullanılan paspayı/beton örtüsü aparatları

3.1.3.3. Epoksi

Güçlendirme işleminde, çift bileşenli ve yüksek kaliteli bir kimyasal epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Bu kapsamda, Sikafloor-150 (A bileşeni) ve Sikafloor-151 (B bileşeni) ticari ürünleri tercih edilmiştir. Epoksi karışımı, A bileşeninden 320 gram (4 birim) ve B bileşeninden 80 gram (1 birim) olacak şekilde hassas terazide tartılmış ve düşük devirli karıştırıcı ile homojen bir karışım elde edilerek hazırlanmıştır. Her bir kiriş için yaklaşık 400 gram epoksi hazırlanmış ve uygulama rulo fırça yardımıyla kiriş yüzeyine sürülerek gerçekleştirilmiştir. Uygulama sonrası epoksinin priz alması ve yeterli aderans dayanımına ulaşabilmesi için numuneler 24 saat süreyle bekletilmiştir. Uygulama süreci ve görselleri Şekil 3.9’da sunulmuştur.



Şekil 3.9. Güçlendirme uygulamasında kullanılan epoksi malzemesi

3.3. Numunelerin Güçlendirme Metodu

Kesme kapasitesi zayıf kirişlerin karbon fiber demet/iplik ve epoksi ile güçlendirilmesi için gereken ekipmanlar hazırlanıp adım adım uygulamalar yürütülmüştür. Güçlendirme uygulamaları aşağıda sırası ile açıklanmıştır;

Deney kirişlerinin güçlendirme işlemlerinde kullanılan temel ekipmanlar; matkap, uygun çapta matkap uçları, cetvel, metre, kurşun kalem, kompresör, taşlama makinesi, karbon fiber demet/ip ve özel olarak üretilmiş iplerdir. Güçlendirme uygulamasına geçilmeden önce, her bir ekipmanın görevine uygun olarak hazırlığı yapılmış ve uygulama süreci belirli bir sıraya göre gerçekleştirilmiştir.

İlk aşamada, kirişlerin üst yüzeyinden 50 mm ve yan yüzeylerinden 60 mm mesafe bırakılarak, cetvel ve kurşun kalem yardımıyla deliklerin açılacağı noktalar işaretlenmiştir. Delik yerleri, kesit yüksekliğinin belirli oranlarına ($d/2$, $d/3$ ve $d/4$) göre belirlenmiş ve bu doğrultuda matkapla delme işlemine geçilmiştir. Karbon fiber demet/inin geçirileceği delikler için 6 mm çapında matkap ucu kullanılırken, özel üretim karbon fiber ipler için 8 mm çapında matkap ucu tercih edilmiştir.

Delme işlemi tamamlandıktan sonra, delik içinde biriken beton tozları, basınçlı hava (kompresör) kullanılarak temizlenmiştir. Bu temizlik işlemi, özellikle ip, beton ve epoksi arasındaki aderansı artırmak ve uygulamanın etkinliğini sağlamak açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca, iplerin yükleme esnasında kesit köşelerinde zarar görmesini önlemek amacıyla, kirişlerin keskin kenarları taşlama makinesi ile pahlanmış (yuvarlatılmış) ve böylece olası ip kopmaları minimize edilmiştir. Uygulama adımları ve bu adımlarda kullanılan ekipmanlar Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

Güçlendirme aşamasında, hazırlanan demet/ip önce uygun uzunluklarda kesilmiş, ardından uç kısımlarına bir tıg aparatı bağlanarak, kirişin bir ucundan başlayıp U şeklinde sarma yöntemi ile deliklerden geçirilerek uygulanmıştır. Uygulama sırasında demet/inin gergin olmasına dikkat edilmiş ve gevşeklik oluşmamasına olabildiğince özen gösterilmiştir.

Bazı numunelerde, uygulamanın kesme kapasitesine katkısını daha iyi analiz edebilmek amacıyla iplerle birlikte epoksi enjeksiyonu da uygulanmıştır. Epoksi uygulaması deliklerin içine yapılmamış olup yalnızca yüzey uygulaması ile gerçekleştirilmiştir. Epoksinin kurlenmesi için 24 saat süreyle beklenmiş ve bu sürenin sonunda numuneler testlere hazır hâle getirilmiştir. Güçlendirme uygulamasında iplerin deliklerden geçirilme aşaması Şekil 3.11'de, epoksi uygulaması ise Şekil 3.12'de

sunulmuştur. Güçlendirme işlemleri tamamlandıktan sonra, tüm numuneler üzerinde dört noktalı düşey yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10. Güçlendirme adımları ve bu adımlarda kullanılan ekipmanlar



Şekil 3.11. FRP demeti/ipi ve özel üretim FRP ipin deliklerden geçirilmesi

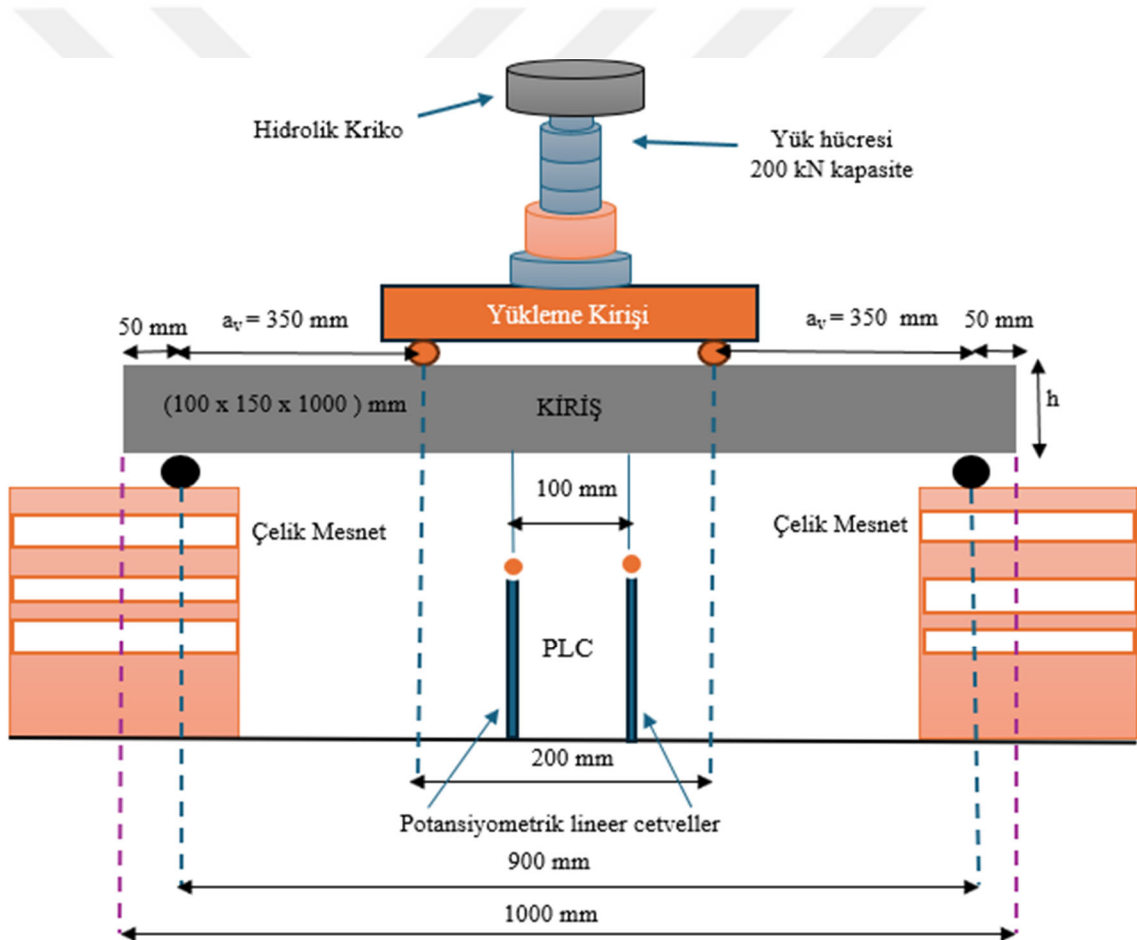


Şekil 3.12. Güçlendirmede kullanılan FRP iplerin epoksi ile uygulanması

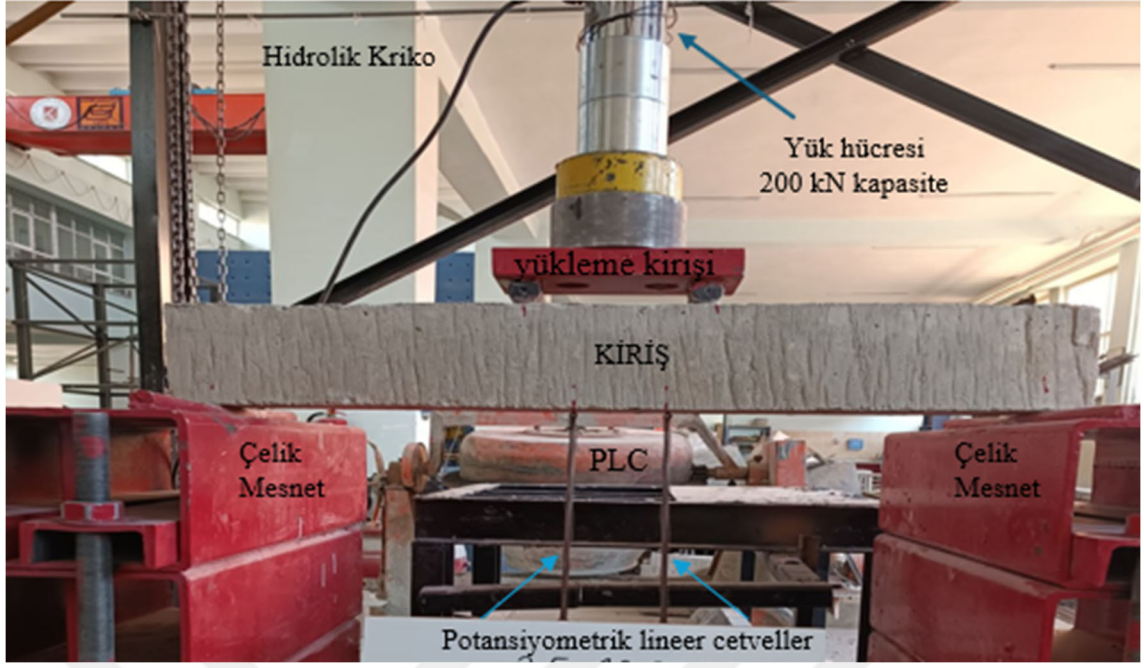
3.4. Deney Mekanizması

Kiriş numunelerinde yapılan güçlendirme uygulamalarının kesme kapasitesine katkısını değerlendirebilmek amacıyla, farklı güçlendirme konfigürasyonları kullanılarak dört noktalı eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.13). Kirişlerin kesme açıklığı / faydalı yükseklik oranı (a_v/d), 350 mm açıklık ve 120 mm faydalı yükseklik dikkate alınarak 2,92 olarak hesaplanmıştır. Tüm deneysel çalışmalar, Konya Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde, her bir kiriş numunesi, uç bölgeden 50 mm mesafede yerleştirilen sabit mesnetlerle sisteme yerleştirilmiştir. Yükleme işlemi, mekanik bir pompa yardımıyla, her seferinde 10 kN artışlarla uygulanmıştır. Deneylerde, 200 kN kapasitesine sahip bir yük hücresi (load cell) ile yük değerleri hassas bir şekilde ölçülmüştür. Uygulanan toplam yük P , hidrolik kriko aracılığıyla iki adet yükleme kirişi vasıtasıyla her biri $P/2$ büyüklüğünde olacak şekilde simetrik biçimde kiriş numunesine iletilmiştir. Bu yükleme, monotonik bir şekilde ilerlemiş ve her 10 kN'luk artış sonrasında, kirişte oluşan çatlakların gözlemlenebilmesi amacıyla kısa süreli bir duraklama yapılmıştır. Bu duraklamalarda çatlaklar sınıflandırılarak farklı renklerde kalemle işaretlenmiştir (örneğin: eğilme çatlakları için mavi ve kesme çatlakları için kırmızı kalem kullanılmıştır).

Kiriş numunelerindeki düşey deplasmanları ölçmek amacıyla, orta açıklığa 100 mm aralıkla yerleştirilmiş iki adet potansiyometrik deplasman ölçer (PLC) kullanılmıştır. Yükleme ve buna karşılık oluşan deplasmanlar, bilgisayar destekli sekiz kanallı veri toplama sistemi aracılığıyla anlık olarak kayıt altına alınmış; eş zamanlı olarak yük-deplasman eğrileri oluşturulmuştur (Şekil 3.14). Deney süresince yük-deplasman eğrisinin değişimi bilgisayar ekranında takip edilmiştir. Deneylerden elde edilen yük-deplasman verileri doğrultusunda; numunelerin maksimum yük taşıma kapasiteleri, süneklik düzeyi, enerji tüketimi ve rijitlikleri belirlenmiş ve karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Şekil 3.13'te deney düzeneğinin hem şematik gösterimi hem de gerçek gösterimi sunulmuştur. Şekil 3.14'te ise verilerin toplanması için kullanılan veri toplama cihazının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.13. Yükleme düzeneği



Şekil 3.14. Yükleme düzenneği (Devamı)



Şekil 3.15. 8 kanallı veri toplama cihazı

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında, ikisi referans numune olmak üzere toplam 12 adet betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Tüm numunelerde, çekme bölgesinde 2Ø14 ve basınç bölgesinde 2Ø8 çapında boyuna donatılar kullanılmış; kesme donatısı olarak ise Ø6 çapında etriyeler, 350 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Kirişlerin yüzeyine (üst basınç donatısının altında olacak şekilde), kesit faydalı yüksekliğinin belirli oranları olan $d/2$, $d/3$ ve $d/4$ mesafelerde delikler açıldıktan sonra, bu deliklerin içinden farklı tip ve konfigürasyonlarda FRP ipler kullanılarak güçlendirme yapılmış ve bu uygulamaların yapısal davranış üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Güçlendirme uygulamaları kapsamında, bazı numuneler yalnızca karbon fiber demet/ip ile; bazıları özel üretim karbon ip ile, bazıları ise bu iplerle birlikte epoksi esaslı yapıştırıcı kullanılarak güçlendirilmiştir. Böylece, farklı malzeme kombinasyonlarının kirişlerin kesme kapasitesi ve diğer mekanik özelliklerine etkileri değerlendirilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda, karbon fiber demet/ip, özel üretim karbon ip ve epoksi uygulamalarının kiriş kesme dayanımını ve mekanik özelliklerini belirgin şekilde etkilediği gözlemlenmiştir. Güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş tüm numunelere ait deneysel veriler karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve farklı güçlendirme tekniklerinin etkinliği nicel olarak ortaya konulmuştur.

Dört noktalı yükleme düzeneğinde uygulanan düşey yükler, yük hücresi (load cell) yardımıyla hassas biçimde ölçülmüş; buna karşılık oluşan deplasmanlar ise her numunenin alt orta bölgesine yerleştirilen iki adet potansiyometrik lineer cetvel ile kaydedilmiştir. Elde edilen veriler, bilgisayara bağlı veri toplama sistemi aracılığıyla dijital olarak kaydedilmiş ve her numuneye ait yük-deplasman ilişkileri grafiksel olarak oluşturulmuştur.

Deneysel bulguların daha açık ve karşılaştırmalı şekilde analiz edilebilmesi amacıyla, her bir numuneye ait veriler aşağıdaki başlıklar altında sunulmuştur:

- Göçme durumu oluşana kadar çatlakların gelişim aşamaları,
- Yük-deplasman eğrileri,
- Göçme sonrası oluşan hasar durumlarının detaylı görselleri.

Tüm deneyler tamamlandıktan sonra, elde edilen veriler üzerinden numunelerin yük taşıma kapasitesi, süneklik düzeyi, başlangıç rijitliği, enerji tüketimi ve göçme mekanizmaları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu parametreler doğrultusunda yapılan analizler, her bir numune özelinde bireysel sonuçlar sunulmasının yanı sıra, genel

karşılaştırmalar yoluyla farklı güçlendirme türlerinin yapısal davranışa etkilerini ortaya koymuştur.

4.1. Deneysel Çalışma Sonuçları

Bu bölümde, deney kirişlerinin bireysel sonuçları sunulmaktadır. Bölüm 4.2’de ise burada elde edilen tüm deney sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

4.1.1. S-N-4.0-N-NE numunesi

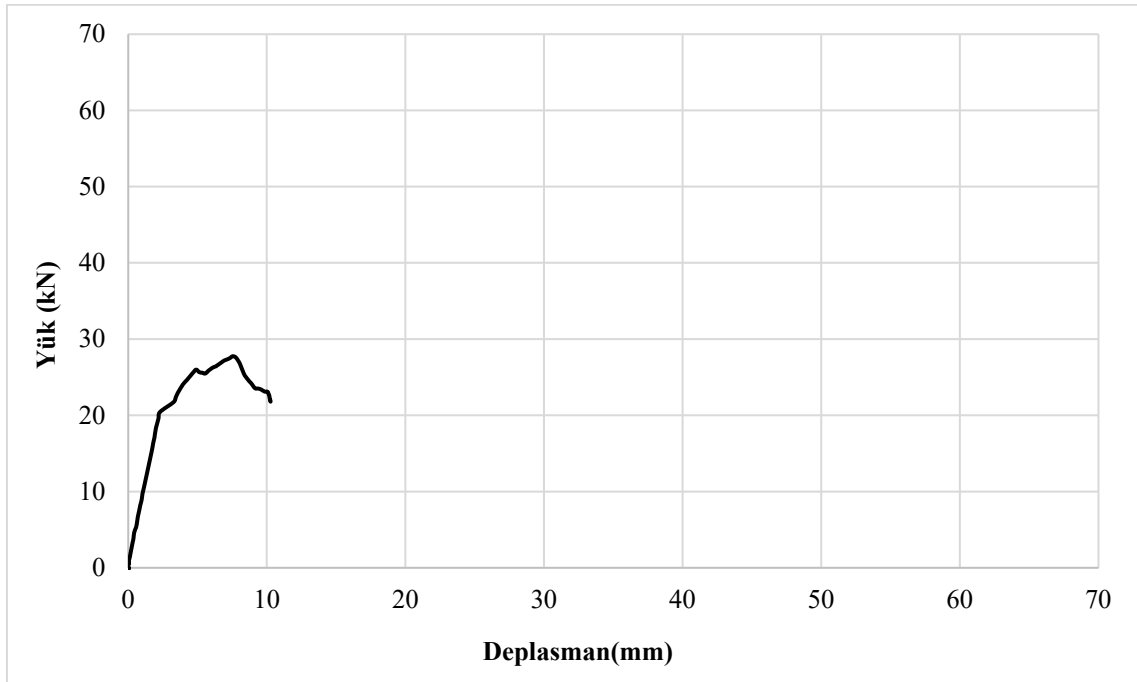
Bu çalışma kapsamında ilk olarak, **S-N-4.0-N-NE** kodlu referans kiriş numunesi test edilmiştir. Bu numune, herhangi bir güçlendirme uygulanmaksızın yalnızca üzerinde delikler açılmış bir kiriş olarak değerlendirilmiştir. Deliklerin çapı 6 mm olarak belirlenmiş ve kiriş yüzeyine, kesit faydalı yüksekliğinin dörtte biri oranında ($d/4$) yerleştirilmiştir. Bu işlem, güçlendirme yapılacak kirişlerde olduğu gibi matkapla gerçekleştirilmiş ancak yapısal bir güçlendirme (demet/ip) uygulanmamıştır. Bu sayede, yalnızca deliklerin yük taşıma kapasitesi ve rijitlik üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Kiriş numunesinde uygulanan yük 13kN ve düşey deplasman 1.54mm iken, kiriş üzerinde herhangi bir çatlak gözlenmemiştir. Yük değeri, 21 kN seviyesine ulaştığında, kirişin sol kesme açıklığında ilk eğik çekme çatlak oluşmuş ve bu anda orta açıklıkta ölçülen deplasman değeri 2.66 mm olarak kaydedilmiştir. Yüklemenin artmasıyla birlikte eğik çekme çatlaklarının sayısı ve genişliği artmış, özellikle kesme bölgesinde çatlak gelişimi daha belirgin hâle gelmiştir. Bu durum, kirişin eğilme kapasitesinin kesme kapasitesinden daha yüksek olduğunu ve dolayısıyla göçmenin kesme yönünden gerçekleştiğini göstermektedir. Yükleme devam ettikçe çatlak genişlikleri artmaya devam etmiş, özellikle sağ ve sol kesme açıklıklarında ilerleyen eğik çekme çatlakları sonunda, 27.75 kN yük ve 7.54 mm deplasman seviyesinde kirişte eğik çekme kırılması meydana gelmiştir. Bu aşamada yapı elemanı göçme durumuna ulaşmıştır. Kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları Şekil 4.1’de sunulmaktadır.

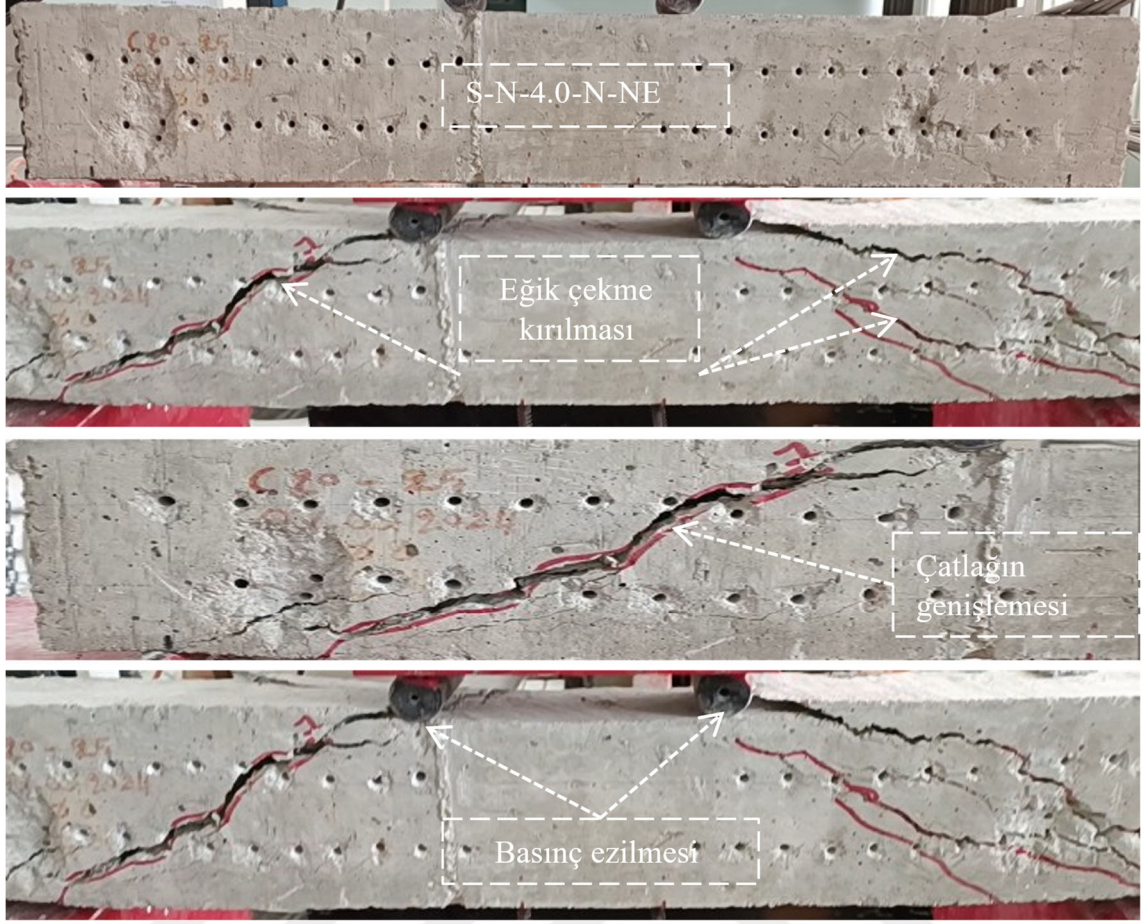


Şekil 4.1. S-N-4.0-N-NE kodlu delikli referans kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları

S-N-4.0-N-NE kodlu delikli referans kiriş numunesine ait yük-deplasman eğrisi Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Kiriş numunesi yük taşıma kapasitesine ulaştıktan sonra kirişte oluşan hasarlar detaylıca incelenmiş olup, Şekil 4.3’te gösterilmiştir.



Şekil 4.2. S-N-4.0-N-NE kodlu delikli referans kiriş numunesine ait yük-deplasman eğrisi



Şekil 4.3. S-N-4.0-N-NE kodlu delikli referans kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

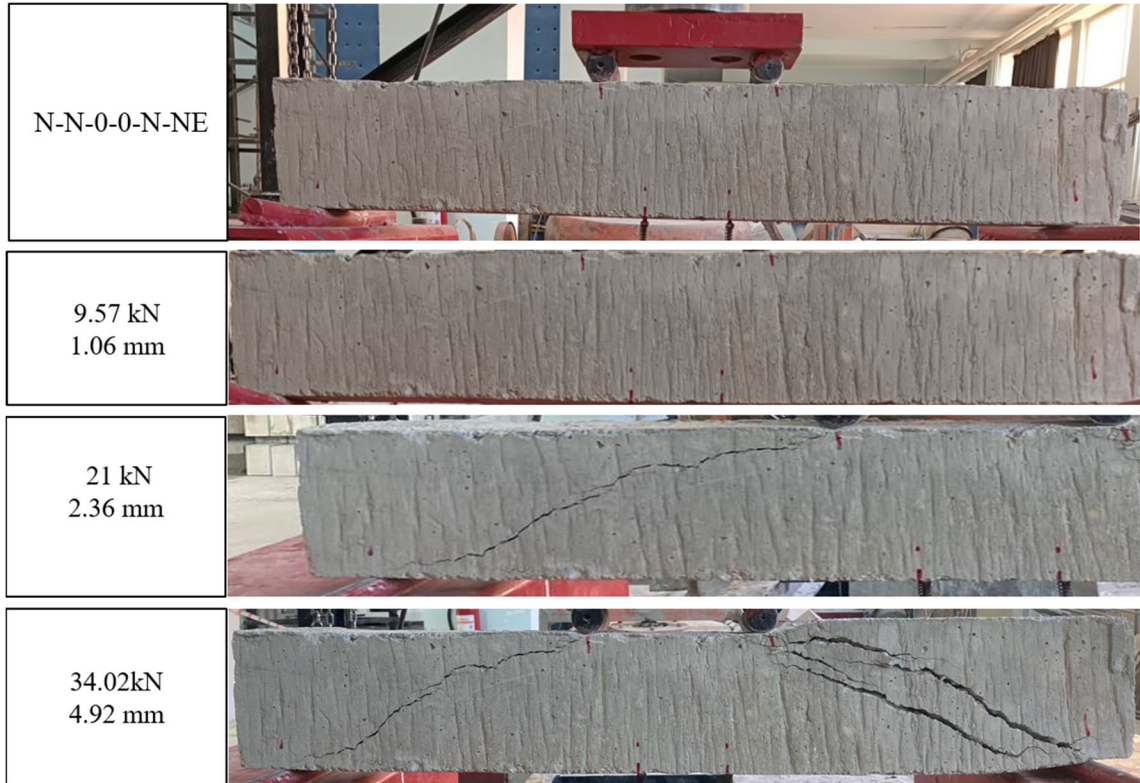
4.1.2. N-N-0-0-N-NE numunesi

Bu deneyde test edilen N-N-0-0-N-NE kodlu numune, çalışma kapsamında kullanılan ikinci referans kiriş olup, ilk referans kiriş (S-N-4.0-N-NE) ile aynı beton dayanımı, donatı düzeni ve kesit geometrisine sahiptir. Ancak bu numunede herhangi bir delik açılmamış; dolayısıyla deliklerin olmaması durumunda kirişin yapısal performansı referans olarak değerlendirilmiştir.

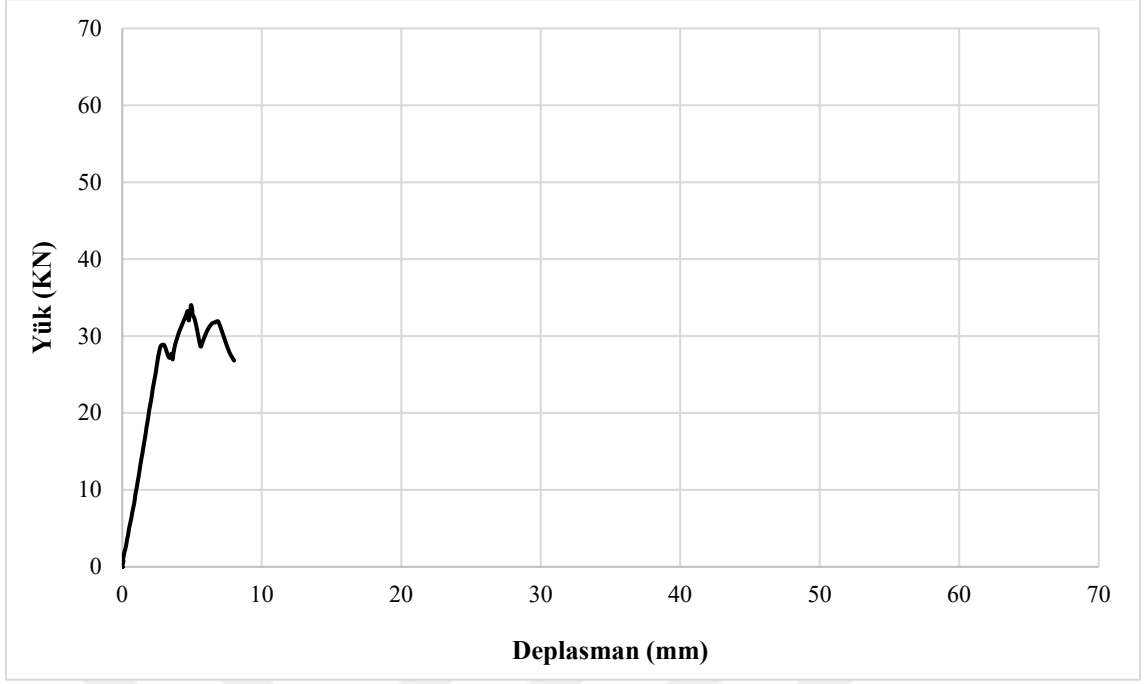
Numune üzerine uygulanan yük 9.57 kN seviyesine ulaştığında, gözle görülür bir hasar oluşmamış olup bu yükleme anında orta açıklıktaki deplasman 1.06mm olarak kaydedilmiştir. Yük artışıyla birlikte 21 kN seviyesinde, kirişin sol kesme açıklığında ilk eğik çekme çatlağı meydana gelmiş ve bu esnada deplasman değeri 2.36mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.4). Yüklemin devam etmesiyle birlikte eğik çekme çatlakları sağ ve sol kesme bölgelerinde ilerlemiş ve genişlemiştir. Sonuç olarak, numune 34.02 kN maksimum yük ve 4.92 mm deplasman değerine ulaştığında, her iki kesme bölgesinde oluşan çatlakların birleşmesi ile eğik çekme kırılması gözlemlenerek göçme meydana

gelmiştir. Ayrıca kirişin basınç bölgesinde yükleme mesnetinin altında ezilme de gözlemlenmiştir.

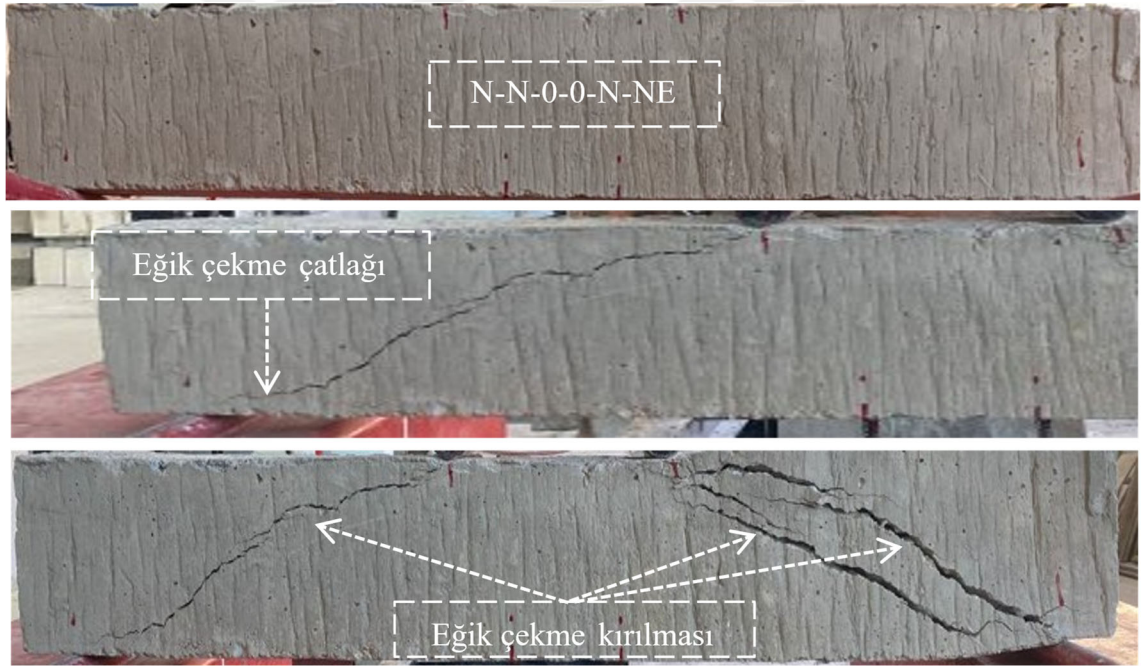
Numuneye ait eğik çekme çatlaklarının oluşum aşamaları ve yük-deplasman ilişkisi Şekil 4.4'te sunulmuştur. Bu numuneye ait yük-deplasman eğrisi ise Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Yük taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra numunede meydana gelen hasar detayları incelenmiş ve Şekil 4.6'da görsel olarak verilmiştir.



Şekil 4.4. N-N-0-0-N-NE kodlu deliksiz referans kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları



Şekil 4.5. N-N-0-0-N-NE kodlu deliksiz referans kiriş numunesine ait yük-deplasman eğrisi



Şekil 4.6. N-N-0-0-N-NE kodlu deliksiz referans kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detaylar

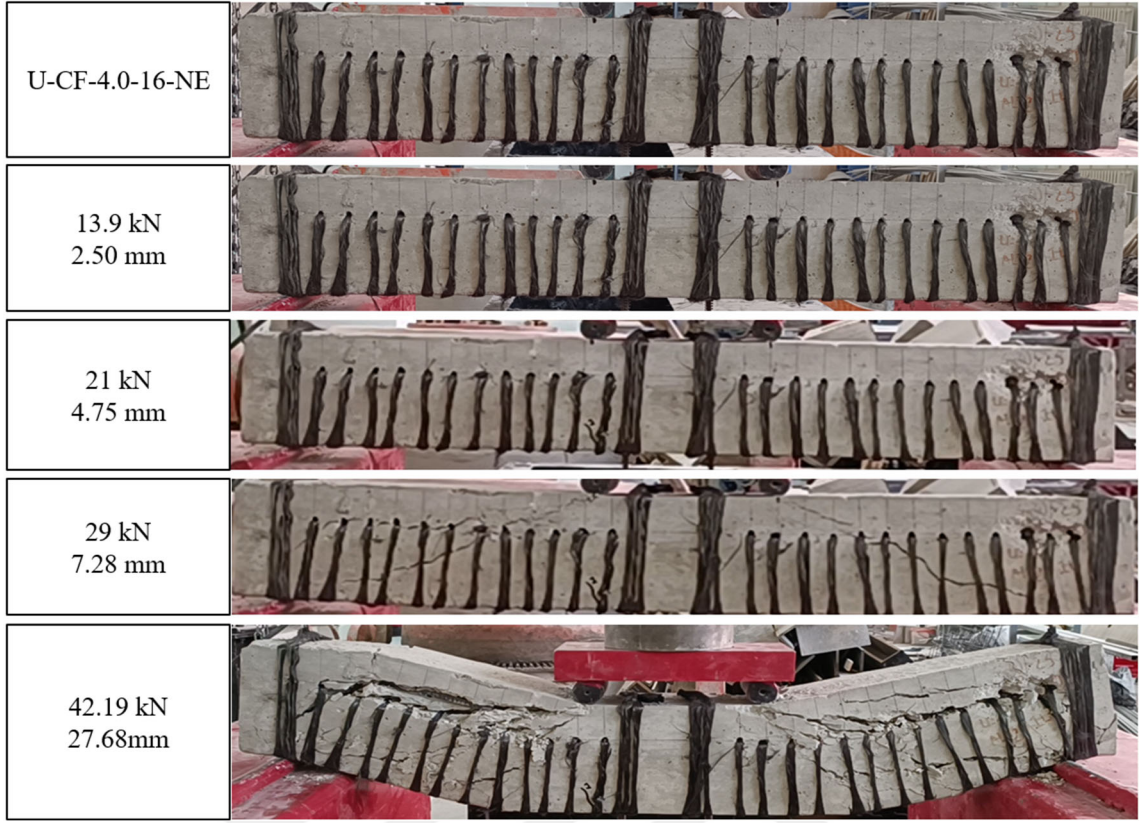
4.1.3. U-CF-4.0-16-NE numunesi

Bu çalışma kapsamında ilk güçlendirme olarak, U-CF-4.0-16-NE kodlu kiriş numunesi test edilmiştir. Bu numune, üzerinde üsten 50 mm yandan 60 mm mesafe bırakarak matkapla 6 mm çapında delikler açılmış ve kiriş yüzeyine, kesit faydalı

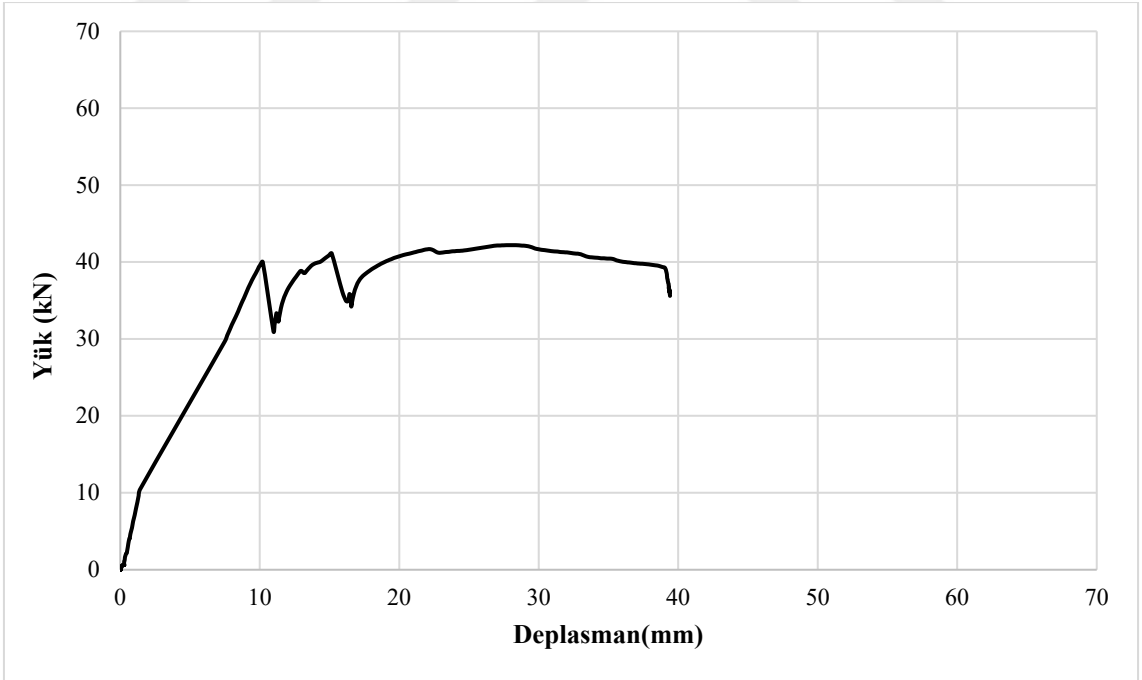
yüksekliğinin dörtte biri oranında ($d/4$) mesafe ile karbon fiber demet/ip yerleştirilmiştir. Güçlendirme yapılacak kirişte U şeklinde sargılama yapılarak yapısal bir takviye FRP demet/ip 16 kat (ip) uygulanmıştır. İpi, kirişin bir ucundan geçirmek sureti ile orta bölgeye kadar ilerleyerek sargılama uygulanmıştır. Bu sayede, kesme kapasitesi zayıf betonarme kirişlerin üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu numune özellikleri diğer referans kirişlerdeki gibi aynı beton dayanımı, donatı düzeni ve kesit geometrisine sahiptir.

Numune üzerine uygulanan yük 13.9 kN seviyesine ulaştığında, gözle görülür bir hasar oluşmamış olup bu yükleme anında orta açıklıktaki deplasman 2.50 mm olarak kaydedilmiştir. Yük artışıyla birlikte 21 kN seviyesinde, kirişin sol kesme açıklığında ilk kesme çatlak meydana gelmiş ve bu esnada deplasman değeri 4.75 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.7). Yüklemin 29 kN yük ve 7.28 mm deplasman değerinde devam etmesiyle birlikte eğik çekme çatlakları sağ ve sol kesme bölgelerinde ilerlemiş ve genişlemiştir. Sonuç olarak, numune 42.19 kN maksimum yük ve 27.68 mm deplasman değerine ulaştığında, her iki kesme bölgesinde oluşan çatlakların birleşmesi ve basınç bölgesinde ezilme meydana gelmesiyle göçme oluşmuştur. Ayrıca yükün belli seviyelerde düşmesi ve tekrar artması FRP ipin güçlendirmeye katkı sağlamaya devam etmesi ile açıklanabilir.

Numuneye ait eğik çekme çatlaklarının oluşum aşamaları ve yük-deplasman ilişkisi Şekil 4.7’de sunulmuştur. Bu numuneye ait yük-deplasman eğrisi ise Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Yük taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra numunede meydana gelen hasar detayları incelenmiş ve Şekil 4.9’da görsel olarak verilmiştir



Şekil 4.7. U-CF-4.0-16-NE kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları



Şekil 4.8. U-CF-4.0-16-NE kiriş numunesine ait yük-deplasman eğrisi



Şekil 4.9. U-CF-4.0-16-NE numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

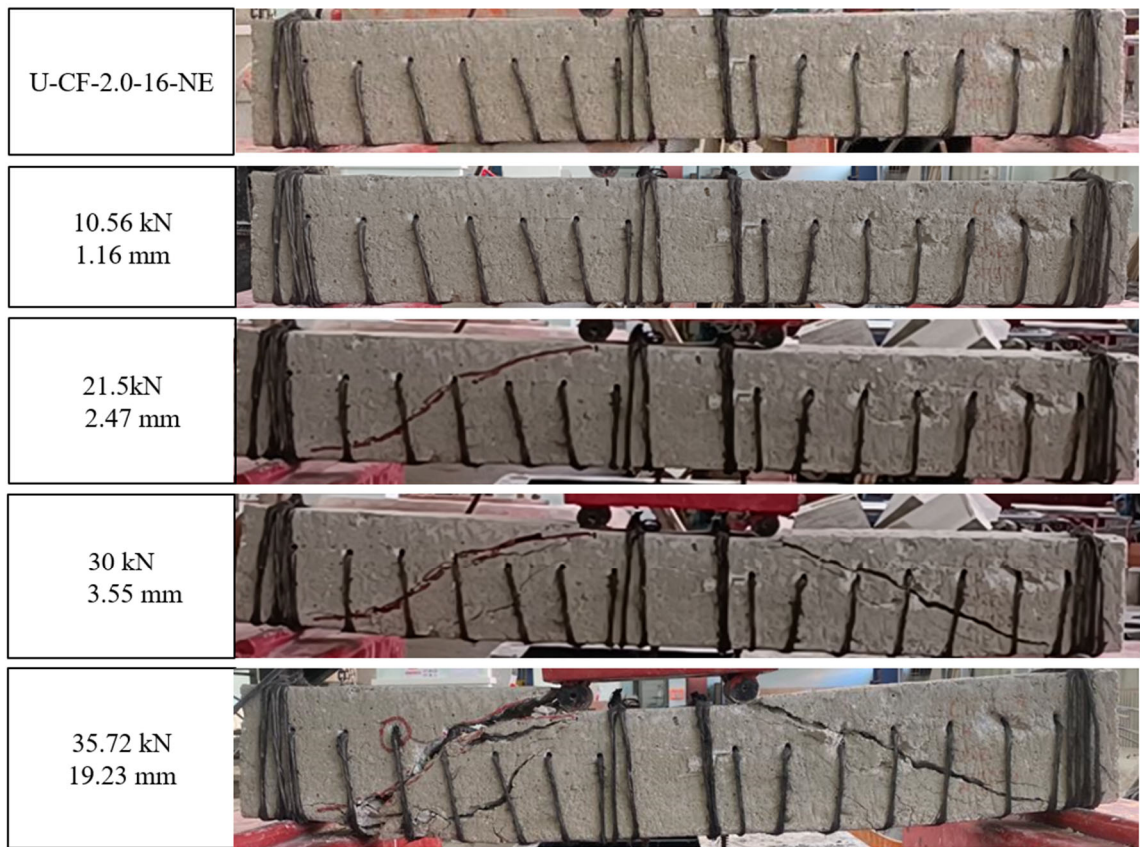
4.1.4. U-CF-2.0-16-NE numunesi

Çalışma kapsamında ikinci güçlendirme olarak, U-CF-2.0-16-NE kodlu kiriş numunesi test edilmiştir. Bu numune, üzerinde üsten 50 mm yandan 60 mm mesafe bırakarak matkapla 6 mm çapında delikler açılmış ve kiriş yüzeyine, kesit faydalı yüksekliğinin yarısı oranında ($d/2$) mesafe ile demet/iplik yerleştirilerek güçlendirme gerçekleştirilmiştir. Yani kirişe U şeklinde sargılama yapılarak 16 kat FRP demet/ip ile güçlendirme uygulanmıştır.

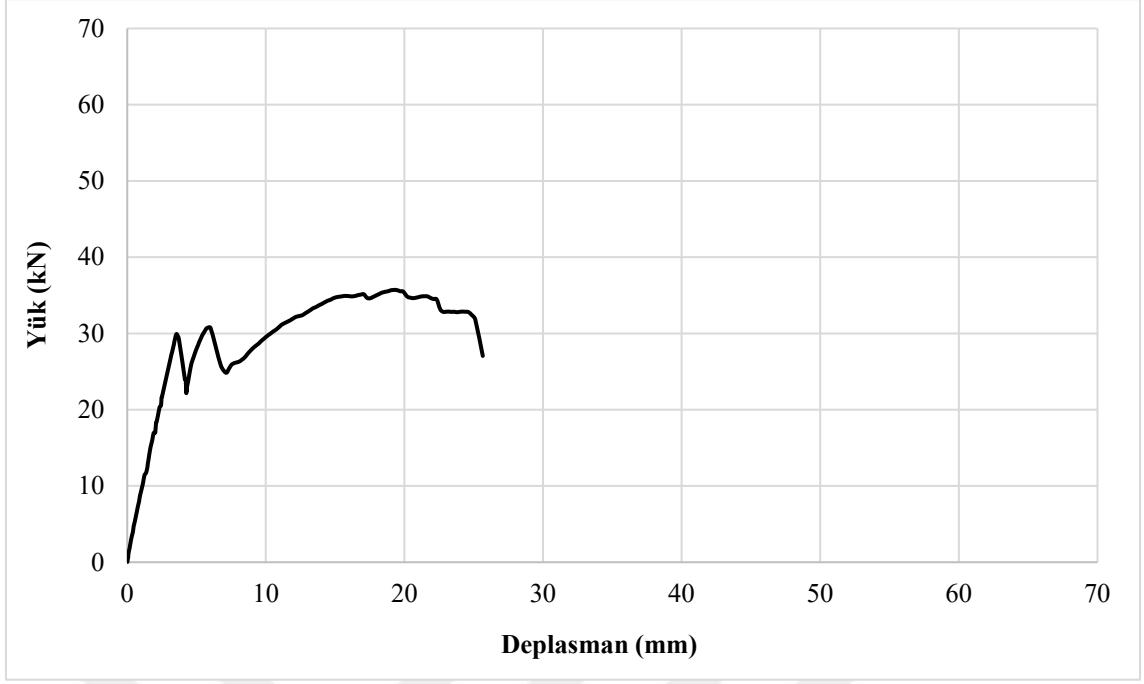
Numune üzerine uygulanan yük 10.56 kN seviyesine ulaştığında, gözle görülür bir hasar oluşmamış olup bu yükleme anında orta açıklıktaki deplasman 1.16 mm olarak kaydedilmiştir. Yük artışıyla birlikte 21.5 kN seviyesinde, kirişin sol kesme açıklığında ilk eğik çekme çatlağı meydana gelmiş ve bu esnada deplasman değeri 2.47 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.10). Yüklemin yaklaşık 30 kN ve deplasmanın 3.55 mm değerine ulaşmasıyla birlikte eğik çekme çatlakları sağ ve sol kesme bölgelerinde ilerlemiş ve genişlemiştir. Sonuç olarak, numune 35.72 kN maksimum yük ve 19.23 mm deplasman

değerine ulaştığında, her iki kesme bölgesinde oluşan çatlakların genişlemesiyle göçme gerçekleşmiştir. Bu esnada kirişin çatlağın en geniş olduğu bölgede CFRP ipti uzama ve yersel kopmalar gözlenmiştir. Ayrıca yükün belli seviyelerde düşmesi ve tekrar artması önceki kiriş numunesinde olduğu gibi CFRP ipin güçlendirmeye katkı sağlamaya devam etmesi ile açıklanabilir.

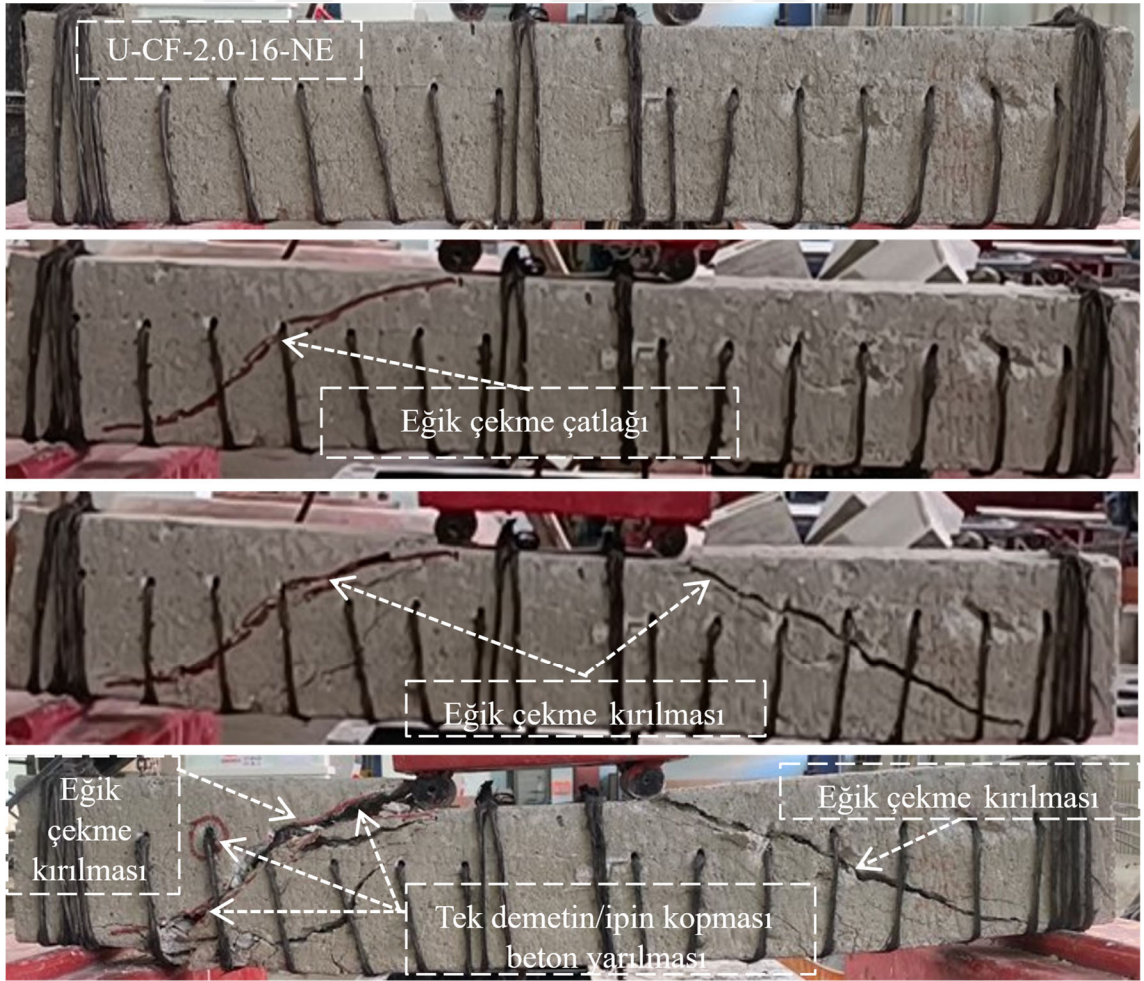
Numuneye ait eğik çekme çatlaklarının oluşum aşamaları ve yük-deplasman ilişkisi Şekil 4.10'da sunulmuştur. Bu numuneye ait yük-deplasman eğrisi ise Şekil 4.11'de gösterilmektedir. Yük taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra numunede meydana gelen hasar detayları incelenmiş ve Şekil 4.12'de görsel olarak verilmiştir.



Şekil 4.10. U-CF-2.0-16-NE kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları



Şekil 4.11. U-CF-2.0-16-NE kiriş numunesine ait yük-deplasman eğrisi



Şekil 4.12. U-CF-2.0-16-NE kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

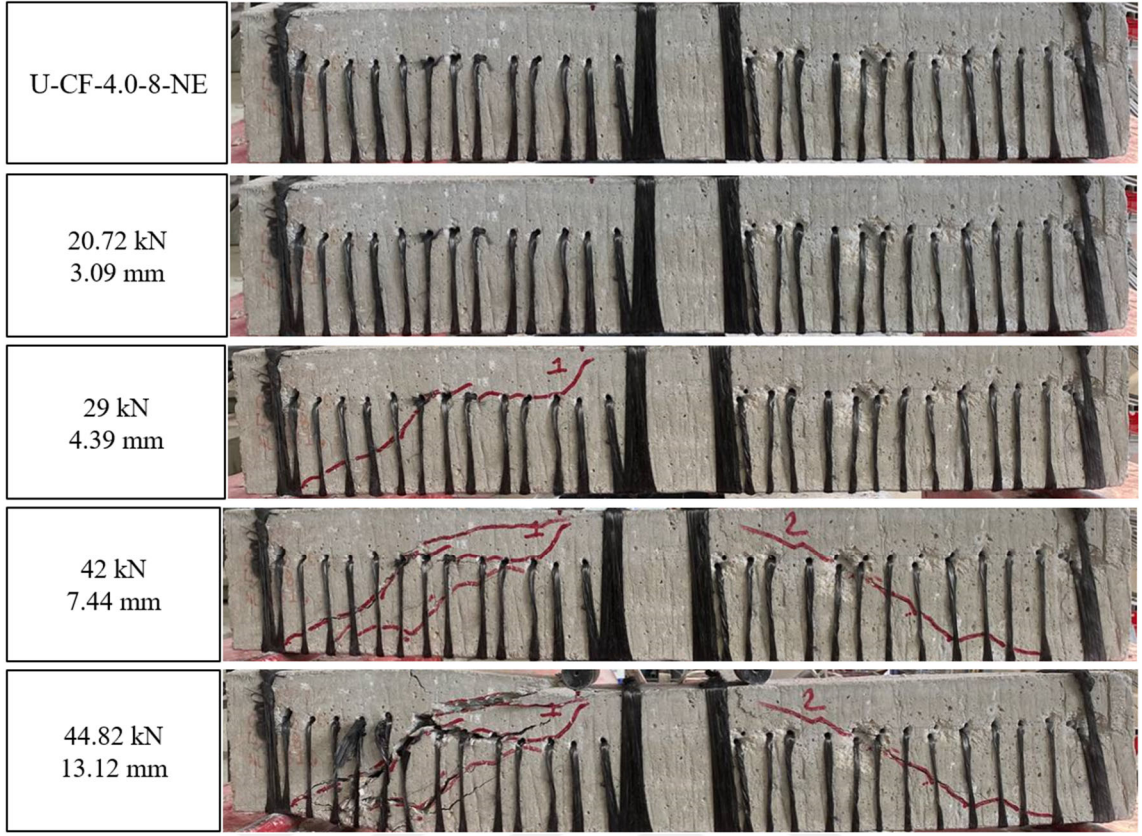
4.1.5. U-CF-4.0-8-NE numunesi

Çalışma kapsamında üçüncü güçlendirme olarak, U-CF-4.0-8-NE kodlu kiriş numunesi test edilmiştir. Bu numune, üzerinde üsten 50 mm yandan 60 mm mesafe bırakarak matkapla 6 mm çapında delikler açılmış ve kiriş yüzeyine, kesit faydalı yüksekliğinin dörtte biri oranında ($d/4$) mesafe ile FRP demet/iplik yerleştirilerek güçlendirme uygulanmıştır. Diğer bir ifade ile kirişe U şeklinde sargılama yapılarak 8 kat FRP demet/ip ile güçlendirme uygulanmıştır.

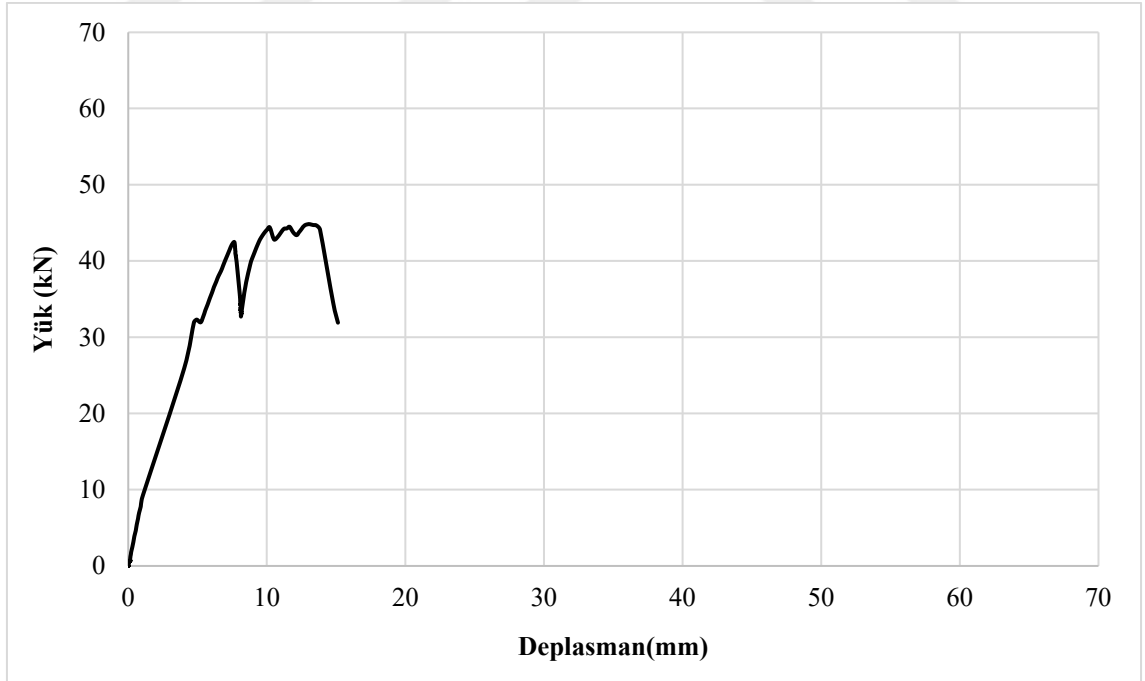
Numune üzerine uygulanan yük 20.72 kN seviyesine ulaştığında, gözle görülür bir hasar oluşmamış olup bu yükleme anında orta açıklıktaki deplasman 3.09 mm olarak kaydedilmiştir. Yük artışıyla birlikte 29 kN seviyesinde, kirişin sol kesme açıklığında ilk eğik çekme çatlakları meydana gelmiş ve bu esnada deplasman değeri 4.39 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.13).

Yüklemenin 42 kN yük ve 7.44 mm deplasman değerinde devam etmesiyle birlikte eğik çekme çatlakları sağ ve sol kesme bölgelerinde ilerlemiş ve genişlemiştir. Sonuç olarak, numune 44.82 kN maksimum yük ve 13.12 mm deplasman değerine ulaştığında, her iki kesme bölgesinde oluşan çatlakların birleşmesi ve genişlemesi ile kirişin sol kesme bölgesinde iki adet ipte kopma gözlenmesiyle göçme meydana gelmiştir. Şekil 4.14'te yükün ilk tepe noktasından sonra düşmesi çatlakların oluşmasına ve daha sonra yükün tekrar artması ise FRP iplerin yük taşımasına işaret olarak değerlendirilebilir.

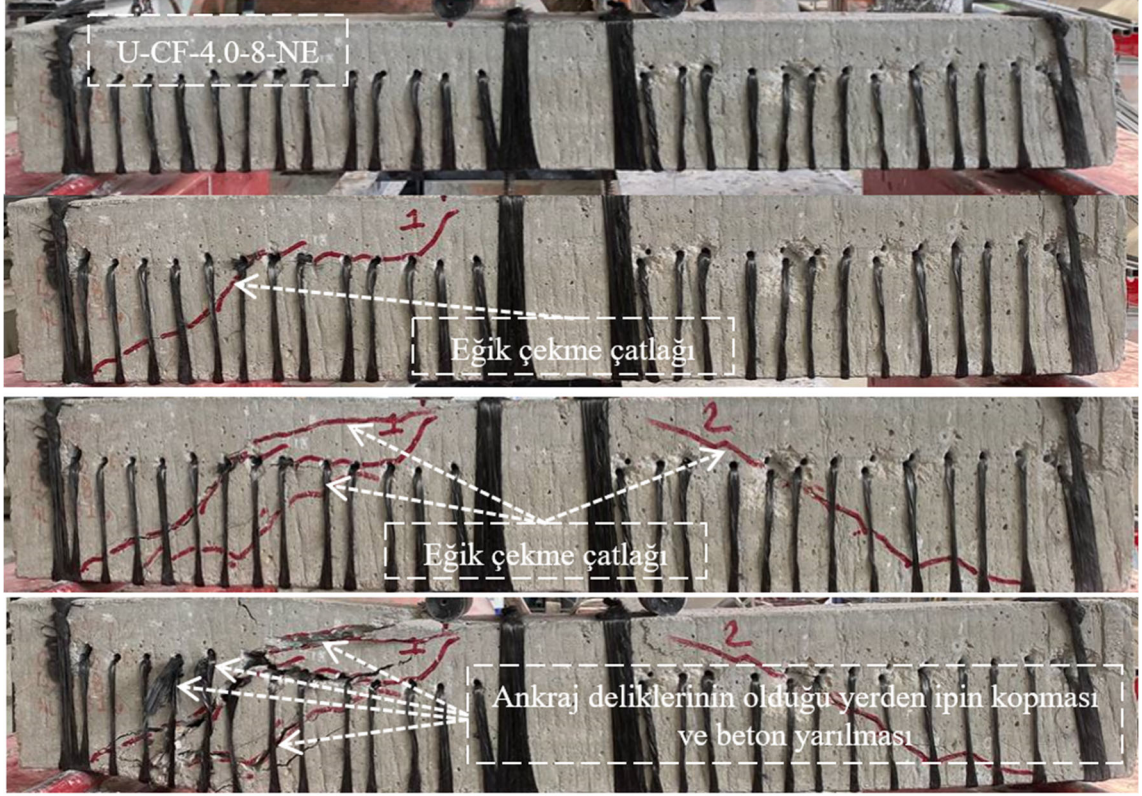
Numuneye ait eğik çekme çatlaklarının oluşum aşamaları Şekil 4.13'te sunulmuştur. Bu numuneye ait yük-deplasman eğrisi ise Şekil 4.14'te gösterilmektedir. Yük taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra numunede meydana gelen hasar detayları incelenmiş ve Şekil 4.15'te görsel olarak verilmiştir.



Şekil 4.13. U-CF-4.0-8-NE kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları



Şekil 4.14. U-CF-4.0-8-NE kiriş numunesine ait yük-deplasman eğrisi



Şekil 4.15. U-CF-4.0-8-NE kiriş numunesine ait göçme Sonrası Hasar Detayları

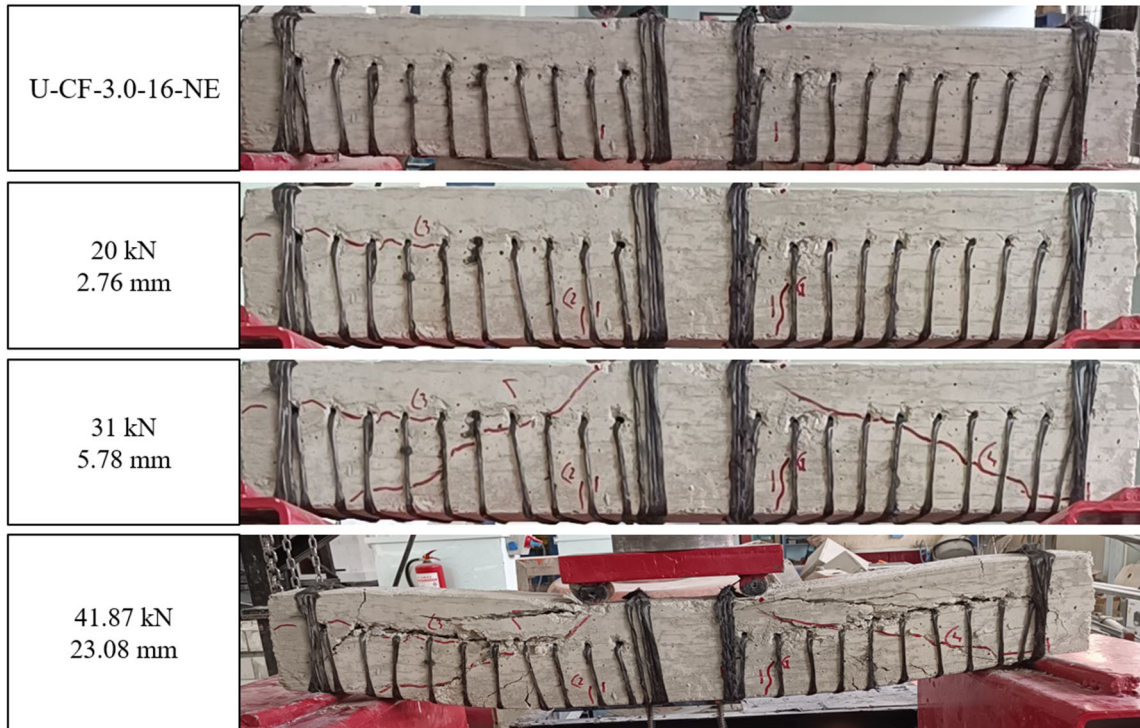
4.1.6. U-CF-3.0-16-NE numunesi

Dördüncü güçlendirme yöntemi kapsamında, U-CF-3.0-16-NE kodlu kiriş numunesi üzerinde deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu numunede, üstten 50 mm ve yandan 60 mm mesafe bırakılarak, kiriş yüzeyine 6 mm çapında delikler matkapla açılmıştır. Açılan delikler, kesitin faydalı yüksekliğinin üçte biri oranındaki ($d/3$) aralıklarla yerleştirilmiştir. Güçlendirme uygulaması sırasında, kirişin üç yüzeyini saran U şeklindeki konfigürasyonda karbon fiber (FRP) demeti/ipi kullanılmış; toplamda 16 kat demet/ip sarılarak yapısal bir sargı oluşturulmuştur. Bu uygulama ile kirişin kesme kapasitesinin artırılması hedeflenmiştir.

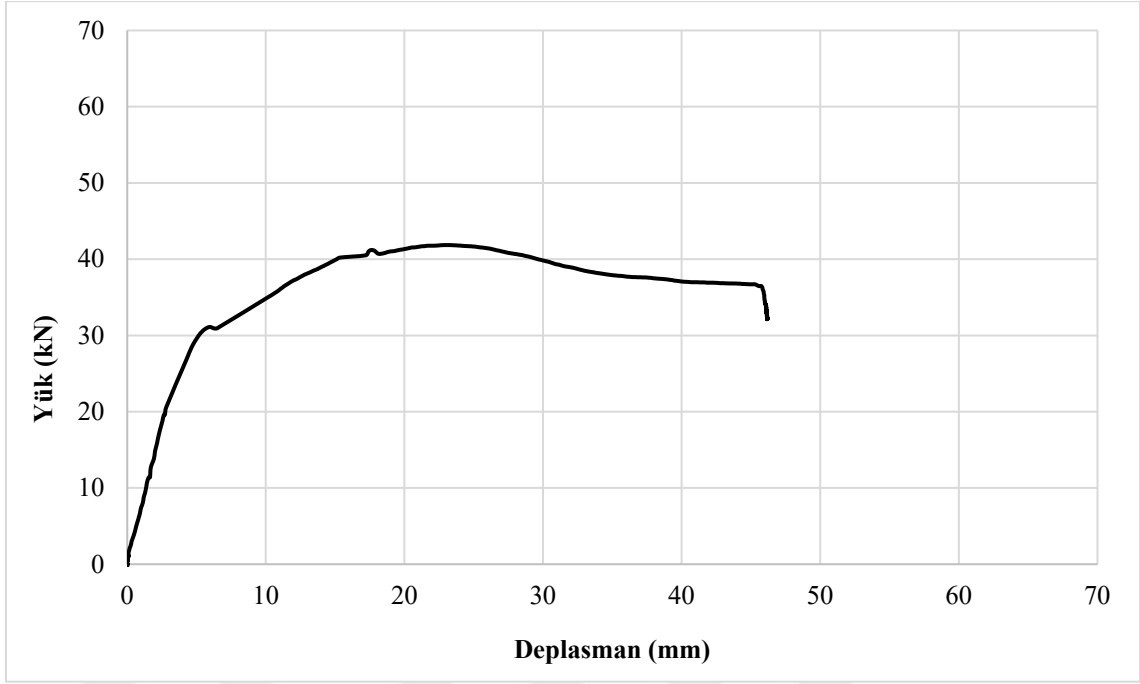
Numune üzerine uygulanan yük 12.65 kN seviyesine ulaştığında, gözle görülür bir hasar oluşmamış olup bu yükleme anında orta açıklıktaki deplasman 1.69 mm olarak kaydedilmiştir. Yük artışıyla birlikte 20 kN seviyesinde, kirişin sol kesme açıklığında ankraj deliklerin olduğu yerde yatay kırılmalar ve orta kısımlara yakın bölgelerde de kesme çatlakları meydana gelmiş ve bu esnada deplasman değeri 2.76 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.16). Yüklemin 31 kN düşey yük ve 5.78 mm deplasman seviyesine ulaşmasıyla birlikte, eğik çekme çatlaklarının hem sağ hem de sol kesme

bölgelerinde ilerlediği ve belirgin şekilde genişlediği gözlemlenmiştir. Numune, 41.87 kN maksimum yük ve 23.08 mm deplasman seviyesine ulaştığında; her iki kesme bölgesindeki eğik çatlakların birleşmesi, kirişin sol tarafındaki basınç bölgesinde ezilme oluşması ve ankraj deliklerinin bulunduğu bölgede gelişen yatay çatlakların ilerleyerek genişlemesi sonucunda göçme meydana gelmiştir.

Numuneye ait eğik çekme çatlaklarının oluşum aşamaları Şekil 4.16'da yük-deplasman eğrisi ise Şekil 4.17'de gösterilmektedir. Yük taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra numunede meydana gelen hasar detayları incelenmiş ve Şekil 4.18'da görsel olarak verilmiştir.



Şekil 4.16. U-CF-3.0-16-NE kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları



Şekil 4.17. U-CF-3.0-16-NE kiriş numunesine ait yük-deplasman eğrisi



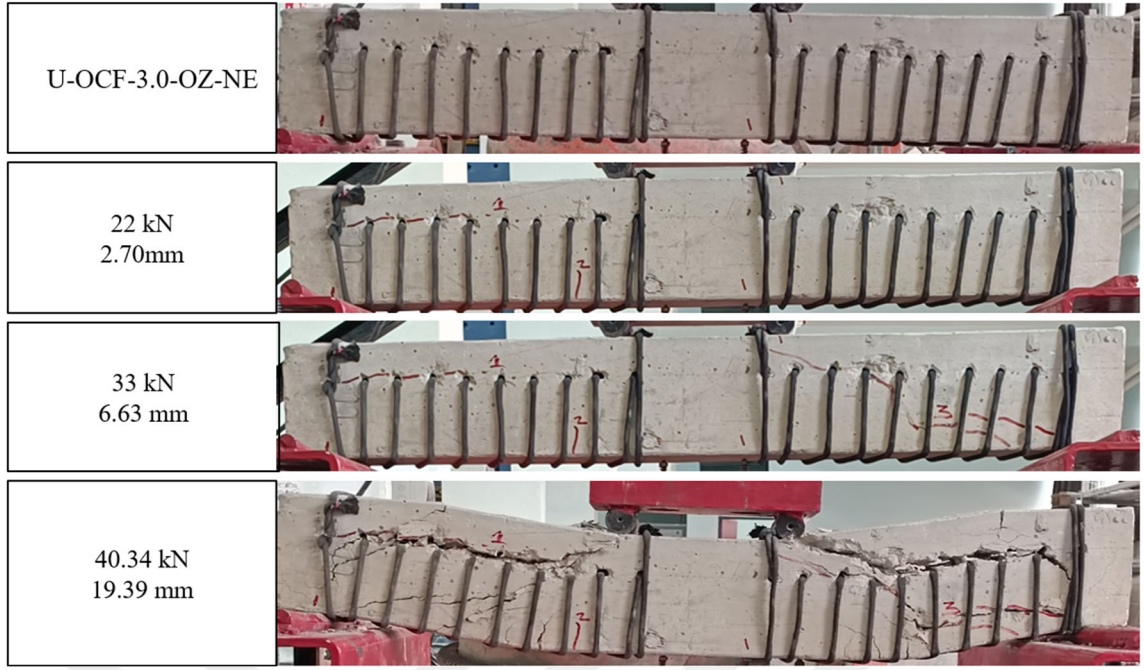
Şekil 4.18. U-CF-3.0-16-NE kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

4.1.7. U-OCF-3.0-OZ-NE numunesi

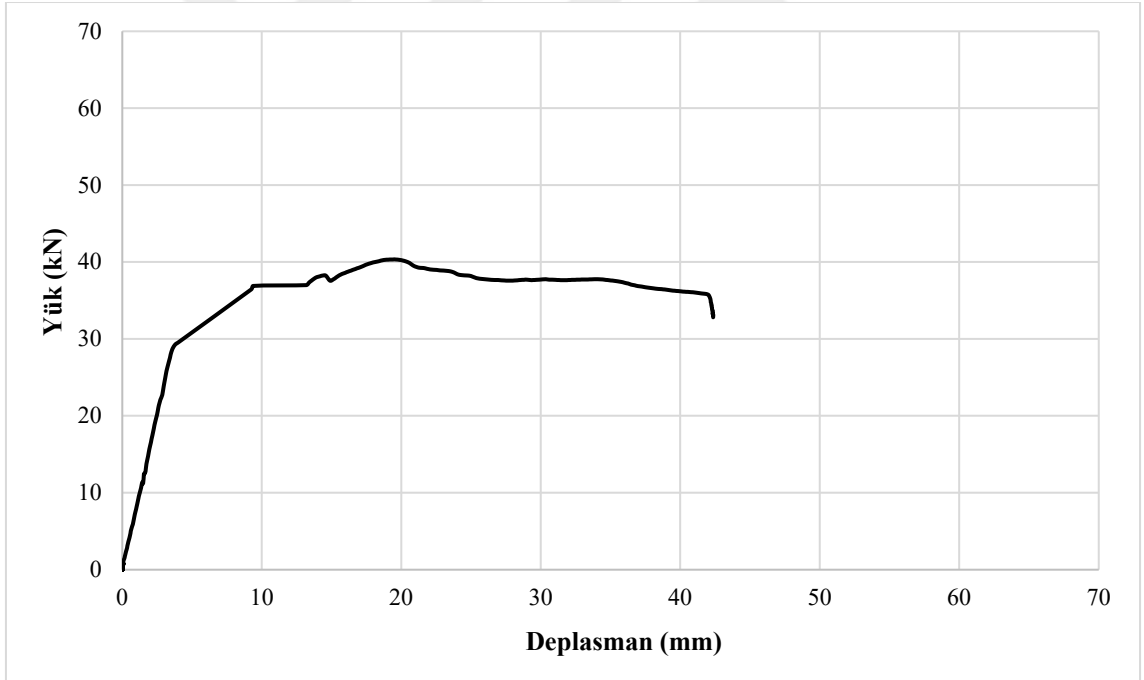
Çalışma kapsamında beşinci güçlendirme yöntemi olarak, U-OCF-3.0-OZ-NE kodlu kiriş numunesi üzerinde deneysel test gerçekleştirilmiştir. Bu numunede, üstten 50 mm ve yandan 60 mm mesafe bırakılarak, kiriş yüzeyine 8 mm çapında delikler matkapla açılmıştır. Delikler, kesitin faydalı yüksekliğinin üçte biri oranındaki ($d/3$) aralıklarla yerleştirilmiştir. Güçlendirme uygulamasında, kirişin üç yüzünü saran U tipi konfigürasyonda, özel üretim fiber ip kullanılmıştır. Uygulanan ip, 8 mm çapındaki deliklere yerleştirilmiş olup 6 mm çapındadır. Bu yeni takviye türünün yük taşıma kapasitesine etkisini değerlendirmek amacıyla numune ilk kez test edilerek performansı analiz edilmiştir.

Numune üzerine uygulanan yük 12.40 kN seviyesine ulaştığında, gözle görülür bir hasar oluşmamış olup bu yükleme anında orta açıklıktaki deplasman 1.55 mm olarak kaydedilmiştir. Yük artışıyla birlikte 22 kN seviyesinde, kirişin sol kesme açıklığında ankraj deliklerin olduğu yerde yatay kırılmalar ve orta kısımlara yakın bölgelerde kesme çatlakları meydana gelmiş ve bu esnada deplasman değeri 2.70 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.19). Yüklemin 33 kN yük ve 6.63 mm deplasman değerine ulaşmasıyla eğik çekme çatlakları sağ ve sol kesme bölgelerinde ilerlemiş ve genişlemiştir. Sonuç olarak, numune, 40.34 kN maksimum yük ve 19.39 mm deplasman seviyesine ulaştığında; her iki kesme bölgesinde oluşan eğik çatlakların birleşmesi, kirişin sol tarafındaki basınç bölgesinde ezilme meydana gelmesi ve ankraj deliklerinin bulunduğu bölgede gelişen yatay çatlakların ilerleyerek genişlemesi sonucunda göçme meydana gelmiştir.

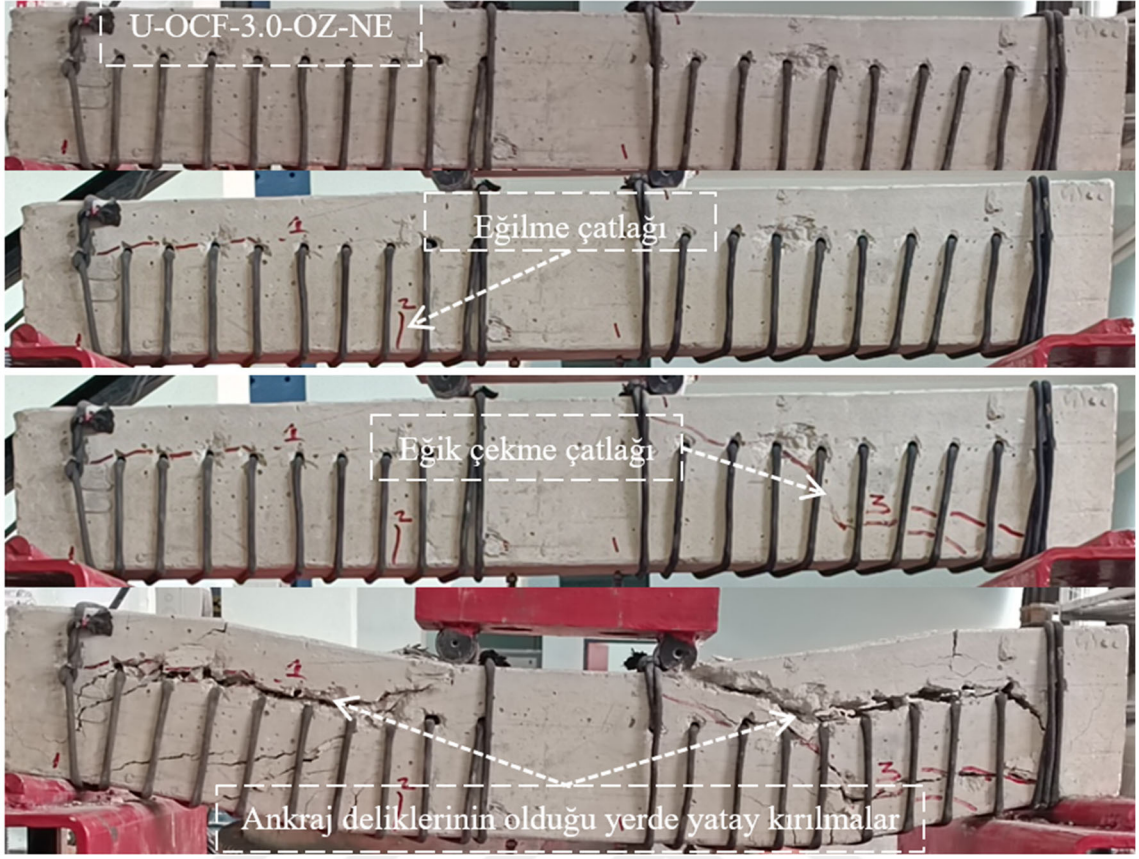
Numuneye ait eğik çekme çatlaklarının oluşum aşamaları Şekil 4.19’da yük-deplasman eğrisi ise Şekil 4.20’de gösterilmektedir. Yük taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra numunede meydana gelen hasar detayları incelenmiş ve Şekil 4.21’de görsel olarak verilmiştir.



Şekil 4.19. U-OCF-3.0-OZ-NE kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları



Şekil 4.20. U-OCF-3.0-OZ-NE kiriş numunesine ait yük-deplasman eğrisi



Şekil 4.21. U-OCF-3.0-OZ-NE kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

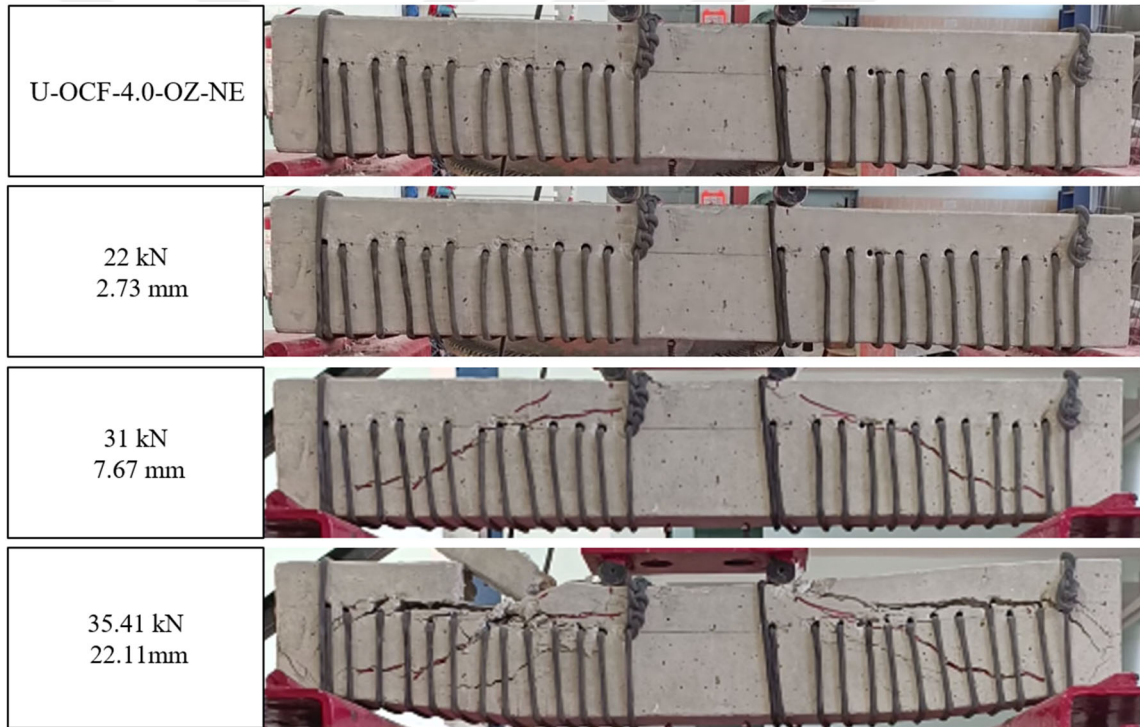
4.1.7. U-OCF-4.0-OZ-NE numunesi

Altıncı güçlendirme tipi kapsamında, U-OCF-4.0-OZ-NE kodlu kiriş numunesi üzerinde deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu numunede, kirişin üst yüzeyinden 50 mm ve yan yüzeyinden 60 mm mesafe bırakılarak, 8 mm çapında delikler matkap yardımıyla açılmıştır. Açılan delikler, kesitin faydalı yüksekliğinin dörtte biri oranındaki ($d/4$) aralıklara sahiptir. Güçlendirme uygulamasında, kirişin üç yüzünü kapsayacak şekilde U tipi sargı konfigürasyonu tercih edilmiş ve özel üretim karbon lif esaslı takviye ipler kullanılmıştır. Uygulanan iplerin nominal çapı 6 mm olup, 8 mm çapındaki deliklerden geçirilerek yerleştirilmiştir. Bu güçlendirme tekniği ile kesme dayanımının artırılması ve olası kırılma mekanizmalarının kontrol altına alınması amaçlanmıştır.

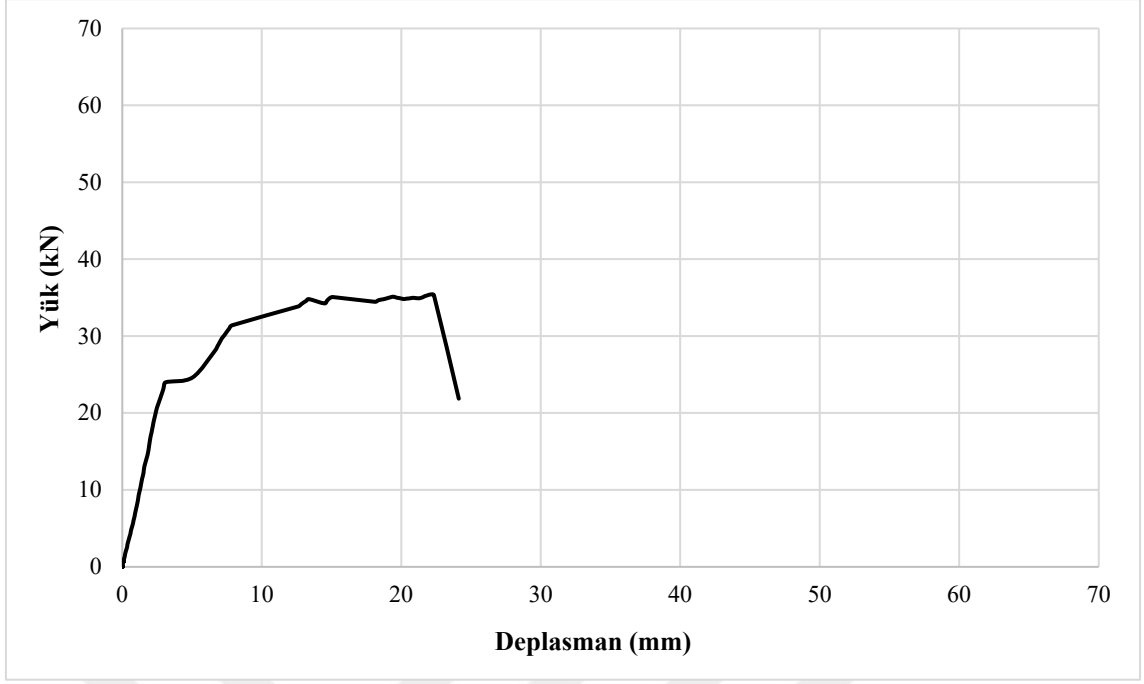
Numune üzerine uygulanan yük 22 kN seviyesine ulaştığında, gözle görülür bir hasar oluşmamış olup bu yükleme anında orta açıklıktaki deplasman 2.73 mm olarak kaydedilmiştir. Yük artışıyla birlikte 31 kN'a ulaşıldığında, kirişin sol ve sağ kesme açıklığında eğik çekme çatlakları meydana gelmiş ve bu esnada deplasman değeri 7.67 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.22). Numune, 35.41 kN maksimum yük ve 22.11 mm

deplasman seviyesine ulaştığında; her iki kesme bölgesinde oluşan eğik çatlakların birleşmesi, kirişin sağ tarafındaki basınç bölgesinde ezilme, sol tarafındaki basınç bölgesinde ise betonun yarılması meydana gelmiştir. Ayrıca, ankraj deliklerinin bulunduğu bölgede oluşan yatay çatlakların ilerleyerek genişlemesiyle birlikte göçme gerçekleşmiştir. Özel üretimli karbon ip kesme bölgesindeki çatlağın genişlemesini engellemiş, böylece en zayıf bölgeden yani ankraj deliklerinin bulunduğu yerden hasar meydana gelmiştir.

Numuneye ait eğik çekme çatlaklarının oluşum aşamaları Şekil 4.22’de, numuneye ait yük-deplasman eğrisi ise Şekil 4.23’te gösterilmektedir. Yük taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra numunede meydana gelen hasar detayları incelenmiş ve Şekil 4.24’te görsel olarak verilmiştir.



Şekil 4.22. U-OCF-4.0-OZ-NE kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları



Şekil 4.23. U-OCF-4.0-OZ-NE kiriş numunesine ait yük-deplasman eğrisi



Şekil 4.24. U-OCF-4.0-OZ-NE kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

4.1.8. U-CF-3.0-16-E numunesi

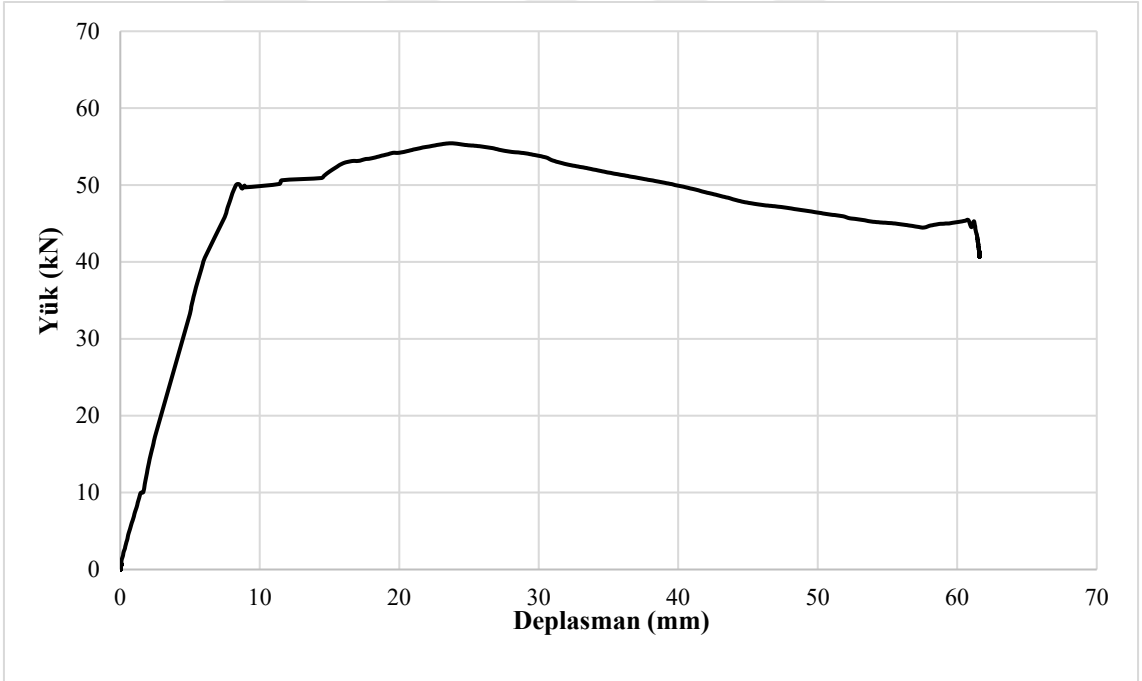
Yedinci güçlendirme yöntemi kapsamında, U-CF-3.0-16-E kodlu kiriş numunesi, kesme kapasitesi yetersiz betonarme kiriş davranışının güçlendirme sonrası daha iyi anlaşılması amacıyla test edilmiştir. Bu numunede, üst yüzeyden 50 mm ve yan yüzeyden 60 mm mesafe bırakılarak, 6 mm çapında delikler matkapla açılmış ve delikler, kesitin faydalı yüksekliğinin üçte biri oranında ($d/3$) aralıklara sahiptir. Güçlendirme uygulaması sırasında, kirişin üç yüzeyini saran U tipi konfigürasyonda FRP demeti/ipi kullanılmış ve toplam 16 kat demet/ip sarılarak güçlendirme gerçekleştirilmiştir. Bu numuneyi önceki benzerlerinden ayıran temel fark, lifli polimer sisteminin epoksi ile birlikte uygulanmış olmasıdır. Bu sayede fiber malzeme ile beton arasında tam yapışma (tam kompozit davranış) sağlanmış ve sistemin yük taşıma kapasitesi, rijitlik ve sürekliliğe olan katkısı deneysel olarak değerlendirilmiştir.

Numune üzerine uygulanan yük 31 kN seviyesine ulaştığında, gözle görülür bir hasar oluşmamış olup bu yükleme anında orta açıklıktaki deplasman 4.63 mm olarak kaydedilmiştir. Yük artışıyla birlikte 42 kN seviyesinde, kirişin sağ ve sol kesme açıklığında eğik çekme çatlakları, orta açıklığında ise eğilme kaynaklı çatlaklar meydana gelmiş; bu sırada orta açıklıktaki deplasman değeri 6.44 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.25). Şekil 4.26 incelendiğinde, bu aşamaya kadar yapılan güçlendirme yöntemleri içerisinde en fazla yük taşıma kapasitesine ulaşıldığı görülmektedir. Bu durum FRP demetin/ipin, epoksinin ve betonun kompozit tek bir malzeme gibi davranması ve yüklemenin ilk anından itibaren beraber yük taşımasından kaynaklanmaktadır. Numune 55.44 kN maksimum yük ve 23.70 mm deplasman değerine ulaştığında, her iki kesme bölgesinde oluşan çatlakların basınç bölgesine ulaşması ve mevcut çatlakların genişlemesi sonucu göçme oluşmuştur.

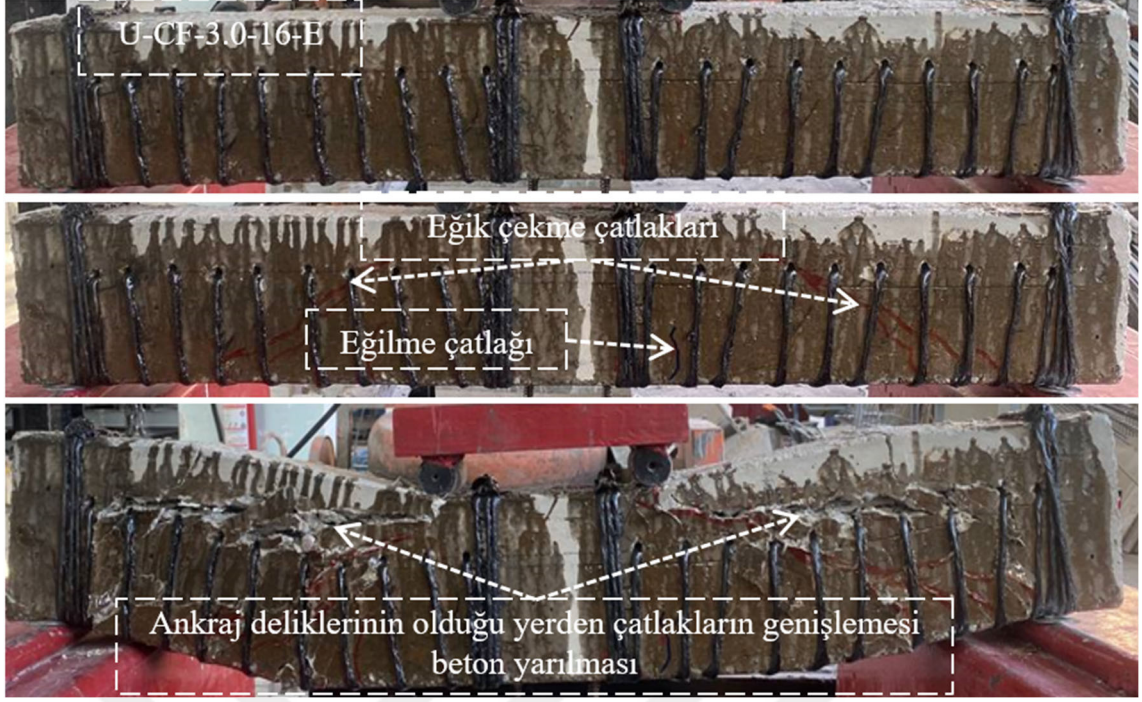
Numuneye ait eğik çekme çatlaklarının oluşum aşamaları Şekil 4.25'te, numuneye ait yük-deplasman eğrisi ise Şekil 4.26'da gösterilmektedir. Yük taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra numunede meydana gelen hasar detayları incelenmiş ve Şekil 4.27'de görsel olarak verilmiştir.



Şekil 4.25 U-CF-3.0-16-E kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları



Şekil 4.26. U-CF-3.0-16-E kiriş numunesine ait yük-deplasman eğrisi



Şekil 4.27. U-CF-3.0-16-E kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

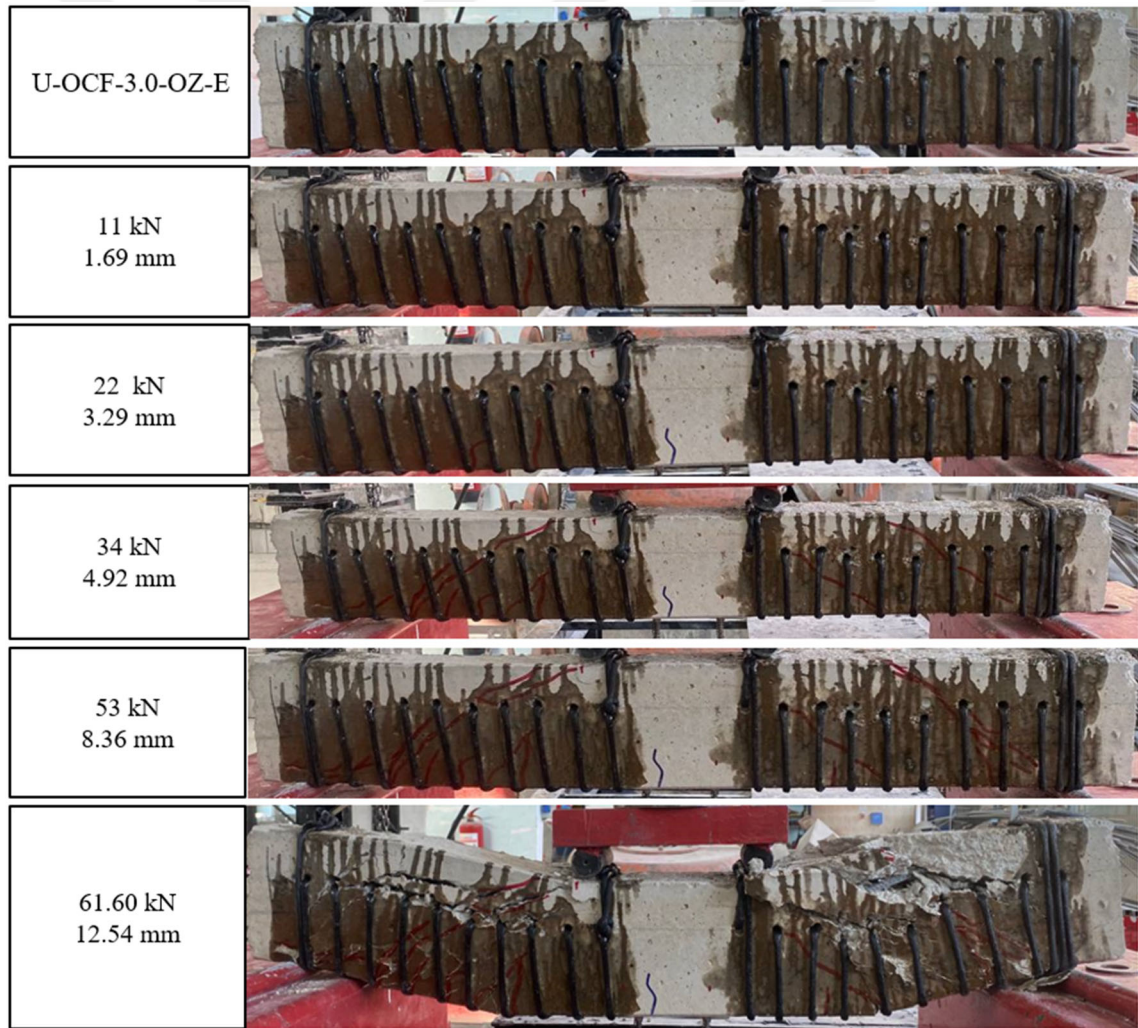
4.1.9. U-OCF-3.0-OZ-E numunesi

Çalışma kapsamında sekizinci ve epoksi ile uygulanan ikinci güçlendirme yöntemi olarak, U-OCF-3.0-OZ-E kodlu kiriş numunesi üzerinde deneysel test gerçekleştirilmiştir. Bu numunede, kirişin üst yüzeyinden 50 mm ve yan yüzeyinden 60 mm mesafe bırakılarak, 8 mm çapında delikler matkapla açılmış ve bu delikler, kesitin faydalı yüksekliğinin üçte biri oranında ($d/3$) aralıklara sahiptir. Güçlendirme uygulaması sırasında, kirişin üç yüzünü saran U tipi konfigürasyonda, özel üretim lifli polimer esaslı takviye ipleri kullanılmış ve epoksi ile aderansı sağlanarak yapısal bir sargı oluşturulmuştur.

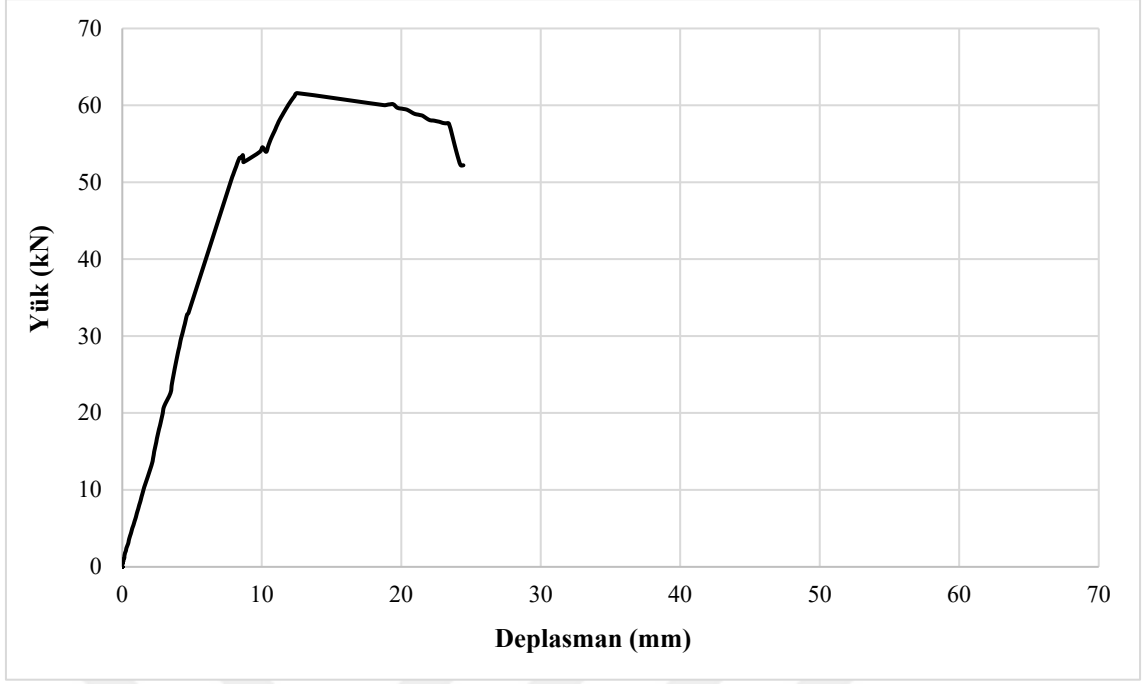
Numune üzerine uygulanan yük 11 kN seviyesine ulaştığında, kirişin sol kesme açıklığında ilk eğik çekme çatlakları oluşmuş olup bu yükleme anında orta açıklıktaki deplasman 1.69 mm olarak kaydedilmiştir. Yük artışıyla birlikte 22 kN seviyesinde, kirişin sol kesme açıklığında eğik çekme çatlakları artmış ve bu esnada orta bölgede düşey deplasman değeri 3.29 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.28). Ayrıca bu yük seviyesinde kiriş orta bölgesinde eğilme çatlakları da gözlenmiştir. Yük artışıyla birlikte 34 kN seviyesinde, kirişin sol ve sağ kesme açıklığında eğik çekme çatlakları artmaya devam etmiş çatlaklar basınç bölgesine doğru uzamış ve bu esnada düşey deplasman değeri 4.92 mm olarak ölçülmüştür. Yüklemin 53 kN ve 8.36 mm deplasmana ulaşmasıyla, kirişin

sağ ve sol kesme açıklığında meydana gelen eğik çekme çatlakları basınç bölgesine ilerlemeye devam etmiş ve belirgin şekilde genişleme gözlenmiştir. Nihayet numune 61.60 kN maksimum yük ve 12.54 mm düşey deplasman seviyesine ulaştığında; her iki kesme bölgesindeki çatlakların kirişin basınç bölgesine ulaşması ile kirişin sağ ve sol basınç bölgesinde ezilme oluşması, ankraj deliklerinin bulunduğu bölgede yatay çatlakların genişlemesi ve betonun yer yer yarılması sonucunda göçme meydana gelmiştir.

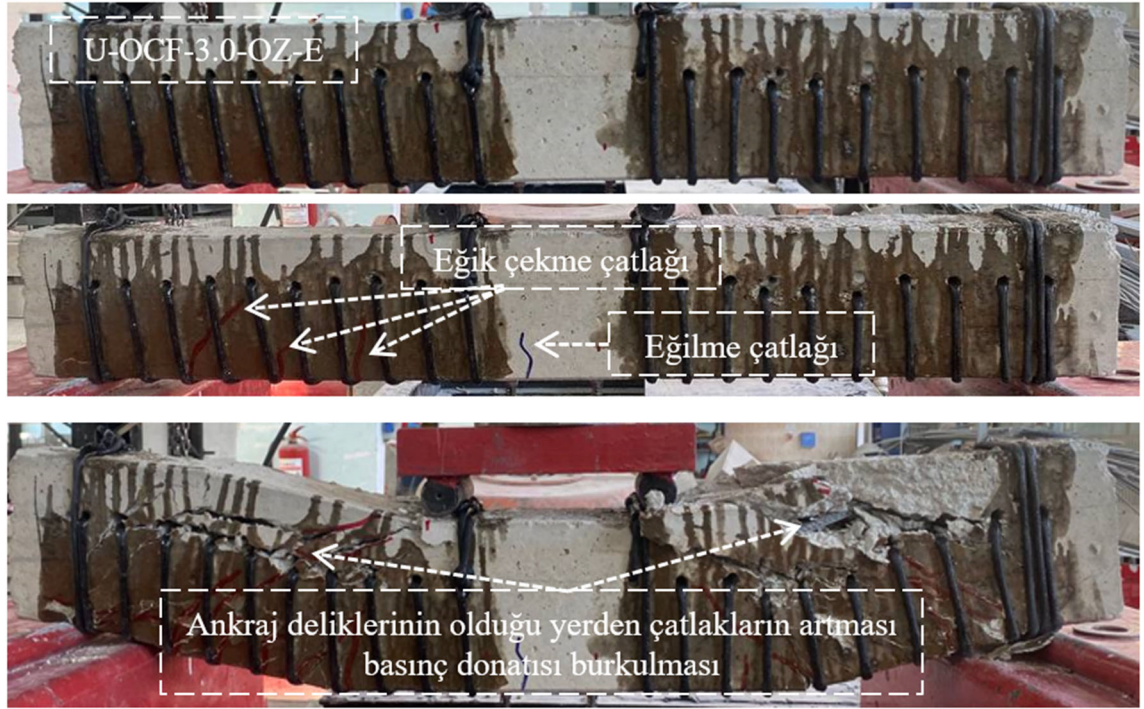
Numuneye ait eğik çekme çatlaklarının oluşum aşamaları Şekil 4.28’de, numuneye ait düşey yük- düşey deplasman eğrisi ise Şekil 4.29’da sunulmuştur. Yük taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra numunede meydana gelen hasar detayları incelenmiş ve Şekil 4.30’da gösterilmiştir.



Şekil 4.28. U-OCF-3.0-OZ-E kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları.



Şekil 4.29. U-OCF-3.0-OZ-E kiriş numunesine ait yük-deplasman eğrisi



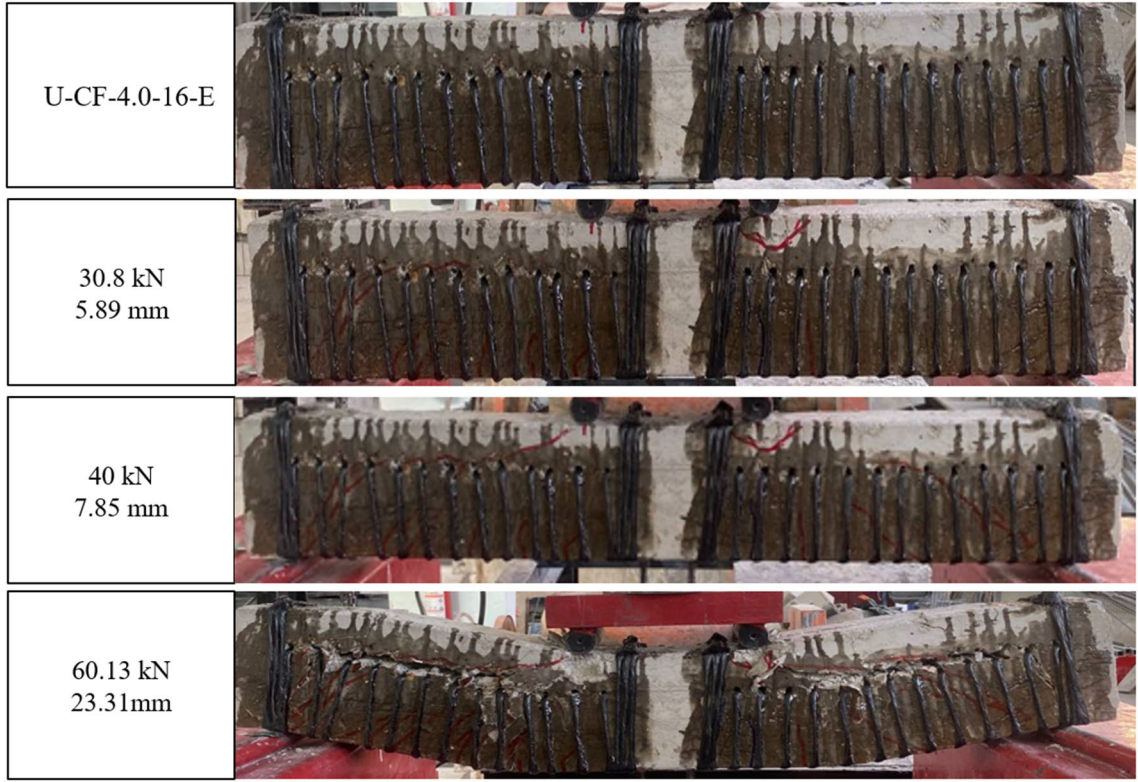
Şekil 4.30. U-OCF-3.0-OZ-E kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

4.1.10. U-CF-4.0-16-E numunesi

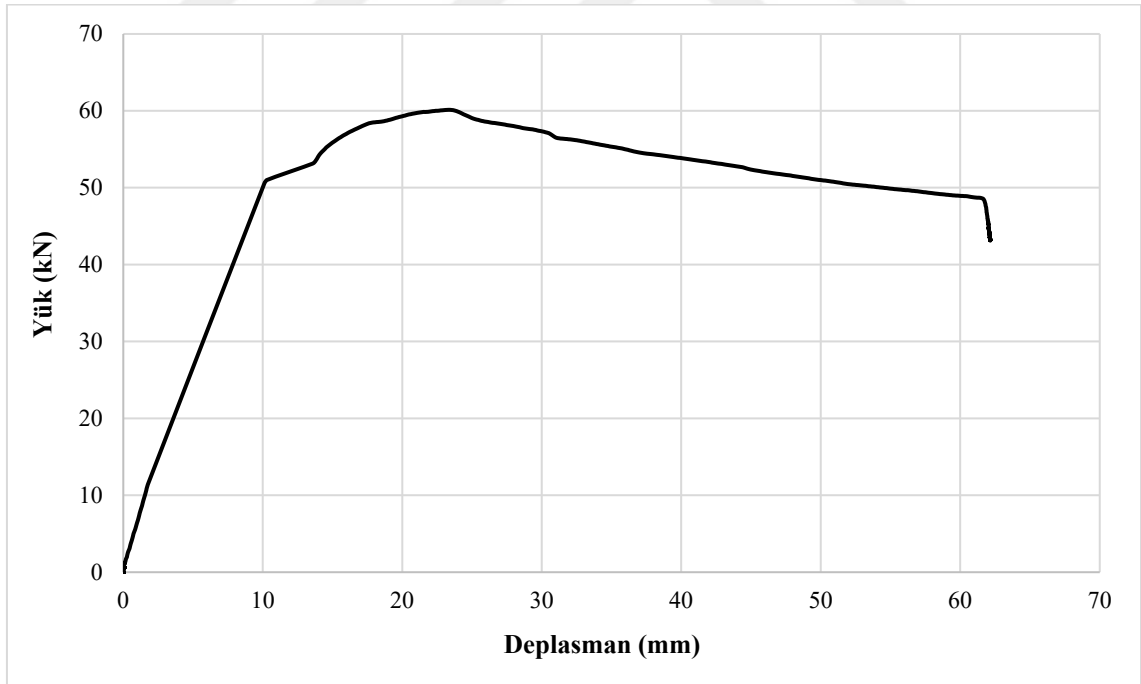
Çalışma kapsamında dokuzuncu ve epoksi ile uygulanan üçüncü güçlendirme yöntemi olarak, U-CF-4.0-16-E kodlu kiriş numunesi test edilmiştir. Bu numunede, üst yüzeyden 50 mm ve yan yüzeylerden 60 mm mesafe bırakılarak, 6 mm çapında delikler matkapla açılmış ve bu delikler, kesitin faydalı yüksekliğinin dörtte biri oranında ($d/4$) aralıklarla kiriş yüzeyine yerleştirilmiştir. Güçlendirme uygulamasında, kirişin üç yüzünü saran U tipi sargı konfigürasyonu kullanılmış; 16 kat FRP demet/ip ile sarım yapılmış ve iplerin yüzeyine epoksi uygulanarak beton ve lifli polimerin bütünleşik (kompozit) çalışması sağlanmıştır. Kiriş numunesi, bu kompozit takviye sistemiyle güçlendirilmiş haliyle teste tabi tutulmuştur.

Numune üzerine uygulanan yük 21 kN seviyesine ve deplasman 3.81mm değerine ulaştığında, yükleme noktasında ilk çatlak oluşmuştur. Yük artışıyla birlikte 30.80 kN seviyesinde, kirişin hem sol hem de sağ kesme açıklıklarında eğik çekme çatlakları meydana gelmiş; bu esnada orta açıklıktaki deplasman 5.89 mm olarak kaydedilmiştir. Düşey yüklemenin devamında, 40 kN'a ulaşıldığında, sağ ve sol kesme açıklığında eğik çekme çatlaklarının ilerlediği ve bu anda orta açıklıkta oluşan deplasmanın 7.85 mm olduğu ölçülmüştür (Şekil 4.31). Numune, 60.13 kN seviyesinde maksimum yüke ve 23.31 mm düşey deplasman değerine ulaştığında, her iki kesme bölgesinde oluşan eğik çatlakların kirişin basınç bölgesine ulaştığı, mevcut çatlak genişliklerinin arttığı ve özellikle ankraj deliklerinin birbirine yakın olmasından dolayı deliklerin bulunduğu bölgede yatay çatlakların belirgin şekilde ilerleyip genişlediği gözlemlenmiştir. Bu gelişmelerin sonucunda numune göçmüştür.

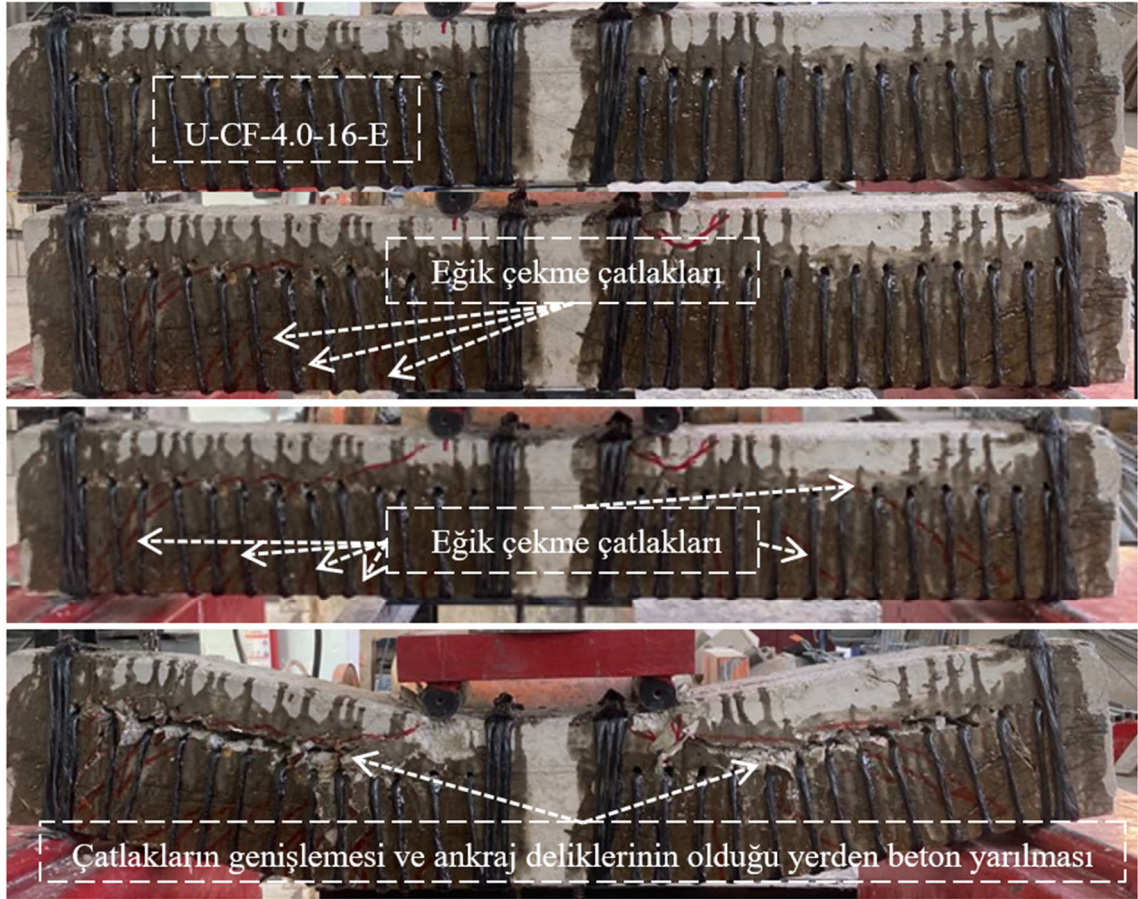
Bu numuneye ait eğik çekme çatlaklarının oluşum süreci Şekil 4.31'de sunulurken, deneye ait yük–deplasman eğrisi Şekil 4.32'de grafiksel olarak verilmiştir. Numunenin taşıma kapasitesine ulaştıktan sonraki hasar durumu detaylı şekilde incelenmiş ve oluşan hasar bölgeleri Şekil 4.33'te gösterilmiştir.



Şekil 4.31. U-CF-4.0-16-E kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları



Şekil 4.32. U-CF-4.0-16-E kiriş numunesine ait yük-deplasman eğrisi



Şekil 4.33. U-CF-4.0-16-E kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detayları

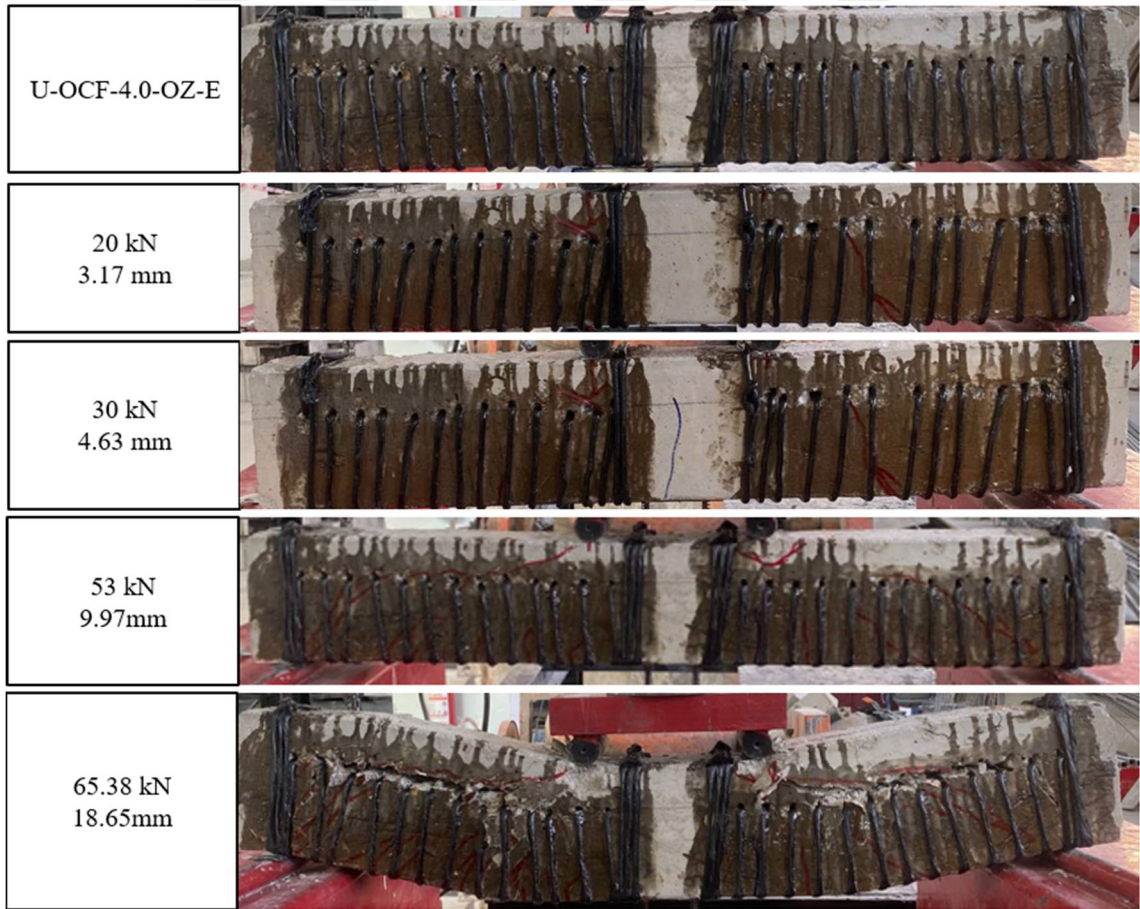
4.1.11. U-OCF-4.0-OZ-E numunesi

Çalışma kapsamında onuncu ve epoksi ile uygulanan dördüncü güçlendirme yöntemi olarak, U-OCF-4.0-OZ-E kodlu kiriş numunesi, aynı zamanda son deney numunesi olarak test edilmiştir. Bu numunede, üst yüzeyden 50 mm ve yan yüzeylerden 60 mm mesafe bırakılarak, 8 mm çapında delikler matkap yardımıyla açılmış ve bu delikler, kesitin faydalı yüksekliğinin dörtte biri oranında ($d/4$) aralıklarla yerleştirilmiştir. Güçlendirme uygulamasında, kirişin üç yüzünü saran U tipi konfigürasyonda özel üretim FRP ip kullanılmış, ardından yüzeye epoksi uygulanarak beton ile takviye malzemesi arasında aderans sağlanmış ve numune bu kompozit sistemle test edilmiştir.

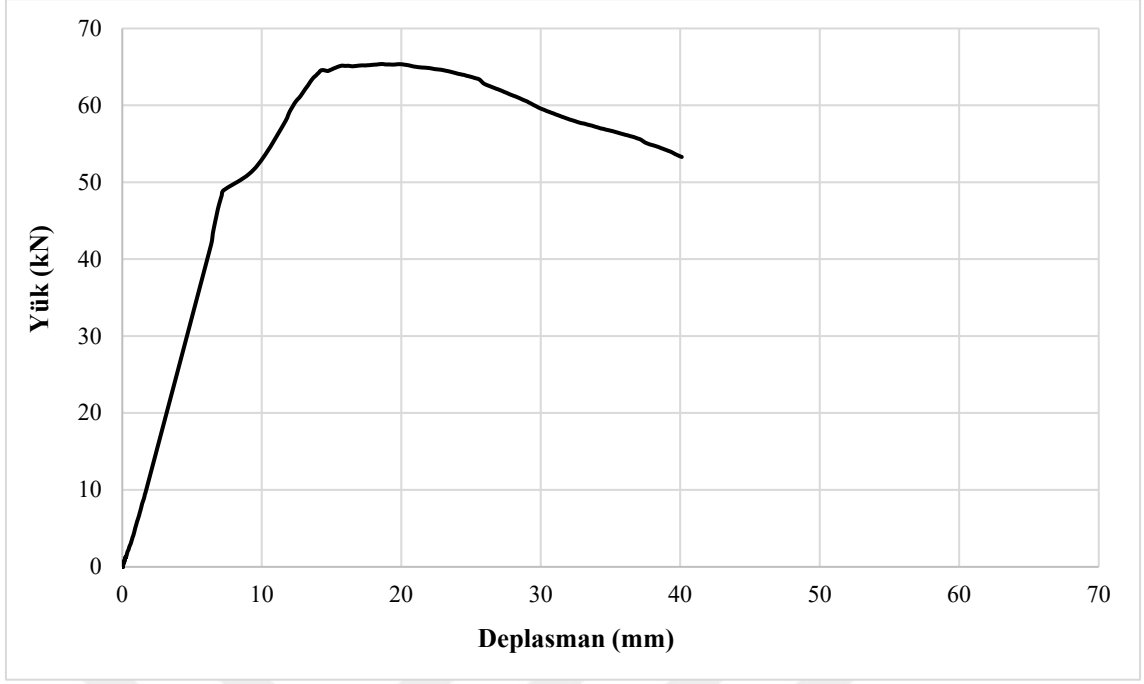
Numune üzerine uygulanan yük 12.13 kN seviyesine ulaştığında, yapıda gözle görülür bir hasar meydana gelmemiş; bu yükleme anında orta açıklıktaki deplasman 2.02 mm olarak kaydedilmiştir. Yük artışıyla birlikte, 20 kN seviyesinde kirişin sağ kesme açıklığında eğik çekme çatlakları ve yükleme noktasında bir çatlak oluşmuş; bu sırada

deplasman değeri 3.17 mm olarak ölçülmüştür. Uygulanan yük 30 kN seviyesine ulaştığında çatlaklarda herhangi bir genişleme gözlemlenmemiş, ancak bu aşamada ilk eğilme çatlakları kirişin orta açıklığında meydana gelmiş ve bu anda orta açıklıktaki deplasman 4.63 mm olarak kaydedilmiştir. Yüklemenin 53.00 kN seviyesine ulaşmasıyla birlikte, kirişin sağ ve sol kesme açıklığında eğik çekme çatlaklarının oluştuğu gözlemlenmiş ve bu sırada deplasman değeri 9.97 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.34). Numune, 65.38 kN maksimum yük ve 18.65 mm deplasman seviyesine ulaştığında, her iki kesme bölgesindeki çatlakların kirişin basınç bölgesine ulaştığı, mevcut çatlakların belirgin şekilde genişlemesi ve ankraj deliklerinin bulunduğu bölgede gelişen yatay çatlakların ilerlemesi sonucunda sünek bir davranış sergileyerek göçme meydana gelmiştir. Bu numunede, yük taşıma kapasitesi, rijitlik ve süneklikte artış gözlemlenmiş, göçme öncesi deformasyon kapasitesinin yükseldiği değerlendirilmiştir.

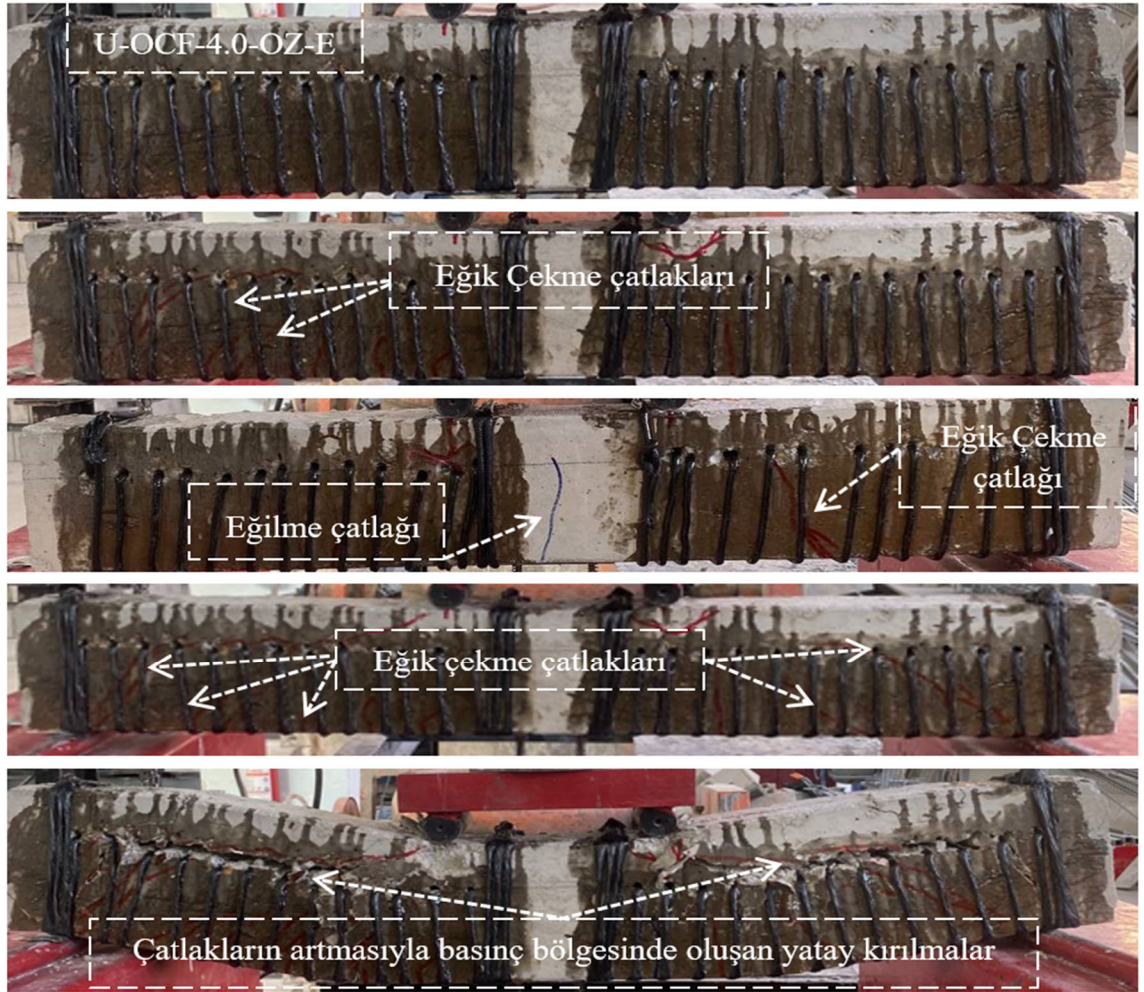
Numuneye ait eğik çekme çatlaklarının oluşum süreci Şekil 4.34'te, yük–deplasman eğrisi ise Şekil 4.35'te sunulmuştur. Taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra meydana gelen hasar görünüşleri ise Şekil 4.36'da verilmiştir.



Şekil 4.34. U-OCF-4.0-OZ-E kiriş numunesine ait çatlak oluşum aşamaları



Şekil 4.35. U-OCF-4.0-OZ-E kiriş numunesine ait yük-deplasman eğrisi



Şekil 4.36. (U-OCF-4.0-OZ-E) kiriş numunesine ait göçme sonrası hasar detaylar

4.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Bu bölümde, toplam on iki adet numuneye ait deneysel veriler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Karşılaştırmalar; maksimum yük taşıma kapasitesi, rijitlik değerleri, enerji tüketimleri, süneklik düzeyleri ve göçme davranışları açısından gerçekleştirilmiştir. Süneklik açısından grafikler ve çizelgeler incelendiğinde referans numunelerde süneklik gözlenmemekle birlikte diğer numunelerle karşılaştırma yapabilmek amacıyla süneklik oranları çizelgede verilmiştir. Yapılan deneylerin sonucunda elde edilen sonuçlar özetlenerek tablo halinde sırasıyla Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te sunulmuştur. Bu tablodaki simgeler sırasıyla δ_y ; akma noktası olarak ifade edilen $0.85P_{max}$ yük seviyesindeki deplasman değerini (mm), δ_{max} ; maksimum yük (P_{max}) seviyesindeki deplasman değerini (mm), δ_u ; kopma noktası olarak ifade edilen $0.85P_{max}$ yük seviyesindeki deplasman değerini (mm), P_{max} ; maksimum yük değerini (kN) temsil etmektedir. Ayrıca, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38'de tüm deney kirişlerinin karşılaştırmalı göçme durumları ve Şekil 4.39'da ise tüm deney kirişlerinin karşılaştırmalı yük-deplasman eğrileri gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Düşey yükleme testi sonrası numunelerin taşıdığı yük, deplasman ve rijitlik değerleri

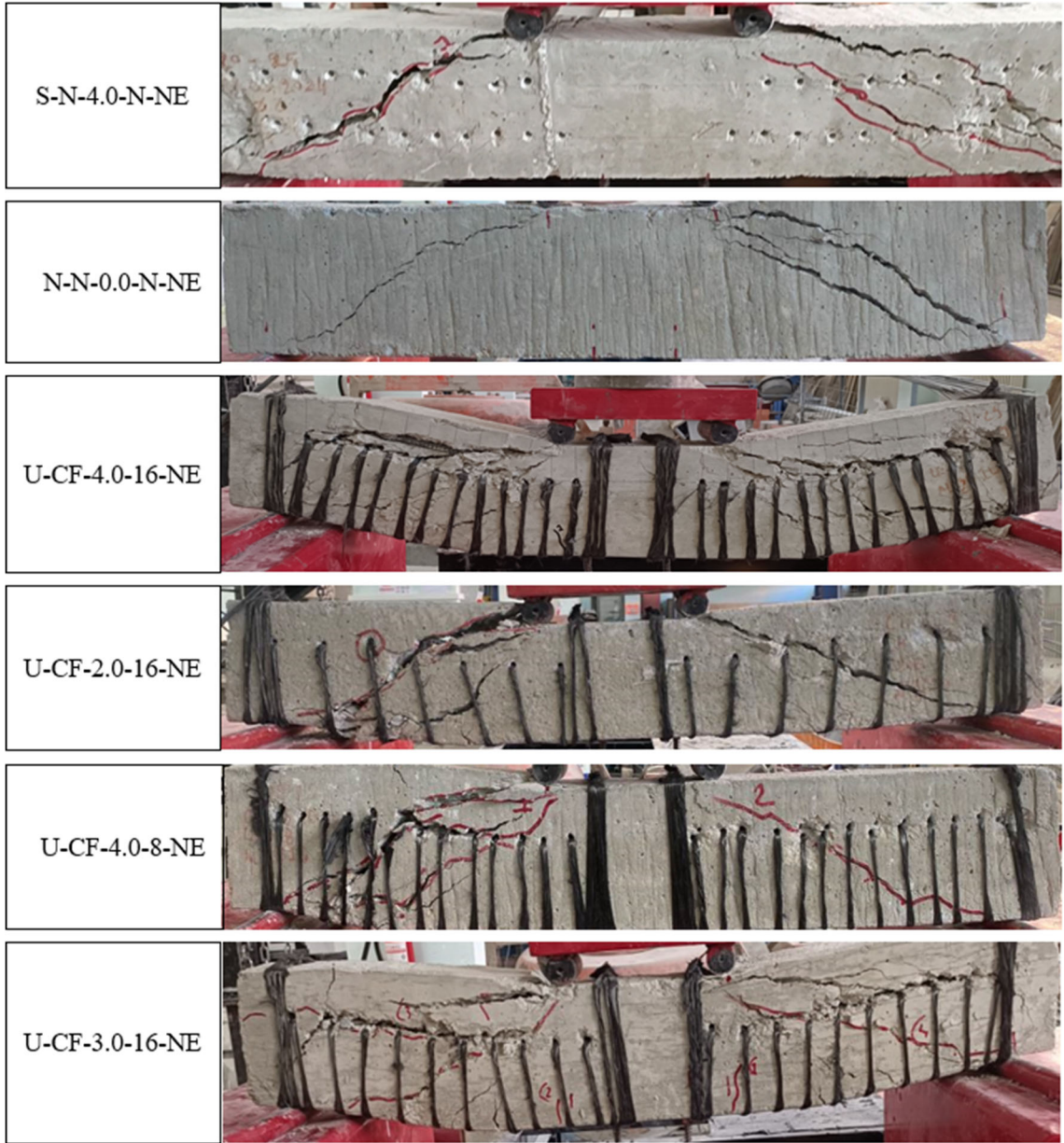
Numune İsmi	P_{max} (kN)	Nihai deplasman (mm)	$0.85*P_{max}$ (kN)	P_{max} deplasman (mm)	P_{maks} rijitlik (kN/mm)	Akma rijitlik (kN/mm)
S-N-0-0-N-NE	27.75	9.37	23.59	7.53668	3.682	6.257
N-N-0-0-N-NE	34.02	8.01	28.92	4.922	6.912	7.630
U-CF-4.0-16-NE	42.19	39.40	35.87	27.6826	1.524	4.048
U-CF-2.0-16-NE	35.72	25.66	30.36	19.2253	1.858	2.880
U-CF-4.0-8-NE	44.82	15.13	38.10	13.118	3.417	4.440
U-CF-3.0-16-NE	41.87	46.16	35.59	23.0758	1.814	3.370
U-OCF-3.0-OZ-NE	40.34	42.37	34.29	19.3915	2.080	3.719
U-OCF-4.0-OZ-NE	35.42	24.12	30.10	22.1056	1.602	4.107
U-CF-3.0-16-E	55.44	61.56	47.12	23.7021	2.339	6.073
U-OCF-3.0-OZ-E	61.60	24.45	52.36	12.5388	4.912	6.354
U-CF-4.0-16-E	60.13	62.15	51.11	23.3092	2.580	4.972
U-OCF-4.0-OZ-E	65.38	40.11	55.57	18.6547	3.505	5.422

Çizelge 4.2. Düşey yükleme testi sonrası numunelerin taşıdığı enerji kapasiteleri

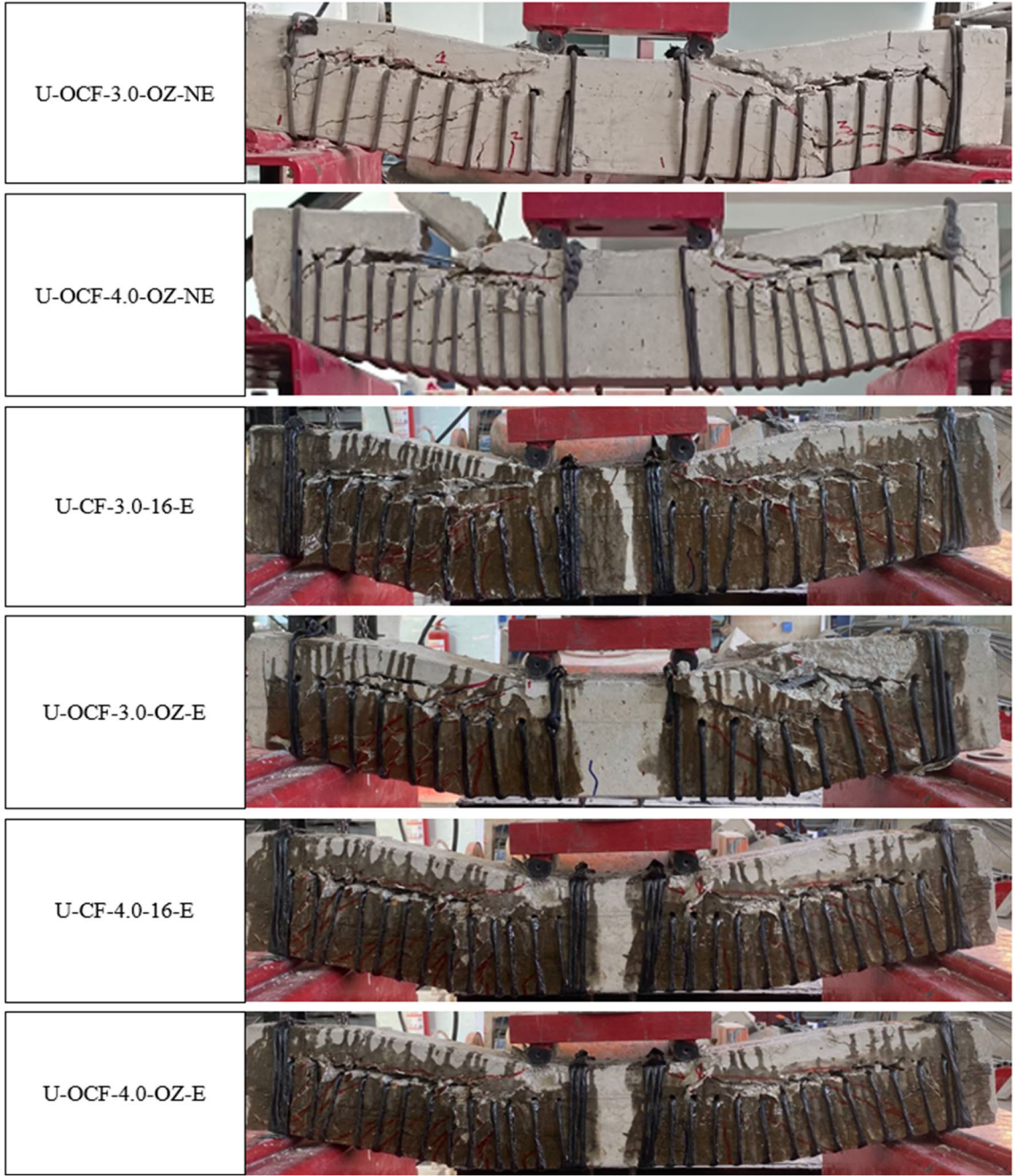
Numune İsmi	Toplam enerji tüketimi (kJ)	P_{max} enerji tüketimi (kJ)	$0.85P_{max}$ (akma) anında enerji tüketimi (kJ)	Plastik Enerji tüketimi (kJ)
S-N-0-0-N-NE	0.201	0.154	0.056	0.144
N-N-0-0-N-NE	0.091	0.104	0.069	0.022
U-CF-4.0-16-NE	0.692	0.010	0.006	0.686
U-CF-2.0-16-NE	0.758	0.542	0.248	0.510
U-CF-4.0-8-NE	0.254	0.010	0.006	0.248
U-CF-3.0-16-NE	1.658	0.766	0.266	1.392
U-OCF-3.0-OZ-NE	1.489	0.624	0.236	1.253
U-OCF-4.0-OZ-NE	0.709	0.650	0.148	0.561
U-CF-3.0-16-E	2.897	1.033	0.199	2.698
U-OCF-3.0-OZ-E	1.176	0.467	0.227	0.949
U-CF-4.0-16-E	3.087	1.015	0.278	2.810
U-OCF-4.0-OZ-E	2.138	0.847	0.323	1.816

Çizelge 4.3. Düşey yükleme testi sonrası numunelerin akma ve kopma deplasman değerleri

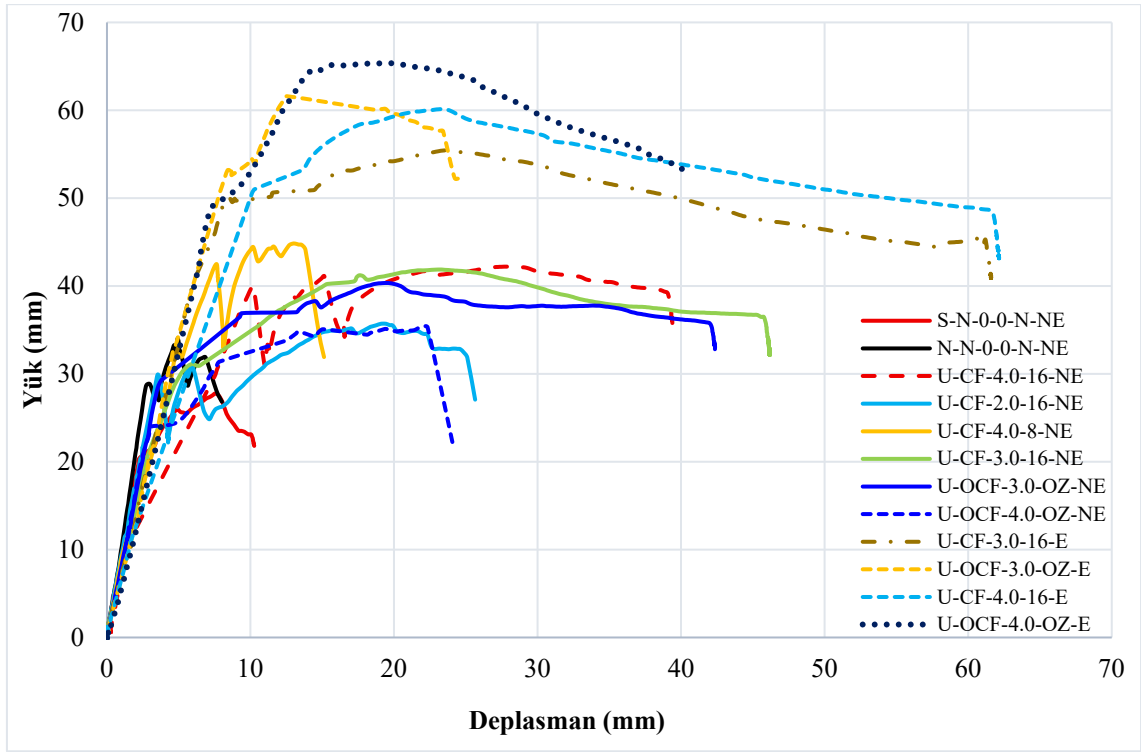
Numune İsmi	δ_y (mm)	δ_u (mm)	Süneklik oranı (mm/mm)
S-N-0-0-N-NE	3.77	9.14	2.42
N-N-0-0-N-NE	3.79	5.60	1.48
U-CF-4.0-16-NE	8.86	33.39	3.77
U-CF-2.0-16-NE	10.54	25.10	2.38
U-CF-4.0-8-NE	8.58	14.79	1.72
U-CF-3.0-16-NE	10.56	45.92	4.35
U-OCF-3.0-OZ-NE	9.22	42.26	4.58
U-OCF-4.0-OZ-NE	7.33	22.34	3.05
U-CF-3.0-16-E	7.76	47.38	6.11
U-OCF-3.0-OZ-E	8.24	24.24	2.94
U-CF-4.0-16-E	10.28	49.38	4.80
U-OCF-4.0-OZ-E	10.25	37.17	3.63



Şekil 4.37. Deney kirişlerinin karşılaştırmalı göçme durumları



Şekil 4.38. Deney kirişlerinin karşılaştırmalı göçme durumları (Devamı)



Şekil 4.39. Referans ve güçlendirilmiş bazı numunelerin karşılaştırılması

Çizelge 4.1 incelendiğinde, standart karbon fiber demet/ip (CF) ve özel üretilmiş karbon fiber ip (OCF) malzemelerinin epoksi reçine ile birlikte güçlendirme amacıyla uygulanmasının, betonarme kesme kirişlerinin maksimum yük taşıma kapasitelerinde önemli artışlar sağladığı gözlemlenmiştir. S-N-4.0-N-NE ve N-N-0.0-N-NE delikli ve deliksiz referans numunelerinde maksimum yük taşıma kapasitesi sırasıyla 27.75kN ve 34.02kN'dir. Güçlendirme işlemi sonrasında elde edilen yük taşıma kapasitesi, en düşük 35.42 kN (U-OCF-4.0-OZ-NE) ve en yüksek 65.38 kN (U-OCF-4.0-OZ-E) olmak üzere önemli ölçüde artış göstermiştir. Özellikle epoksi ile birlikte kullanılan 6mm çapındaki OCF iplerin uygulandığı U-OCF-4.0-OZ-E numunesi delikli referans numuneye göre %136 ve deliksiz referans numuneye göre ise %92 oranında maksimum yük taşıma kapasitesi artışıyla en yüksek performansı göstermiştir. Epoksili güçlendirme uygulamalarında CF demet/ipin uygulandığı U-CF-4.0-16-E numunesi delikli referans numuneye göre %117 ve deliksiz referans numuneye göre ise %77 oranında yük taşıma kapasitesi artışı sağlamıştır. Ayrıca epoksi reçine olmadan yapılan güçlendirmeler neticesinde maksimum yük taşıma kapasitesi (U-CF-4.0-8-NE) delikli referans numuneye göre %61.5 ve deliksiz referans numuneye göre ise %32 oranında artış göstermiştir. Elde edilen bulgular, epoksi reçine kullanılarak yapılan güçlendirme uygulamalarında, OCF ipliklerin hem uygulama kolaylığı hem de yük taşıma

kapasitesinde sağladığı artış açısından diğer kullanılan konfigürasyonlara (CF ile yapılan) kıyasla daha üstün bir performans sergilediğini açıkça ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.1'deki maksimum yükteki rijitlik (P_{max}/δ_{max}) değerleri incelendiğinde, delikli ve deliksiz referans numuneler sırasıyla 3.682 kN/mm 6.912kN/mm değerlerinde rijitlik sergilerken, CF demet/ip ve OCF ip ile güçlendirilmiş numunelerde rijitlikte değişkenlikler gözlenmiştir. Örneğin, U-OCF-3.0-OZ-E numunesinin maksimum yük anındaki rijitliği 4.912 kN/mm olup, bu değer delikli referans numunesi ile kıyaslandığında %33.4 oranında bir artış ve deliksiz referans numunesi ile kıyaslandığında ise %29 oranında bir azalış göstermiştir. Diğer yandan, U-OCF-3.0-OZ-NE numunesinde hesaplanan rijitlik 2.080 kN/mm olup, bu değer referans numunelere göre sırasıyla %43.5 ve %70 oranlarında azalma göstermektedir. Epoksi reçine uygulanan standart karbon fiber demet/ip ile güçlendirilen U-CF-4.0-16-E numunesinin rijitliği 2.580kN/mm olup, bu değer referans numunelere göre sırasıyla %30 ve %63 oranında azalış göstermektedir. Ancak epoksi reçine uygulanmayan U-CF-4.0-16-NE numunesinde elde edilen rijitlik 1.524kN/mm olup, bu değer referans numunelere göre sırasıyla %59 ve %78 oranlarında azalma göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, epoksi reçine ile yapılan güçlendirme uygulamalarının, numunelerdeki rijitlik kaybını azaltmada önemli katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

Deneyisel çalışmada test edilen on iki adet kesme etkili kiriş numunesine ait enerji tüketim kapasitesi, düşey yükleme altındaki yapısal performanslarının değerlendirilmesinde temel parametrelerden biri olarak ele alınmıştır. Enerji tüketimi değerleri, toplam enerji tüketimi, plastik enerji tüketimi, maksimum yük altındaki enerji tüketimi (P_{max}), ve akma anı olarak kabul edilen $0.85P_{max}$ seviyesindeki enerji tüketimi olarak dikkate alınmıştır. Bu kapsamda hem CF hem de OCF ipleri ile güçlendirilmiş numuneler referans kirişlerle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Toplam enerji tüketimi, yük deplasman eğrisinin altında kalan toplam alanı belirtmektedir. Diğer bir ifade ile kirişin yükleme boyunca tükettiği toplam enerjiyi ifade eder ve numunelerin süneklik kapasitesinin bir göstergesidir. Referans olarak belirlenen S-N-4.0-N-NE (delikli) ve N-N-0.0-N-NE (deliksiz) numuneleri, sırasıyla 0,201 kJ ve 0,091 kJ toplam enerji tüketimine ulaşmıştır. Güçlendirilmiş numunelerle kıyaslandığında bu değerlerin oldukça düşük olduğu anlaşılmaktadır. Güçlendirilen numuneler incelendiğinde, en yüksek toplam enerji tüketimi U-CF-4.0-16-E numunesinde gözlemlenmiştir (3.087 kJ), bu değer delikli referans numunesine göre yaklaşık 34 kat (N-N-0.0-N-NE), deliksiz referans numunesine göre ise 15 kat (S-N-4.0-N-NE) daha yüksek olduğu görülmektedir.

Ardından en yüksek enerji tüketimi, sırasıyla U-CF-3.0-16-E (2,897 kJ) ve U-OCF-4.0-OZ-E (2,138 kJ) numunelerinde gözlenmiştir. Bu durum hem CF hem de OCF tipi iplerin epoksi ile birlikte kullanıldığında, toplam enerji tüketimi açısından referans numunelere göre çarpıcı düzeyde bir artış sağladığını ortaya koymaktadır. Epoksi reçinenin uygulanmadığı grupta ise en başarılı numune U-CF-3.0-16-NE olup 1.658 kJ ile epoksi kullanılmayan örnekler arasında en yüksek enerji tüketimine sahiptir. Bu durum, demet/ip oranı ve sarım sıklığının, epoksi kullanılmasa dahi toplam enerji tüketimi üzerinde tek başına belirleyici bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Plastik enerji tüketimi, akma rijitliği sonrası kirişin deformasyon altında ne kadar enerji tüketebildiğini gösteren kritik bir parametredir. Delikli ve deliksiz referans numunelerin plastik enerji tüketimi sırasıyla 0.144 kJ (S-N-4.0-N-NE) ve 0.022 kJ (N-N-0.0-N-NE) gibi oldukça sınırlıdır. Yani, özellikle göçme sonrası yük taşıma kapasitesinin neredeyse tükendiğini ifade eden bir durumdur. Güçlendirilmiş numuneler arasında en yüksek plastik enerji tüketimi, yine U-CF-4.0-16-E (2.810 kJ) ve U-CF-3.0-16-E (2.698 kJ) numunelerinde olduğu görülmektedir. Bu numuneler, epoksi katkısının plastik deformasyon kapasitesini de anlamlı biçimde artırdığını göstermektedir. Özel üretim ip kullanılan U-OCF-4.0-OZ-E numunesi de 1.816 kJ plastik enerji tüketimi ile yüksek performans sergilemiştir. Ancak deneysel veriler, kirişe uygulanan düşey yükün artmasıyla birlikte, CF demet/ip ile güçlendirilmiş numunelerin plastik enerji tüketim kapasitelerinin, OCF iplerle güçlendirilmiş numunelere kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durumun, CF demetin/ipin çok katmanlı (8 kat ve 16 kat) yapısının ve bu katmanların epoksi reçine ile birleştirilmiş olmasının bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Deney sırasında artan yük etkisiyle, CF demet/ip içindeki lifler birbirinden bağımsız şekilde kırılmalar yaşamış ve bu da daha fazla enerji tüketimine yol açmıştır. Buna karşılık, OCF ipler özel üretim olup, sürekli sargılı liflerin homojen bir yapıda bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu yapı, deney boyunca liflerin kopmadan bütünlüğünü korumasını sağlamış ve kırılma enerjisinin sınırlı kalmasına neden olmuştur. Epoksi içermeyen gruplarda en dikkat çekici sonuç U-CF-3.0-16-NE (1.392 kJ) ve U-OCF-3.0-OZ-NE (1.253 kJ) numunelerinde gözlemlenmiştir. Bu değerler, epoksi kullanılmasa dahi uygun sarım oranı ve ip miktarının etkili plastik enerji tüketimi sağladığını kanıtlamaktadır. Bu bulgular, epoksi içeren numunelerde olduğu gibi CF demet/ip ile güçlendirilmiş numunelerin, OCF iplerle güçlendirilmiş numunelere kıyasla daha yüksek plastik enerji tüketme kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır. CF demetin/ipin çok katmanlı ve ayrışabilir lif yapısı nedeniyle, yükleme

sırasında oluşan lif kırılmaları, enerjinin daha geniş bir deformasyon aralığında tüketilmesine imkân tanımış; bu da plastik enerji tüketiminin artmasına katkı sağlamıştır.

Maksimum yük taşıma kapasitesinde (P_{max}) numunenin ulaştığı andaki enerji tüketimi incelendiğinde, delikli referans numunesinde 0.154 kJ (S-N-4.0-N-NE) ve deliksiz referans numunesinde ise 0.104 kJ (N-N-0.0-N-NE) olarak hesaplanmıştır. Güçlendirilmiş numuneler arasında en yüksek P_{max} enerji tüketimi epoksi içeren U-CF-3.0-16-E (1.033 kJ) ve U-CF-4.0-16-E (1.015 kJ) numunelerinde elde edilmiştir. Bu sonuç, epoksi reçine ile yapılan güçlendirmelerde CF demet/ip ile hem yüksek dayanım hem de yüksek enerji tüketiminin birlikte sağlanabildiğini göstermektedir.

Numunelerin $0.85P_{max}$ değerine karşılık gelen akma enerji tüketim kapasiteleri incelendiğinde, delikli referans numunesinde 0.056 kJ (S-N-4.0-N-NE) ve deliksiz referans numunesinde 0.069 kJ (N-N-0.0-N-NE) olan bu değer, güçlendirilmiş numunelerde en fazla 0.323 kJ ile U-OCF-4.0-OZ-E numunesinde gözlenmiştir. Bu da, delikli ve deliksiz referans numunelerine göre sırasıyla yaklaşık %477 ve %368 oranında enerji tüketim kapasitesinde artışa karşılık gelmektedir. Elde edilen sonuçlar, OCF iplerle güçlendirilmiş numunelerin akma noktasına kadar olan yükleme sürecinde, CF demet/ip ile güçlendirilmiş numunelere kıyasla daha üstün bir performans sergilediğini göstermektedir. Bu durum, özellikle akma öncesi aşamada fiberlere iletilen yüklerin sınırlı olması nedeniyle, OCF iplerin daha rijit bir davranış ortaya koyarak hem yük taşıma kapasitesinin hem de akma aşamasında tüketilen enerjinin artmasına katkı sağlamasından kaynaklanmaktadır.

Süneklik açısından Çizelge 4.3 incelendiğinde, CF demet/ip ve OCF iplerin epoksi ile birlikte uygulanmasının betonarme kirişlerin eğilme kapasitesi ve plastik deformasyon yeteneğini önemli ölçüde artırdığı anlaşılmaktadır. Denge altı donatılmış betonarme bir kiriş numunesinin sünek davranış sergilediğini ifade edebilmek için süneklik oranının en az 4~5 civarında olması gerektiği bilinmektedir. Delikli ve deliksiz referans numunelerin süneklik oranları sırasıyla 1.48 ve 2.42 değerlerinde iken, güçlendirilmiş numunelerde bu oran 2.38 ile 6.11 arasında değiştiği görülmektedir. Güçlendirilmiş kirişlerde süneklikteki değişimler, delikli referans kiriş numunesine göre %16.22 ile %312.16 arasında, deliksiz referans kiriş numunesine göre ise %-38.84 ile %152.07 arasında değişim göstermiştir. En yüksek süneklik değeri U-CF-3.0-16-E numunesinde kaydedilmiştir. Şekil 4.37 ve Şekil 4.38 incelendiğinde hem epoksili hem de epoksisiz güçlendirme uygulanan numunelerin güçlendirme sonrası sünek davranış sergilediği açıkça görülmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Yapılan tez çalışması kapsamında düşey yükler altında kesme kapasitesi zayıf kiriş elemanların farklı konfigürasyonda, karbon fiber demet/ip ile güçlendirilmesi incelenmiştir. Deneysel çalışmada on iki adet betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Bunlardan iki tanesi güçlendirilmemiş delikli ve deliksiz referans numunesi olmak üzere geriye kalan on numune farklı konfigürasyonlarla güçlendirilmiştir. Çalışmada farklı tür ve farklı aralıklarda karbon fiber demet/ip ile güçlendirme yapılmıştır. Ayrıca güçlendirme uygulamasında epoksinin kullanılması ve kullanılmaması gibi parametreler de incelenmiştir. Bu çalışma, literatür için ilk çalışma olmasından dolayı oldukça önemlidir. Dolayısıyla bu tez çalışmasıyla elde edilen deney sonuçları gelecek çalışmalar için oldukça değerli bilgiler sunmaktadır. Testlerden elde edilen sonuçlar ışığında kirişlerin hasar türleri, sünekliği, yük taşıma kapasitesi, rijitliği ve enerji tüketme kapasitesi irdelenmiştir. Çalışmanın sonunda elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş olup gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

- Referans numunelerde gevrek kırılma ve ani kesme çatlakları gözlemlenmiştir. Özel üretimli ip ve epoksi ile güçlendirilen kirişlerin düşey yük taşıma kapasitesinde deliksiz referans numuneye göre %92'ye kadar (U-OCF-4.0-OZ-E numunesi) artış sağlanmış olup, kesme çatlakları kontrol altına alınmış ve daha sünek bir davranış sergilenmiştir.
- Epoksi kullanılarak güçlendirilen numunelerde, aynı parametreye sahip epoksisiz güçlendirilen numunelerden daha kontrollü ve daha sünek (%40.5'e kadar artış) bir kırılma gözlemlenmiştir. Bu durum güçlendirilen numunelerde beton yüzeyle daha iyi aderans sağlandığını göstermektedir. Ayrıca çatlakların yayılımının daha kontrollü olmasına katkı sağlanmıştır.
- Deney kirişlerinde d/4 aralığa sahip güçlendirilmiş numuneler, d/3 ve d/2 delik aralığına sahip numunelere kıyaslandığında, daha yüksek taşıma kapasitesine ve sünek davranışa sahiptir. Uygulanan demetin/ipin sıklığına göre göçme mekanizması değişmektedir.
- Epoksi içeren özel üretimli iplerle güçlendirilen numuneler, karbon fiber ip/demet kullanılarak güçlendirilen numunelere kıyasla daha yüksek yük taşıma kapasitesi

ve daha rijit bir davranış sergilemiştir. Buna karşılık, epoksi içermeyen numunelerde ise karbon fiber demet/ip ile güçlendirme, özel üretimli ip ile yapılan güçlendirmeye göre daha üstün performans göstermiştir.

- Özel üretimli ip ile güçlendirilen numunelerin deney sonu hasarları incelendiğinde, herhangi bir kopma olmadığı gözlenmiştir. Bu durum kullanılan özel üretimli ipin çapının (kalınlığının) yapılan güçlendirmede yeterli olduğunu göstermektedir. Ancak güçlendirmede karbon demet/ip kullanılması ile kopma durumunun meydana gelmemesi için ip kalınlığının 16 kat 6 mm olması büyük bir önem taşımaktadır.
- Numunelerin enerji tüketimleri incelendiğinde, epoksi kullanımı ile tüm enerji parametrelerinde ciddi artışlar meydana gelmiştir. Özellikle epoksi ile desteklenen numunelerde, toplam enerji tüketiminde yaklaşık 34 kat, maksimum yük (P_{max}) altındaki enerji tüketiminde yaklaşık 10 kat, $0.85P_{max}$ altındaki enerji tüketiminde yaklaşık 6 kat ve plastik enerji tüketiminde ise yaklaşık 128 kat artışlar elde edilmiştir.
- Her enerji tüketim seviyesinde en yüksek enerji tüketimi sağlayan numune U-CF-4.0-16-E olurken, onu karbon fiber demet/ip ve özel ip içeren epoksili diğer numuneler takip etmiştir. Epoksi kullanılmayan numunelerde dahi uygun lif oranı ve sarım sıklığı ile yüksek enerji performansı elde edilebileceği görülmüştür (U-CF-3.0-16-NE, U-OCF-3.0-OZ-NE). Enerji tüketimi bakımından karbon fiber demet/ip genel olarak özel üretim karbon fiber ipe kıyasla daha yüksek değerlere ulaşmıştır, ancak özel iplerin daha ekonomik ve sürdürülebilir olması dikkate alındığında mühendislik uygulamaları için önemli bir alternatif sunduğu sonucuna varılmıştır.

Yapılan tez çalışmasının sonucunda karbon fiber demet/ip ile güçlendirme tekniği, kesme kapasitesi zayıf kirişlerin dayanım ve sünekliğinin iyileştirilmesinde etkili bir çözüm olduğunu ortaya koymuştur. Bu çalışma benzer yapısal betonarme elemanlarının güçlendirilmesi için yapılacak gelecekteki araştırmalar için oldukça önemli bir referans kaynağıdır.

5.2. Öneriler

Yapılan tez kapsamında elde edilen bulgular doğrultusunda, araştırmacıların ilerleyen süreçte ele alması gereken ve bu alandaki bilgi birikimine katkı sağlayabilecek olası çalışma konuları aşağıda sıralanmıştır:

- Bu çalışmada karbon fiber demet/ip ve özel üretimli ip ile güçlendirme uygulamasının etkinliği araştırılmıştır. İleride cam, aramid gibi farklı elyaf türlerinin kiriş güçlendirmesindeki karşılaştırmalı etkisi incelenebilir.
- Farklı tür sarım tekniği ve farklı iplerin kirişe uygulanma aralıkları araştırılabilir. Bu sayede güçlendirmede optimum aralık ve etkili sarım belirlenebilir.
- Güçlendirilen numunelerin tersinir-tekrarlanır çevrimsel yükler altındaki davranışı araştırılabilir.
- Farklı a_v/d oranına sahip kesme kapasitesi zayıf betonarme kirişlerin davranışı araştırılabilir.
- Güçlendirilen numunelerin yangın gibi çevresel etkilere karşı performans değerlendirilmesi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Aksoylu, C., 2021, Experimental analysis of shear deficient reinforced concrete beams strengthened by glass fiber strip composites and mechanical stitches, *Steel and Composite Structures*, 40 (2), 267–285. <https://doi.org/10.12989/scs.2021.40.2.267>
- Aksoylu, C., Başaran, B. ve Arslan, M. H., 2024, Hasarlı ve hasarsız betonarme, çelik, ahşap ve dolgu duvar yapı elemanlarının çelik / elyaf ip, halat veya tellerle dikilerek onarımı ve güçlendirilmesi için sistem ve bu sistemin uygulanış yöntemi, Türk Patent ve Marka Kurumu, Tescil No: 2023 002378, Ankara.
- Aksoylu, C., Özkılıç, Y. O. ve Arslan, M. H., 2022, Mechanical steel stitches: An innovative approach for strengthening shear deficiency in undamaged reinforced concrete beams, *Buildings*, 12 (10), 1–18. <https://doi.org/10.3390/buildings12101501>
- Aksoylu, C., Uysal, Y., Özkılıç, Y. O., Başaran, B. ve Arslan, M. H., 2023, Strengthening shear deficiency in undamaged reinforced concrete beams using innovative 45° mechanical steel stitches, *Structures*, 58, 105523. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105523>
- Alav, D. S., 2022, Beton dayanımının farklı CFRP tipleri ile güçlendirilmiş kesme kirişlerinin davranışına olan etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Ali, J. İ., 2022, Saplama kiriş sebebiyle oluşan hasarların deneysel olarak incelenmesi ve uygun donatılandırma ve güçlendirme yönteminin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Alsdudi, M., 2021, Kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde optimum lifli polimer miktarının belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Alshlash, S., 2019, Betonarme kirişlerde onarım ve güçlendirme yöntemlerinin deneysel olarak irdelenmesi ve maliyet analizi, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya
- Alshlash, S., Aksoylu, C., Erkan, İ. H. ve Arslan, M. H., 2019, Ön hasarlı kesme kirişlerinin CFRP ile onarım ve güçlendirilmesi, IV. International Scientific and Vocational Studies Congress – Engineering, 7–10 Kasım 2019, Kızılay, Ankara, 172–177.
- Alshlash, S., Aksoylu, C., Hakkı Erkan, İ. ve Arslan, M. H., 2019, Kesme kapasitesi yetersiz ön hasarlı betonarme kirişlerin “dikiş demirleri” ile onarım/güçlendirilmesi, IV. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi – Mühendislik, Kızılay, Ankara, 7–10 Kasım, 178–183.
- Anil, Ö., Altın, S., Kara, M. E., Koprman, Y. ve Mertoğlu, Ç., 2011, Kesmede yetersiz betonarme kirişlerin CFRP ile dayanım ve sünekliğinin artırılması, 10. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 11–14 Ekim, 1–10.
- Aslan, S., Erkan, İ. H., Aksoylu, C. ve Arslan, M. H., 2024, An experimental investigation and cost analysis of flexural or shear strengthening pre-damaged RC beams, *Structures*, 62, 106091. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106091>
- Aykaç, B. ve Acar, Ö., 2014, Betonarme kirişlerin dıştan yapıştırılmış karbon kumaş ve çelik levhalardan oluşan kompozit malzemeyle güçlendirilmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29 (1).
- Baş, F., 2024, Kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişlerin mekanik çelik dikişlerle güçlendirilmesinde kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı ve kiriş yüksekliği değişiminin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Çetinkaya, N., Kaplan, H. ve Şenel, Ş. M., 2004, Betonarme kirişlerin lifli polimer (FRP) malzemeler kullanılarak onarım ve güçlendirilmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10 (3), ss. 291–298.
- Demir, S., 2019, Çelik tel örgülerin betonarme kirişlerin kesme davranışına etkisi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7 (1), 477–487. <https://doi.org/10.29130/dubited.461843>

- Esen, B., Gündoğay, A., Yaman, S., Tekeli Kabaş, H. ve Demir, F., 2022, Betonarme kirişlerin davranışını etkileyen parametrelerin deneysel incelenmesi, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 27 (4), 1043–1060. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1120435>
- Gemi, L., Madenci, E. ve Özkılıç, Y. O., 2020, Çelik, cam FRP ve hibrit donatılı betonarme kirişlerin eğilme performansının incelenmesi, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8 (2), 1470–1483. <https://doi.org/10.29130/dubited.629354>
- Hussain, Q., Ruangrassamee, A., Joyklad, P. ve Wijeyewickrema, A. C., 2022, Shear enhancement of RC beams using low-cost natural fiber rope reinforced polymer composites, *Buildings*, 12 (5), 0602. <https://doi.org/10.3390/buildings12050602>
- Kaya, T., Aras, M. ve Çalışkan, Ö., 2017, Basınç ve eğilme dayanımlarına CFRP'nin etkisi, *Journal of Engineering Sciences*, 20 (3), ss. 1–9.
- Li, W. ve Leung, C. K. Y., 2017, Effect of shear span-depth ratio on mechanical performance of RC beams strengthened in shear with U-wrapping FRP strips, *Composite Structures*, 177, 141–157. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.059>
- Miruthun, G., Vivek, D., Remya, P. R., Elango, K. S., Saravanakumar, R. ve Venkatraman, S., 2020, Experimental investigation on strengthening of reinforced concrete beams using GFRP laminates, *Materials Today: Proceedings*, 37 (Part 2), 2744–2748. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.544>
- Ojaimi, M. F., 2021, Experimental study on shear strengthening of reinforced concrete beams using different techniques of concrete jacketing, *Basrah Journal of Engineering Science*, 21 (2), 53–61. <https://doi.org/10.33971/bjes.21.2.8>
- Özkal, F. M., 2017, Kesme açıklığı küçük olan betonarme kirişlerin etriye düzeni ve kenetlenme yönünden incelenmesi, XX. Ulusal Mekanik Kongresi, Bursa, 5–9 Eylül 2017, ss. 551–561.
- Panda, K. C., Bhattacharyya, S. K. ve Barai, S. V., 2013, Effect of transverse steel on the performance of RC T-beams strengthened in shear zone with GFRP sheet, *Construction and Building Materials*, 41, 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.098>
- Sevinç, T., 2008, Betonarme kirişlerin CFRP, çelik ve betonarme levhalarla taşıma gücünün artırılmasının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Siddika, A., Saha, K., Mahmud, M. S., Roy, S. C., Mamun, M. A. Al ve Alyousef, R., 2019, Performance and failure analysis of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) strengthened reinforced concrete (RC) beams, *SN Applied Sciences*, 1 (12). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1675-x>
- TBDY-2018, 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar, Ankara, 1-416
- TDY-2007, 2007, Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik, TC Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Deprem Araştırma Dairesi.
- Tokgöz, H. ve Dündar, B., 2014, Kesme yönünden yetersiz dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerin CFRP ile güçlendirilerek kesme kapasitelerinin artırılması, İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi, 3 (2), ss. 87–97. <https://dergipark.org.tr/en/pub/duzceitbd/issue/4816/66440>
- Uysal, Y., 2022, Kesme kapasitesi yetersiz betonarme kirişlerin 45° açılı mekanik çelik dikişlerle güçlendirilmesinde optimum tasarımın araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Uysal, Y., Aksoylu, C., Özkılıç, Y. O. ve Arslan, M. H., 2022, Kesme donatısı yetersiz ön hasarsız betonarme kirişlerin yenilikçi bir yaklaşımla güçlendirilmesi: mekanik çelik dikişler, 8. Yapı Mekaniği Laboratuvarları Çalıştayı, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, ss. 218–222. <https://www.researchgate.net/publication/371491491>