T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KESME AÇISINDAN YETERSİZ OLAN TABLALI BETONARME KİRİŞLERİN CFRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

AHMED ABED HAMAD HAMAD

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

HAZİRAN – 2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

AHMED ABED HAMAD HAMAD tarafından hazırlanan "KESME AÇISINDAN YETERSİZ OLAN TABLALI BETONARME KİRİŞLERİN CFRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ" adlı tez çalışması 23/06/2021 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oy birliği** ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri **İmza**

Başkan
Prof. Dr. Murat ÖZTÜRK

Danışman
Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN (Danışman)
Üye
Dr. Öğr. Üyesi A. Serdar ECEMİŞ

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Sait GEZGİN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından 201004037 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

AHMED ABED HAMAD HAMAD

Tarih: 23.06.2021

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KESME AÇISINDAN YETERSİZ OLAN TABLALI BETONARME KİRİŞLERİN CFRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

AHMED ABED HAMAD HAMAD

Selçuk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN
Yardımcı Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Şakir YAZMAN

2021, 99 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN-Danışman
Prof. Dr. Murat ÖZTÜRK
Dr. Öğr. Üyesi Serdar ECEMİŞ

Betonarme elemanlarda kesme hasarı ani olarak meydana gelir ve enerji tüketimi olmaksızın oluştuğu için oldukça tehlikelidir. Bu nedenle, betonarme elemanların taşıma gücüne kesme hasarı görerek değil eğilme hasarı görerek ulaşması hedeflenerek tasarım yapılır. Eğilme ve kesme etkisine maruz kirişlerin sünek davranarak üzerlerindeki yükü absorbe etmeleri oldukça önemlidir. Bununla beraber mevcut betonarme binaların bir kısmında yetersiz sargı donatısından dolayı kirişler kesme hasarı görebilmektedirler. Bu hasarların önlenebilmesi için bu kirişlerin güçlendirilmesine ihtiyaç vardır. Güçlendirmedeki en büyük problem kirişlerin üzerlerinde bulunan döşemelerdir. Döşemeler ile kirişler beraber betonlandıkları için tek bir parça şeklinde çalışırlar. Bu nedenle kirişler T kesit olarak tasarlanırlar. T kesitli kirişlerin kesme açısından yetersiz olması durumunda güçlendirilmesi döşemelerin varlığı nedeniyle dikdörtgen kirişler kadar kolay olmamaktadır. Bu çalışmada kesme açısından yeterli olmayan betonarme T kirişlerin farklı CFRP konfigürasyonu ile güçlendirilmesinde, güçlendirme tipinin davranışa olan etkisi deneysel ve analitik olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, kesme açısından yetersiz biri referans olarak kullanılacak dokuz adet ½ geometrik ölçekli betonarme T kiriş statik dört noktadan yükleme ile test edilmiştir. Bu kirişlerin yedi tanesi kesme hasarının beklendiği bölgede parçalı CFRP konfigürasyonları ile güçlendirilmiş bir tanesi ise kesme bölgesinde tam CFRP sargılama yapılarak güçlendirilmiştir. Parçalı CFRP uygulamasında güçlendirmelerin iki tanesinde karbon elyaf farklı açılardan (45^o ve 90^o) ankrajlarla kirişe sabitlenmiştir. Çalışmada ayrıca elde edilen deneysel sonuçlar ACI 440.2R-17, TBEC-2018 ve FIB-2001'in vermiş olduğu amprik bağıntılarla da karşılaştırılmıştır. Her alternatifin çeşitli düzeyde dayanıma katkıda bulunduğu ama ankrajsız ve tam sargılı olmayan numunelerde özellikle CFRP tabakalarının ayrılması (debonding) ile hasarın geliştiği görülmüştür. Ankraj uygulamasının düşey yük kapasitesine etkisi oldukça olumlu olmakla beraber süneklikte hatırı sayılır etkisi olmamıştır. Amprik bağıntıların ise deneysel sonuçlara göre oldukça tutucu değerler verdiği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme, Kesme Hasarı, T-kiriş, Güçlendirme, Ankaraj, CFRP

ABSTRACT

MS THESIS

STRENGTHINING OF T-SHAPED REINFORCED CONCRETE BEAM WITH DEFICIENT IN TERMS OF SHEAR THROUGH CFRP AND PROPOSED SOLUTIONS

AHMED ABED HAMAD HAMAD

Selcuk University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering

Advisor: Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN
Co-Advisor: Dr. Şakir YAZMAN

2021, 99 Pages

Jury
Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN (Advisor)
Prof. Dr. Murat ÖZTÜRK
Dr. A. Serdar ECEMİŞ

Shear damage in reinforced concrete elements occurs suddenly and is very dangerous because it occurs without energy consumption. For this reason, the design is made with the aim of reaching the bearing strength of reinforced concrete elements not by shear damage, but by bending damage. It is very important that the beams exposed to bending and shear effects act ductile and absorb the load on them. However, in some of the existing reinforced concrete buildings, beams may suffer shear damage due to insufficient shear reinforcement. In order to prevent these damages, these beams need to be strengthened. The biggest problem in strengthening is the slabs on the beams. Since slabs and beams are concreted together, they work in one piece. For this reason, beams are designed as T-section. If T-section beams are insufficient in terms of shear, strengthening is not as easy as rectangular beams due to the presence of slabs.In this study, the effect of reinforcement type on behavior in strengthening of reinforced concrete T-beams with different CFRP configurations, which is not sufficient in terms of shear, was investigated experimentally and analytically. For this purpose, nine geometric scale reinforced concrete T-beams, one of which is insufficient for shear, were tested with static loading from four points. Seven of these beams are strengthened with partial CFRP configurations in the area where shear damage is expected, and one is strengthened with full CFRP wrapping in the shear zone. In the partial CFRP application, in two of the strengthenings, the carbon fiber is fixed to the beam with anchors at different angles (45^o and 90^o). The experimental results obtained in the study were also compared with the empirical formulations given by ACI 440.2R-17, TBEC-2018 and FIB-2001. It has been observed that each alternative contributes to various levels of strength, but damage develops especially with debonding of CFRP layers in unanchored and not fully coiled samples. Although the effect of the anchor application on the vertical load capacity is quite positive, it did not have a significant effect on ductility. It is seen that the empirical relations give very conservative values according to the experimental results.

Keywords: Reinforced Concrete, Shear Failure, T-Beams, Strengthening, Anchorage, CFRP

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Tablalı betonarme kesme kirişlerinin güçlendirmesinin konfigürasyonu belirlenmesini amaçladığımız tezimin her aşamasında yardım, tezin hazırlanması sürecinde bana çok değerli vakitlerini ayırarak teorik bilgilendirme, bilimsel katkı, teşvik ve yönlendirmede bulunarak hızlıca yol almamı sağlayan, beni cesaretlendiren ve desteğini benden esirgemeyen, saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Musa Hakan ARSLAN'a, yüksek lisans tez aşamamda ikinci danışman olarak görevlendirilen Dr. Öğretim Üyesi Şakir YAZMAN'a ayrıca teşekkürü borç bilirim. Özellikle CFRP şeritlerin tablalı betonarme kirişlere uygulanması noktasında Doç. Dr. Lokman GEMİ hocamız ile beraber tüm detayları benimle paylaştıkları için ve gelişimime katkıları için minnettarım. Ayrıca tez konusuyla ilgili kaynakların taramasında ve deneysel ve analitik çalışmalarımın başından sonuna kadar her aşamasında destek olan bilgi ve tecrübesi ile yol gösteren sayın hocam Dr. Ceyhun AKSOYLU'ya ve tezin kurgulanmasında ve nümerik modellemelerinde emeği geçen Dr. Yasin Onuralp ÖZKILIÇ'a da teşekkür ederim. Tez çalışmam süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan ve her aşamada bana yardımcı olan sevgili aileme teşekkür ederim. Son olarak İnşaat Mühendisliği Yapı ve Deprem Araştırma Laboratuvarının emektarı emekli teknisyen Yüksel ÇİFTÇİ'ye de fiziki yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

AHMED ABED HAMAD HAMAD
KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET…….. **iv**
ABSTRACT…… **v**
ÖNSÖZ…….. **vi**
İÇİNDEKİLER…….. **vii**
SİMGELER VE KISALTMALAR…….. **ix**
1. GİRİŞ…….. 1
1.1. Genel…….. 1
1.2 Çalışmanın Amacı…… 2
1.3. Çalışmanın Önemi…… 2
1.4. Çalışmanın Kapsamı…….. 3
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI…… 4
2.1. Giriş……... 4
2.2 Daha Önceki Deneysel Çalışmalara İlgili Literatür Taraması……... 4
3. MATERYAL VE YÖNTEM…… 17
3.1 Giriş……... 17
3.2. Kompozitler…….…… 17
3.3. Elyaf Takviyeli Polimer (FRP)…… 18
3.3.1. Karbon Lif Takviyeli Polimer (CFRP)..…… 21
3.3.2. Cam Lif Takviyeli Polimer (GFRP)..…….. 22
3.3.3. Aramid Lif Takviyeli Polimer (AFRP)..…… 22
3.3.4. Bazalt Lif Takviyeli Polimer (BFRP)…… 23
3.4. FRP Güçlendirme…… 25
3.5. Kesme Güçlendirilmesi…… 26
3.6. FRP Güçlendirilmiş Kirişlerin Hasar Modları…….…… 28
3.7. Tablalı Betonarme Kirişlerin tasarımı……..…… 30
4. MATERYAL…….…… 32
4.1. Numunelerin Hazırlanması ve Dökümü…….. 32
4.2. Donatı Çeliği…….. 34
4.3. Güçlendirme Metodolojisi…….. 36
4.3.1. Kirişlerin Hazırlanması…….. 36
4.3.2. CFRP Levhaları…… 37
4.4. Tablalı Kirişlerin CFRP Levhaları ile Güçlendirilmesi…… 41
4.4.1. Kirişin İki Taraflı Sargılaması (TB-1)…… 41
4.4.2. Gövde Yüksekliğinin Yarısını U-Şekli Sargılama (TB-2)…….. 42
4.4.3. Gövde'in Tüm Yüksekliğini U-Sargılama (TB-3)..…… 42
4.4.4. Gövde'in Tüm Yüksekliği ve Flanş Altındaki Alanını U-Sargılama (TB-4). 43
4.4.5. Kirişin Tüm Yüksekliğini Tam Sargılama (TB-5) …….. 43
4.4.6. . CFRP Levhalar ile Kiriş Gövdesinin Tüm Yüksekliğini ve Flanş Altındaki Alan U-Sargılama ve CFRP Ankrajı Kullanma (TB-6)……. 44
4.4.7. 45 ° Açılı CFRP Ankraj Kullanarak Kiriş Gövdesinin Tüm Yüksekliğini ve Flanş Altındaki Alan U-Sargılama (TB-7) …….. 45
4.4.8. Kiriş Gövdesinin Tüm Yüksekliğinde Sürekli CFPR Levhalar ile U-Sargılama (TB-8)……... 46
4.5. Güçlendirme Metodolojisi- Fan Tipi Ankraj..…… 48
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR…….. 51
5.1. Giriş…..…… 51
5.2. Deneysel Çalışma Sonuçları ve Hasar Analizi..…….. 53
6. ANALİTİK ÇALIŞMA…..…… 74
6.1 Giriş…..…….. 74

6.2. ACI-440.2R-17…..……. 75
6.3. FIB-2001…....……..... 77
6.4. TBEC-2019……... 78
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER…… 81
KAYNAKLAR…..…….. 85

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_f : Lifli polimer enkesit alanı
av : Eleman kesme açıklığı
Ac : Beton alanı
As : Çekme donatısı alanı
d_1 :Çekme bölgesi paspayı
f_c : Beton basınç dayanımı
n : Lifli polimer katman sayısı
t_f : Lifli polimer enkesit kalınlığı
b_w :Kiriş gövde genişliği
b_f : Lifli polimer enkesit genişliği
b : Kiriş genişliği
h : Kiriş derinliği
d : Kiriş faydalı yüksekliği
E_c : Betonun elastisite modülü
E_f : Lifin elastisite modülü
E_s : Çelik elastisite modülü
E_{fu} : Lifin kopma uzaması
C25 : Basınç dayanımı 25 MPa olan beton sınıfı
P : Deney elemanlarına uygulanan yatay yük
M : Moment
Vc : Beton kesitin kesme dayanımı
Vs : Betonarme kesitin kesme donatısının kesmeye katkısı
V_f : Betonarme kesitte kullanılacak fiberin kesme katkısı
Vr : Elemanın kesme dayanımı
n_f : Kirişin tek yüzünde bulunan fiber sayısını
W_f : Lifli polimer genişliği
S_f : Lif şeritler eksenler arası mesafeyi
ε_f : etkili birim uzama limiti
ε_{fu} : FRP'nin şekil değiştirmesi
ρ_f : FRP'nin hacimsel oranı
Ø : Donatı çapı
δy : Akma anındaki deplasman değeri
δu : Yükün %85'ine karşı gelen deplasman değeri

Kısaltmalar

FRP	**:** Lifle Güçlendirilmiş Polimer
CFRP	: Karbon Fiber Takviyeli Polimerler
EB	: Dışarıdan bağlı (External Bonding)
GFRP	: Cam Fiber Takviyeli Polimerler
AFRP	: Aramid Fiber Takviyeli Polimerler
BFRP	: Basalt Fiber Takviyeli Polimerler
Mpa	: Mega Pascal
kN	:Kilo Newton
Gpa	: Giga Pascal
N/A	: Uygulanamaz (Not Applicable)
ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü Standardı
NSM	: Yakın Yüzeye Monteli (Near Surface Mounted)
LVDT	: Lineer Variable Displacement Transducer
RC	: Betonarme
TBDY-2018	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018
FIB-2001	:The International Federation for Structural Concrete (fib) as Bulletin 14
TBEC	:Turkish Seismic Earthquake Code
FRCM	: Fabric-Reinforced Cementitious Matrix

1. GİRİŞ

Günümüzde mevcut yapılar genellikle betonarme, çelik ve ahşaptan oluşmaktadır. Bunların içinde en yaygın olanlar betonarme yapılardır. Betonarme yapılar, diğer yapılara oranla kolay bakımı ve tamiri, işçiliğinin daha kolay olması, daha ekonomik ve işçilik maliyetlerinin daha az olması sebebiyle daha çok tercih edilmektedir. Türkiye'de mevcut yapılarda, yapının tasarımında öngörülen yüklerden farklı dış yükler söz konusu olması, etkiyen yüklerin yapıda hasar meydana gelmesi gibi sebeplerle yapıların yeterli güvenlikte olmadığı düşünüldüğünde farklı güçlendirme yöntemleri bir çözüm olarak görülmektedir.

Yapı elemanlarına güçlendirme yapılırken kesme, eğilme ve süneklik kapasiteleri açısından iyileştirme söz konusudur. Kirişlerde söz konusu hasarlar çoğunlukla kesme ve eğilme çatlaklarıdır ve güçlendirilmesinde betonarme mantolama, karbon, cam, aramid ve bazalt lifli polimerle sargılama (CFRP, GFRP, AFRP, BFRP vs.) ve çelik levhalarla yapılan uygulamalar bulunmaktadır. Burada önemli olan hangi kapasitenin hangi ölçüde artırılacağının doğru tespit edilmesi ile uygulanabilecek en ekonomik ve etkili güçlendirme yönteminin seçilmesidir.

Betonarme elemanlar çeşitli şekillerde güç tükenmesine erişirler. Eğilme, kesme, donatı sıyrılması, eksenel yük altında ezilme ve burkulma gibi farklı güç tükenmesi türleri bulunmaktadır. Yapım ve deprem yönetmelikleri bunlardan sadece bir tanesine (eğilme güç tükenmesine) izin vermekte diğer hasarların oluşmasına izin vermemektedir. Özellikle kiriş ve kolonlarda sıklıkla görülebilen kesme hasarı ani olarak meydana gelir ve enerji tüketimi olmaksızın oluştuğu için oldukça tehlikelidir. Eleman bazlı bu hasar taşıyıcı sistemin toptan göçmesine bile sebep olabilir. Bu nedenle, betonarme elemanların taşıma gücüne kesme hasarı görerek değil eğilme hasarı görerek ulaşması hedeflenerek tasarım yapılır.

Eğilme ve kesme etkisine maruz kirişlerin sünek davranarak üzerlerindeki yükü absorbe etmeleri oldukça önemlidir. Zira kirişler gelen yükleri sünek davranarak karşılarken kolonlarda herhangi bir hasarın oluşmaması kapasite tasarımı için önemlidir. Fakat özellikle mevcut betonarme binaların bir kısmında yetersiz sargı donatısından dolayı kirişler kesme hasarı görebilmektedirler. Bu hasarların önlenebilmesi için bu kirişlerin güçlendirilmesine ihtiyaç vardır. Güçlendirmedeki en büyük problem kirişlerin üzerlerinde bulunan döşemelerdir. Döşemeler ile kirişler beraber

betonlandıkları için tek bir parça şeklinde çalışırlar. Bu nedenle kirişler T kesit olarak tasarlanırlar. T kesitli kirişlerin kesme açısından yetersiz olması durumunda güçlendirilmesi döşemelerin varlığı nedeniyle dikdörtgen kirişler kadar kolay olmamaktadır.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu deneysel çalışmanın temel amacı, CFRP liflerle güçlendirilmiş yetersiz kesme dayanımı olan tablalı betonarme kirişlerin davranışlarının deneysel ve analitik olarak araştırılmasıdır. Özellikle farklı CFRP konfigürasyonlarının kesme davranışına olan etkisini gözlemlemek ve analitik yöntemlerle bulunan kesme kapasitesi ile deneysel kapasitesinin ne derece örtüştüğünü irdelemek tezin bir diğer amacıdır. Bununla beraber CFRP uygulamasının ankrajlı olarak yapılması durumunda ankrajlarını etkinliğinin incelenmesi de çalışmanın temel motivasyonlarından birisi olmuştur.

1.2. Çalışmanın Önemi

Betonarme yapıların güçlendirilmesi zor ve uzmanlık gerektiren bir iştir. Taşıyıcı sistemin global ve eleman bazlı zaafiyetinin iyitespit edilmesi gerekmektedir. Bu tespit mevcut yapıların değerlendirilmesi kısmında deprem yönetmeliklerinde yer bulmaktadır. Bu tespiti yaptıktan sonra zaafiyetin türüne göre (süneklik, dayanım ve rijitlik) gerekli önlemler alınmalıdır. Eleman bazlı alınan bu önlemler yapının bütüncül performansının da pozitif yönde etkilemelidir. Sonuç olarak güçlendirme standart bir işlem olmayıp her yapı için farklı bir şekile ele alınması gereken ciddi mühendislik altyapısı ve bilgisi gerektiren bir operasyondur.

Betonarme yapıların kolon, kiriş, perde, döşeme ve temel gibi taşıyıcı sistem elemanlarında farklı güçlendirme tipleri farklı yöntemlerle uygulanabilmektedir. Kirişlerde genellikle kesme kapasitesinin yetersizliği ve akabinde oluşan süneklik kaybı önemli bir problem olarak görülmektedir. Özellikle eski yönetmeliklere göre imal edilmiş yapılar (Türkiye'de 1975 ve öncesi) ilgili yıllarda kesme kaygısının yönetmelikte tam olarak kendini bulmamasından kaynaklı olmak üzere günümüz şartlatrının istemiş olduğu kesme donatısı seviyesinin oldukça altında donatılmıştır. Zamanla değişen yükler, yapının zamanla deforme olması, kullanıcı müdehaleleri, yetersiz dayanım vs. gibi etkiler mevcut yapıların riskli olmasının temel sebeplerindendir.

Betonarme binalarda kirişlerin güçlendirilmesinde bazı zorluklar yaşanmaktadır. Elemanların yatay olmasından ve döşemeler ile beraber yekpare çalışmasından kaynaklı betonarme mantolama imalatında zorluklar yaşanmaktadır. Çelik profiller ile güçlendirme bu açıdan daha avantajlı olsa da zaman içinde korozyon bu güçlendirmenin en zayıf yönüdür. Ayrıca çelik birleşimlerinde oluşacak bir teknik hata önemli kapasite kayıplarına da sebep olabilir. Özellikle CFRP kumaşın kesme kapasitesi düşük olan kirişlerde sıklıkla uygulama alanı bulmasının en önemli sebebi kolay uygulanabilir ve efektif bir güçlendirme yöntemi olmasıdır. Ayrıca CFRP'nin yüksek mukavemet/ağırlık oranı, manyetik olmaması, iletken olmaması ve kimyasal saldırılara karşı üstün direnci ve uygulama kolaylığı gibi özelliklerinden dolayı sıklıkla tercih edilmektedir.

Fakat bu özelliklerinin yanında CFRP'nin uygulamasınının, kullanılan malzemenin özelliklerinin (birim ağırlık, lif yapısı ve yönü, kullanılan yapıştırıcı vs.) çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Aksi halde CFRP malzemesininin kullanımı sonrasında betonarme elemanda arzulanan iyileşme görülmeye bilir.

Bu tez çalışmasında kesme dayanımı yetersiz olan T kirişlerin CFRP ile güçlendirilmesinde çeşitli alternatifler denenmiştir. Ayrıca CFRP'nin performansının artırabilmek için iki farklı ankraj uygulaması da yapılmıştır. Son on yıldır uygulama sıklığı artan bu malzemenin daha iyi tanınması ve belki de daha ekonomik çözümler üretilebilmesi için deneysel çalışmaların önemi bu çalışmanın temel motivasyonlarından birini oluşturmuştur.

1.3. Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışmada kesme açısından yeterli olmayan betonarme T kirişlerin farklı CFRP konfigürasyonu ile güçlendirilmesinde, güçlendirme tipinin davranışa olan etkisi deneysel ve analitik olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, kesme açısından yetersiz biri referans olarak kullanılacak dokuz adet ½ geometrik ölçekli betonarme T kiriş statik dört noktadan yükleme ile test edilmiştir. Bu kirişlerin yedi tanesi kesme hasarının beklendiği bölgede parçalı CFRP konfigürasyonları ile güçlendirilmiş bir tanesi ise kesme bölgesinde tam CFRP sargılama yapılarak güçlendirilmiştir. Parçalı CFRP uygulamasında güçlendirmelerin iki tanesinde karbon elyaf farklı açılardan (45^o ve 90^o) ankrajlarla kirişe sabitlenmiştir. Çalışmada ayrıca elde edilen deneysel sonuçlar ACI 440.2R-17 (2017), TBEC-2018 (2018) ve FIB-2001 (2001) de verilmiş olduğu amprik bağıntılarla da karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Giriş

Geçtiğimiz yirmi yıl boyunca, beton kirişlerin farklı tipte FRP kompozitleri kullanarak ve bunları birkaç farklı şekilde uygulayarak harici olarak güçlendirirken kesmedeki davranışını anlamak için birçok deneysel çalışma ve bilimsel araştırma yapılmıştır. Bu yollarla güçlendirilen kirişlerde kesme kapasitesinde daha büyük bir artış ve daha fazla süneklik sağlayan en iyi yöntem de araştırılmıştır. Literatürde bulunan 29 deneysel çalışma gözden geçirilmiş ve test sonuçları çalışılmış, karşılaştırılmış ve hızlı bir şekilde referans verilebilecek önemli bir veri tabanı oluşturacak şekilde organize edilmiştir. Tablo 2.1'de deney programı, güçlendirmede kullanılan malzeme türleri, güçlendirme şeması, numunenin beton özellikleri, kullanılan çelik takviyenin boyutu ve aşağıda 2010'dan 2021'e kadar birçok deneysel çalışmanın gözden geçirilmesi yer almaktadır.

2.2 Daha Önceki Deneysel Çalışmalara İlgili Literatür Taraması

Deifalla ve Ghobarah (2010), kombine kesme ve burulmaya maruz kalan fiber takviyeli polimer (FRP) kumaşlar kullanılarak güçlendirilmiş çeşitli yükleme, geometrik konfigürasyonlar, eğilme kirişleri, tablalı betonarme kirişler gibi çeşitli durumları incelemiştir. Müşterek kesme ve burulma altında yapısal bir elemanın hasarı, doğası gereği gevrektir. Çalışmada altı yarı ölçekli kiriş, iki kontrol numunesi ve dört güçlendirilmiş kiriş inşa edilmiş ve kirişi farklı oranlarda birleşik kesme ve burulmaya tabi tutan özel olarak tasarlanmış bir test düzeneği kullanılarak test edilmiştir. Karbon FRP'leri kullanan dört güçlendirme tekniği kullanılmıştır. CFRP levhalarla kesme ile güçlendirilmiş tablalı betonarme (T-kesitli) derin kirişlerin davranışını ve performansını araştırmak için bir seri deneysel test gerçekleştirilmiştir.

Altın ve ark. (2010), CFRP şeritlerle güçlendirilmiş betonarme T-kesitli kirişlerin kesme kapasitesini ve sünekliğini araştırmak için deneysel bir çalışma yürütmüştür. Bu deneysel çalışmayı gerçekleştirmek için 10 (T kesitli) tablalı betonarme kirişler hazırlanmış ve dökülmüştür. Beton kirişler 4000 mm uzunluğunda tasarlandı ve T şeklindeki enine kesitin boyutları 360 mm flanş genişliği, 75 mm flanş kalınlığı, toplam derinliği 360 mm idi. Gövdenin genişliği 120 mm idi. kirişlerin yedisi kesme takviyesi için etriyelerle ve üçü en kötü durumları temsil etmek için etriye kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. Kirişler, üç farklı aralıklı U şeklindeki CFRP şeritlerle dıştan güçlendirildi ve sargılama işleminden sonra bunlardan altısına ankraj sistemi

uygulanmıştır. Testlerin sonuçları, CFRP şeritlerle güçlendirilen numunelerde kesme kapasitesinde önemli bir artış olduğunu göstermiştir. Fan şeklindeki ankraj sistemi kullanımının, bu tip ankrajın uygulandığı numunelerin kesme mukavemetine etkisinin kapsamını da belirtmiştir. Testlerin sonuçları, bu tip ankrajların güçlendirildiklerinde kendileri için yapıldığı kirişlerin süneklikteki artış miktarını da göstermiştir.

Galal ve Mofidi (2010), bu çalışmada tablalı betonarme (T-kesitli) kirişlerin kesmede güçlendirilmesine yeni mekanik olarak ankraj tekniğinin uygulanması incelenmiştir. Bu deneysel çalışmayı gerçekleştirmek için U-şekilli CFRP levhalar kullanılmıştır ve harici olarak uygulanmıştır. Bu çalışmayı gerçekleştirmek için, üç adet T-şekilli betonarme kiriş tasarlanmış ve dökülmüştür. Bu kirişlerden biri kontrol kirişi olarak dikkate alınmıştır ve kesmede hasar olan kiriş dört noktalı sistemle incelenmiştir. İkinci kiriş ise CFRP levha kullanılarak kesme bölgelerinde güçlendirilmiş ve kiriş gövdesine U şeklinde dıştan sargılanmıştır. Kalan üçüncü kiriş, kuru karbon fiber levhaya (CF) sahip U şeklinde bir ankraj sistemi kullanılarak güçlendirilmiştir. Numunelerin incelenmesinin sonuçları, yeni ankraj sistemi ile güçlendirilen numunenin, kontrol kirişine göre kesme kapasitesinde% 48, CFRP levhalarla güçlendirilen numuneye göre ise % 16 artış olduğunu göstermiştir.

Lee ve ark. (2011), kesme açısından yetersiz tasarlanmış toplam 14 tablalı betonarme (T-kesitli) derin kirişin davranışını ve performansını deneysel olarak araştırmıştır. Referans olarak kullanılan hariç, kirişler CFRP levhalar kullanılarak kesmede harici olarak güçlendirilmiştir. Ayrıca U-şekilli CFRP levhaları bir ankraj olarak kullanılmıştır. Dört noktadan yükleme testleri altında tüm kirişler incelenmiştir. Tüm kirişler 1800 mm açıklık, 460 mm yükseklik, 180 mm gövde genişliği, 100 mm flanş kalınlığı ve 450 mm flanş genişliği ile üretilmiştir. İnceleme sonuçlarının gözlem ve analizinden, lif levhalarının yönünün incelenen derin kirişin süneklik ve maksimum yük açısından kapasitesi ve kesme performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu gözlenmiştir. Ayrıca, U şeklindeki CFRP levha ankraj sistemini kullanmanın önemli etkisinin yük taşıma kapasitesini, sünekliği ve rijitliği artırdığı gösterilmiştir.

Belarbi ve ark. (2012), CFRP levhalar ile kesme bölgesinde harici olarak güçlendirilmiş tablalı betonarme kirişlerin kesme performansını incelemiştir. Deneysel program, tam ölçekli köprü kirişlerinin kesme performansını araştırmak için 8 tam ölçekli tablalı betonarme kirişlerini içermektedir. Tüm kirişler (kontrol kirişi hariç),

CFRP levhalar ve mekanik ankraj sistemi kullanılarak kirişin yatay eksenine 90 ° fiber oryantasyonlu U-sargılama şeması ile güçlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, mekanik ankraj takılmadığında kontrol kirişinin kesme mukavemetine kıyasla kesme kapasitesinde yaklaşık % 23'ten% 26'ya bir artışın meydana geldiğini açıklamıştır.

Kim ve ark. (2012), CFRP levhalarının ve ankrajlarının betonarme ve öngerilmeli beton kirişlerin uygulamalarını incelemiştir. Deneysel araştırma, büyük köprülerin veya taşıyıcı elemanlarının kirişlerinin kesmesini güçlendirmek için ankrajlı CFRP kullanmanın etkinliğini onaylamak için gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamlı deneysel çalışmanın amacına ulaşmak için çeşitli T-kirişler ve I-kirişler üzerinde kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. 16'sı 610 mm derinliğinde ve 8'i 1220 mm derinliğinde olmak üzere toplam 24 numune dökülmüş ve test edilmiştir. Test sonuçları, uygulanan ankraj sisteminin kesme mukavemetini, güçlendirilmemiş kontrol kirişinden % 50 daha fazla bir orana önemli ölçüde artırabildiğini kanıtlamıştır.

Panda ve ark. (2013), Cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) levha ile kesme bölgesinde dışarıdan güçlendirilmiş 18 tablalı betonarme kirişin kesme dayanımını ve hasar modlarını incelemiştir. Tüm kirişler, etriyeli ve etriyesiz olarak 2500 mm açıklık, 260 mm yükseklik, 100 mm gövde genişliği, 60 mm flanş kalınlığı ve 250 mm flanş genişliği ile dökülmüştür. Dokuz kiriş seçildi ve farklı etriye aralıklarına sahip, örneğin etriyesiz, 200 etriye ve 300 mm etriye aralığına sahip kontrol kirişleri olarak kabul edilmiş, kalan 9 kiriş ise kesme bölgesinde yandan bağlı U-ceket ve U-ceketli ankraj sistemli GFRP şeritleri ile güçlendirilmiştir. Deneysel bulgular, kesme bölgesinde dışarıdan güçlendirilmiş tablalı betonarme kirişlerin kesme kapasitesinin% 15-40 arttığını ve ankraj sistemli U-ceket şemasının U-ceket konfigürasyonundan çok daha etkili olduğunu açıkça göstermiştir.

Bousselham ve Chaallal(2013), Hem betonun hem de CFRP'nin katkıda bulunduğu kesme dayanımının kiriş boyutundan ne ölçüde etkilendiği konusunda deneysel çalışma yapılmıştır. 12 adet tablalı betonarme kiriş, geometri bakımından benzer ancak boyut olarak farklı olduğu için iki seri ile hazırlanmış, dökülmüş ve test edilmiştir. Birinci serinin kirişlerinde faydalı yükseklik d = 350 mm iken, ikinci serinin kirişlerinde faydalı yükseklik d = 175 mm idi. Test sonuçları, etriye olmadan ve CFRP levhalar ile kesme bölgesinde güçlendirilmiş kirişin kesme dayanımının kiriş boyutundan etkilendiğini göstermiştir.

Panigrahi ve ark. (2014), GFRP levhalarla dışarıdan güçlendirilmiş 12 tablalı betonarme T-kirişin kesme performansı deneysel olarak incelenmiştir. Tüm kirişler 1300 mm açıklığa sahip kesme açısından yetersiz olan kirişler olarak tasarlanmış ve dört noktalı sistem altında test edilmiştir. Kesme performansını araştırmak için farklı GFRP şerit konfigürasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar, GFRP levhaların kullanımının tablalı betonarme kirişlerin kesme kapasitesini artırmaya yardımcı olduğunu kanıtlamıştır. Ayrıca, ankraj kullanımının lif levhalarının ayrılmasını önlediğini de göstermiştir.

Baggio ve ark. (2014), deneysel olarak üç farklı tip FRP'nin (CFRP, GFRP ve FRCM) uygulanmasını incelemiştir. Ankaraj tekniği, CFRP ve GFRP olmak üzere iki tür FRP'den de kullanılmıştır. Dokuz ince kesme yetersiz olan betonarme kirişler hazırlanmış ve dökülmüş, bunlardan biri kontrol kirişi olarak seçilmiş ve geri kalanı aşağıdaki şekilde güçlendirilmiştir: Numunelerden ikisi, ankraj kullanılarak veya ankarajsız U şeklinde CFRP şeritlerle sargılanmıştır. Ayrıca ankraj sistemi kullanılarak ve ankraj sistemi kullanılmadan numunelerden ikisi FRCM ızgaralarla sargılanmıştır. örneklerin dördü ya tamamen sarılmış ya da kısmen U-sargı GFRP şeritlerle, Ankraj sistemini kullanılarak ve ankraj sistemi kullanmadan sargılanmıştır. Testlerin sonuçlarından, kullanılan üç tipin de FRP kullanımının incelenen numunelerde, kesme kapasitesindeki artışa bağlı olarak kesme hasarından eğilme hasarına kadar hasar modunu değiştirdiği bulunmuştur. Ankrajların varlığı nedeniyle, FRP şeritlerinin betonun dış yüzeyinden ayrılması gecikti, bu da ankraj sisteminin uygulandığı kirişlerin kesme kapasitesinin ve sünekliğinin artmasına ve iyileştirilmesine yardımcı olmuştur.

El-Saikaly ve ark. (2014), T-kesitli tablalı betonarme kirişlerin kesmesine CFRP iplerin uygulanmasının etkisini ve bu tip ankraj tekniğinin, kullanılan bu tip ankraj sistemini içermeyen kontrol kirişine göre kesme kapasitesini iyileştirmedeki faydasını incelemiştir. Bu çalışmanın uygulanması için çelik üzengi demirlerini düzenleme yöntemine dayalı olarak üç seri numune yapılmıştır. İlk seri çelik üzengi içermiyordu, ikinci kiriş serisi 260 mm aralıklı çelik üzengi demirleri içeriyordu ve üçüncü seri için 175 mm aralıklıydı. Her seriden, kesme güçlendirilmesi için harici CFRP tabakaları olmayan bir numune kontrol kirişi olarak kabul edilmiştir. Bu deneysel çalışmada, her seri, CFRP levhalarla güçlendirilmiş bir kiriş, sadece L şeklindeki CFRP şeritlerle güçlendirilmiş bir kiriş, L şeklinde CFRP şeritlerle güçlendirilmiş bir kiriş ve karbon fiber ipler kullanılarak ankraj sisteminden oluşmuştur. 4520 mm uzunluğunda, 406 mm

toplam yüksekliğinde, 508 mm flanş genişliğinde, 102 mm flanş kalınlığında ve gövdenin genişliği 152 mm iken, on iki betonarme T-kiriş tasarlanmış ve hazırlanmıştır. Testlerin sonuçlarından, ip tekniğini ankraj olarak kullanmanın kesme kapasitesini artırmanın yanı sıra CFRP L-şeritlerinin aıyrılmasını önlemede faydası kanıtlanmıştır.

Kim ve ark. (2015), Dokuz tablalı betonarme derin T kesitli kirişin kesme dayanımını incelemiştir. Test, farklı konfigürasyonlara sahip harici CFRP levhalar ve CFRP ankrajlar kullanılarak kesme bölgesinde güçlendirilmiş 8440 mm uzunluğunda, 356 mm gövde genişliğinde, 533 mm flanş genişliğinde ve 1220 flanş derinliğinde kirişler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, daha küçük enine çelik oranına sahip kirişlerde, CFRP şeritlerinin kesme mukavemetine olan paylaşımının daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Panda ve ark. (2015), U-sargılı GFRP levha ile dışarıdan güçlendirilmiş tablalı betonarme T kesitli kirişin şekil değiştirme analizi üzerine deneysel bir araştırma yapmıştır. Bu deneysel çalışma için kullanılan kiriş uzunluğu 2.500 mm idi. 18 kiriş dökülmüş ve bunlardan 9 tanesi sargısız, üç farklı etriye aralıklı kontrol kirişi olarak kabul edilmiştir. Kalan dokuz kiriş, tablalı betonarme T-kirişinin U-konfigürasyonunda kesme bölgesinde bir, iki veya üç tabaka CFRP şeritleri ile harici olarak güçlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, tek tabakalı CFRP şeritlerle güçlendirilen kirişteki şekil değiştirmenin, test edilen tüm örneklerde iki ve üç tabakala güçlendirilenlerden daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Kannan ve Anu (2015), bu çalışmada, kesme donatısında eksik olan T-kesitli tablalı betonarme kirişlerin güçlendirilmesi için çeşitli konfigürasyonlar kullanılmıştır. On sekiz adet tablalı betonarme T-kirişi etriye olmadan dökülmüş ve test edilmiştir. İki kiriş kontrol kirişi olarak kabul edilirken, geri kalan kirişler farklı GFRP levhaları şemalarıyla harici olarak güçlendirilmiştir. Test, dört noktalı yükleme sistemi ile gerçekleştirildi ve yükleme, numunenin hasar olduğu noktaya kadardı. Numunelerin sargılaması, U-sargılama ve yan yapıştırma olmak üzere iki şema ile gerçekleştirilmiştir. Kontrol kirişiyle karşılaştırıldığında, test sonuçları U- sargılama şemasının kesme kapasitesinde iki taraflı şemaya göre daha etkili olduğunu göstermiştir. Kontrol kirişiyle karşılaştırıldığında kesme mukavemetindeki artış, yan bağlanmış sargılı numuneler için % 33 ve U-sargılı numuneler için % 46'dır.

Chen ve ark. (2016), toplam 11 tam ölçekli T kesitli kirişin deneysel bir araştırmasını incelemiştir. Örnekler, keme dontılı ve kesme donatısız olarak iki tip seri halinde gerçekleştirilmiştir. Her seriden bir kiriş seçilmiş ve kontrol kiriş olarak kabul edilmiştir. Karşılaştırma yapmak için, bir numune sadece CFRP U-şeritleri ile güçlendirilirken, diğer kirişler CFRP U-şeritleri ve çeşitli yeni ankaraj sistemleri ile güçlendirilmiştir. Sonuçlar, hem fiber ankrajların hem de mekanik ankrajların, FRP'nin güçlendirme etkisini önemli ölçüde artırdığını ve hasar modunu, ayrılma hasarından kopma hasarına değiştirdiğini göstermiştir. Test sonuçları, ankrajların güçlendirilmiş kirişlerin, özellikle uç ankrajların sünekliğini önemli ölçüde artırabildiğini göstermiştir.

Panda ve ark. (2016), yandan yapıştırılmış GFRP levha kullanılarak dıştan güçlendirilmiş tablalı betonarme T kesitli kirişin kesme performansını incelemiştir. Deneysel çalışma için kullanılan kiriş uzunluğu 2500 mm'dir. 18 kiriş dökülmüş ve bunlardan 9 tanesi sargısız, üç farklı etriye aralıklı kontrol kirişi olarak kabul edilmiştir. Kalan dokuz kiriş, betonarme T-kirişinin gövdenin yan tarafındaki kesme bölgesinde bir, iki veya üç tabaka CFRP şeritleriyle harici olarak güçlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, yan bağlı şema ile sargılanmış GFRP levha kullanılarak kesme bölgesinde güçlendirilen numunenin etkinliği (Vn, test / Vn, teo.)% 12,5 ila% 50 artırdığını göstermektedir.

Foster ve ark. (2016), CFRP levhalarla harici olarak bağlanmış on beş tablalı betonarme kirişin deneysel olarak performansını incelemiştir. Kirişler 720, 540 ve 360 mm olmak üzere üç farklı derinlikte gerçekleştirilmiştir. Kirişler iki konfigürasyonla güçlendirildi: ankrajsız harici olarak bağlanmış sürekli U-sargılı CFRP levhaları ve yüzeye yakın monte (NSM) CFRP levhaları ankraj sistemi. Tüm güçlendirilmiş numuneler, CFRP levhalarının beton yüzeyinden ayrılmasıyla hasar oldu. Test sonuçlarından ve hasar modlarını gözlemleyerek, ankraj sisteminin kullanıldığı kirişlerde, ankraj sisteminin kullanılmadığı kontrol kirişine veya güçlendirilmiş kirişe göre kesme kapasitesinde artış gözlenmiştir.

Keskin ve ark. (2017), bu deneysel araştırma, fiber takviyeli polimerler (CFRP) kullanarak kesme bölgesindeki betonarme kirişleri güçlendirmek için kullanılan CFRP şeritleri kirişlerin etrafına iki kat halinde tam sargı olarak güçlendirilmiştir. Kirişler, 1400 mm uzunluğunda, 230 mm yüksekliğinde ve 150 mm genişliğinde ve bir dikdörtgen şekile sahip olacak tasarlanıp dökülmüştür. Tüm numuneler, 16 mm çapında

2 adet çubuk, etriyesiz ve sadece çekme bölgesinde donatı kullanılarak yapılmıştır. Test sonuçlarından, betonarme kirişlerinin mukavemetinin ve sünekliğinin, rijitlik üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı halde CFRP güçlendirmesiyle iyileştirilebileceği gözlenmiştir.

Nguyen-Minh ve ark. (2018), toplam 22 T kesitli kirişin deneysel bir araştırmasını incelemiştir. Bu deneysel çalışma, CFRP U-sargılar ile güçlendirilmiş bağlanmamış ardgermeli beton kirişlerin kesme davranışını araştırmaktadır. Bu çalışmada, numuneler her grup için farklı beton basınç dayanımları olan üç gruba ayrılmıştır. Numuneler ayrıca her grup için farklı bir kiriş kesme açıklığı / kiriş faydalı yüksekliği oranı ile incelenmiştir. Tablalı kiriş 3500 mm uzunluk, 500 mm toplam yükseklik, 300 mm flanş genişliği, 80 mm flanş kalınlığı ve gövdenin genişliği 120 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Kirişler dört nokta eğilme testi altında test edilmiştir. Testlerin sonuçlarından, FRP U-sargı veriminin, kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranının azalmasıyla büyük ölçüde azaldığı gözlenmiştir.

Gemi ve ark. (2019), Bu deneysel çalışmada, CFRP kumaşlar ve dört farklı güçlendirme şeması ile dışarıdan güçlendirilmiş prefabrike beton aşıklar için kesme kapasitesi ve hasar modları incelenmiştir. Aşıklar 3200 mm uzunluğunda, 300 mm yüksekliğinde ve 30 MPa basınç dayanımına sahip olacak şekilde tasarlanıp dökülmüştür. Biri kontrol aşığı olarak kabul edilen beş aşık üretildi ve dört aşığın geri kalanı kesme bölgesinin uçlarına farklı güçlendirme şemalarına sahip CFRP kumaşlarla sarılanmıştır. Testlerin sonuçları, uçlarında karbon fiber (CFRP) ile dıştan güçlendirilmiş aşıklar, özellikle tamamen sargılanmış olanların kesme kapasitesinin arttığını kanıtlamıştır.

Oller ve ark. (2019), CFRP levhalar ile kesme bölgesinde harici olarak güçlendirilmiş iki ana donatı oranına sahip 10 adet tam ölçekli tablalı betonarme T-kiriş üzerinde deneysel olarak çalışılmış, farklı miktarlarda gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemelerin uygulanması, mekanik bir ankraj sistemi ile veya olmadan, sürekli veya süreksiz U-şekilli bir düzenlemede harici olarak güçlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, karbon fiber takviye yüzdesine bakılmaksızın, ankrajlı fiber levhalar kullanılarak harici güçlendirmenin etkisinin, onsuz olduğundan daha etkili olduğunu göstermiştir. Lif şeritlerinin sonunda ankrajların varlığı, liflerin beton yüzeyden ayrılmasını geciktirir veya önler, bu da iyi bir verimlilik göstermektedir.

Mhanna ve ark. (2019), iki tablalı betonarme T-kiriş ve dört betonarme dikdörtgen kirişin kesme performansı deneysel olarak incelenmiştir. Tablalı kirişlerden biri U-Sargılar ile güçlendirilmiş ve diğeri kontrol kirişi olarak kabul edilmiştir. Buna karşılık, dikdörtgen kesitli kirişler söz konusu olduğunda, bunlardan üçü tamamen sargılanmış CFRP levhalarla güçlendirilirken, dördüncüsü bir referans kiriş olarak kabul edilmiştir. Deneysel testin sonuçları, U-şeklinde sargılanmış CFRP tabakaları konfigürasyonuna sahip güçlendirilmiş kirişin, kontrol kirişinden% 114.82 daha fazla kesme mukavemetinde artış olduğunu açıklamıştır. Aynı zamanda, tamamen sargılanmış numunelerin kesme mukavemetindeki artışın,% 201 oranında güçlendirilmemiş kontrol kirişinden daha fazla olduğu açıklanmıştır. Dahası, test sonuçlarından, tamamen sargılama konfigürasyonu yöntemiyle harici olarak güçlendirilmiş kirişin sünekliğindeki artışın miktarının, U-şekilli sargılama konfigürasyonunda harici olarak güçlendirilmiş T-kirişinin sünekliğinden çok daha fazla olduğu bulunmuştur.

Aksoylu ve ark. (2020), deneysel olarak incelenen dikdörtgen kesme kapasitesi yetersiz olan, farklı dairesel deliklere sahip betonarme kirişler, iki yöntemle CFRP levhalar ile tamamen güçlendirilmiştir. 2.500 mm uzunluğunda ve 250 mm derinliğinde 11 adet dikdörtgen kesitli kesme açısından yetersiz olan betonarme kiriş dökülmüş ve dört noktalı statik yükleme sistemi altında incelenmiştir. Bu deneysel çalışmanın amacı iki şeyi doğrulamaktı: Birincisi, delik çapının kirişin yüksekliğine oranının, kesme yetersiz olan betonarme kirişin kapasite taşıma yüküne etkisidir, ve ikincisi, farklı konfigürasyonlarda uygulanan CFRP levhalarının, deliklerin varlığı nedeniyle elemanın orijinal kapasitesindeki zayıflığı telafi etmede etkinliğini doğrulamaktı. İnceleme ve analizinin sonuçlarından, CFRP güçlendirmesinin her zaman kiriş kapasitesini geri yükleyemeyeceği ve orijinal durumuna döndüremeyeceği sonucuna varılabilir(deliklerin varlığı olmadan). Ayrıca, karbon fiberin etkililik seviyesi esas olarak kirişteki deliğin çapına bağlıdır. Dahası, bu deneysel çalışma, kiriş çapının kiriş derinliğinin 0.64'ünü aşması durumunda, delik alanının tamamen güçlendirilmesini şart koşan ikinci güçlendirme şemasının en iyi seçenek olduğu ve daha iyi bir etkiye sahip olduğu sonucuna varmıştır.

Razaqpur ve ark. (2020), altı büyük ölçekli tablalı betonarme kirişini test etmek için deneysel bir araştırma yapmıştır. Dört noktalı eğilme altında, 4500 mm açıklığa, 400 mm yüksekliğe ve 500 mm flanş genişliğine sahip bir kiriş incelenmiştir. Kontrol kirişleri olarak, iki kiriş güçlendirilmeden işlendi, bir kiriş laminatla ankrajsız ve üç

kirişin geri kalanı CFRP π-ankrajları kullanılarak sabitlenmiştir. Bu deneysel araştırmada testlerin sonuçları 30 ankrajlı kirişlerden birinin ankrajsız numunelere göre ayrılma yükünde yaklaşık% 46 artış sağladığı gösterilmiştir. Bulgular, π-ankraj sisteminin olumlu etkisini ve betonarme kirişin güçlendirilmesinde faydalı bir yöntem olarak kalın ve güçlü laminatların verimli bir şekilde kullanıldığını göstermektedir.

Shahriari ve Naderpour (2020), bu deneysel analitik çalışmada, kesme yetersiz olan kirişlerin ve farklı güçlendirme konfigürasyonlarına sahip CFRP levhalar ile harici olarak güçlendirilmiş kirişlerin güvenilirliği incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Dikdörtgensel enine kesite sahip dört kesme yetersiz olan betonarme kiriş tasarlanmış ve toplam 2800 mm uzunluğunda, 250 mm genişliğinde ve 450 mm derinliğinde dökülmüştür. Kirişlerden biri kontrol kirişi olarak seçildi ve geri kalan üçü farklı konfigürasyonlarda, tamamen sargılanmış, U şeklinde ve yandan yapıştırılmış CFRP levhalarla harici olarak güçlendirilmiştir. İnceleme sonuçlarının bulgularından ve analizlerinden, diğer şemaların geri kalanına kıyasla tam sargılama şemasının en az güvenilir değişken olduğu bulunmuştur.

Sarıbıyık ve ark.(2020), çeşitli sargılama konfigürasyonları kullanılarak BFRP levhalarla dışarıdan güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme performansını deneysel olarak incelemiş ve araştırmıştır. Bu deneysel ve analitik çalışmada dikdörtgen kesitli dokuz betonarme kirişler tasarlanmış ve dökülmüştür. Toplam uzunluğu 2000 mm, genişliği 150 mm ve yüksekliği 250 mm olan kirişler hazırlanmış ve dökülmüştür. Bir kiriş ayarlanmış ve seçilmiş ve kontrol kirişi olarak kabul edilmiştir. Kalan sekiz kiriş, farklı sargılama şemalarına sahip BFRP şeritleri kullanılarak harici olarak güçlendirilmiştir. Test sonuçları ve analizlerinden elde edilen bulgulardan, bazalt lif (BFRP) şeritleri ile güçlendirilen tüm kirişlerin kesme kapasitesinin, kontrol kirişinin kesme kapasitesine kıyasla önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Uygulanan diğer güçlendirme şemalarının arasında en iyi sonuçların şerit ve levhalarla tamamen sargılanmış örneklerde olduğu da fark edilmiştir.

Zaki ve ark. (2020), farklı ankraj sistemli CFRP levhalar ile güçlendirilmiş tablalı betonarme T-kesitli kirişler için eğilme incelemesi gerçekleştirmiştir. Beş adet T-kesitli tablalı betonarme kiriş hazırlanmış, dökülmüş ve test edilmiştir. Kirişlerden biri seçilmiş ve kontrol kirişi olarak kabul edilmiş ve kalan dört kiriş CFRP şeritleri ile güçlendirilmiş ve birkaç farklı ankaraj yöntemi uygulanmıştır. Tablalı kiriş 2000 mm

uzunluk, 305 mm toplam yükseklik, 406 mm flanş genişliği, 102 mm flanş kalınlığı ve gövdenin genişliği 152 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Testin sonuçlarından, kesme bölgesinde ankrajların varlığının etkili olduğu kanıtlanmıştır. Süneklik, ankrajlar arasındaki mesafeden ve ayrıca ankrajların sayısından etkilenmiştir, bu da CFRP şeritlerinin ayrılmasıyla sonuçlanmıştır.

Chalioris ve ark. (2020), betonarme tablalı kirişlerin üç tarafına U-mantolama olarak dıştan yapıştırılmış EB-CFRP sargılamasının uygulanmasını incelemiştir. Kesme bölgesinin tamamı da sargılanmıştır. Bu deneysel çalışmayı gerçekleştirmek için beş adet tablalı betonarme kiriş hazırlanmış ve dökülmüştür. Betonarme kirişler 1400 mm uzunluğunda tasarlanmış ve T şeklindeki enine kesitin boyutları, 300 mm flanş genişliği, 50 mm flanş kalınlığı, toplam 200 mm derinlik ve 150 mm gövde genişliği ile tasarlanmıştır. Kirişlerden biri kesme takviyesi için etriye ile, ikincisi etriyesiz gerçekleştirilmiş ve kontrol kirişi olarak kabul edilmiştir. Kalan üç kiriş, kesme alanı boyunca U şeklindeki CFRP levhalarla harici olarak güçlendirilmiş ve sargılama işleminden sonra bunlardan birine ankraj sistemi uygulanmıştır. CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin incelenmesinin sonuçları, kontrol kirişinden (güçlendirilmemiş) daha büyük olan kesme mukavemeti miktarını göstermiştir. Ayrıca, ankrajların varlığının, karbon fiberin beton yüzeyinden ayrılmasını geciktirdiğini de göstermiştir.

Madotto ve ark. (2021), BFRP kompozit malzemelerle güçlendirilmiş 7 tam ölçekli betonarme kirişin kesme ve eğilme kapasitesinin deneysel bir incelemesini yapmıştır. Bu deneysel çalışmada 2400 mm uzunluğunda, 250 mm yüksekliğinde ve 200 mm genişliğinde betonarme kirişler dökülerek hazırlanmıştır. Sonuçlar aracılığıyla ve güçlendirilmiş kirişlerin muayenesinin sonuçlarının güçlendirilmemiş kirişin sonuçlarıyla karşılaştırılarak, güçlendirilmiş kirişlerin kesme kapasitesinde önemli bir yüzde ile artış gözlemlenmiş, bu da BRFP kompozitlerinin betonarme kirişlerin güçlendirilmesindeki etkinliğini teyit etmektedir.

Tablo 2.1. Güçlendirilmiş Betonarme Kirişler Üzerine Deneysel Çalışmalar.

Yazarlar	Yıl	Numune sayısı	Özellikler ve Parametreler																						
			Geometri					Kiriş tipi			Beton ve Donatı				FRP tipi					Güçlendirme Şeması						
			Dikdörtgen kesit	T kesit	Kiriş açıklığı L< 7 ft	Kiriş açıklığı 7 ft < L< 13 ft	Kiriş açıklığı L >13 ft	Düzenli Kirişler (a/d >2.5)	Derin Kirişler	Ölçek Etkisi	Beton Basınç Dayanımı (Mpa) 28 gün	Boyuna çekme donatı (mm)	Etriye donatısının çapı (mm)	Karbon	Aramid	Cam	Bazalt	İki taraflı yapıştırma	U-ceket yapıştırma	Tam sargı	Sürekli sargı	Şeritler	NSM Yakın Yüzeye Monteli	Şeritlerin yapıştırma açıcı =90 °	Şeritlerin yapıştırma açıcı ≠ 90°	Ankaraj
A. Deifalla ve A. Ghobarah.	2010	6		■		■				■	25.6	4∅20	∅10 @70	■					■	■	■			■			■
S. ALTIN ve ark.	2010	10		■			■	■			25	3∅20	∅6@ 300	■					■			■		■			■
Khaled Galal ve Amir Mofidi	2010	3		■		■				■	42	2∅25	∅10 @250	■					■		■			■			■
H.K. Lee ve ark.	2011	14		■	■				■		22.45	4∅22	∅6	■				■	■					■	■		■
A. Belarbi ve ark.	2012	8		■			■	■			27.6	12∅16	∅10 @305	■					■			■		■			■
Yungon Kim ve ark.	2012	24		■			■	■			23-27	10∅29	∅10 @255	■					■			■		■	■		■
K.C.Panda ve ark.	2013	18		■		■		■			39-43	2∅20	∅6@ 300			■		■	■		■			■			■
A. Bousselham, O. Chaallal	2013	12		■				■			24-27	4∅25 2∅10 +2∅ 15	∅8@ 175	■					■					■			
A.K. Panigrahi ve ark.	2014	12		■	■					■	22-25	2∅20 +1∅ 10	∅8@ 250			■		■	■		■	■		■	■		■

D. Baggio ve ark.	2014	9									50.7	2∅30	∅6@ 180															
G. El Saikaly ve ark.	2014	12									28	4∅25	∅8@ 260															
Y. Kim ve ark.	2015	9									27	12∅ 32	∅10 @254															
K.C. Panda ve ark.	2015	18									30	2∅20	∅6@ 300															
Kannan R Ms. Anu A.	2015	18									25	2∅10	∅6@ 300															
G.M. Chen ve ark.	2016	11									43	4∅28	∅8@ 200															
Panda ve ark.	2016	18									41	2∅20	∅6@ 200															
Robert M. Foster ve ark.	2016	15									55-65	6∅32	∅8@ 360															
R.S.O. Keskin ve ark.	2017	9									21,39	2∅16	-----															
L.Nguyen-Minh ve ark.	2018	22									38.3 55.5	2∅25	∅6@ 300															
L. Gemi, ve ark.	2019	5									30	2⌀9+ 1⌀8	∅8@ 250															
E. Oller ve ark.	2019	10									33.9 39.2	8⌀16 4⌀16+ 4⌀20	Ø6@ 240															
Haya H. Mhanna ve ark.	2019	6									45.9	4∅16	∅8@ 80															
C.Aksoylu ve ark.	2020	11									35	2⌀14 +1⌀ 12	Ø6@ 250															
A.G. Razaqpur, ve ark.	2020	**6**									59.34	3⌀16	Ø10 @ 150															
S. Shahriari ve H. Naderpour	2020	4									21	4⌀22 +2⌀2 0	∅8@ 200															
A.Saribiyik ve ark..	2020	**9**									16.9	3∅18	∅8@ 200															

M.A. Zaki, ve ark.	2020	**5**									38	2⌀16	Ø10@ 127													
Constantin E. Chalioris ve ark.	2020	**5**									35.15	4∅16	Ø4@ 150													
R. Madotto ve ark.	2021	**7**									53.5 31.7	2∅30	∅10 @ 200													

Not : (a/d) = a = Kiriş kesme açıklığı ; d= Kiriş faydalı yüksekliği ; L: Kiriş uzunluğu ; ∅ = Donatı çubuğunun çapı

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Giriş

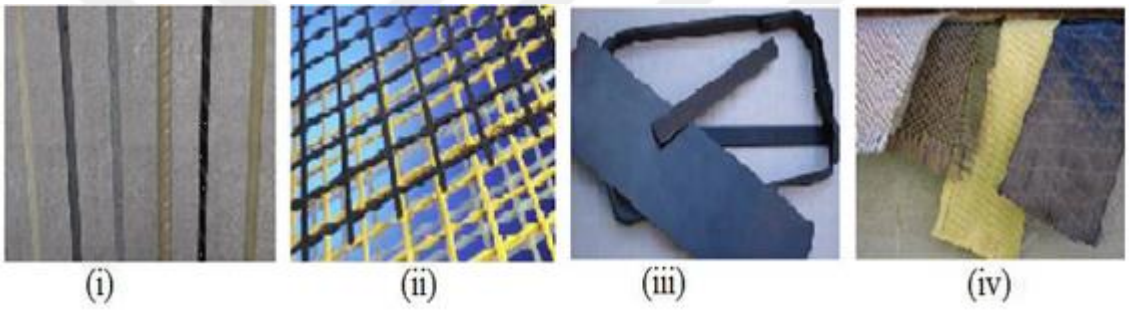
Yapılan deneysel güçlendirme çalışmalarının amacı, kesme açısından yetersiz olan tablalı betonarme kirişlerin dış yüzeyine farklı konfigürasyonlarla yapıştırılan CFRP'nin, kiriş kesme performansı ve hasar modları üzerindeki etkisini araştırmaktır. Bu hedeflere ulaşmak için, dokuz adet kesme donatısı yetersiz tablalı betonarme kiriş üretilmiştir. Tüm numunelerin üretimi, Konya Teknik Üniversitesi yapı ve deprem laboratuvarlarında hazırlanan kalıplara önce donatıların sonra da betonun yerleştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Mevcut deneysel araştırmada, tüm tablalı kirişler, dört noktalı yükleme altında test edilmiştir. Tüm kiriş deneylerinde kesme açıklığı/faydalı yükseklik oranı (a/d) 3 olarak dikkate alınmıştır. Deneysel çalışma iki numune için farklı açılarda ankraj kullanımı ve farklı tasarımlarda karbon fiberlerin kiriş yüzeyine yapıştırılması ana değişkenler olarak dikkate alınmıştır. Uygulanan yükün betonarme T-kirişlerin dayanımı, rijitliği, sünekliği ve enerji tüketme kapasitesi üzerindeki etkisi araştırılmış, detaylı bir hasar analizi yapılmış ve elde edilen deneysel sonuçlar ACI 440.2R-08, TBEC-2019 ve FIB-2001'in vermiş olduğu ampirik bağıntılarla da karşılaştırılmıştır. Bu bölümde, bu tez çalışması için deneysel programın tüm detayları açıklanmıştır.

3.2. Kompozitler

Etimolojik olarak kompozit kelimesi Latince kökenili olup, "bir araya getirme" anlamına gelen bileşen olarak adlandırılı. FRP kompozitler sırasıyla lifler ve matris malzeme olmak üzere iki bileşenden oluşur. Bu kompozitler, spor ekipmanları, havacılık, otomotiv ve tıp alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. İnşaat mühendisliğinde kullanılan kompozitler ise farklı şekil ve konfigürasyonlara sahiptir. Betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesinde farklı fiber malzemelerle üretilen kompozitler kullanılmaktadır. Bunlar içerisinde Aramid Elyaf Takviyeli Polimerler (AFRP), Bazalt Elyaf Takviyeli Polimer (BFRP), Karbon Elyaf Takviyeli Polimerler (CFRP) ve Cam Elyaf Takviyeli Polimerler (GFRP) sayılabilir. Literatürde en yaygın kullanılanı ise CFRP malzemesidir. Diğer bir ifadeyle, belirtilen bu dört kompozit arasından CFRP uygulaması, rehabilitasyon ve güçlendirme pazarının %90-95'ine

sahiptir. Güçlendirme amacıyla geliştirilen kompozitler, farklı ölçülerde ve farklı doğrultularda elyaflara sahip olabilir. Kompozit malzemeler, mikroskobik düzeyde ayrı ve farklı fiziksel ve/veya kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla bileşenden üretilir.

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, yüksek çekme mukavemetine sahip elyaflardan ve yapısal malzemeyi üretmek için elyafları birbirine bağlayan reçineden oluşur. Yaygın olarak kullanılan reçine, elyafı kaplayarak koruyan, dayanıklılık sağlayan ve yükleme durumunda yükü elyaflara dağıtan epoksi reçinedir. Betonarme elemanların yapısal takviyesi ve rehabilitasyonu için kullanılan FRP kompozit malzemelerin, ticari olarak donatı çubuğu, ızgara, plaka ve kumaş olmak üzere çeşitli boyutları ve formları mevcuttur (Matthys, 2000). Şekil 3.1'de, FRP kompozitlerin farklı formları gösterilmiştir.



Şekil 3.1. FRP kompozitlerinin çeşitli boyutları ve formları; (i) FRP donatı çubuğu, (ii) FRP ızgaraları, (iii) FRP FRP plakaları ve şeritleri, (iv) FRP levhalar veya kumaşlar (FIB, 2007).

3.3. Elyaf Takviyeli Polimer (FRP)

FRP, genellikle yüksek çekme mukavemetine sahip liflerden ve optimum istenen özelliklere sahip yeni bir malzeme üretmek için lifleri birbirine bağlayan termoset veya termoplastik matristen oluşmaktadır. Genel olarak bir veya daha fazla yönde takviye işlevi sağlamak için yeterli bir en boy oranına (uzunluk/kalınlık) sahip karbon, aramid, cam ve bazalt lifler, polimerik matris (termoset veya termoplastik) ile birleştirilerek FRP kompozitler üretilir. FRP kompozit malzemeler, betonarme yapıların hızlı bir şekilde artan normal ve deprem yüklernine karşı rehabilite edilmesi ve güçlendirilmesi için uygun bir takviye elemanıdır ve aşağıda verildiği gibi birçok avantajları mevcuttur:

FRP'nin Avantajları

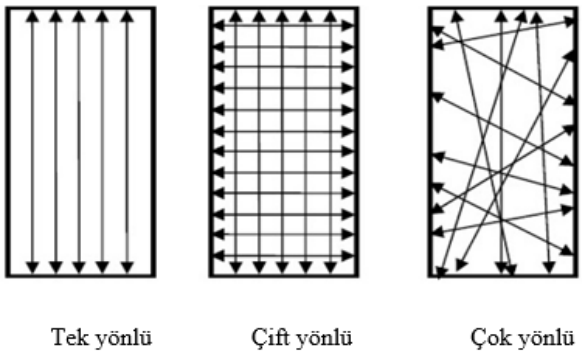
- Yüksek mukavemet-ağırlık oranı,
- Yüksek rijitlik-ağırlık oranı,
- Çeşitli kimyasallara dayanıklı,
- Tasarımda esneklik,
- HafifLİK,
- Korozyon direnci,
- Yüksek yorulma direnci,
- Kurulum kolaylığı,
- Düşük bakım maliyeti ve zamanı,
- Mükemmel dayanıklılık,
- Elektromanyetik geçirgenlik,
- Kalıp gerektirmez olması,
- Çeşitli formlarda mevcut olmaları: levhalar, şeritler, kumaş ve ızgara
- 24 saat içinde oda sıcaklığında kürlenmeleri.

FRP'nin dezavantajları

- Yüksek fiyat,
- Uzun süreli yükler altında deformasyona duyarlılık,
- Sıcaklık ve nem etkileri,
- Yangına ve ultraviyole ışınlarına karşı korunma ihtiyacı,
- Doğrusal davranış (ani kopma),
- Düşük ateş direnci,
- Ara yüzeyden ayrılma riski.

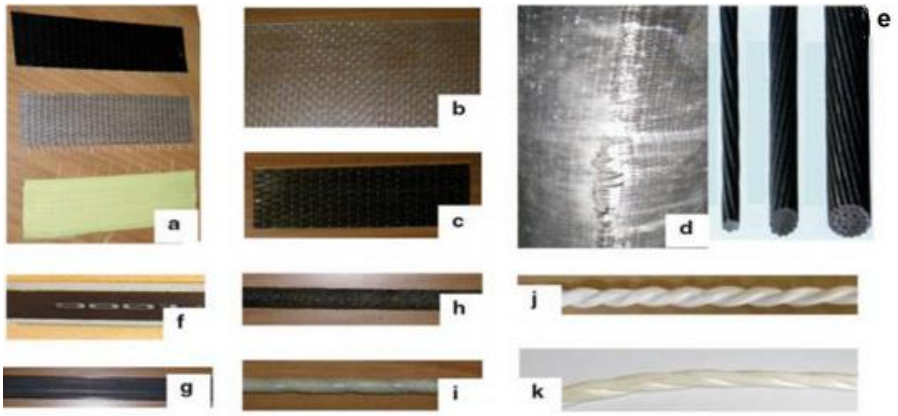
Kompozitlerin mekanik özellikleri, takviye elemanı olan lifl malzemesine, matris özelliklerine, lif yönüne ve lif miktarına bağlıdır. FRP sistemlerdeki lifler, lifleri birbirine bağlayan bir reçine matrisine gömülüdür ve Şekil 3.2'de gösterildiği gibi sırasıyla tek yönlü, çift yönlü ve çok yönlü olabilir. FRP kompozitler liflerin yapı içerisinde yönüne göre yük taşıyabilirler. FRP'ler yalnızca lif yönlerinde güçlüdür ve lifler betonarme kirişlerde kesme çatlaklarını kontrol etmek için uygun şekilde yönlendirilerek yüzeye yapıştırılmalıdır. Bir kirişteki kesme kuvveti ve eğilme momenti kapasitelerinin artırılması için FRP uygulaması farklı şekilde yapılmalıdır. Ayrıca

deprem yükleri gibi tersinir-tekrarlanır yükler altında, lifler betonarme kirişlerin her iki yönde kesme güçlendirmesi gerekliliğini karşılamak için iki farklı yönde düzenlenebilir. Bu anlamda, lifler bir, iki veya birden fazla yönde yerleştirilebilir. Elyaf yönlerinden birinin tam olarak kesme çatlağına paralel olması durumu haricinde, tekrarlı yükleme için güçlendirme gerekmese bile, iki yönde liflerin kullanılması, kesme direnci açısından açıkça uygun olabilir.



Şekil 3.2. Kompozitlerde lif yönleri

İnşaat sektöründe, E-, S- ve Z-cam, karbon, aramid ve bazalt lifler dahil olmak üzere dört ana lif türü kullanılmaktadır. Bununla birlikte, polimer matrisler (reçineler) iki gruba ayrılır: temoset ve termoplastikler. Termoset matrisler vinilesterler, epoksiler ve polyesterler olarak gruplandırılmaktadır. Termoset matrisler, ilave sertleştirici reçine veya yoğunlaştırma yoluyla polimerizasyonla oluşturulan çapraz bağlı polimerlerdir. Isı etkisi altında kürleşirler ve kürlenme işlemi sonuçlandığında belirli bir ısıya kadar yeniden ısıtıldığında veya çözücülerde erimez veya yumuşamazlar. Geliştirilmiş mekanik performansları nedeniyle daha yaygın olarak kullanılan termoset reçineler, liflerle daha iyi arayüzey oluşturma ve yapışma özelliklerine sahiptir. Termostlerin aksine, polivinil klorür, polipropilen, polietilen ve poliüretan gibi termoplastiklerin üretimi daha maliyetlidir ve çevre koşullarına karşı oldukça hassastır. Şekil 3.3 farklı FRP takviyelerini göstermektedir.



Şekil 3.3. Farklı FRP takviyeleri. Ek açıklamalar : a) tek yönlü karbon, cam ve aramid lif levhası, (b) kürlenmiş şeffaf çift yönlü GFRP levhası, (c) bazalt lif levhası , (d) kırık sınırlama GFRP ceketi, (e) CFRP tendonları, (f) CFRP laminat, (g) NSM için CFRP şerit, (h) CFRP çubukları, (i) GFRP çubukları, (j) polipropilen lifli ip, (k) vinylon ipi

3.3.1. Karbon Lif Takviyeli Polimer (CFRP)

CFRP kompoziti, en popüler takviye elemanı olması yanısıra en maliyetli olanıdır. Bununla birlikte, uygulamalarda hafiflik ile birlikte üstün mukavemet performans özelliklerinin kombinasyonu, maliyetin ikincil plana atılıp onu vazgeçilmez bir takviye elemanı haline getirmektedir. Karbon liflerin 5-10 μm arasında değişen küçük çapları vardır. CFRP kompozitler oldukça yüksek çekme mukavemetine ve mukavemet-ağırlık oranına sahip son derece hafif ve güçlü bir malzemedir.

CFRP kompozitlerde, yükü taşıyan karbon liflerdir ve matris genellikle lifleri bir arada tutan epoksi gibi bir polimer reçinedir. Karbon lifleri, karbon malzemelerden karbonizasyon, oksidasyon ve yüksek sıcaklıklarda (2500-3000°) grafitleştirme yoluyla üretilir (Örneğin cellulose, pitch, polyacrylonitrile). Yapıları güçlendirmek için genellikle iki tür karbon lif kullanılır,. Bunlar sırasıyla yüksek mukavemetli ve yüksek elastisite modülüne sahip olanlardır. Bu tip özellikler üretim sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Yorulma yüklemesi altında karbon lifler mükemmel performans gösterir. Ayrıca bu malzemeler çeşitli kimyasal maddelere dayanıklı olup su geçirmez özelliktedir. Yüksek karbon içerikleri nedeniyle elektriksel olarak iletkendirler ve çelikle doğrudan temas halinde galvanik korozyona neden olabilirler. Karbon elyaf anizotropik bir madde olduğu için, enine yöndeki elastikiyet modülü, uzunlamasına yöndeki esneklik modülünden daha küçüktür.

3.3.2. Cam Lif Takviyeli Polimer (GFRP)

Mukavemet/ağırlık oranı bakımından, cam elyaflar en güçlü malzemelerden biridir. Aynı zamanda fiberglas olarak da bilinen ve genel olarak kompozite ağırlıkça % 0,5-%2,0 oranında uygulanan cam fiberler, fiberglas takviyeli plastik olarak adlandırılır. S-cam elyaflar, E-cam ve alkaliye dayanıklı AR-cam elyaflar en yaygın biçimlerdir. Enine kesit çapı 5-24 μm arasında değişir. Cam lifler, yüksek sıcaklıkta (1600°) işlenmiş kaolin, kum, kolemanit ve kireçtaşı karışımından elde edilir. Cam, temelde bir tetrahedral (SiO_4) yapıya sahip silikondan (SiO_2) yapılır. İşlemi kolaylaştırmak veya birkaç özelliği değiştirmek için birkaç alüminyum oksit ve diğer metalik iyonlar farklı miktarlarda uygulanır (örneğin, S-cam lifleri, E-camdan daha yüksek bir çekme mukavemeti gösterir). Elastisite modülü (Young modülü), 70 ila 90 GPa arasında değişir. GFRP ayrıca son derece yüksek bir mukavemet/ağırlık oranına (9.67 kg/m^2 - 19.52 kg/m^2) sahip olmasıyla birlikte kimyasal etkilere, tuzlu suya ve alkali koşullara karşı dirence sahiptir. Bundan başka, GFRP mükemmel ısı yalıtım özelliğine, mükemmel ısı direncine ve CFRP'ye göre daha düşük maliyete sahiptir. Ek olarak, cam lifler genellikle köprüler, kubbeler ve bina çerçeveleri gibi yapısal elemanlarda kullanıldığı gibi yapısal olmayan yığma duvarlar gibi ikincil yapıların güçlendirilmesinde de kullanılmaktadır. Yüksek gerilme koşullarında gerilmeli korozyona uğrama riski, yorulma yüklemesi ve neme karşı hassasiyet gibi cam liflerinde çeşitli dezavantajları mevcuttur. Genellikle, cam lifler, aramid veya karbon liflerden daha düşük Young modülüne (E-cam için 70 GPa) sahiptir ve aşınma direnci nispeten zayıftır; bu nedenle bunların kullanımında dikkatli olunması gerekir.

3.3.3. Aramid Lif Takviyeli Polimer (AFRP)

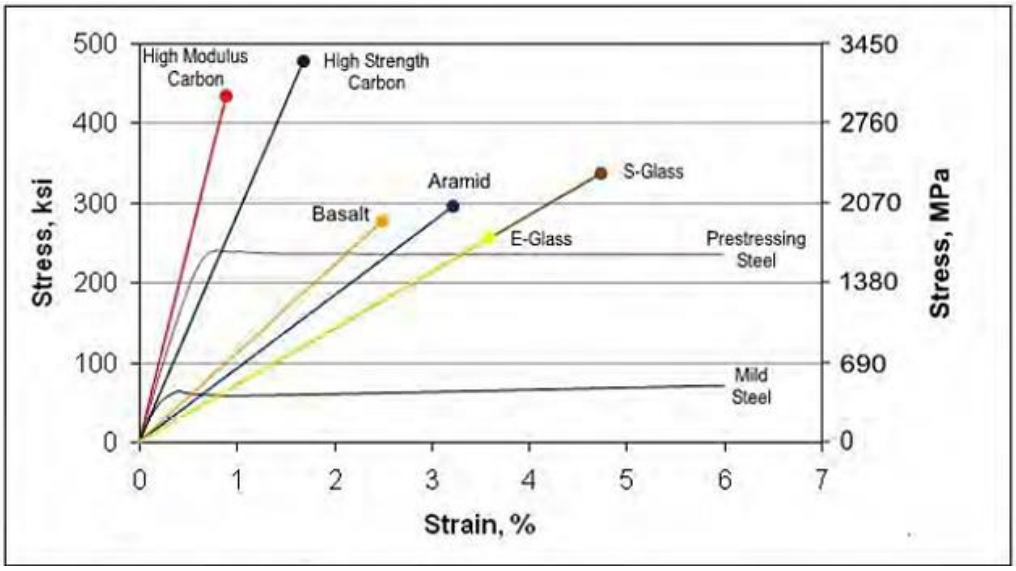
AFRP'ler, aramid lifler ile güçlendirilmiş en önemli kompozitlerden biridir. Aramid lifler güçlü sentetik (suni) liflere sahip, yüksek mukavemet ve elastikiyet modülüne, mükemmel ısı direncine, cam lifden % 40 daha düşük yoğunluğa ve biraz daha yüksek maliyete sahiptir. Aramid lif genellikle beton yapılarda kullanılır, ancak endüstriyel olarak, aramid liflerinin çok düşük basınç dayanımına ve yüksek çekme mukavemetine sahip olması nedeniyle, hafif yüklü yapılarda aramid lifin kullanımı sınırlıdır. Aramid lifler genel olarak, 3000 MPa'ya kadar oldukça yüksek çekme mukavemetine sahip organik sentetik lifler olan karakterize edilirler. Aramid lifler ateşe dayanıklıdır ve

yüksek sıcaklık seviyelerinde iyi performans gösterirler. Aramid lifler ısıl ve elektriksel olarak yalıtkandır, organik çözücülere, yağlayıcılara ve yağlara dayanıklıdır. Aramid liflerin özel performansları arasında, rijitlik/ağırlık ve mukavemet/ağırlık oranları gösterilebilir endüstriyel olarak bu performansları oldukça önemlidir .

3.3.4. Bazalt Lif Takviyeli Polimer (BFRP)

Bazalt lifler, çapı 10-20μm arasında oldukça ince liflerden oluşmaktadır. BFRP, yeni ve yenilikçi bir teknolojidir ve inşaat endüstrisi için GFRP çubuklarına bir alternatiftir. Bazalt lif malzemeleri, mukavemeti, ısıl iletkenliği, rijitliği, ısı direncini ve kimyasal ve fiziksel korozyon direncini iyileştirmeye yardımcı olabilecek FRP kompzit malzemelerde kullanılan takviye elemanlarından biridir. Hollaway (1993) 'e göre, tüm liflere uygulanan çekme yükleri, herhangi bir akma sergilemeden hasar noktasına kadar doğrusal bir elastik özellik sunar. Bazalt lifinin faydalarını hesaba katarak, genellikle yüksek yük taşıma özelliklerinden dolayı ağır otomotiv endüstrilerinde ve inşaat mühendisliğinde yapısal elemanların takviyesi için güçlendirme malzemesi olarak uygun kullanım alanları mevcuttur. Bazalt lifler, betonarme kirişleri güçlendirmek için yaygın olarak kullanılan daha maliyetli liflere nispeten uygun maliyeti ile yeni bir alternatif oluşturmaktadır. BFRP'ler genellikle yüksek çekme mukavemeti, kırılma uzaması ve alkaliye karşı ultra yüksek direnci ile bilinir.

İnşaat mühendisliğinde yapısal elemanların güçlendirilmesi için en yaygın olarak kullanılan liflerin çeliğe kıyasla gerilme- şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.4'te gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Çelik ve FRP'lerin Tipik Gerilme- Şekil değiştirme eğrisi (Kaynak: www.build-on-prince.com)

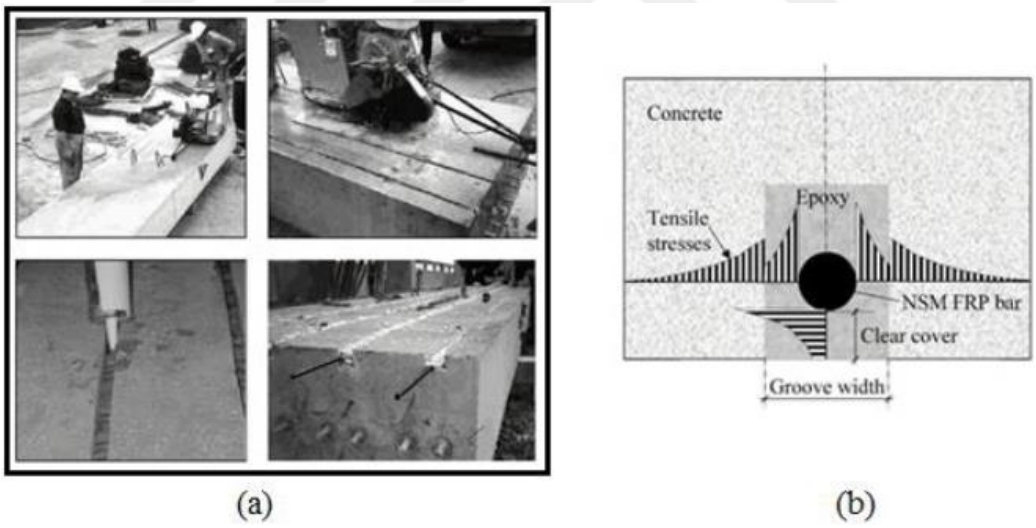
Ticari olarak temin edilebilen takviye liflerin özellikleri Tablo 3.1'de sunulmaktadır.

Tablo 3.1. FRP kompozit malzemeler için takviye liflerinin tipik özellikleri (FIB, 2007)

Lif türü / Özellik		Yoğunluk	Çekme dayanımı	Young modülü	Nihai çekme şekil değiştirmesi	Termal genleşme katsayı	Poisson katsayısı
		(kg/m^3)	(MPa)	(GPa)	(%)	(10^{-6}/°C)	
Cam	E-glass	2500	3450	72.4	2.4	5	0.22
	S-glass	2500	4580	85.5	3.3	2.9	0.22
	AR-glass	2270	1800-3500	70-76	2.0-3.0	-	-
	ECR	2620	3500	80.5	4.6	6	0.22
Karbon	High modulus	1950	2500-4000	350-650	0.5	-1.2…-0.1	0.20
	High strength	1750	3500	240	1.1	-0.6…-0.2	0.20
Aramid	Kevlar 29	1440	2760	62	4.4	-2.0 boyuna 59 radyal	0.35
	Kevlar 49	1440	3620	124	2.2	-2.0 boyuna 59 radyal	0.35
	Kevlar 149	1440	3450	175	1.4	-2.0 boyuna 59 radyal	0.35
	Technora H	1390	3000	70	4.4	-2.0 boyuna 59 radyal	0.35
	SVM	1430	3800-4200	130	3.5	-	-
Bazalt	Albarie	2800	4840	89	3.1	8	-

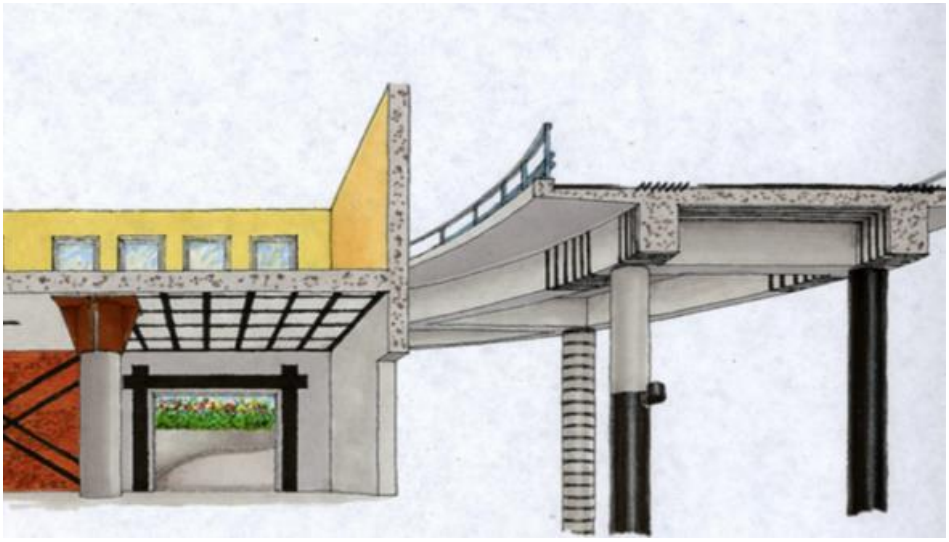
3.4. FRP Güçlendirme

Daha önce belirtildiği gibi FRP, inşaat yapılarının güçlendirilmesi için ideal bir seçimdir. FRP esas olarak kolonlar, kirişler, döşemeler ve duvarlar gibi yapısal elemanların eğilme dayanımını ve kesme kapasitesini artırmak için kullanılır. Beton kirişler, hem yatay yükleri (deprem veya rüzgar nedeniyle) hem de düşey yükleri taşımak üzere tasarlanan yapılarda ana unsurdur. Yapısal elemanlarda, harici FRP güçlendirme tekniği dıştan bağlanmış (Extarnally bonded, EB) olarak bilinirken, dahili FRP güçlendirme tekniği yakın yüzeye monte (near surface mounted, NSM) olarak bilinir. EB-FRP tekniği harici olarak sargı (tabaka) veya laminatlarda uygulanır, NSM-FRP tekniği ise FRP çubuklar veya laminatlar kullanılarak uygulanır. NSM-FRP tekniğinde, beton testere ile beton yüzeyinde açılan önceden kesilmiş oluklara veya yarıklara çubuklar veya laminatlar yerleştirilir ve FRP'yi betona Şekil 3.5'te gösterildiği gibi yapıştırmak için epoksi reçine ile doldurulur.



Şekil 3.5. NSM FRP çubukları ile uygulama metotlarının güçlendirilmesi ve belirli bir NSM FRP çubuğunun etrafındaki çekme gerilmesi dağılımı. (Rizkalla, et al., 2003).

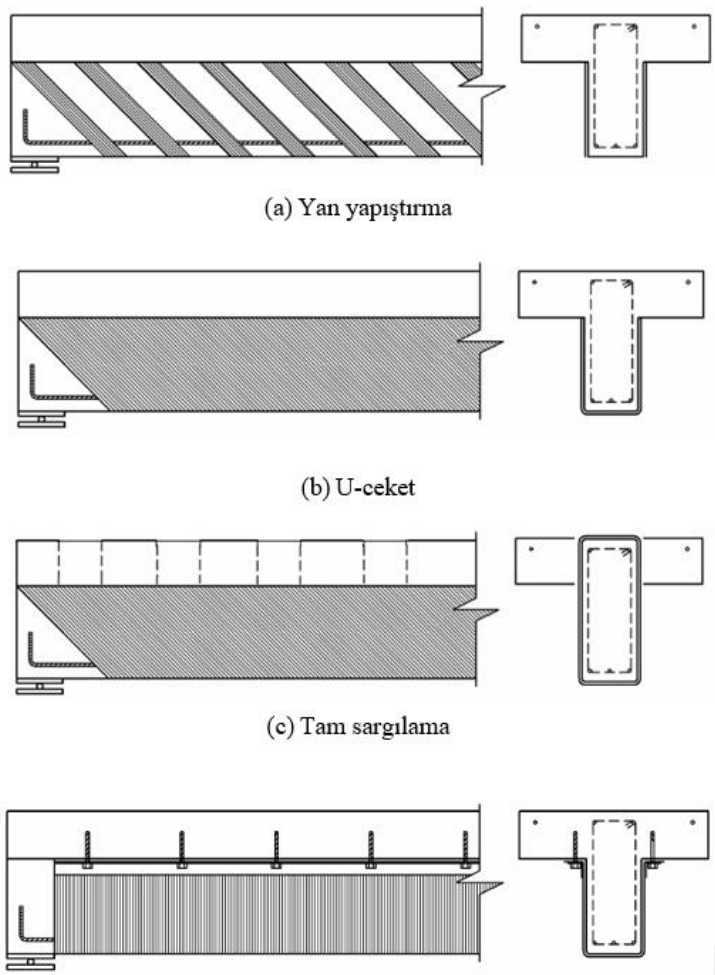
Lifli kumaşlar, FRP'nin toplam kalınlığını artırmak için birden fazla tabaka halinde de uygulanabilir. Bu araştırma, statik yükleme koşulu altında betonarme tablalı kirişlerin kesme davranışına harici olarak bağlanmış CFRP kompozitlerin katkısını incelemeye odaklanmaktadır. Farklı yapısal elemanlar Şekil 3.6'da görüldüğü gibi FRP kompozit malzemelerle güçlendirilebilir.



Şekil 3.6. Yapısal elemanlara uygulanan FRP (Täljsten, 2006)

3.5. Kesme Güçlendirilmesi

Bir betonarme kirişin kesme hasarı, eğilme hasarından belirgin bir şekilde farklıdır. Bir kirişin eğilme hasarı doğası gereği sünektir, oysa kesme hasarı gevrek ve ani kırılmalar şeklinde gerçekleşir. Bu nedenle, betonarme kirişlerin sünek bir hasar modunu sağlamak için eğilme dayanımından daha yüksek verimli bir kesme direncine sahip olması gerekir. Betonarme kirişin kesme kuvveti yetersiz olduğunda veya kesme kapasitesi eğilme kapasitesinden az olduğunda, kesme mukavemeti göz önüne alınmalıdır. Güçlendirme malzemesi olarak FRP, betonarme kirişlerin kesme kapasitesini artırmak için de kullanılmıştır. Özellikle, betonarme tablalı kirişlerin kesme direncini arttırmak için uygulanabilen, harici olarak bağlanmış FRP'nin Şekil 3.7'de gösterildiği gibi farklı konfigürasyonları vardır. Bunlar (a) FRP'nin kirişin yan yüzeylerine yapıştırılması, (b) U-şeklinde yapıştırılması, (c) Kirişin tüm enkesiti etrafına yapıştırılması ve (d) Ankrajlı U-şeklinde yapıştırma olarak sayılabilir.



Şekil 3.7. FRP kullanarak kesme güçlendirme konfigürasyonları (Täljsten'den sonra, 2006)

Lifin gelişmiş özelliklerine rağmen, FRP ile güçlendirilmiş bir yapısal eleman çok erken hasar görmüş olabilir ve liflerin ayrılmasına neden olabilir. Sonuç olarak, lif tam mukavemetine ulaşamaz. Bu nedenle, FRP kompozitin erken hasarını önlemek için U-ceketleme, mekanik bağlama, sivri uçlu ankrajlar ve hibrit ankraj teknikleri gibi çok sayıda ankraj sistemi geliştirilmiştir. Her ankaraj türü, uygulamaya bağlı olarak erken ayrılmayı geciktirecek iyileşmeye neden olmaktadır, ancak bu sorun inşaat mühendisleri için hala yeterince iyi çözülememiştir.

Bir güçlendirme uygulamasında üç kurala uyulmalıdır (Täljsten, 2006):

1. Uygulama yüzeyi yapıştırma için uygun bir şekilde hazırlanmalıdır. Bu gereksinim, uygulama alanın diğer malzemelerden arındırılması ve betonun ortaya çıkması ile karşılanır. Yüzey su, yağ veya tozdan temizlenmiş olmalıdır.
2. Güçlendirme sisteminin uygulanması amacıyla güçlendirilecek alanı çevreleyen ortamın sıcaklığı minimum 10°C olmalıdır. Yapıştırıcının optimum durumda

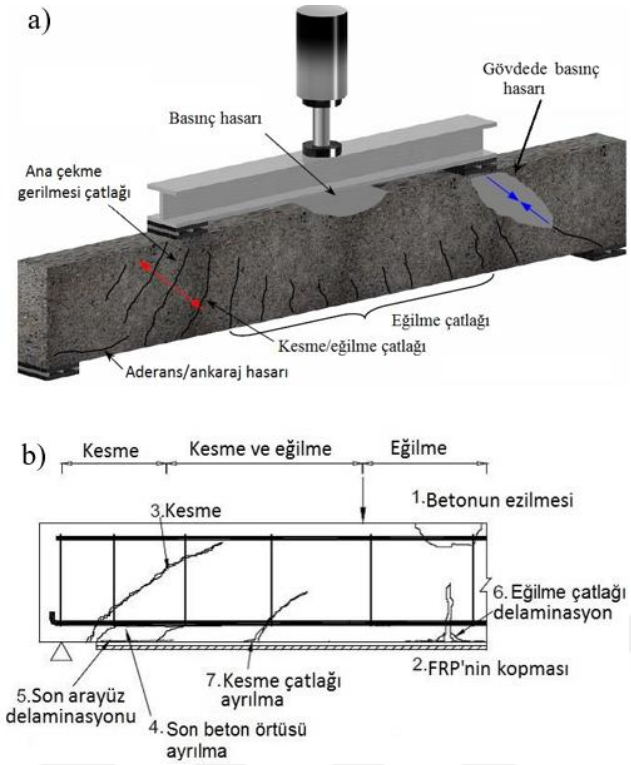
sertleşmesi için bu koşul yerine getirilmelidir. 10°C'nin altındaki sıcaklıklar için harici bir ısı kaynağı uygulanmalıdır.

3. Yapıştırma işlemi gerçekleştirildikten sonra kompozitin, uygulamanın yapıldığı yerlerde, yangına, saldırgan çevre koşullarına ve yoğun ısı radyasyonuna karşı korunması gerekir. Bunun için yangına dayanıklı boya, sıva veya uygun görülen diğer sistemler gibi çeşitli ticari malzemeler kullanılabilir.

3.6. FRP Güçlendirilmiş Kirişlerin Hasar Modları

Geleneksel betonarme kirişlerle karşılaştırıldığında, FRP ile güçlendirilen kirişler birçok hasar modu gösterir. Hasar modları iki gruba ayrılır. Birinci tür hasar, betonun ezilmesi ve ardından lif kopması gibi olağan hasar modlarıdır. İkinci tür hasar ise beton ve FRP arasında erken ayrılma (debonding) hasarının gözlenmesi sonucu FRP'nin tam kapasite çalışamamasıdır. Liflerle güçlendirilmiş kirişlerin harici olarak bağlanmış sistemle hasar modları Şekil 3.8, (a, b) ve Tablo 3.2'de özetlenmiştir. Lif ve beton arasındaki bağ mukavemetinin sınırı nedeniyle, lifle güçlendirilmiş kirişler, lifin veya betonun tam kapasitesine ulaşmadan genellikle erken hasar olur. Bu tür bir hasar önceden uyarı olmadan gerçekleşir. Her erken ayrılma hasar modunu anlamak için; çok sayıda deneysel çalışma yapılmıştır. Lif-beton ara-yüzünde bağlanma mukavemetini etkileyen çeşitli etken faktörler nedeniyle erken bağ hasarları için kesin mekanizma henüz gerçekleştirilmemiştir. Eğilme ve kesmede liflerle güçlendirilmiş betonarme kirişlerin deneysel çalışmalarında çeşitli göçme modları fark edilmiştir. Yapısal elemanın eğilme ve kesmedeki mukavemeti, esas olarak kontrol hasarı moduna bağlıdır. Harici olarak bağlanan liflerle güçlendirilmiş betonarme kirişler için beş hasar modu vardır. Bunlar eğilme ve kesme hasar modları olarak aşağıdaki gibi açıklanabilir:

1- Donatı çeliğinin akmasından önce betonun ezilmesi,
2- Çekme donatısının akması ve ardından FRP'nin kopması,
3- Çekmede donatının akması ve ardından betonun ezilmesi,
4- FRP'nin beton yüzeyden ayrılması.



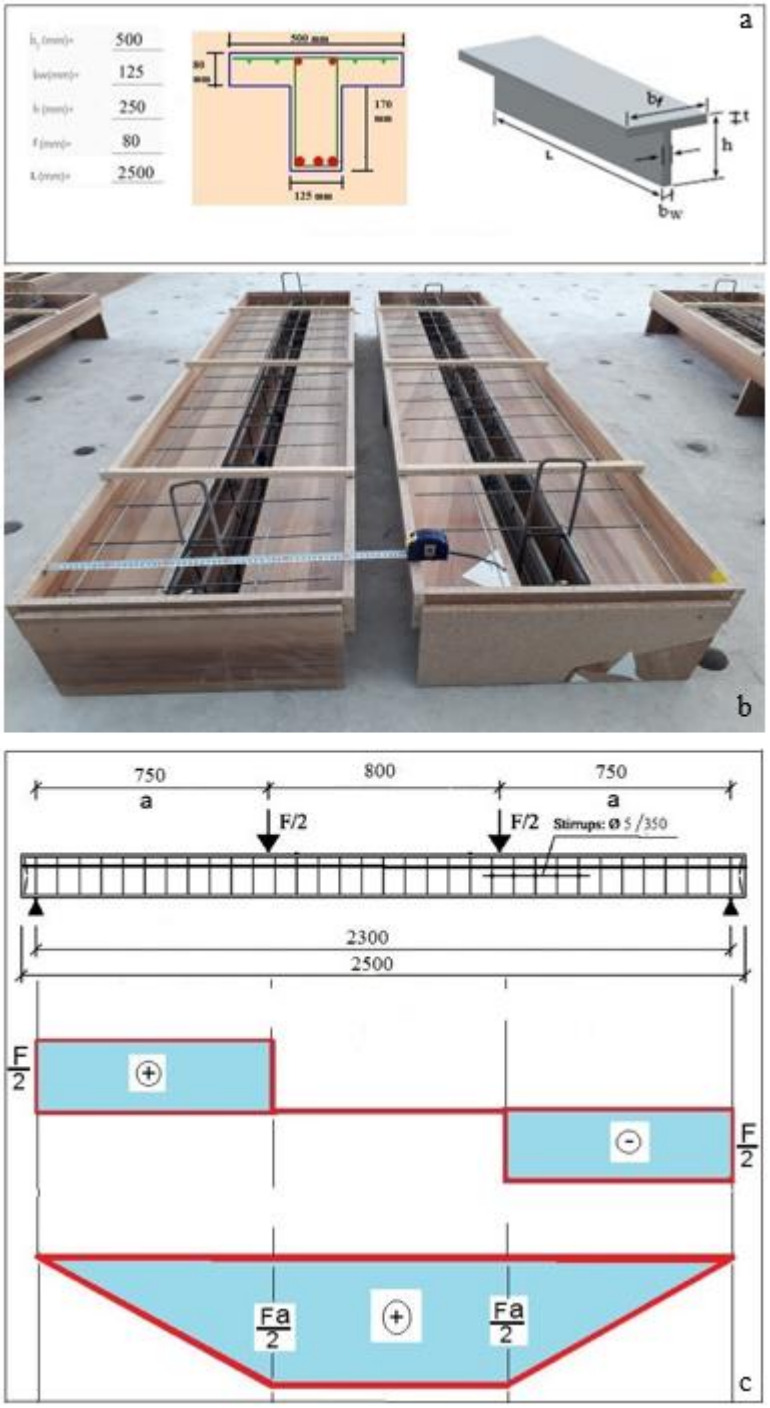
Şekil 3.8. a) Bir kirişte kesme hasarı modları (Täljsten'den sonra, 2006), b) Harici olarak bağlanmış güçlendirilmiş kirişlerin hasar modları (Pham ve Al-Mahaidi 2004)

Tablo 3.2. Harici olarak bağlanmış sistem için hasar modlarının açıklaması.

Hasar modları		Açıklama
Durum I: Tam kompozit performansı	Betonun ezilmesi FRP kopması	Erken hasarları önlediğimizde, kirişin nihai eğilme kapasitesi, beton basınçta ezildiğinde veya fiber kompozit çekme kopması nedeniyle hasar olduğunda elde edilir. Lif kopmasının gevrek hasarı dışında, bu, betonarme kirişlerin geleneksel eğilme hasarı modlarına benzer.
Durum II: Erken hasar	Son örtünün ayrılması	Levhanın aniden bitmesi nedeniyle oluşan büyük arayüzey kesmesi ve normal gerilmeler nedeniyle, beton örtü hasarı, levhanın sonunda veya yakınında bir çatlağın yayılmasıyla başlar.
	Uç ara-yüzün delaminasyonu	Bu tür bir ayrılma hasarı, en zayıf malzemenin mukavemetini aşan FRP tabakasının sonlandırılmasına yakın yüksek ara-yüzey kesmesi ve normal gerilmelerle başlatılır (epoksi veya beton).
	Eğilme çatlağı indüklenmiş ayrılma.	Eğilme çatlağının neden olduğu ayrılma, çatlak konumundaki konsantre bağ gerilimi, en zayıf tabakadaki kesme mukavemetini geçtiğinde meydana gelir.
	Kesme çatlağı indüklenmiş ayrılma.	Kesme çatlağının neden olduğu ayrılma hem kesme hem de eğilme momentinin önemli olduğu bölgede meydana gelir. İki mekanizmanın bir araya gelmesi sonucu oluşur. Bunlardan ilki, ayrılmaya neden olan eğilme çatlağı için olanla aynıdır. İkincisi ise eğik çatlağın dikey hareketinin sonucudur.

a. Tablalı Betonarme Kirişlerin Tasarımı

Deneysel çalışmalar için, T-şekilli betonarme enine kesite sahip kiriş seçilmiştir çünkü bu kesit en yaygın kirişlerden biridir ve tipik olarak kiriş ve döşemenin entegre yapısını temsil etmektedir. İncelenen bu kiriş, kesme açısından yetersiz olan tablalı betonarme kirişler olarak tasarlanmıştır. Tablalı betonarme kirişler, TBEC-2018 şartnamelerine göre tasarlanmıştır. Tüm kirişler, eğilmeden önce kesmede hasar olmasını sağlamak için tasarlanmıştır. Düşey yük dağıtma kirişine ondan da betonarme kirişe iki tekil yükün aktarımı ile sağlanmıştır. Betonarme tablalı kirişlerin genel görünümü ve boyutları Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Betonarme kirişlerin temel şekli ve boyutları

4. MATERYAL

4.1. Numunelerin Hazırlanması ve Dökümü

Tüm kirişler, istenilen ölçü ve şekli elde etmek için **Konya Teknik Üniversitesi** deprem laboratuarında yerel olarak üretilen kontrplaktan yapılan kalıplarda dökülmüştür. Beton kirişler, 25 MPa tasarım basınç dayanımına sahip yerel bir beton fabrikası tarafından üretilen bir hazır beton ile dökülmüştür. Tüm kirişler 2500 mm uzunluğunda, 250 mm yüksekliğinde (h), 500 mm flanş genişliğinde ve 125 gövde genişliğinde (bw) üretilmiştir. Beton dökülmeden önce tüm kalıplar yağlanmiştir. Laboratuvarda donatı çeliği düzenlenmiş ve kalıplara yerleştirilmiştir. Tüm kirişler için beton beton pas payı kalınlığı 25 mm idi. Beton kalıba döküldükten sonra beton yüzey çelik mala ile tesviye edilerek düzeltilmiştir. Şekil 4.1'de beton kirişlerin üretim aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Beton kirişlerin çalışma aşamaları.

Tüm kirişler, döküm sırasında mekanik olarak sıkıştırılmıştır. Çimentonun hidratasyon sürecinin devamı için kaybedilen suyun yerine kür edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, tüm tablalı betonarme kirişler ve silindirler en az 28 günlük bir süre boyunca su ile kür edilmiştir**(Şekil 4.2.**).



Şekil 4.2. Beton kirişlerin dökümü

Betonun basınç dayanımını ve yarmada çekme dayanımını belirlemek için, aynı beton partisinden altı silindirik numune (150 * 300) mm alınmış ve kontrol kirişi ile aynı zamanda döküm tarihinden itibaren 28 gün sonra test edilmiştir. Üç beton silindirin ortalama basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı sırasıyla 29MPa ve12.8 MPa ölçülmüştür**(Şekil 4.3.**).

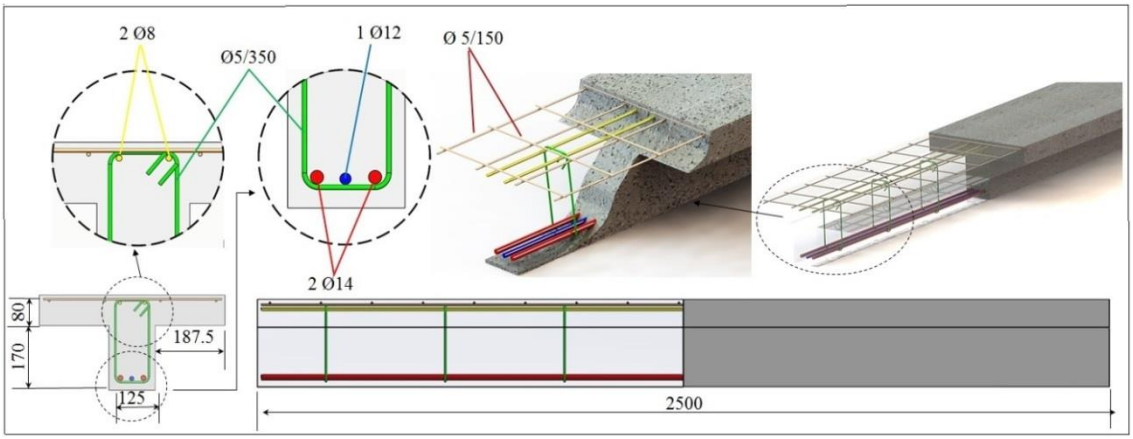




Şekil 4.3. Betonun basınç ve yarmada çekme dayanımının tayini

4.2. Donatı Çeliği

Mevcut deneysel çalışmada üç farklı çapta deforme çelik donatı çubuğu kullanılmıştır. Alt çekme çeliği için, 12 mm çapında (As=113 mm^2) bir çubuk ile 14 mm çapında (As=318 mm^2) iki çubuk kullanılmıştır. Üst basınç donatı çeliği olarak 8 mm çapında (As=101 mm^2) iki çubuk kullanılmıştır. Kirişi, kesme açısından yetersiz olarak yapmak için, Şekil 4.4.(a,b,c)'de gösterildiği gibi kirişin boyuna kesiti boyunca 350 mm'lik sabit mesafelerde eşit aralıklarla yerleştirilmiş 5 mm çapında çift ayaklı etriyeler kullanılmıştır. Her bir çubuğun üç numunesi üzerinde standart çekme testi yapılarak, bu deneysel çalışmada kullanılan çelik donatıların akma dayanımı Tablo 4.1'de gösterildiği gibi hesaplanmıştır. İstenilen beton örtüyü sağlamak için (30 mm), etriye ile ahşap kalıp arasına, çelik takviye etriyelerinin altına ve yanlarına birçok noktaya plastik pas payı monte edilmiştir. Yeterli bir ankraj elde etmek için, çekme ve basınç donatı çubukları her bir uca 90° çengellenmiştir.



(a)



(b)



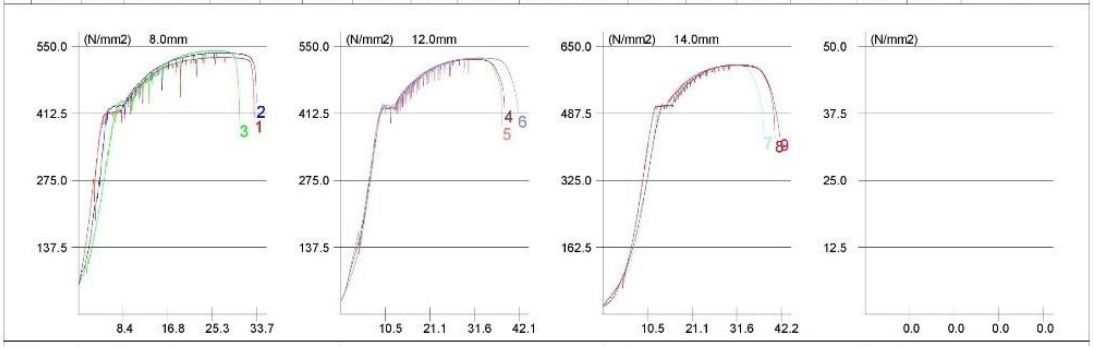


(c)

Şekil 4.4. Betonarme tablalı kirişlerinin yapım süreci

Tablo 4.1. Çelik donatıların akma dayanımı

Deney sonuçları														Standart değerler						
Test	Çelik sınıfı	Kutle kg/m	Anma Çap mm	Num. Çap mm	Kesit mm2	İlk boy mm	Son boy mm	Max. uzama %	Kopma uzama %	Akma Dayanım N/mm2	Çekme Dayanım N/mm2	Çekme / Akma	D.Akma / K.Akma	Akma Min N/mm2	Çekme Min N/mm2	Çekme / Akma	D.Akma / K.Akma	Kopma uzama %	Max.Yük uzama %	Kutle min-max kg/m
1	S 420	0.395	8.00	8.01	50.39	40.0	47.28	27.84	18.20	414.00	527.22	1.27	0.99	420	500	1,15	1,30	10	-	
2	S 420	0.396	8.00	8.02	50.52	40.0	48.56	26.98	21.40	427.00	536.31	1.26	1.02	420	500	1,15	1,30	10	-	
3	S 420	0.396	8.00	8.02	50.52	40.0	47.63	26.41	19.08	436.00	540.79	1.24	1.04	420	500	1,15	1,30	10	-	
4	S 420	0.888	12.00	12.01	113.29	60.0	71.93	31.37	19.88	422.57	522.84	1.24	1.01	420	500	1,15	1,30	10	-	
5	S 420	0.889	12.00	12.01	113.29	60.0	72.66	31.55	21.10	428.00	524.96	1.23	1.02	420	500	1,15	1,30	10	-	
6	S 420	0.888	12.00	12.01	113.29	60.0	71.25	32.43	18.75	425.57	525.79	1.24	1.01	420	500	1,15	1,30	10	-	
7	S 420	1.210	14.00	14.01	154.16	70.0	84.77	30.54	21.10	500.00	604.50	1.21	1.19	420	500	1,15	1,30	10	-	
8	S 420	1.210	14.00	14.01	154.16	70.0	85.67	31.35	22.39	504.00	604.86	1.20	1.20	420	500	1,15	1,30	10	-	
9	S 420	1.210	14.00	14.01	154.16	70.0	83.24	30.77	18.91	503.68	603.25	1.20	1.20	420	500	1,15	1,30	10	-	



4.3. Güçlendirme Metodolojisi

4.3.1. Kirişlerin Hazırlanması

Güçlendirme sürecinde en önemli çalışma, CFRP şeritlerini kaliteli bir reçine ve sertleştirici kullanarak beton yüzeye iyi bir şekilde yapıştırma yöntemidir. Kirişler 28 günlük olduktan sonra güçlendirme işlemine başlamak için kirişler temizlendi ve içindeki gevşek parçacıklar iyice uzaklaştırılmıştır. Karbon fiber levhalar ile beton yüzey arasında etkin bir bağ sağlamak amacıyla kaba zımpara kağıdı kullanılarak karbon fiber ile uygulanacak beton yüzeyleri iyi bir şekilde düzeltilmiştir. Alt köşeler, taşlama makinesi kullanılarak yaklaşık 10 mm'lik bir yarıçapa pahlanıp yuvarlatılmıştır. Daha sonra yüzeyler, Şekil 4.5'te gösterildiği gibi bir basınçlı hava tabancası ile tozdan temizlenmiştir ve keskin köşelere pah kırılmıştır.



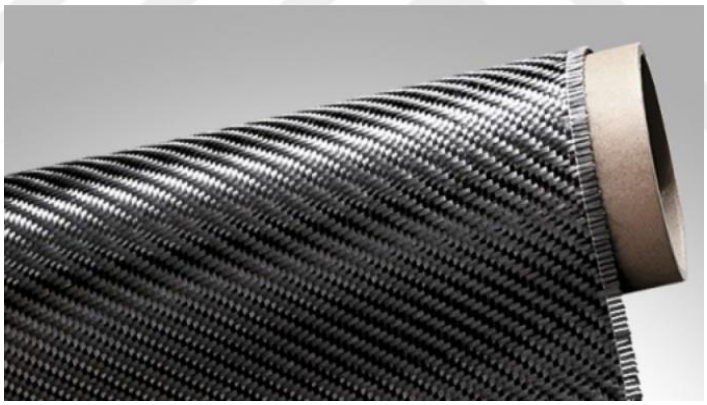





Şekil 4.5. Kirişlerin Hazırlanması

4.3.2. CFRP Levhaları

Bu deneysel çalışmada, **FİBERMAK KOMPOZİT** tarafından üretilen kesme bölgesinde tablalı betonarme kirişlerin güçlendirilmesi için tek tip karbon kumaşlar kullanılmıştır(**Şekil 4.6.**).



Şekil 4.6. CFRP Kumaşı

Karbon kumaş, reçine ve sertleştiricinin özellikleri malzeme üreticisinden alınmıştır. Karbon lifli kumaşın tüm fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki Tablo 4.2'de gösterilmektedir.

Tablo 4.2. Karbon lifli kumaşın özellikleri.

	CFRP Özellikleri	Mıktarı
1	Düşük yoğunluk	1,8 g/cm^3
2	İyi ısıl iletkenlik	20 W/M*K (Standart modül için)
3	Germe Modülü	220-240 GPa
4	Germe Dayanımı	3450-4850 Mpa
5	Düşük lif çapı	5-8 µm
6	Elektriksel öz direnç	1650 µΩ
7	Kopma uzaması	%1,6-2,2
8	Alansal ağırlık:	240 gr/m^2

9	Mevcut genişlikleri	1000 mm ve 1200 mm
10	Dokuma stili	Plain
11	Mekanik mukavemet	Yüksek
12	Raf ömrü	Sınırsız
13	Korozyona karşı dayanım, inorganik, asit ve bazlardan	Etkilenmez

Güçlendirme işleminin verimliliği esas olarak fiber elyaf kumaşın beton yüzeyine bağlayan epoksi reçinenin mukavemetine bağlıdır. Epoksi, sertleştirici ve reçine olarak iki bileşenden oluşur. Epoksi reçine içerisine ilave edilen sertleştirici üreticinin tavsiyelerine göre ağırlıkça (100-34) oranında katılmıştır. Karıştırma işlemi, karışımın homojen hale gelene kadar uygun bir plastik kap içinde elektrikli bir karıştırıcı ile yapılmıştır. Epoksi reçine ile karıştırılmadan önce, karbon kumaşlar her bir kiriş için daha önceden belirlenen tasarımlara uygun olarak gerekli boyutlarda kesilmiştir.



Şekil 4.7. Güçlendirme işleminde kullanılan epoksi ve reçine

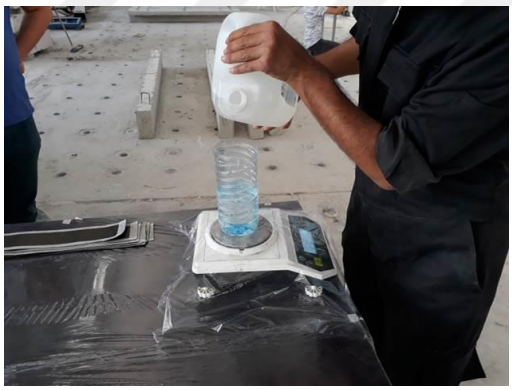
Daha sonra epoksi reçine, karbon kumaşların tamamen ıslatıldığından emin olana kadar karbon kumaşlara ve uygulamanın yapılacağı beton yüzey üzerine uygun bir rulo ile sürülmüştür.

Tablo 4.3. F-1564 Reçine Özellikleri

Görünüm	Berrak – Sıvı	
Renk	Şeffaf	
Vizkozite (25° C)	1200 -1400	m pa.s
Yoğunluk (25° C)	1.15	g/cm^3
Kürlenme	23° C 80° C 100° C	2 gün 4 saat 2 saat
Raf Ömrü (Oda Sıcaklığı)	12	Ay
Karışım oranı (Ağırlıkça)	F-1564 Reçine F-3486-3487 Sertleştirici	100 34

Tablo 4.4. F-3486-3487 Sertleştirici Özellikleri

Görünüm	Berrak – Sıvı	
Renk	Şeffaf	
Vizkozite (25° C)	10 -20	m pa.s
Yoğunluk (25° C)	1	g/cm^3
Kürlenme	23° C 80° C 100° C	2 gün 4 saat 2 saat
Raf Ömrü (Oda Sıcaklığı)	12	Ay
Karışım oranı (Ağırlıkça)	F-1564 Reçine F-3486-3487 Sertleştirici	100 34











Şekil 4.8. Epoksi reçinenin hazırlanması, karbon lifli kumaşlara ve beton yüzeylere uygulanması

Son olarak, beton yüzey üzerinde epoksi kaplı alana elyaf kumaşlar uygulandı ve karbon kumal ile beton yüzeyi arasında oluşabilecek hava kabarcıklarını gidermek için sıkılmıştır. Karbon kumaş beton yüzeylere yapıştırılırken epoksinin sertleşmesini önlemek için bu işlem hızlı bir şekilde yapılmalıdır. Beton yüzeylere karbon elyaf yapıştırma işlemleri laboratuar ortamında yaklaşık oda sıcaklığında (22 °C) gerçekleştirilmiştir **(Şekil 4.8.)**.



Şekil 4.9. Dıştan karbon fiber ile güçlendirilmiş kirişlerden birini test edilmesi

Kirişler sekiz farklı konfigürasyonlada ve kirişlerin her iki yüzeyine karbon kumaşlar yapıştırmıştır. Karbon lifli kumaşların genişliği 70 mm ve her iki kumaş arasındaki mesafe 120 mm olarak belirlenip uygulama yapılmıştır.

4.4. Tablalı Kirişlerin CFRP Levhaları ile Güçlendirilmesi

4.4.1. Kirişin İki Taraflı Sargılaması (TB-1)

Bu kiriş, gövde yüksekliği (170 mm) ve gövde genişliği 70 mm olan, yalnızca kiriş gövdenin yanal taraflarına 14 karbon kumaş uygulanarak güçlendirilmiştir. Lifin faydalı yüksekliği (d_{fv}) 140 mm dir.



Şekil 4.10. Kirişin İki Yandan Sargılaması (TB-1)

4.4.2. Gövde Yüksekliğinin Yarısını U-Şekli Sargılama (TB-2)

Bu güçlendirme konfigürasyonunda, kiriş, U-şekilli karbon kumaşlar, sadece kesme bölgesinde, gövde derinliğinin yarısına eşit bir yükseklikte kiriş gövdesine uygulanarak güçlendirilmiştir. Kirişin her iki yanında 7 şerit kullanılmıştır. Lifin faydalı yüksekliği (d_{fv}) 57.5 mm dir.



Şekil 4.11. Gövde Yüksekliğinin Yarısını U-Şekli Sargılama (TB-2)

4.4.3. Gövdenin Tüm Yüksekliğini U-Sargılama (TB-3)

Bu güçlendirme konfigürasyonunda, kirişin her iki tarafındaki kiriş gövdesinin tüm derinliğine U şeklinde karbon kumaş uygulanarak kiriş güçlendirilmiştir. Kiriş gövdenin her iki yanında 70 mm genişliğinde 7 şerit kullanılmıştır. Lifin faydalı yüksekliği (d_{fv}) 140 mm dir.



Şekil 4.12. Gövdenin Tüm Yüksekliğini U-Sargılama (TB-3)

4.4.4. Gövdenin Tüm Yüksekliği ve Flanş Altındaki Alanını U-Sargılama (TB-4)

Diğer bir güçlendirme konfigürasyonu, flanşın altındaki alana ek olarak kiriş gövdesinin tüm yüksekliğine U şeklinde karbon kumaşlar uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Kiriş gövdenin her iki yanında ve flanşın altındaki alana 70 mm genişliğinde 7 şerit kullanılmıştır. Lifin faydalı yüksekliği (d_{fv}) 140 mm dir.



Şekil 4.13. Gövdenin tüm yüksekliği ve flanş altındaki alanını U-Sargılama (TB-4)

4.4.5. Kirişin Tüm Yüksekliğini Tam Sargılama (TB-5)

Kesme bölgesinde güçlendirme ile ilgili başka bir durum çalışması için, kirişin tüm yüksekliği karbon kumaş ile sargılanmıştır. Başlangıçta, bir elektrikli matkap kullanılarak kiriş gövdesine paralel olarak flanşın yüksekliğinde 25 mm genişliğinde bir yarık açılmıştır. Daha sonra yarık bölgesi temizlenmiş ve kaba zımpara kağıdı kullanılarak taşlama makinesi ile düzleştirilmiştir. Ardından kirişin her bir tarafında 7 şerit bulunan 70 mm genişliğindeki karbon kumaş şeritler kirişin tüm kesiti etrafına uygulanmıştır. Lifin faydalı yüksekliği (d_{fv}) 220 mm dir.





Şekil 4.14. Kirişin tüm yüksekliğini tam sargılanması (TB-5)

4.4.6. CFRP Levhalar ile Kiriş Gövdesinin Tüm Yüksekliğini ve Flanş Altındaki Alan U-Sargılama ve CFRP Ankrajı Kullanma (TB-6) .

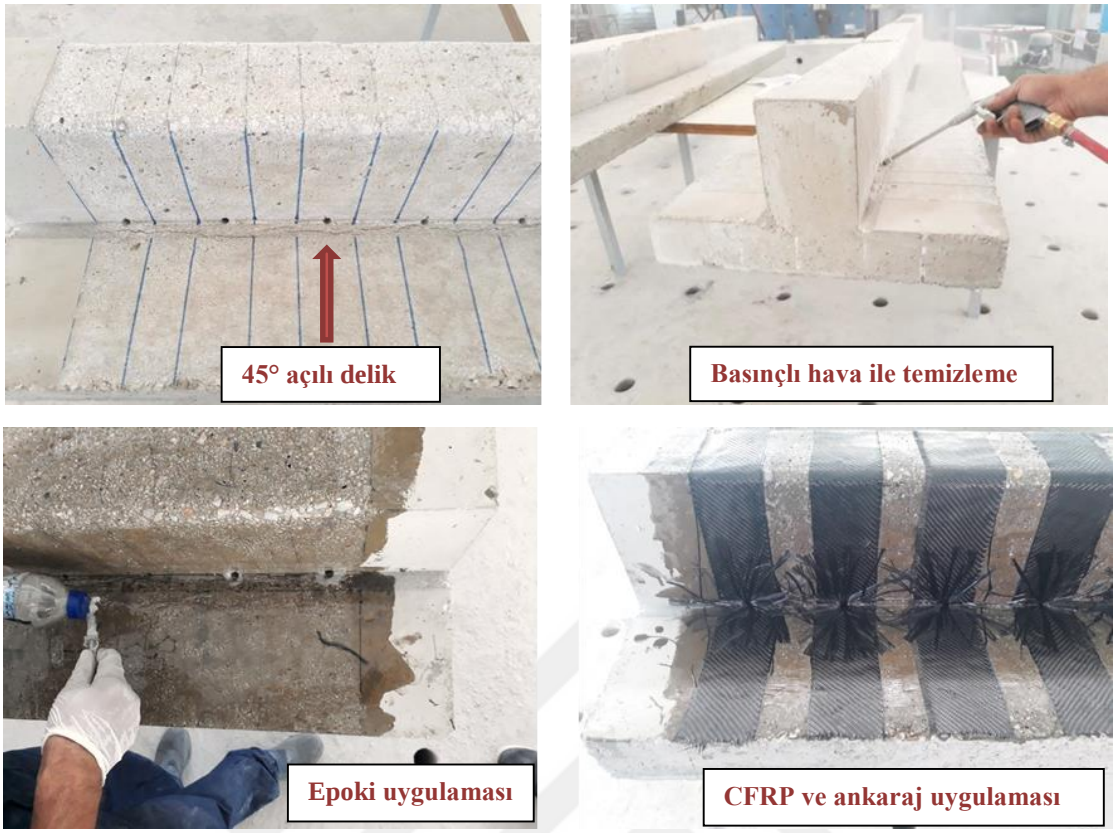
Kirişin tüm gövdesi ve flanş altındaki alan U şeklinde karbon kumaş ile güçlendirilmiş ve ardından kiriş gövdenin yarısı yüksekliğinde ankraj uygulanmıştır. Bu güçlendirme konfigürasyonu, TB4 kirişiyle aynı şekilde, ancak kiriş gövdenin yarı yüksekliğinde karbon liflerden yapılmış ankrajların eklenmesiyle yapılmıştır. Elektrikli matkap ile gövde yüksekliğinin ortasında 60 mm derinliğinde ve 10 mm çapında bir delik açılmıştır. Ankrajlar, kirişin gövdesine 90° 'lik bir açıyla uygulanmıştır. Daha sonra deliklerin içerisindeki tozlar basınçlı hava ile temizlenmiştir. Karbon kumaş şeritleri uygulandıktan sonra, ankrajlar epoksi reçine ile ıslatıldıktan sonra, şeritler üzerinde açılan deliklerden kirişte açılan deliklere sokularak sabitlenmiştir. Daha sonra serbest ankrajların kanatları, epoksi reçineler ile işlemden geçirildikten sonra karbon kumaş şeridinin dış yüzeyine yapıştırılmıştır.



Şekil 4.15. Kiriş gövdesinin tüm yüksekliğini U-Sargılama ve karbon lif ankraj (TB-6) kullanma

4.4.7. 45 ° Açılı CFRP Ankraj Kullanarak Kiriş Gövdesinin Tüm Yüksekliğini ve Flanş Altındaki Alan U-Sargılama (TB-7)

Bu güçlendirme konfigürasyonu, TB6 kirişli güçlendirme konfigürasyonunun aynısıdır, ancak kiriş gövdesinin flanşla buluştuğu noktada 45° bir açıyla ankrajlar uygulanmıştır **(Şekil 4.16).**



Şekil 4.16. Kiriş gövdesinin tüm yüksekliğini U-Sargılama ve 45 ° açılı CFRP ankraj (TB-7) kullanma

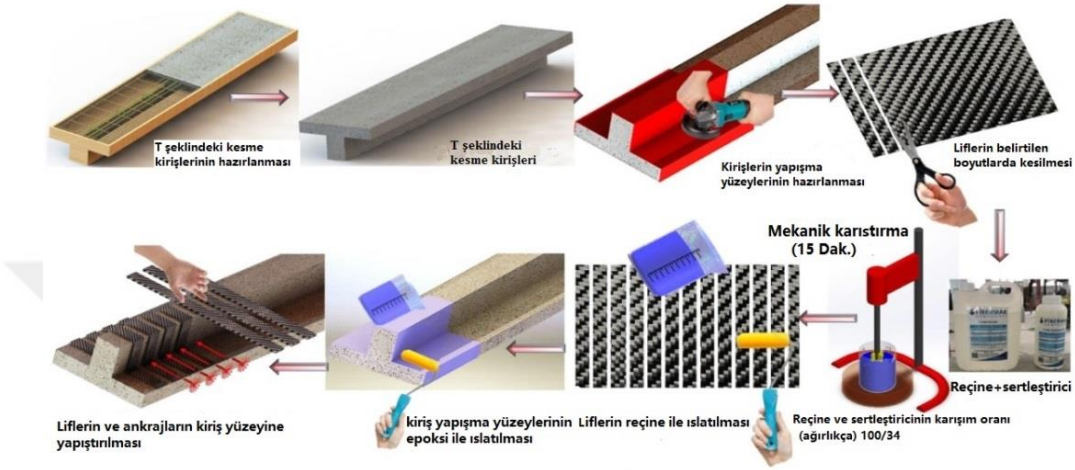
4.4.8. Kiriş Gövdesinin Tüm Yüksekliğinde Sürekli CFPR Levhalar ile U-Sargılama (TB-8)

Kiriş gövdesinin tüm yüksekliğine ve flanşın altındaki alana, kiriş kesme bölgesi boyunca sürekli bir U-şekilli karbon kumaş uygulanarak güçlendirilmiştir. Bu güçlendirme konfigürasyonu, ankraj kullanılmadan gerçekleştirilmiştir (**Şekil 4.17**).



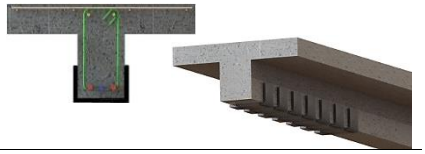
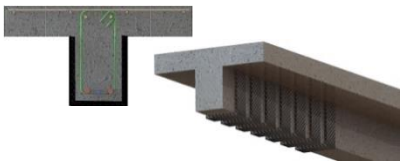
Şekil 4.17. Kiriş kesme bölgesi boyunca sürekli karbon kumaş ile U-sargılama (TB-8)

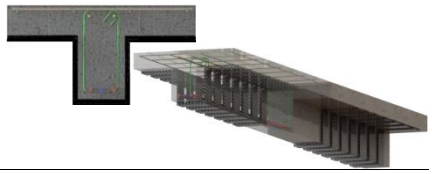
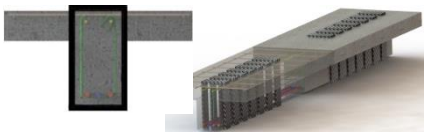
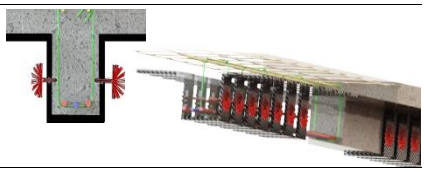
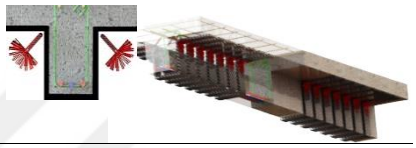
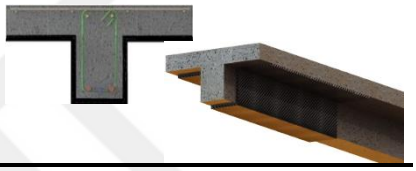
Şekil 4.18'da güçlendirme sürecinin şematik görüntüsü verilmiştir. Güçlendirmede kullanılan karbon kumaş şeridinin (W_f) genişliğinin şeridin merkezinden bitişik şeridin merkezine (Sf) şeritler arasındaki mesafeye oranı hesaplanmıştır. Her kirişte kullanılan CFRP hacminin, güçlendirme bölgesi altındaki beton hacmine oranı da hesaplanmıştır (ρf). Yukarıda belirtilen tüm kiriş detayları Tablo 4.5'te özetlenmiştir.



Şekil 4.18. Kiriş güçlendirme sürecinin adımları

Tablo 4.5. Kiriş detayları

No.	Numune kodu	W_f/S_f oranı	ρ_f oranı x(10^{-3})	Şerit genişliği W_f (mm)	Şeritlerin arasındaki eksenel mesafesi (S_f) (mm)	Güçlendirme konfigürasyonu
1	TB-0	N/A	0	0	0	
2	TB-1	0.58	1	70	120	
3	TB-2	0.58	0.9	70	120	
4	TB-3	0.58	1.4	70	120	

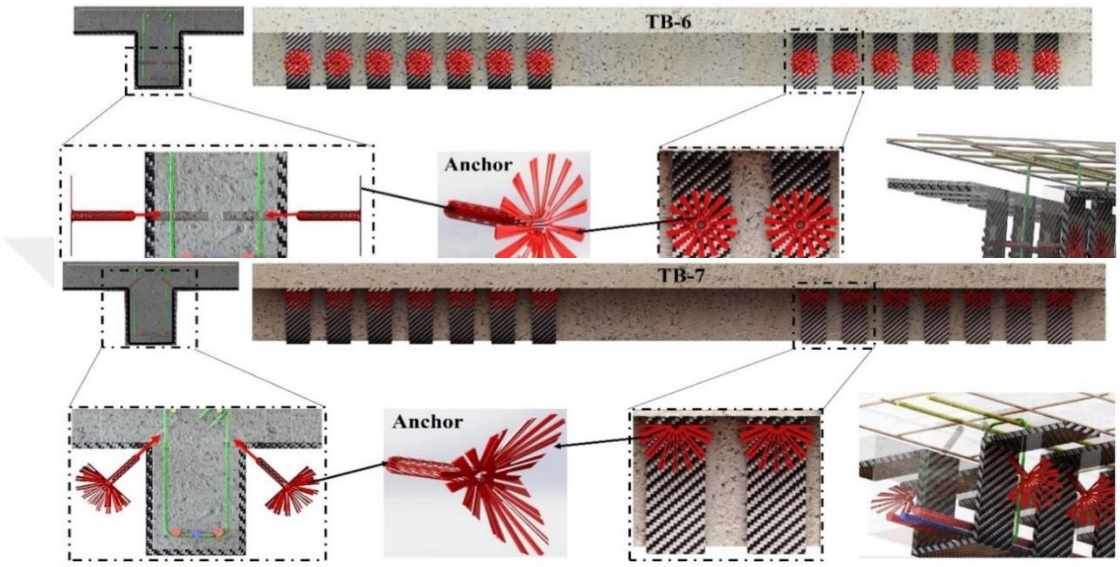
5	TB-4	0.58	2.5	70	120	
6	TB-5	0.58	2.2	70	120	
7	TB-6	0.58	2.5	70	120	
8	TB-7	0.58	2.5	70	120	
9	TB-8	1	4.1	790	N/A	

N/A: Uygulanamaz (Not Applicable)

4.5. Güçlendirme Metodolojisi- Fan Tipi Ankraj

Kiriş yüzeyleri temizlendikten sonra belirlenen yerler matkap yardımıyla delinerek 10 mm çapında delik açılmıştır. Ankraj deliklerinin açılmasından sonra kiriş basınçlı hava ile tozlardan arındırılmıştır. Daha sonra açılan deliklere fan tipi ankraj yerleşim aşamasına geçilmiştir. Fan tipi ankrajların hazırlanmasında 15 adet bundle birleştirilip ikiye katlanarak 30 bundle'dan oluşan 70 mm boyunda 10 mm çapında ankraj çubuklar oluşturulmuştur. Ankraj malzemesi olarak 420 gr/m^2 12K bundle'dan 15 adet kullanılmıştır. TB-6 kirişinde ankrajlar kiriş tablasının 85 mm altına kiriş gövdesinin her iki yüzüne dik yönde uygulanmıştır. TB-7'de ise kiriş gövdesi ile tablanın birleşim bölgesinde yatayla 45^o açı yapacak şekilde kirişin her iki yüzüne ankraj uygulanmıştır. İlk olarak mekanik taşlama aracı ile gerekli düzeltme ve pürüzlendirme (Yüzey hazırlama) işlemi yapıldıktan sonra basınçlı hava ile ankraj delikleri ve yapışma yüzeyleri temizlenmiştir. Daha sonra kirişlere karbon kumaş şeritler yapıştırılmıştır. Kiriş yüksekliği doğrultusunda yerleştirilen karbon kumaş şeritler yaklaşık 5 dk beklendikten sonra ankraj deliklerinin bulunduğu bölgedeki düşey liflerin sürekliliği kesilmeden ankraj delikleri açılmıştır. Enjektör yardımıyla

reçine+sertleştirici karışımı deliklere doldurulmuş ve 60 mm uzunluğundaki ankrajlar, CFRP parçaların sarılma yönünde döndürülerek deliklere yerleştirilmiştir. Delik dışında kalan 50 mm boyundaki bundle'lar fan şeklinde karbon kumaş şeritlere ve kirişe epoksi ile yapıştırılmıştır. Fan tipi karbon liflerden yapılan ankrajın TB-6 ve TB-7'ye uygulama detayları Şekil. 4.19'da gösterilmiştir. TB-6 ve TB-7 numunelerine fan tipi ankrajın uygulanması ise Şekil 4.20'de gösterilmiştir.



Şekil 4.19. CFRP fan tipi ankrajın kirişlere uygulama detay görünümleri



Şekil 4.20. TB-6 ve TB-7 kirişlerine fan tipi ankraj uygulaması

Deneysel çalışmada kullanılan 240 gr/m^2 elyafın eksenel çekme test görünümü Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Ayrıca deneylerde kullanılan elyaf, reçine ve sertleştirici özellikleri Tablo 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.21. Deneylerde kullanılan lifli polimerin eksenel çekme test görünümü

Tablo 4.6. Deneylerde kullanılan CFRP, reçine ve sertleştiricinin özellikleri

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

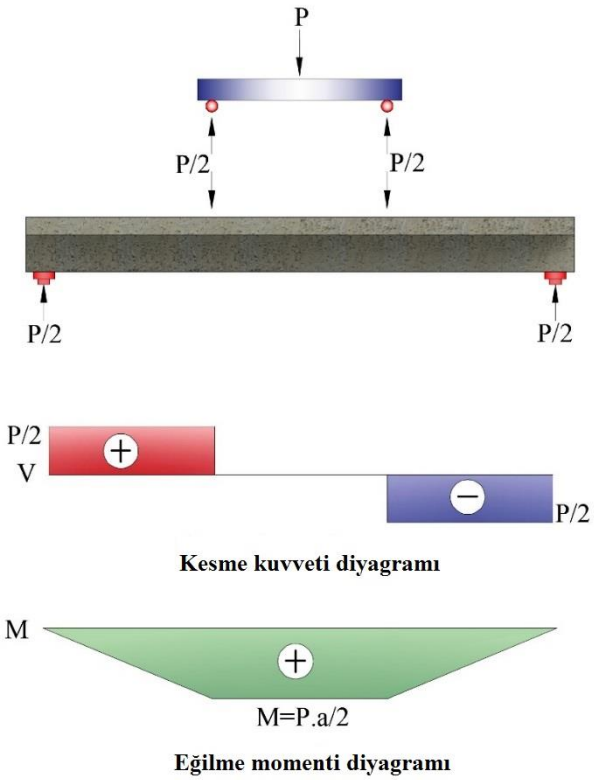
* Bu değerler laboratuvar ortamında yapılan çekme testi ile elde edilmiştir.

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR

5.1. GİRİŞ

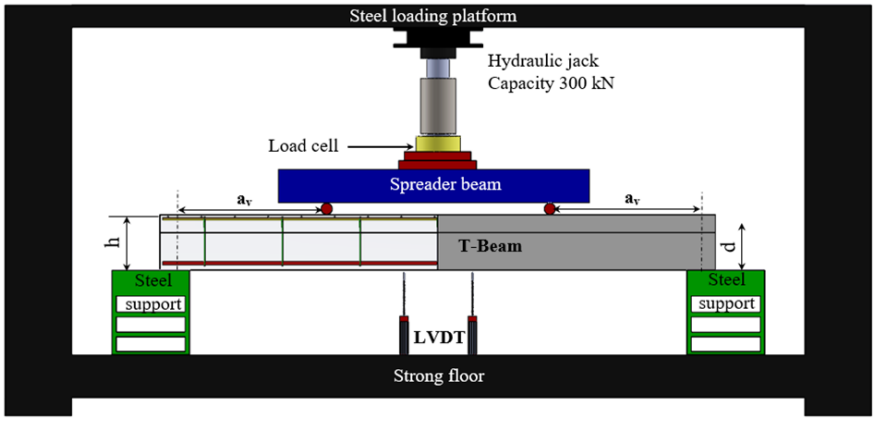
Deneysel çalışmalar Konya Teknik Üniversitesi Deprem Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamındaki fiziksel koşullar, deneysel numune boyutlarının seçiminde etkili olmuştur. Kirişlere simetrik, tek düze bir yükleme yapılmıştır. Kirişler üzerine yerleştirilen reaksiyon kirişi 1000 mm uzunluğunda dolu gövdeli çelikten oluşmaktadır. Reaksiyon kirişi simetrik biçimde mesnet aralığı 900 mm olan basit mesnetler üzerine yerleştirilmiştir. Reaksiyon kirişinin orta noktasına küresel mesnetle uygulanan P büyüklüğündeki yük mesnetlere P/2 olarak aktarılmaktadır. Deney numunelerinin taşıyabildiği maksimum yük olan göçme yükü bu P büyüklüğündeki yük değeridir. Reaksiyon kirişinin mesnedi ile kiriş mesnedi arasındaki mesafe 700 mm'dir. Kirişler mesnetlerine 100 mm'lik kısmı gelecek şekilde sabit mesnetlenmiştir. Uygulamada yerinde dökme betonarme kirişler kolonlara genellikle ankastre olarak mesnetlenmektedir ve üzerindeki yük üniform yayılı yüktür. Fakat bu çalışmada araştırılan kesme davranışı olduğu için mesnetlenme şeklinin ve yayılı yükün bir önemi yoktur.

Yetersiz kesme donatılı kirişlerin göçme davranışını etkileyen en önemli faktörlerden birisi de av/d (av: kiriş kesme açıklığı, d: kiriş faydalı yüksekliği) oranıdır. Kirişlerde kesme hasarının gözlenebilmesi için literatür dikkate alınarak av/d oranı 3 olarak seçilmiştir. Yapılan çalışmada ölçümler elektronik ortamda yüksek hassasiyette veri ölçer cihazlarla ölçülüp bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Yükleme 300 kN basınç kapasiteli Enarpac marka cihaza bağlı yük hücresi ile uygulanmıştır. Hidrolik yükleme hücresinin ucunda bulunan ve uygulanan yükü ölçmeye yarayan yük ölçme hücresi bulunmaktadır. Yükleme bütün deneylerde sıfırdan başlayarak sistematik olarak 10 kN'luk birimlerde artırılmış ve göçme oluşuncaya kadar devam edilmiştir. Yüklemeden dolayı kirişte oluşan iç kuvvetler Şekil. 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Yüklemeden dolayı kirişte oluşan iç kuvvetler (av şekil)

Kirişin alt kısmında deplasman ölçümleri için yerleştirilen doğrusal deplasman ölçerler (LVDT) ölçüm alınan bölgede doğrusal yer değiştirmeyi vermektedir. Deneylerde her bir kiriş için iki adet LVDT kullanılmıştır. LVDT'lerin yerleşim şeması ve deney düzeneği Şekil. 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Deneylerde kullanılan dört noktalı yükleme düzeneği

Deneylerde CFRP'nin TB-1'den TB-7'ye kadar olan kirişlerde CFRP şerit genişliği 70 mm olarak uygulanmıştır. TB-8 numunesinde CFRP, kiriş kesme açıklığı

sürekli olarak sargılanacak şekilde 790 mm olarak uygulanmıştır. Her bir deney numunesinin deney öncesi görünümü Şekil 5.3 ‘te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Deneylerden önce T şeklindeki kirişler

5.2. Deneysel Çalışma Sonuçları ve Hasar Analizi

Bu çalışmada kullanılan numunelerin deney sonrası genel hasar fotoğrafları Şekil 5.4’te toplu olarak verilmiştir. Her bir numune deney sonuçları yük-deplasman grafikleri karşılaştırmalı yorumlanmış ve ayrıntılı olarak hasar analizleri yapılmıştır.

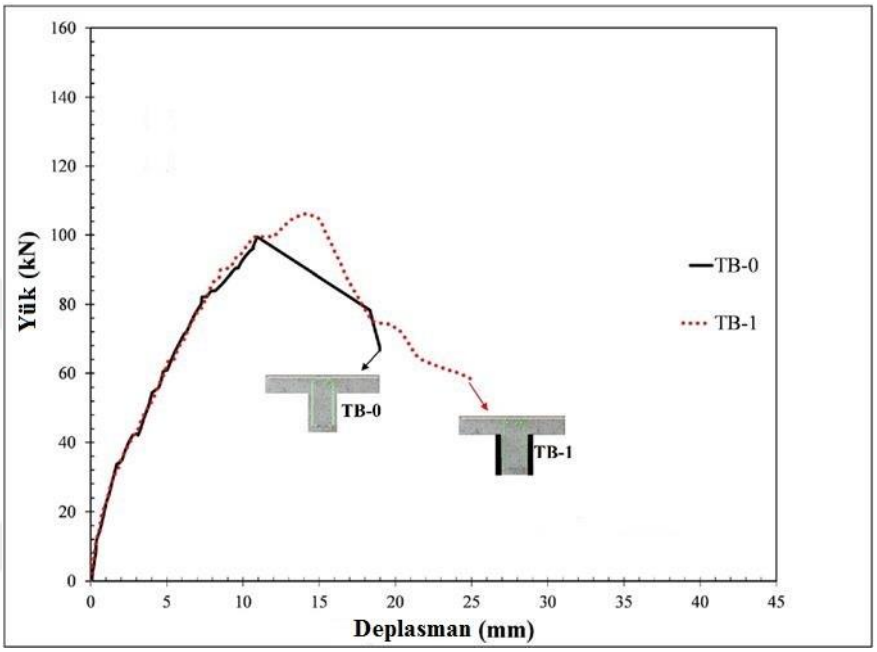
Bilindiği üzere kompozit malzemelerin üretimi ihtiyaç duyulan uygulamaya göre farlılıklar gösterebilmektedir. Uygulamada seçilecek takviye malzemesi ve reçine bileşenleri; uygulama biçimi, uygulama yapılacak yüzey geometrisi ve tasarıma göre seçilmektedir. Özellikle yapılacak uygulama inşaat alanında ise seçilecek kompozit bileşenlerinin seçimi ayrıca önemlidir. Kirişler için yapılacak güçlendirme uygulamalarında yükleri karşılayacak elyaf konfigürasyonları ve reçine bileşenleri uygulama sürecine uygun olmalıdır. Kompozit malzemelerle ilgili yapılan çalışmalarda deney sonrası oluşan hasarların incelenmesi ve hasar modlarının belirlenmesi sonraki yapılacak çalışmalar için önemlidir. Yapılan hasar analizleri neticesinde uygulanan kompozit yapının hasar davranışları belirlenmelidir. Yapılacak sonraki çalışmalar için seçilecek kompozit bileşenlerinin iyileştirilmesi yönünde; çalışmayı yapan ve literatürde benzer çalışmayı yapacak araştırmacılara önemli katkılar sağlayacağı düşünüldüğünden geniş bir makro hasar analizi bu çalışmada sunulmuştur. Deney esnasında ve deney sonrasında alınan veriler ışığında yapılan hasar analizi yukarda verilen kompozit uygulanmış kirişlerin deney sırasına (TB-1'den TB-8'e) göre gerçekleştirilmiştir.



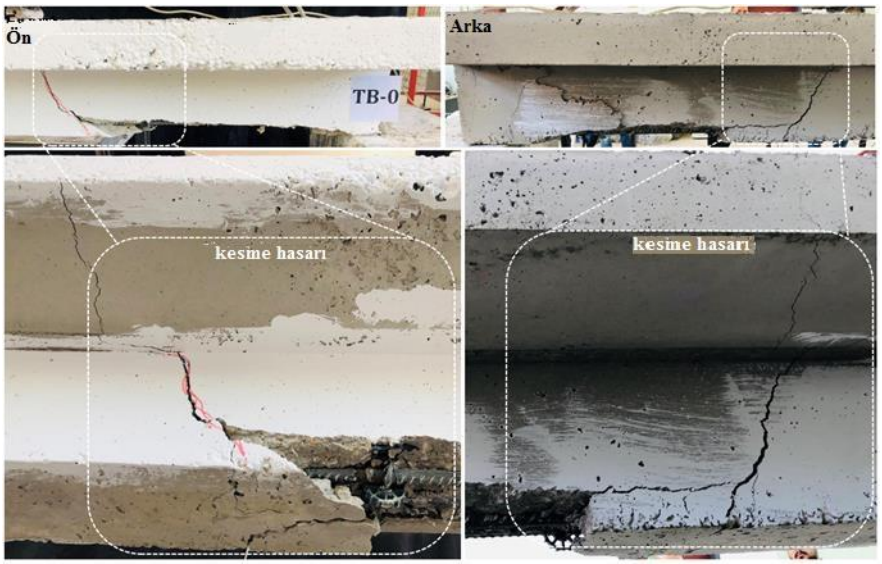
Şekil 5.4. Tablalı kiriş kompozit uygulamalarının deney sonrası genel hasar görünüşleri

Deney elemanlarının her biri için düşey yük-orta nokta deplasman grafikleri hazırlanmıştır. Şekil.5.5'te TB-0 ve TB-1 numunelerinin karşılaştırılması verilmiştir. TB-0 numunesi kesme donatısı yetersiz ve bu çalışmadaki referans numuneyi temsil etmektedir. TB-1 numunesi ise kesme yönünden yetersiz, 70 x 170 mm uzunluğundaki CFRP şeritlerin kirişin her iki yan yüzüne yapıştırılarak uygulandığı ilk güçlendirme alternatifidir. TB-8 numunesi hariç diğer tüm güçlendirilen kirişlerin sağ ve sol kesme açıklıkları boyunca uygulanan CFRP şeritler, kirişin tek yüzünde toplam 14 adettir.

Kirişin her iki yüzüne uygulanan CFRP şerit sayısı ise 28 adettir. TB-0 numunesi incelendiğinde 99.5 kN yük ve 10.6 mm deplasman değerine ulaştığı anda ani ve gevrek kesme hasarına uğrayarak göçmüştür. Kirişin orta açıklığında oluşan eğilme çatlakları 40 kN yük seviyesinden sonra kesme çatlaklarının oluşumu ile devam etmiştir. Çatlaklar, kirişin sağ mesnetinden başlayarak kiriş yüksekliği boyunca uzamış ve kiriş üzerinde yer alan reaksiyon kirişinin sağ mesnetine ulaştığı anda kesme hasarıyla sonlanmıştır (Şekil 5.6).



Şekil 5.5. TB-0 ve TB-1 deney numunelerinin karşılaştırılması



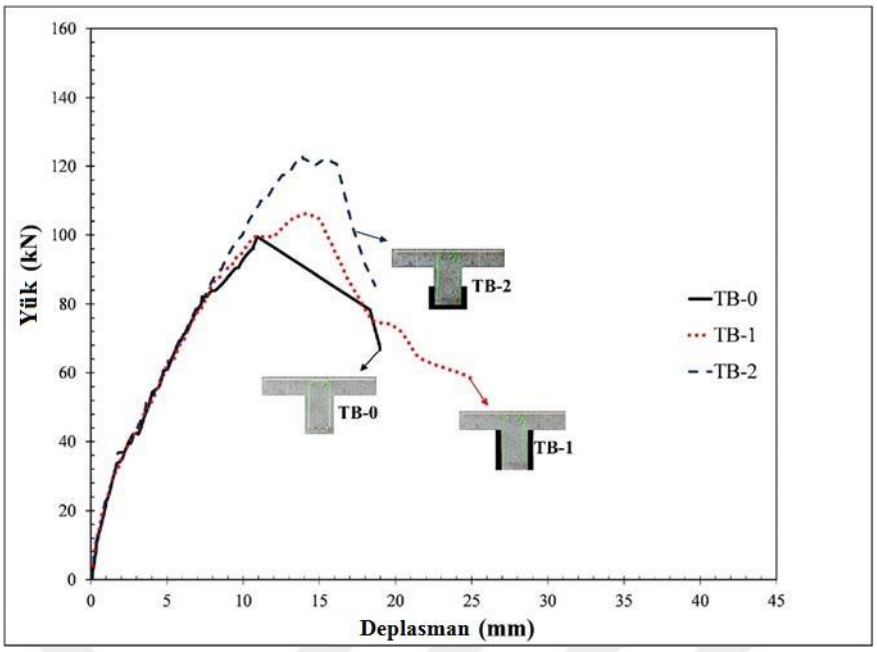
Şekil 5.6. TB0 referans kiriş numunesinde deney sonrası oluşan hasarların görüntüsü

TB-0 numunesinde meydana gelen tipik kesme kiriş davranışı, seçilen av/d oranının da uygun olduğunu göstermiştir. TB-1 numunesi incelendiğinde maksimum yük 106.2 kN ve bu noktadaki deplasman değeri 14.1 mm iken TB-0'a benzer şekilde kesme hasarı sonucu deney sonlanmıştır. TB-1 kirişinde çatlaklar TB-0'da olduğu gibi orta açıklıkta başlamış yaklaşık 64 kN yük seviyesinden sonra matris çatlak sesleri duyularak kesme çatlaklarının oluşumu gerçekleşmiştir. Bu durum kiriş yan yüzlerine uygulanan CFRP şeritlerin kesme açıklığında oluşan kesme çatlaklarının daha yüksek yük değerlerinde oluşmasını sağladığını göstermiştir. Ayrıca TB-0'a göre orta açıklıkta oluşan çekme çatlakları daha fazla meydana gelmiştir. Ancak kirişin alt kısmında yani çekme bölgesinde olmayan CFRP şeritten dolayı betonda oluşan kesme çatlaklarının yük artışına bağlı olarak ilerlemesi CFRP şeritlerin betondan ayrılmasına (debonding) yol açmıştır. Çatlakların kiriş sol mesnetinden başlayarak ilerlemesi ile kesme hasarı meydana gelmiştir. Özellikle 100 kN yük seviyesinden sonra kiriş kesme bölgesinde yer alan CFRP şeritlerde ve ara yüzeyde artarak devam eden matris çatlak sesleri kiriş göçme anına kadar duyulmuştur. TB-1 numunesinde yük taşıma kapasitesi TB-0'a göre % 6.7 oranında artış göstermiştir. Bu durum yerleşimi yapılan CFRP şeritlerin kesme çatlağının oluşumunu ve ilerlemesini geciktirerek kiriş kesme kapasitesinin artmasına destek olması ile açıklanmaktadır. CFRP uygulamalarında ilk hasar, gerek kompozit yapı içerisinde gerekse kiriş ve CFRP ara yüzeyinde matris çatlakları oluşarak gözlenmiştir. Yük artışı ile birlikte artan ve genişleyen kesme çatlakları beton ve CFRP uygulaması arasında oluşan yapışma ara yüzeyini (interface) lokal olarak kırmış ve ayrılma hasarları oluşmuştur. Maksimum yük seviyesine ulaşıldığında kesme hasar bölgesinde kirişin her iki yüzeyinde CFRP şerit uygulamalarının betondan soyulduğu görülmüştür (CFRP peeling off of concrete). Kiriş CFRP ara yüzeyinin kırılması ile kesme çatlakları hızla ilerleyerek kiriş başlıklarında (tablada) hasarı oluşmuştur (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. TB-1 numunesinin deney sonrası oluşan hasarların görüntüsü

TB-1'de yan yüzlere uygulanan CFRP şeritler, TB-2'de kiriş çekme bölgesini de içine alacak şekilde (U şeklinde) uygulanmıştır. Ancak TB-1'de kiriş yan yüzlerine yerleştirilen 170 mm uzunluktaki CFRP'nin boyu 85 mm'ye azaltılmıştır. Sonuç olarak TB-2'de uygulanan CFRP 70x295 mm'dir. Şekil 4.8'de TB-0, TB-1 ve TB-2'nin yük deplasman karşılaştırması verilmiştir. TB-2 numunesi 122.9 kN yük seviyesinde ve 13.8 mm deplasman değerinde kesme hasarına uğramıştır. Şekil 5.8 incelendiğinde TB-2 numunesinde ilk kılcal çatlaklar TB-1 ve TB-0'da olduğu gibi kiriş orta açıklığında yaklaşık 40 kN yük seviyesinde meydana gelmiştir. TB-0, TB-1 ve TB-2'nin yaklaşık 80 kN yük seviyesine kadar benzer davranış eğilimi gösterdikleri Şekil 15'den görülmektedir. Yük değeri yaklaşık olarak 80 kN'u aştıktan sonra numunelerin rijitlik karşılaştırması yapıldığında sırasıyla TB-0<TB-1< TB-2 olduğu görülmektedir (Şekil 5.8). Bu durum kiriş çekme bölgesine uygulanan CFRP'nin rijitlik artışına katkı sağladığını göstermektedir. TB-1 ve TB-2'nin maksimum yük değerine karşılık gelen deplasman değerlerinin yaklaşık aynı olması da kiriş çekme bölgesine uygulanan CFRP'nin rijitliğe katkısını açıklamaktadır.



Şekil 5.8. TB-0-TB-2 deney numunelerinin karşılaştırılması

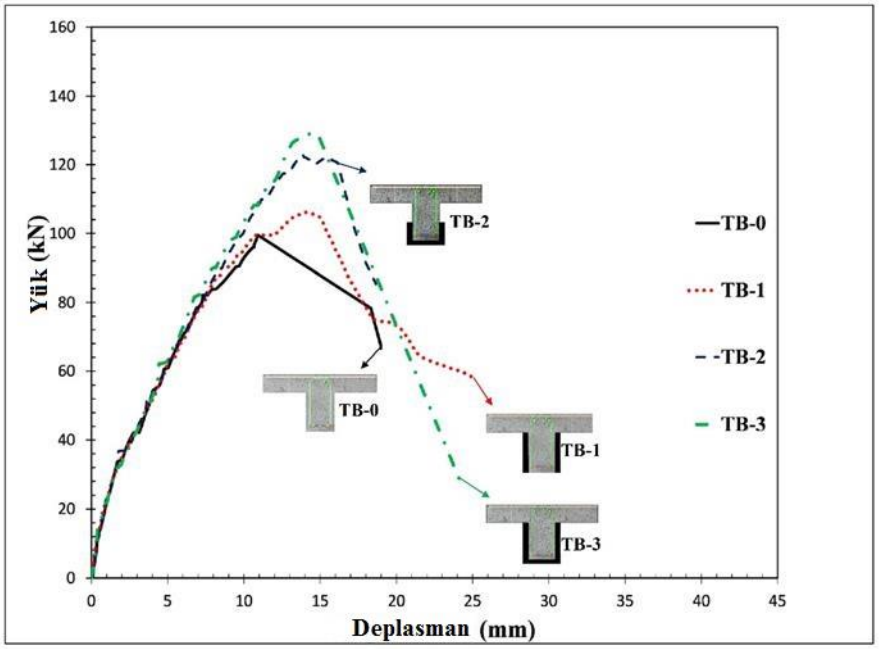
Şekil 5.9'da TB-2 numunesine ait hasar fotoğrafları incelendiğinde; kirişte oluşan mikro kesme çatlaklarının (micro shear cracks) çekme bölgesine kadar ilerlediği fakat CFRP uygulama bölgesinde kuşattığı anlaşılmaktadır (Crack trapping). Çekme bölgesini de içine alan bu uygulama kirişin yük taşıma kapasitesini 122.9 kN seviyesine kadar artırmış ve bu yük seviyesinde kirişin yan yüzeylerinde CFRP uygulamalarının yoğun olarak ayrılma hasarı sonucu CFRP betonun soyulma hasarları oluştuğu son olarak kirişin köşe kısımlarında elyafların kırılması ile CFRP hasarının oluştuğu görülmüştür. Maksimum yük seviyesine kadar kesme ve çekme çatlaklarının ilerlemesini engelleyen CFRP uygulaması kiriş sol açıklığı altında yoğun bir gerilme birikimine (Basınç) sebep olmuştur. CFRP hasarıyla birlikte oluşan gerilme yığılmasının da etkisi ile ani bir kesme hasarı ile kiriş göçmüş ve CFRP uygulama bölgesinde beton örtü ayrılma hasarı da gözlenmiştir.



Şekil 5.9. TB-2 numunesinin deney sonrası oluşan hasarlar görüntüsü

TB-3 kiriş numunesinin TB-2'den tek farkı kiriş yan yüzlerindeki CFRP uygulamasının tabla altına kadar uzanmış olmasıdır. Yani TB-3'de kiriş 70x465 mm uzunluğundaki CFRP şeritler ile tabla altına kadar U şeklinde uygulanmıştır. Sistematik olarak uygulanan CFRP yerleşimleri en etkili güçlendirme alternatifinin tespiti için yapılmıştır. Şekil. 5.10'da sırasıyla TB-0, TB-1, TB-2 ve TB-3'e ait yük-deplasman grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. CFRP uygulaması tabla altına kadar uzanan TB-3 numunesi kiriş davranışının iyileştirilmesi adına bu karşılaştırmada ön plana çıkmaktadır. Genellikle uygulamada imalat kolaylığı açısından tercih edilmektedir. Bu çalışma ile de bu tip uygulamanın güçlendirmedeki başarısı görülmek istenmiştir. TB-3 numunesinde oluşan ilk kılcal çatlaklar diğer numunelere benzer şekilde kiriş orta açıklığında meydana gelmiştir. Oluşan çekme çatlakları yük artışı ile artmaya, genişlemeye ve uzamaya devam etmiştir. Tabla altına kadar CFRP yerleşimin yapılması beton ve CFRP'nin daha rijit davranmasını sağlamıştır. TB-3 numunesinde yük 129.1 kN ve deplasman 14.2 mm olduğu anda kesme hasarı meydana gelerek deney sonlanmıştır. Burada ilginç olan güçlendirilen TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerine ait maksimum yük değerlerine karşılık gelen deplasman değerlerinin yaklaşık benzer olmasıdır. Bu durum Şekil 5.10'dan de görüldüğü üzere CFRP yerleşiminin iyileştirilmesi sistem rijitliğinin ve maksimum yük taşıma kapasitesinin artmasını sağlamıştır Bir elemanın yeterli rijitliğe ve dayanıma sahip olması adına önemli bir

sonuçtur. Ancak güçlendirilen üç numunede kesme hasarıyla göçmüştür. Bu durum kirişlerin yeterli sünekliği sağlaması koşulunu sağlamasa da yeni CFRP yerleşim detayının oluşturulması noktasında fikir vermiştir.



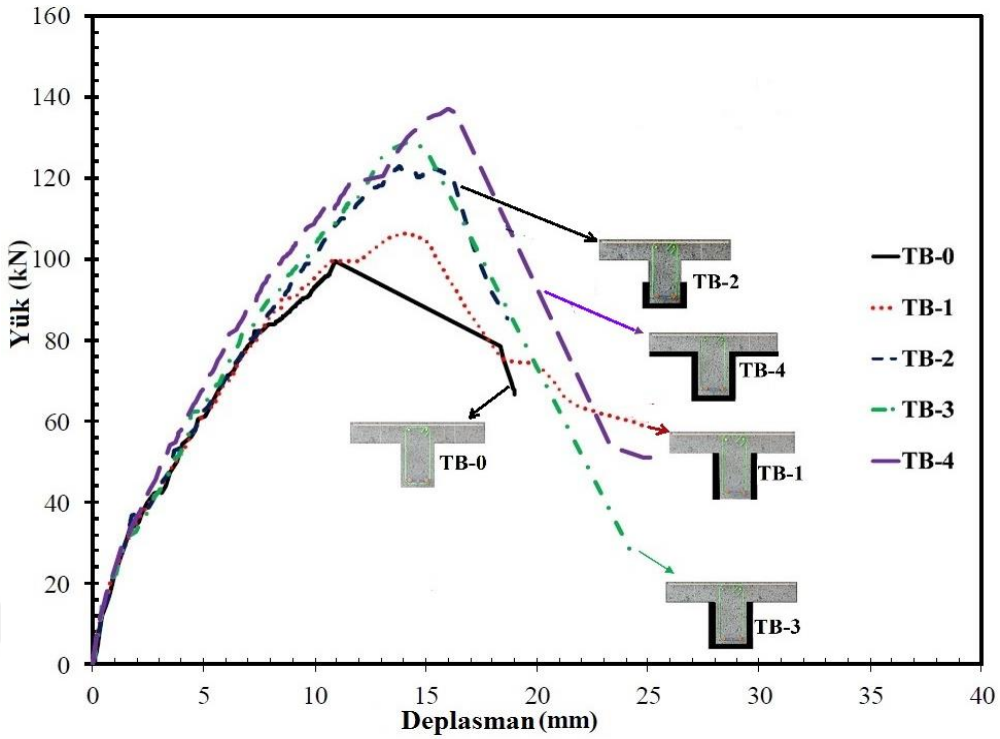
Şekil 5.10. TB-0-TB-3 deney numunelerinin karşılaştırılması

TB-3 numunesine ait hasar analiz resimleri incelendiğinde (Şekil 5.11), oluşan hasarın kirişin sol çekme açıklığında çekme bölgesinde dar bir alanda yoğunluk gösterdiği görülmektedir. Bu bölgede kesme hasarına tekabül eden sadece iki CFRP uygulamasında hasar görülmüştür. Kirişin ön yüzeyinde betonun örtünün soyulması ile ayrılma hasarı oluşurken arka yüzeyinde elyafların kopması ile CFRP hasarı oluşmuştur. Çekme bölgesine ulaşan kesme hasar bölgesinde dar bir alanda beton örtüsünü patlama oluşmuştur. Elyaf kopma bölgesinde CFRP uygulaması kirişten sökülüp incelendiğinde, kompozit uygulama yüzeyinin artışı ile birlikte kiriş ve CFRP uygulaması arasında iyi bir ara yüzey oluştuğu gözlenmiştir. Dar bir alana sıkışan kesme hasarıyla kirişin genel hasarı tabla boyunca devam etmiş ve bu hasarla birlikte kiriş etriyesinde kopma hasarı gözlenmiştir.



Şekil 5.11. TB-3 numunesinin deney sonrası oluşan hasarların görüntüsü

TB-4 numunesi, TB-3 numunesindeki davranış dikkate alınarak geliştirilmiş numunedir. TB-4'ün TB-3'den farkı tabla kısmının da CFRP ile sargılanmış olmasıdır. TB-4'de tablalı kirişin 187.5 mm uzunluğundaki başlık kısmı CFRP uygulanarak güçlendirilmiştir. Sonuç olarak TB-4, 70x840 mm uzunluğundaki CFRP şeritler uygulanarak güçlendirilen numunedir. Şekil 5.12'de TB-0 ve güçlendirilen ilk dört kirişin karşılaştırması gösterilmiştir. TB-4 kirişinde uygulanan CFRP yerleşiminin orta açıklıkta çekme çatlaklarının artışına yol açtığı görülmüştür. Kiriş eğilme kapasitesi diğer güçlendirilen numunelere göre daha fazla zorlanmıştır. Bu durum CFRP'nin kirişe uygulanmasında yerleşim şeklinin önemini ortaya koymaktadır. TB-4 kirişi, 136.9 kN yük ve 16.03 mm deplasman değerinde kiriş sol kesme açıklığında kesme kırılmasına uğrayarak göçmüştür. TB-4 kirişi de göçme anına diğer güçlendirme yöntemleri gibi benzer deplasman değerinde ulaşmıştır. Bu güçlendirme alternatifi de kirişin dayanım ve rijitlik bakımından iyileşmesini sağlamıştır. Ancak yeterli sünek davranış gözlenememiştir.



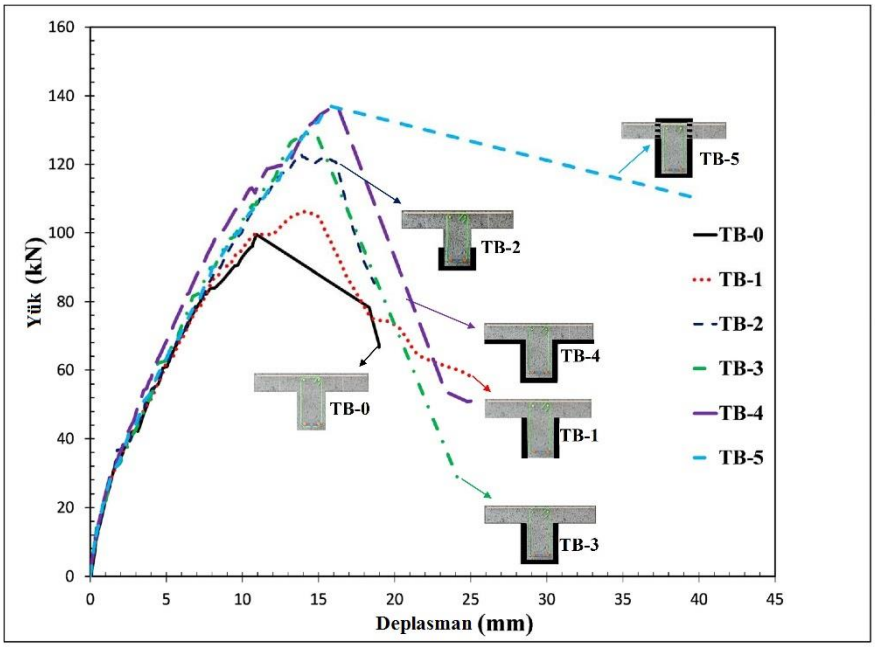
Şekil 5.12. TB-0-TB-4 de ney numunelerinin karşılaştırılması

TB-4 numunesine ait hasar analiz resimleri incelendiğinde (Şekil 5.13), oluşan hasarın kirişin sağ çekme açıklığında çekme bölgesinde dar bir alanda yoğunluk gösterdiği görülmektedir.



Şekil 5.13. TB-4 numunesinin deney sonrası oluşan hasarların görüntüsü

TB-5 kirişine gelindiğinde uygulamada sıklıkla uygulanan güçlendirme alternatifi gözlenmek istenmiştir. Bunun için tablanın kenarları darbeli kırıcı matkap yardımıyla delinmiştir. TB-5 kirişi 70x750 mm'lik CFRP şeritlerin tam sargılama şeklinde uygulanmasıyla güçlendirilmiştir. Güçlendirme sonrasında yüksek dayanımlı çimento harcı ile kırılan kısımlar tamir edilmiştir. Şekil 5.14'te referans numune ve güçlendirilen ilk beş numunenin karşılaştırması gösterilmiştir. TB-5 numunesi 136.9 kN yük ve 15.8 mm deplasman değerinde göçmüştür. Burada oluşan hasar sağ mesnet üzerinde meydana gelmiştir. Oluşan hasar sonrası TB-5 kirişi incelendiğinde, 2.5 cm olarak tasarımda dikkate alınan pas payının 5 cm bırakıldığı tespit edilmiştir. Bu durum sağ kesme açıklığında CFRP'nin kesme dayanımını artırması ile daha zayıf olan mesnet kısmındaki betonun kesitinde artan kesme kuvveti sonucu kırılmasıyla açıklanabilir. Literatürde tablalı kirişlerde CFRP'nin tam sargılama uygulama durumlarında tipik eğilme davranışının oluştuğu birçok çalışma mevcuttur. Ancak burada 136.9 kN'dan sonra hasarın yine kesme etkisiyle oluşmuş olması bu güçlendirme alternatifinin tam kapasitesinin tespit edilememesine yol açmıştır. TB-5 numunesinde maksimum yük değerinden sonra oluşan eğim incelendiğinde beton hasarı ile deney sonlanmasaydı kiriş davranışının eğilme yönünde olacağı anlaşılmaktadır. Çünkü deney sonlanana kadar CFRP şeritlerde herhangi bir hasar meydana gelmemiştir.



Şekil 5.14. TB-0-TB-5 deney numunelerinin karşılaştırılması

TB-5 numunesinin hasar fotoğrafları incelendiğinde (Şekil 5.15.), tam sargılamanın etkisi ile kiriş üzerinde oluşan mikro kesme çatlaklarının az oluştuğu ve bu

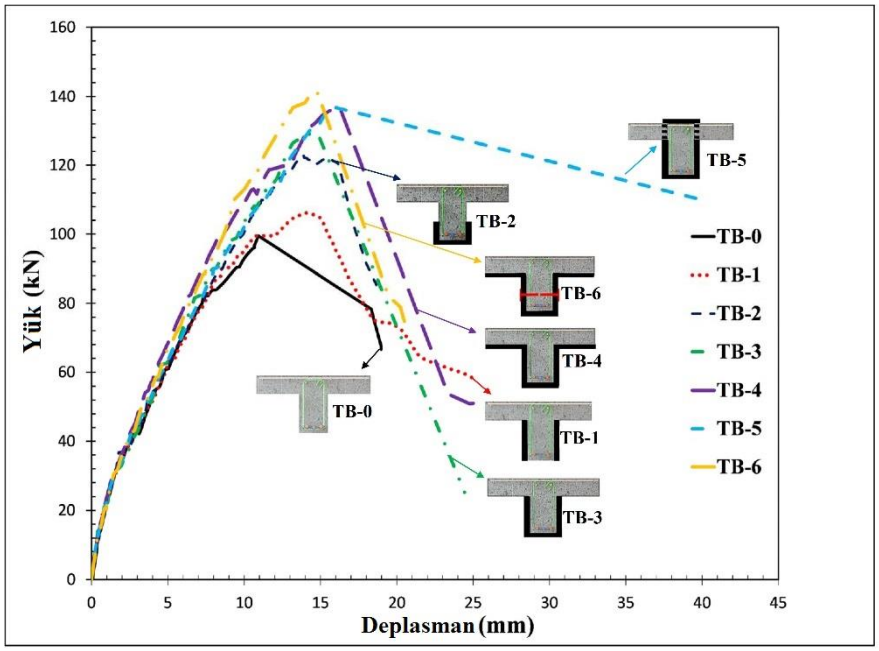
durumun CFRP uygulamasında tam sargı etkisinin hasarın gelişimini önemli bir şekilde etkilediği görülmektedir. Tam sargı uygulaması ile beklenen kesme hasarı oluşmamış ve hasar boyuna donatının bittiği noktada yani paspayı noktasında zayıf bölgede beton örtüsünü patlama şeklinde oluşmuştur. Bu hasarın etkisi ile beton hasarı tamir edilen bölgede tabla boyunca devam etmiştir.



Şekil 5.15. TB-5 numunesinin deney sonrası oluşan hasarların görüntüsü

Deneysel kurguya göre TB-6 numunesi ile ankrajlı güçlendirme yöntemlerine geçilmiştir. CFRP yerleşimi ile TB-4 numunesinin benzeri olan TB-6 numunesi, ankraj uygulaması ile yeni bir alternatif olarak oluşturulmuştur. Burada kirişin her iki yüzüne kiriş gövde ekseninden hazırlanan CFRP ankrajlar 90º olarak ekilmiştir. Başka bir ifade ile TB-6, 70x840 mm uzunluğundaki CFRP şeritler uygulanarak güçlendirilen ayrıca ankrajlar ile ilave güçlendirme yapılan numunedir. TB-6 numunesi 140.9 kN yük ve 14.8 mm deplasman değerine ulaştığı anda kesme hasarıyla göçmüştür. TB-6 numunesi TB-0 ve TB-4 ile karşılaştırıldığında yük taşıma kapasitesi sırasıyla %41.6 ve %2.9 artış sağlamıştır. TB-4 numunesine yalnızca ankraj uygulanması ile elde edilen TB-6 numunesi Şekil 5.16'daki karşılaştırmalar içerisinde dayanım ve rijitlik artışını

sağlamasıyla dikkat çekmektedir. Özellikle maksimum yüke ulaşana kadar yük-deplasman eğrisinin yatayla yaptığı açının artmış olması ankraj uygulamasının rijitlik üzerinde ciddi etki sağladığını göstermiştir. Ancak TB-6 numunesi de sünek davranış göstermemiştir. Bu durum CFRP uygulamasında tercih edilen 240 gr/m^2'nin yeterli dayanıma sahip olmayarak artan yükle beraber kırılmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.16. TB-0-TB-6 deney numunelerinin karşılaştırılması

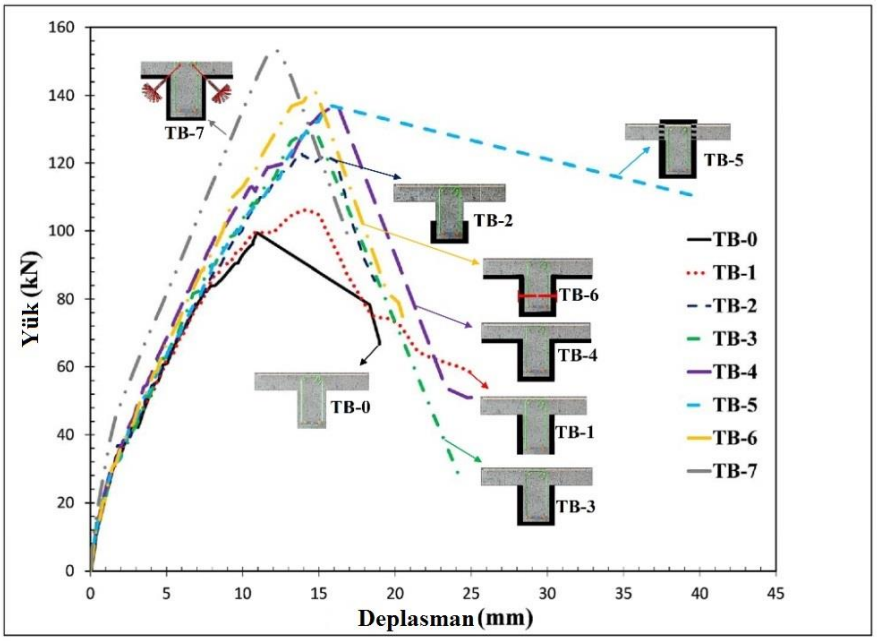
Şekil 5.17'da TB-6 numunesinde oluşan hasarlar ayrıntılı olarak incelenmiştir. Kesme hasarıyla göçmüş olan TB-6 numunesinde CFRP hasar gelişimi ankraj uygulamasının etkisi ile diğer kirişlerden oluşan hasarlardan farklılıklar göstermiştir. Ankraj uygulaması CFRP uygulamasının sargı etkisini önemli derecede artırmış ve kiriş yan yüzeylerinde ayrılma oluşumunu engelleyerek CFRP betonun soyulması hasarlarını önlemiştir. Kirişin çekme bölgesinde CFRP hasarları lif kırılması şeklinde oluşurken kesme hasarı sonrası tabla bölgesinde CFRP betonun soyulma hasarları gözlenmiştir. CFRP ankarajlar uygulandığı bölgelerde kirişte mikro kesme çatlakları ve ankarajlar herhangi bir deformasyon oluşmaması uygulamanın başarılı bir şekilde yapıldığını göstermektedir. Bu aşamada daha uygun karbon kumaş seçimleri ile yapılacak ankarajlı CFRP uygulamaları ile kirişte oluşan kesme hasarının engellenebileceği kanaatine varılmıştır.



Şekil 5.17. TB-6 numunesinin deney sonrası oluşan hasarların görüntüsü

TB-7 numunesi de CFRP yerleşimi ile TB-4 numunesine benzemektedir. Yalnızca uygulanan CFRP'ye ilave olarak kiriş tablası ile gövde birleşim noktasına yatay doğrultu ile 45º ankrajlar uygulanarak yapılan güçlendirme alternatifidir. Başka bir deyişle, TB-7, 70x840 mm uzunluğundaki CFRP şeritler uygulanarak güçlendirilen ayrıca 45º ankrajlar ile ilave güçlendirme yapılan numunedir. TB-7 numunesi 153.1 kN yük ve 12.3 mm deplasman değerine ulaştığı anda kesme hasarıyla göçmüştür. TB-7 numunesi TB-0, TB-4 ve TB-6 ile karşılaştırıldığında yük taşıma kapasitesi sırasıyla %54, %11.8 ve %8.6 artış sağlamıştır. TB-4 numunesine yalnızca ankraj uygulanması ile elde edilen TB-7 numunesi Şekil 5.18'daki karşılaştırmalar içerisinde dayanım ve

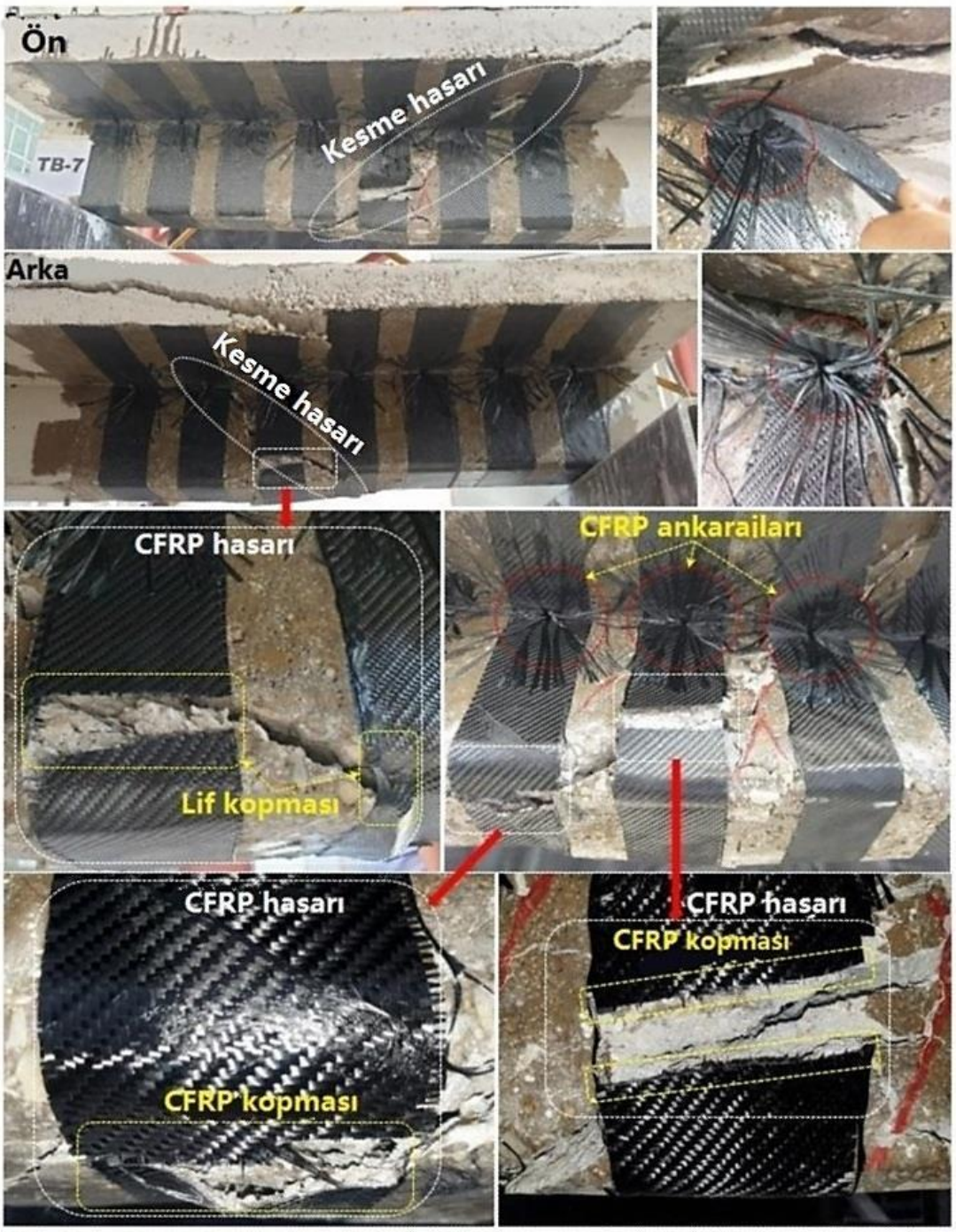
rijitlik artışını sağlamasıyla oldukça dikkat çekmektedir. Özellikle yük-deplasman eğrisinin yatayla yaptığı açı belirgin şekilde artmıştır. Bu durum Şekil 5.18'da gösterilen diğer güçlendirme alternatiflerine göre oldukça fazladır. Ayrıca TB-7'de maksimum yük seviyesine karşılık gelen deplasman değeri yaklaşık TB-0 ile aynıdır. Bu durum TB-7 ve TB-0 karşılaştırıldığında dayanım ve rijitlik bakımından oldukça başarılı bir güçlendirme yapıldığını göstermektedir. Deney sonuna kadar uygulanan ankrajlarda bir ayrılma gözlenmemiştir. Ancak kiriş sol mesnetindeki CFRP şeritin kopması sonucu kesme hasarı ile deney sonlanmıştır. Bu durum TB-6'da da gözlendiği üzere CFRP uygulamasında tercih edilen 240 gr/m^2'nin yeterli dayanıma sahip olmayarak artan yükle beraber kırılmasından kaynaklanmaktadır. Uygulanan ankrajların ise bu tip güçlendirmelerde olması gerektiğinin bir göstergesidir.



Şekil 5.18. TB-0 -TB-7 deney numunelerinin karşılaştırılması

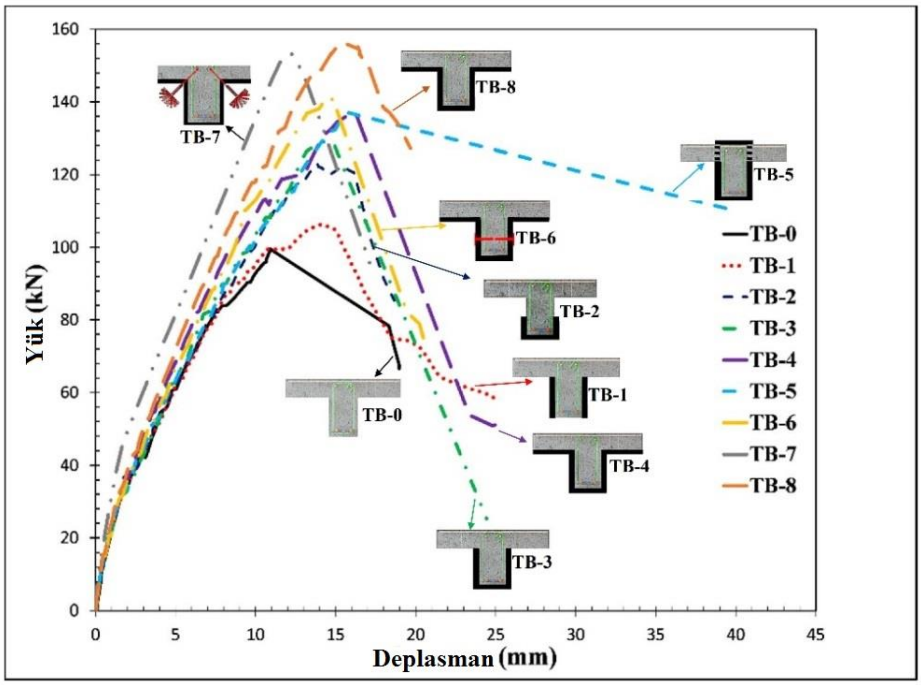
Şekil 5.19'de verilen TB-7 numunesine ait hasar analizi incelendiğinde, uygulanan ankraj bölgesinin etkisi ile CFRP hasar bölgeleri kirişin yan ve alt yüzeyinde oluşarak TB-6 numunesine göre farklılıklar göstermiştir. Bu ankraj uygulamasında betonda oluşan kesme hasarı tek noktadan ziyade dallara ayrılması ile CFRP hasarı gecikmiş ve bu durum kirişin yük taşıma kapasitesi ile rijitliğinde önemli bir artış sağlamasına neden olmuştur. TB-6 numunesinde olduğu gibi CFRP ankrajlarda herhangi bir deformasyon gözlenmemekle beraber uygulama bölgesinde betonda da mikro kesme çatlakları görülmemiştir. Deney sonrası tabla bölgesinde CFRP uygulaması sökülüp kiriş-tabla kesişim noktasına bulunan ankraj uygulama bölgesinin

zorlanmasına rağmen ankrajda herhangi bir deformasyon oluşturulamamıştır. Tablalı kirişlerde ankraj uygulamasının kiriş ve tabla birleşim noktalarında daha etkili olacağı bu numunede gözlenmiştir. Ankraj uygulamalarının etkisinin yüksek olması, ankraj malzemesinin karbon elyaflardan seçilmesi ve CFRP uygulaması ile birlikte yapılması ve ankraj deliklerinin açıldıktan sonra temizlenip uygulamada kullanılan reçine ile iyi ıslatılması gibi nedenlerle ilişkilendirilebilir.



Şekil 5.19. TB-7 numunesinin deney sonrası oluşan hasarların görüntüsü

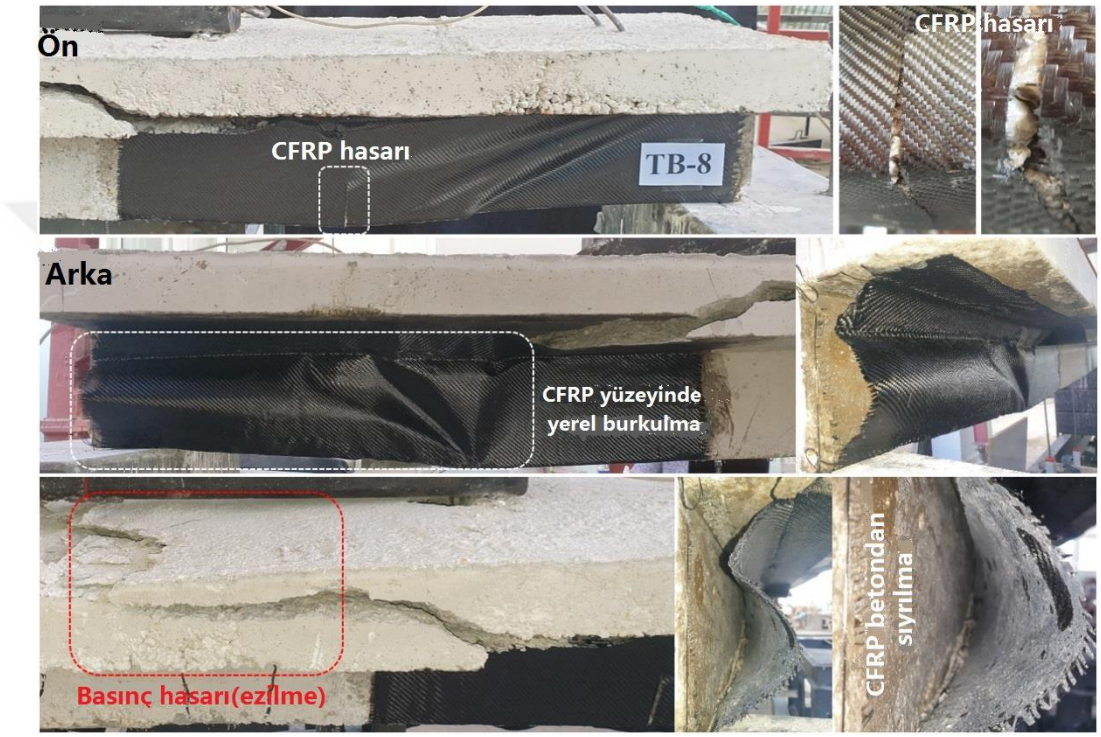
Yapılan CFRP şerit güçlendirmelerinden sonra son olarak TB-8 numunesi oluşturulmuştur. TB-8'de CFRP güçlendirmesi, mesnet kısmından itibaren kesme açıklığının dâhil olduğu 790 mm'lik kısma sürekli olarak U şeklinde tabla altını saracak şekilde uygulanmıştır. Kısaca TB-8 kirişi, 790x830 mm uzunluklu CFRP kumaş uygulanarak güçlendirilmiştir. Yapılan bu güçlendirme uygulamasında ankraj kullanılmamıştır. TB-8 numunesi uygulama için daha pratik olması için düşünülen son alternatiftir. Şekil 5.20'de referans TB-0 ve güçlendirilen tüm numuneler gösterilmiştir. TB-8 numunesi 156.2 kN yük ve 15.5 mm deplasman değerine gelindiğinde kesme hasarına uğrayarak göçmüştür. TB-8 numunesi TB-0, TB-4, TB-6 ve TB-7 ile karşılaştırıldığında yük taşıma kapasitesindeki artış sırasıyla %57, %14.1, %10.8 ve %2 mertebesindedir. TB-8 numunesi tüm güçlendirme numuneleri arasında en fazla yük taşıma kapasitesine sahiptir. Ancak rijitlik bakımından TB-6<TB-8<TB-7 ilişkisi vardır. Bu durum özellikle TB-7 numunesinde kirişe uygulanan 45º'lik ankrajların rijitlik üzerindeki etkisini göstermektedir



Şekil 5.20. TB-0 -TB-8 deney numunelerinin karşılaştırılması

Tam sargı uygulanan TB-8 numunesine ait deney sonrası hasar analiz resimleri Şekil 5.21'de verilmiştir. TB-8 numunesinde oluşan CFRP hasarı bundan önceki diğer numunelerden farklı olarak kesme hasar bölgesinde CFRP yüzeyinde yerel burkulma hasarı gözlenmiştir. Kesme hasarından kaynaklanan deplasmanın etkisi ile kiriş yan

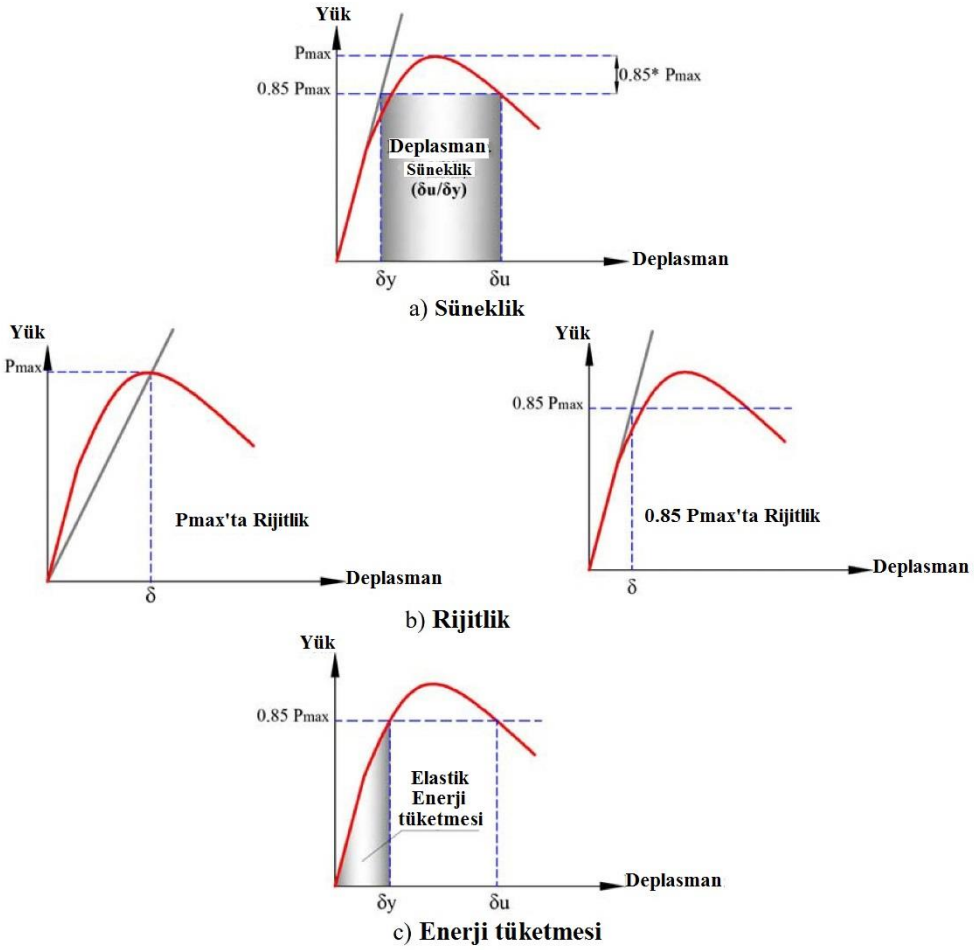
yüzeylerinde oluşan yerel burkulma hasar bölgesinden kiriş ucuna kadar CFRP betondan soyulma hasarı oluşmuştur. Kirişin çekme bölgesine ulaşan kesme hasarı CFRP de 90° elyafların kırılması ile ayrılma hasarını oluşturmuştur. Bu numunede oluşan hasar mekanizması incelendiğinde, TB-7 de yapılan ankraj uygulamasının TB-8 kirişine uygulanması durumunda yerel burkulma ve CFRP soyulma hasarlarının minimize edilerek kirişin yük taşıma kapasitesinin artırılması ile birlikte hasar bölgesinin değişeceği öngörülmüştür.



Şekil 5.21. TB-8 numunesinin deney sonrası oluşan hasarların görüntüsü

Yapılan tüm güçlendirmeler TB-0'a göre yük taşıma kapasitesinin artmasını sağlamıştır. Yapılan karşılaştırmalar kirişlerin dayanım, rijitlik değişimleri, enerji tüketme kapasiteleri ve süneklikleri üzerinden yapılmıştır. Süneklik kıyaslaması yapılırken kirişin kapasitesinde ciddi bir kayıp olmadan yapabildiği maksimum deplasmanlar göz önünde bulundurulmuştur. Dolayısıyla süneklik oranı, kirişin ulaştığı maksimum yük taşıma kapasitesinin %85'ine karşılık gelen deplasman değerinin (δu), akma anındaki deplasman değerine (δy) oranı olarak hesaplanmıştır. Bu oranın sünek bir kiriş için olması gereken minimum değeri 4~5 civarında olduğu literatürde belirtilmiştir [S. Aykac 2011]. Ancak yapılan deneysel çalışmaların TB-5 haricinde bir süneklik oranından bahsetmek mümkün değildir. TB-5'de de sünekliğin oldukça sınırlı kaldığı görülmektedir. Betonarme yapıların eleman bazında ve sistem bazında yeterli

dayanım, yeterli süneklik ve yeterli rijitlik değerini sağlaması tüm uluslararası yönetmeliklerce istenmektedir. Ancak bu çalışmada yapılan güçlendirme uygulamaları dayanım ve rijitlik noktasında kirişin davranışını iyileştirmişken süneklik bakımından yetersiz kalmıştır. Tüm deney numunelerinin rijitlik, süneklik, enerji tüketme kapasitesi hesabı Şekil 5.22'deki gibi hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler Tablo 5.1'de verilmiştir. Tüm numunelerin enerji tüketme kapasitesi karşılaştırması Şekil 5.23'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi enerji tüketme kapasitesi TB-5'numunesinde tam sargılı TB-8'e oldukça yakındır.

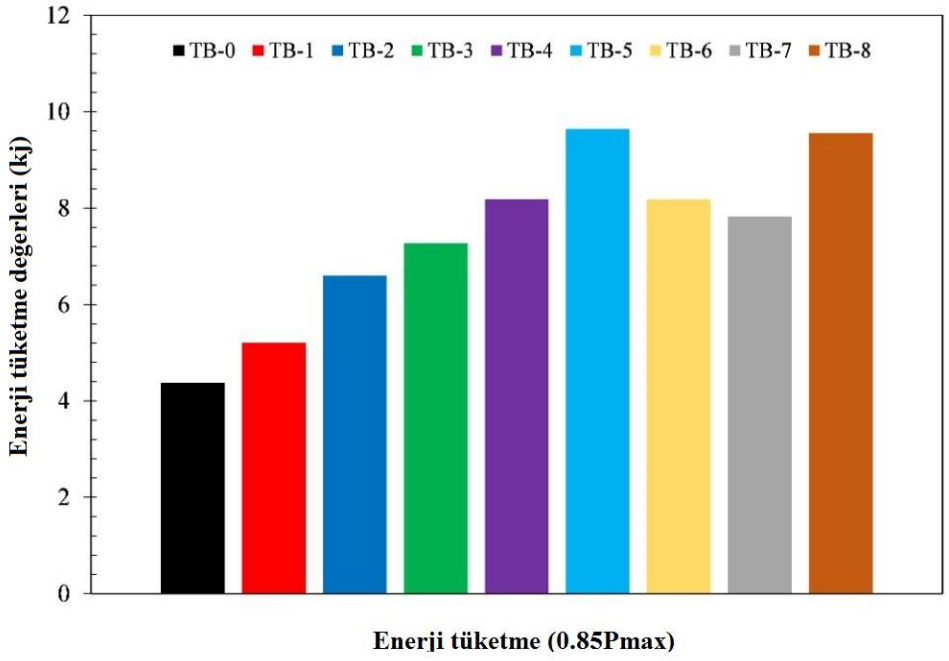


Şekil 5.22. Kirişlerin değerlendirilmesinde dikkate alınan parametreler

Tablo 5.1. Deneysel çalışma sonuçları

Test numuneleri	P_{max} (kN)	P_u $0.85P_{max}$ (kN)	δ_y (mm)	δ_u (mm)	Süneklik Oranı (δ_u/δ_y)	Akmada rijitlik 0.85Pmax	Artış Oranı	Maks. Yükte Rijitlik P_{max}	Artış Oranı
TB-0	99.5	84.5	8.3	16.1	1.9	10.1	—	9.1	—
TB-1	106.2	90.3	8.9	16.5	1.8	10.1	1.00	7.5	—
TB-2	122.9	104.5	10.4	17.1	1.6	10.0	—	8.9	—
TB-3	129.1	109.7	11.0	16.6	1.5	9.9	—	9.1	1
TB-4	136.9	116.4	11.3	19.7	1.7	10.3	1.02	8.5	—
TB-5	136.9	116.4	12.5	**34.3***	**2.7***	9.3	—	8.6	—
TB-6	141.0	120.0	11.0	16.5	1.5	10.9	1.08	9.5	1.05
TB-7	153.1	130.2	9.5	14.4	1.5	**13.7***	1.36	12.5	1.37
TB-8	**156.2***	**132.8***	11.8	19.0	1.6	11.3	1.12	10.1	1.11

*: maksimum değerler.



Şekil 5.23. Numuneler için enerji tüketme değerleri

6. ANALİTİK ÇALIŞMA

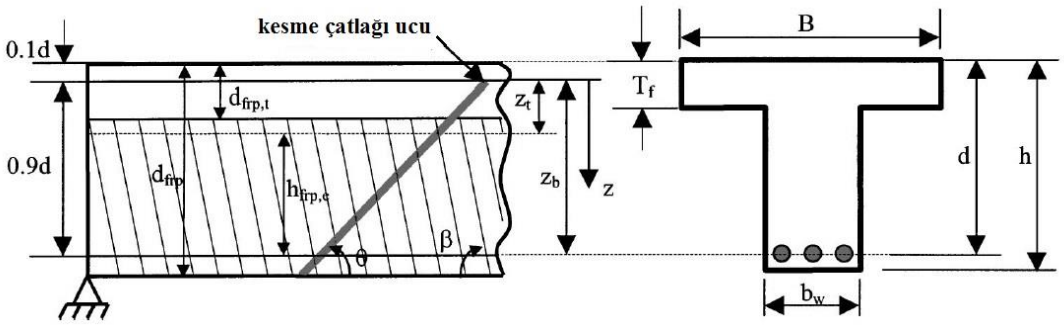
6.1. GİRİŞ

Bir betonarme kirişin nominal kesme dayanımı, ACI-440.2R-17'de belirtilen ve aşağıdaki denklemde verilen temel tasarım denklemi kullanılarak hesaplanabilir.

$$Vn = Vc + Vs$$

Bu hesaplamanın nominal kesme dayanımı, betonun kesme dayanımı ile kesme donatısının dayanımının toplamıdır. Betonarme kirişlerin harici olarak FRP şeritler kullanılarak güçlendirilmesinde ise, kesme dayanımı, FRP şeritlerin betonarme kirişin toplam kesme dayanımını artırmaya katkısı nedeniyle yukarıdaki denkleme üçüncü bir taraf eklenerek hesaplanır. Aşağıdaki Denklem 1'de belirtildiği gibi. CFRP'nin kirişe sargılanması ile güçlendirilmesi kesme kapasitesini artırmaktadır. Bu durum farklı yönetmelik ve standartlar ile ifade edilmektedir. Ancak bu yönetmelikler incelendiğinde CFRP yerleşimine bağlı olarak farklı hesap modellerinin olduğu görülmektedir. Bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar ACI 440.2R-17, TBEC-2019 ve FIB-2001'ın vermiş olduğu amprik bağıntılarla da karşılaştırılmış ve yönetmelik yaklaşımları hakkında çıkarımlar yapılmıştır. Genel olarak betonarme bir kirişin EBR yöntemi ile CFRP uygulamasında kesme dayanımı (Vr), tayin edilirken, betonun dayanımı (Vc), etriye donatısının dayanımı (Vs) ve lifli polimerin dayanımı (Vf) dikkate alınarak Denklem (1) ile hesaplanmaktadır. Şekil 6.1, kesme kuvvetini hesaplamak için teorik hesaplamalarda kullanılan sembolleri göstermektedir.

$$V_r = V_c + V_s + V_f \qquad (1)$$



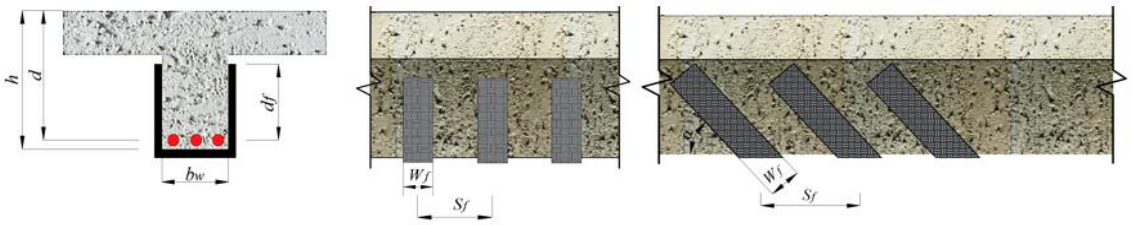
Şekil 6.1. Genel kesme güçlendirme şeması için gösterim (Chen J. F and Teng J. G.2003)

6.2. ACI-440.2R-17

ACI 440.2R-17'de kirişlerin CFRP ile güçlendirilmesi üç farklı şekilde ifade edilmektedir. Bunlar sırasıyla the side bonding, Dikdörtgen kirişlerin kesme mukavemetini arttırmak için kullanılan yan yapıştırma, U-mantolama ve sargılama şemaları Şekil 6.2'de gösterilmektedir. FRP şeritleri için kesme güçlendirmesi hesaplamalarında kullanılan boyutsal değişkenler Şekil 6.3'de gösterilmektedir.



Şekil 6.2. FRP şeritleri kullanılarak betonarme kirişlerin kesme güçlendirmesi için tipik sargılama şemaları (ACI 440.2R-17).



Şekil 6.3. FRP şeritleri için kesme güçlendirmesi hesaplamalarında kullanılan boyutsal değişkenler (ACI 440.2R-17).

ACI 440.2R-17'de FRP'nin kesme kuvvetine katkısı (V_f), Denklem 2, 3, 4'deki gibi hesaplanmaktadır. Burada A_{fv}; aralıklı FRP kesme takviyesi alanı, in^2 (mm^2), f_{fe}; FRP'de etkili stres (Kesit hasarında elde edilen stres seviyesi), psi (MPa), ε_{fe}; FRP takviyesinde etkili şekil değiştirme seviyesi, in/in (mm/mm).

$$V_f = \frac{A_{fv}.f_{fe}.(\sin\alpha + \cos\alpha).d_{fv}}{sf} \quad (2)$$

$$A_{fv} = 2.n.t_f.w_f \quad (3)$$

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe}.E_f \quad (4)$$

CFPR'nin kirişe uygulanma yerleşim tipine göre ε_{fe}'nin sınır değeri değişmektedir. CFRP uygulaması kirişe tam sargılama (tamamen sarılmış) şeklinde uygulanıyorsa Denklem 5, Yapıştırılmış U-sargılar veya yapıştırılmış yüz katları şeklinde uygulanıyorsa Denklem 6 kullanılmaktadır. Burada ε_{fu}; FRP takviyesinin tasarım kopma gerilimi, κ_v; kesme için bağa bağımlı katsayı.

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 \le 0.75.\varepsilon_{fu} \tag{5}$$

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_v.\varepsilon_{fu} \le 0.004 \tag{6}$$

Bağ azaltma katsayısı, beton dayanımının bir fonksiyonudur, kullanılan sarma şeması türü, ve laminatın sertliği. Bağ azaltma katsayısı Denklem 7'den hesaplanabilir.

$$\kappa_v = \frac{k_1.k_2.L_e}{11{,}900.\varepsilon_{fu}} \le 0.75 \quad \text{(SI)} \tag{7}$$

Aktif bağ uzunluğu Le, bağ stresinin çoğunun korunduğu uzunluktur. Bu uzunluk Denklem 8 ile verilmiştir.

$$L_e = \frac{23{,}300}{\left(n.t_f.E_f\right)^{0.58}} \quad \text{(SI)} \tag{8}$$

Bağ azaltma katsayısı ayrıca iki modifikasyon faktörüne bağlıdır., k_1 ve k_2, sırasıyla betonun dayanımı ve kullanılan sargılama şeması türü için hesaplanır. Bu modifikasyon faktörleri için ifadeler Denklem (9) ve Denklem 10'da verilmiştir.

$$k_1 = \left(\frac{f_c'}{27}\right)^{2/3} \quad \text{(SI)} \tag{9}$$

$$k_2 = \begin{cases} \dfrac{d_{fv} - L_e}{d_{fv}} \rightarrow U - wraps \\ \dfrac{d_{fv} - 2L_e}{d_{fv}} \rightarrow Two.sides - bonded \end{cases} \tag{10}$$

Düzgün bir şekilde ankarajlı U-sargılar, FRP kopmasıyla hasar olacak şekilde tasarlanabilir ((Belarbi ve ark., 2012)). Hiçbir durumda, bununla birlikte, ankarajlı FRP U-sargısındaki etkili şekil değiştirme, 0.004 veya 0.75εfu'dan daha azını aşmamalıdır, ve ψf = 0.85 ankarajlı U-sargılar için uygun kalır ve tamamen sarılmış kirişler için ψf = 0.95 kalır. Sürekli elyaf sargılama durumunda FRP aralığı sf değerinin elyaf genişliğinin w_f değerine eşit olması gerektiği de not edilmelidir.. Herhangi bir betonarme kirişin CFRP ile sargılanması durumunda kiriş kesme kapasitesi Denklem 11'deki hesaplanmaktadır. Burada ϕ; mukavemet azaltma faktörünün değeridir.

$$\phi.Vn = \phi(V_c + V_s + \Psi_f.V_f) \qquad (11)$$

ACI 440.2R-17'de kesit tamamen sargılamak en verimli olanıdır, ardından üç taraflı U-sargılama belirtilmektedir. Ancak,bir kirişin iki tarafına yapıştırma, en az verimli şemadır. Yapılan deneysel çalışmada yük taşıma kapasitesi olarak TB-5 (tamamen sargılama)>TB-3 (üç taraflı U-sargı)>TB-1(iki-taraflı sargılama) olduğu da görülmüştür.

6.3. FIB-2001

Kirişlerin CFRP ile güçlendirilmesi sonucu CFRP'nin kesme kuvvetine katkısı. FIB-2001 hükümlerine göre Denklem 12'deki gibi hesaplanmaktadır. Etkili FRP şekil değiştirme εfde'nin tasarım değeri, iki taraflı veya U şeklindeki FRP ceket konfigürasyonları için Denklem 13'te gösterildiği gibi hesaplanabilir. Ayrıca FRP için tamamen sarılmış konfigürasyonlar Denklem 14'te gösterildiği gibi hesaplanabilir. Burada θ; eleman eksenine göre çapraz çatlak açısı., α; ana fiber oryantasyonu ve elemanın boylamasına ekseni arasındaki açı, d; betonarme kirişler için faydalı yükseklik, bw; betonarme kirişler için genişlik, E_{fu}; FRP'nin elastisit modülü, ρ_f; FRP'nin donatı oranı.

$$V_{fd} = 0.9\varepsilon_{fd,e}.E_{fu}.\rho_f.b_w.d.(\cot\theta + \cot\alpha).\sin\alpha \qquad (12)$$

$$\varepsilon_{fd,e} = \min\left\{0.65\left(\frac{f_c^{'\,2/3}}{E_{fu}.\rho_f}\right)^{0.56}.10^{-3}; 0.17\left(\frac{f_c^{'\,2/3}}{E_{fu}.\rho_f}\right)^{0.30}.\varepsilon_{fu}\right. \qquad (13)$$

$$\varepsilon_{fd,e} = 0.17\left(\frac{f_c^{'\,2/3}}{E_{fu}.\rho_f}\right)^{0.30}.\varepsilon_{fu} \qquad (14)$$

t_f kalınlığının sürekli bağlanmış kesme donatıları için FRP donatı oranı ρ_f, Denklem 15'te gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$\rho_f = 2.t_f.\frac{\sin\alpha}{b_w} \quad (15)$$

S_f aralıklarında b_f genişliğinde şeritler veya lavhalar şeklinde olan FRP takviyesi için önceki değer Denklem 16 kullanılarak hesaplanabilir.

$$\rho_f = 2.\left(\frac{t_f}{b_w}\right).\left(\frac{b_f}{s_f}\right) \quad (16)$$

Ana fiber oryantasyonunda olan FRP'nin elastik modülünün (E_{fu}) GPa biriminde olduğu da dikkat edilmelidir.

6.4. TBEC-2019

TBEC-2019'da CFRP'nin kesme kuvvetine katkısı (V_f), Denklem 17'deki gibi hesaplanmaktadır. Burada n_f ; tek bir beton yüzey üzerindeki FRP sargı katmanlarının sayısıdır. t_f; FRP tabakasının etkili kalınlığıdır. w_f; FRP şerit genişliği. E_f; FRP Elastisite modülü. ε_f; etkili birim uzama limiti. d; faydalı eleman yüksekliği. S_f Eksenden eksene şeritlerin FRP aralıklarıdır. ACI 440 ile aynı şekilde, sürekli elyaf sargılama durumunda FRP aralığı s_f değeri, Elyaf genişliği w_f değerine eşit olmalıdır. Etkili birim uzama ε_f değeri, Denklem 18 ile belirlenen değerlerin en küçüğü olarak alınmalıdır. Yönetmeliklerde kabul edilen tek sargılama tekniğinin tam sargılama tekniği olduğu not edilmesi gerekir. Ayrıca lif açısının yönünü hesaba katmaz (fiber yönü her zaman 90º olarak varsayıldı).

$$V_f = \frac{2.n_f.t_f.w_f.E_f.\varepsilon_f.d}{sf} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{fe}\begin{cases}\leq 0.004\\ \leq 0.5\varepsilon_{fu}\end{cases} \quad (18)$$

CFRP'nin kesme kuvvetine katkısında dikkate alınan kopma birim uzaması her bir yönetmelik için farklılık ifade etmektedir. Her bir yönetmelik için dikkate alınan birim deformasyon hesabı Tablo 6.1'de, deneysel ve analitik kesme kuvveti

karşılaştırması Tablo 6.2'de verilmiştir. Ayrıca Şekil 6.4'de farklı yönetmeliklere göre karşılaştırma grafiği gösterilmiştir.

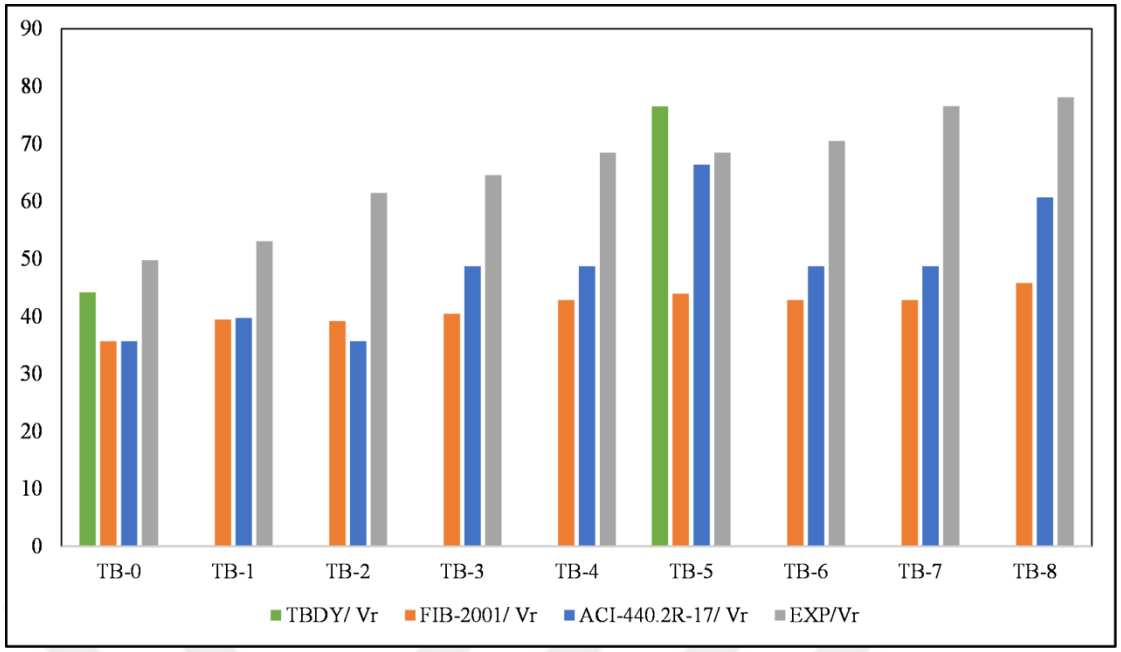
Tablo 6.1. Hesaplamalarda dikkate alınan birim deformasyon değerleri (Lifte etkili şekil değiştirme dikkate alınır)

Test numunesi	ACI 440-2R-17 CODE (εfe)	FIB-2001 CODE (εfd,e)	TBEC-2019 CODE (εfe)
TB-0	----	----	----
TB-1	0.0009	0.00145	----
TB-2	0.00002	0.00149	----
TB-3	0.003	0.00131	----
TB-4	0.003	0.001103	----
TB-5	0.0037	0.001146	0.004
TB-6	0.003	0.001103	----
TB-7	0.003	0.001103	----
TB-8	0.003	0.000951	----

Tablo 6.2. Deneysel ve analitik maksimum kesme kuvvetlerinin karşılaştırılması.

Numune Adı	**Deneysel Sonuçlar (kN) kesme kuvveti (P/2)**	**Analitik Sonuçlar (KN)**								
		TBDY-2018			**FIB-2001**			**ACI 440.2R-17**		
		V_f	$V_c + V_s$	V_r	V_f	$V_c + V_s$	$*V_r$	V_f	$V_c + V_s$	$*V_r = V_n$
TB-0	49.74	-	44.18	-	-	35.67	35.67	-	35.67	35.67
TB-1	53.10	N/A	44.18	N/A	3.77	35.67	39.44	4.71	35.67	39.7
TB-2	61.46	N/A	44.18	N/A	3.51	35.67	39.18	0.03	35.67	35.69
TB-3	64.54	N/A	44.18	N/A	4.78	35.67	40.45	15.35	35.67	48.7
TB-4	68.47	N/A	44.18	N/A	7.17	35.67	42.84	15.35	35.67	48.7
TB-5	68.47	32.34	44.18	76.52	8.29	35.67	43.96	32.34	35.67	66.4
TB-6	70.49	N/A	44.18	N/A	7.17	35.67	42.84	15.35	35.67	48.7
TB-7	76.56	N/A	44.18	N/A	7.17	35.67	42.84	15.35	35.67	48.7
TB-8	78.11	N/A	44.18	N/A	10.13	35.67	45.80	26.31	35.67	60.7

N/A ; Uygulanamaz (Not Applicable)



Şekil 6.4. Deneysel ve analitik sonuçların karşılaştırılması

ACI-440.2R-17'ye göre her bir kiriş için teorik kesme mukavemeti hesaplamalarından, ayrıca her bir kiriş için süneklik hesaplanarak ve bu sonuçların karbon fiberlerin hacimsel oranıyla karşılaştırılması ve Diyagram No. 6.3'te gösterildiği gibi çizilmesi, maksimum kesme dayanımı ve maksimum süneklik veren, kullanılabilen karbon elyafların optimum oranını belirlemek mümkündür.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada kesme açısından yeterli olmayan betonarme T kirişlerin farklı CFRP konfigürasyonu ile güçlendirilmesinde, güçlendirme tipinin davranışa olan etkisi deneysel ve analitik olarak araştırılmıştır. Bu amaçla, kesme açısından yetersiz biri referans olarak kullanılacak dokuz adet ½ geometrik ölçekli betonarme T kiriş statik dört noktadan yükleme ile test edilmiştir. Bu kirişlerin yedi tanesi kesme hasarının beklendiği bölgede parçalı CFRP konfigürasyonları ile güçlendirilmiş bir tanesi ise kesme bölgesinde tam CFRP sargılama yapılarak güçlendirilmiştir. Parçalı CFRP uygulamasında güçlendirmelerin iki tanesinde karbon elyaf farklı açılardan (45º ve 90º) ankrajlarla kirişe sabitlenmiştir. Çalışmada ayrıca elde edilen deneysel sonuçlar ACI 440.2R-17, TBEC-2019 ve FIB-2001'in vermiş olduğu amprik bağıntılarla da karşılaştırılmıştır. Yürütülen çalışmada aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

1. CFRP uygulaması ile bütün numunelerde farklı oranda olmakla beraber kirişin kesme açıklığında kesme çatlak oluşumu ve gelişiminde TB-0 referans numuneye göre kademeli olarak bir gecikme olduğu gözlenmiştir. Çalışmada elde edilen bulgulara göre her bir güçlendirme tipinin kirişlerde dayanım, rijitlik ve süneklik açısından farklı kazanımlara neden olduğu görülmüştür.
2. Ankrajlı ve ankrajsız CFRP şeritler ile güçlendirilen tüm numuneler maksimum yük taşıma kapasitesini artırmış ancak kesme kırılması ile göçmelerine engel olamamıştır. Bununla beraber ankrajlı deney numunelerinin rijitlik ve dayanım açısından önemli katkı sağladığı görülmektedir. Özellikle 45º ankrajlara sahip TB-7 numunesinde bu artışlar daha dikkat çekicidir. TB-7'de 0.85Pmax ve Pmax değerine karşılık gelen rijitlik artışı TB-0'a göre 1.36-1.37 kat fazladır. Bu nedenle güçlendirme uygulamalarında ankraj uygulamasının önemli olduğu görülmüştür.
3. TB-6 ve TB-7 numunelerine uygulanan ankrajlar deney sonuna kadar betondan ayrılmamıştır. Uygulanan ankrajlar ilgili bölgedeki CFRP şeritlerin yüzeyden soyulmasını engellemiş ancak kirişlerin çekme donatılarının akma dayanımına ulaşmasını sağlayamamıştır. Ancak bu durum ankraj yetersizliğinden değil, CFRP şerit malzemesinin (240 gr/m^2) düşük dayanıma sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum (Khalifa ve Nanni, 2000)'nin araştırmalarında bulguladıkları farklı CFRP şerit malzemelerin ankrajlar ile uygulanması durumunda kirişlerde sünek davranış sergilendiği sonucunun ancak yeterli dayanıma sahip olan CFRP ile sağlanabileceğini göstermektedir.

4. TB-5 numunesinde süneklik değerinin diğer numunelere göre daha fazla olması deney sonlanana kadar CFRP şeritlerde herhangi bir hasar olmamasıyla ilgilidir. Bu durum TB-5 kirişinde yetersiz olan kesme donatısının yerinin CFRP şeritlerin aldığının ispatı niteliğindedir. Bu çalışma bulgularına göre özellikle süneklik kaygısının daha ön planda olduğu güçlendirmelerde TB-5 tavsiye edilmektedir.
5. Ankrajsız CFRP şeritler ile güçlendirilen numunelerde göçme, CFRP'nin yüzeyden ayrılması ve kırılması ile gerçekleşmiştir. Ankrajsız CFRP şeritler deney numunelerinin deplasman yapabilme (süneklik) kapasitesini artıramamış ve güçlendirilen numunelerin kesme kırılmasından göçmesine engel olamamıştır. Fakat ankrajsız sürekli sargılı TB-5 kirişinde özellikle süneklik kazanımı diğer numunelere göre daha fazla olmuştur.
6. CFRP şeritlerin eksenleri arasındaki aralık TB-8 numunesi hariç sabit 120 mm olarak alınmıştır. Bu aralığın azalmasına bağlı olarak literatürde kirişlerin yük taşıma kapasitesinin arttığı belirtilmektedir [(Yu ve ark., 2019)]. Yapılacak yeni çalışmalarda bu aralık azaltılarak deneyler gerçekleştirilmelidir.
7. Kesme donatısı yetersiz kirişlerin CFRP şeritlerle güçlendirilmesi uygulamada önerilmektedir. Ancak CFRP malzeme seçiminde 240 gr/m^2'den daha yüksek ağırlıklı kumaşların seçilmesi yapılan çalışma sonucunda önerilmektedir.
8. Ankraj kullanılarak CFRP şeritlerin betonarme kirişe sabitlenmesi bu çalışmada sünek davranışı sağlamamıştır. Ancak literatür ışığında yapılan değerlendirme ile ankrajların dayanım, rijitlik ve süneklik artışında etkili olduğu ifade edilebilir.
9. Literatürde fan tipi ankrajlar bir donatının etrafına CFRP bundle'ların sarılması ile uygulanmaktadır [(Altin ve ark., 2010)]. Ancak bu çalışmada yalnızca yeterli derinlikte ve sıklıkta yapılan CFRP bundle'lar ile oluşturulan fan tipi ankrajların başarısı, donatı kullanımına gerek olmadığını da göstermektedir.
10. Çalışmada test edilen karbon sivri uçlu ankrajlarının kesme kapasitesi açısından önemli kazanımlara neden olduğu görülmüştür. Özellikle 45 derece açı ile döşeme kiriş birleşimlerine yerleştirilen ankrajları kirişlerin kapasite artışı hatırı sayılır olmuştur. Benzer sonuçları (Kim ve ark., 2012) rapor etmişlerdir. (Koutas ve Triantafillou, 2013) elde ettiği sonuçlardan T kirişlerde yatay gövde ankrajlarının kiriş kesme kapasitesini %40-45 artırır sonucu bu çalışmada elde edilememiştir. Fakat(Baggio ve ark., 2014) ve (Ozden ve ark., 2014)'ın da bahsetmiş olduğu gibi ankrajlar FRP'nin ayrılmasını geciktirmiştir. (Eslami ve ark., 2019; Eslami ve ark., 2020)'ın belirttiği gibi FRP ankrajlarının uygulanmasına yönelik kesin bir konsensüs olmasa bile yeterli derinlikte ve uygun lokasyona yerleştirilecek olan sivri uçlu ankrajların her hâlükârda kesme

kapasitesini artıracağı, kompozit için önemli bir problem olan ayrılma veya delaminasyon etkisini de azaltacağı görülmüştür. Burada önemli olan bir diğer konu ise (Chen ve ark., 2016) ve, (El-Saikaly ve ark., 2015),(Saribiyik ve ark., 2021) çalışmalarında vurguladıkları "FRP yandan sarma ve U sargı durumunda FRP şeritlerinin uçlarına ankraj ve / veya FRP şerit başlığı uygulanarak ayrılma hasarı önlenebilir." olması durumudur. Sonuç olarak U şeklinde sarılmış döşeme altına kadar uzatılmış CFRP uygulamalarında kirişlere uygulanacak olan ankrajları uygulama problemleri bir kenara bırakılacak olursa önemli avantaj getirecekleri görülmektedir.

11. Bu çalışmada; kiriş gövdesini tam ve yarım saran U, iki taraflı (side-bonded jackets), döşeme altında (kanatlara) uzatılan U, döşemenin içinde geçen tam sargı, döşeme altında (kanatlara) uzatılan U'ların döşeme ve gövde noktalarından sivri uçlu ankraklar ile kirişlere bağlanması ve kesme bölgesinin sürekli sarılması (fully wrapped jacketing) gibi çok farklı CFRP tipleri ile kesme açısından zayıf olan T kiriş güçlendirilmiştir. Literatürde(Azam ve Soudki, 2014)'nin söylemiş olduğu gibi "side-bonded and U-shaped jackets exhibited similar performance in terms of strength" sonucu elde edilememiştir. (Jung ve ark., 2015) ve(Tetta ve ark., 2015)'ın söylemiş olduğu gibi U şeklinde sargının iki kenardan (side-bonded jackets) yapılana göre çok daha etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca beklendiği gibi döşeme altına kadar uzayan tamamen sarılmış ceket kesme açısından en etkili güçlendirme şekli olmuştur. Bununla beraber (Tetta ve ark., 2015)'ın söylediğinin tersine kapalı ceketler tüm yöntemlere göre en etkilisi olmamıştır. Bu sonuç uygulamada özellikle betonarme döşemelerin kırılması ve kirişin tamamen sarılması (closed jackets) kaygısının da gereksiz olduğunu göstermiştir. Bunun yerine kesme bölgesinde yapılacak olan tam sargılama ya da parçalı CFRP'de döşeme kiriş birleşiminde kullanılacak olan 45 derecelik ankrajlar daha anlamlı ve pratiktir. 45 derecelik ankrajlar ile ilgili benzer sonuçlar (Ozbakkaloglu ve Saatcioglu, 2009) tarafından da rapor edilmiştir.

12. Bu çalışmada standart bir beton dayanımı kullanılmıştır. Özellikle farklı beton dayanımlarının kullanılması durumunda CFRP'nin etkinliği (Loreto ve ark., 2015)'ın dediği gibi değişecektir. Ayrıca ankrajların derinliği, ankrajların tipi kullanılan ankraj sayısı da kirişlerin kesme kapasitesi ve sünekliği için önemli birer parametredir. Bu duruma(Ceroni ve ark., 2008)'da işaret etmiştir.(ACI(440.2R-08, 2008)'in önerdiği özellikle kirişlerin köşelerindeki dönüşlerde minimum 13 mm lik bir yarıçapın olması önemlidir. Bu da sonuçlara etki eden bir parametredir. (Pham ve Al-Mahaidi, 2006)

bahsettiği gibi köşe noktalarındaki 0–12 mm yarıçaplı keskin dönüşler ankraj kapasitelerinde önemli azalmaya da neden olmaktadır.

13. Çalışmada statik bir yükleme etkisi altında testler yapılmıştır. Moment ve kesme kuvveti deprem etkisinde olduğu gibi yön değiştirmemektedir. Özellikle deprem etkisi altında meydana gelecek olan çevrimsel yüklemelerde ankrajların ve kompozit malzemenin genel performansının araştırılması gerekmektedir.

14. Yönetmeliklerde verilen denklemlerden elde edilen sonuçlar deneysel verilerler belirli oranlarda karşılamaktadır. Özellikle yönetmeliklerde baz alınan CFRP deformasyon limit değerleri hesaplamalarda en etkili parametre olarak görülmektedir. Genel kabul görmüş olan 0.004 elastik deformasyon seviyesi betonda hasar görme anında teorik deformasyon limit değerine oldukça yakındır. Ayrıca yönetmeliklerde tasarım felsefesi gereği emniyet faktöründen dolayı CFRP'de birim uzama bir miktar sınırlı kabul edilmektedir. Burada amaç CFRP'nin miktarını artırarak kesme açısından reserv kapasite (dayanım fazlalığı) miktarını artırmaktır.

15. Çalışmada yapılan analitik çözümlemelerde CFRP'nin birim uzaması sabit bir değer olarak kabul edilmiştir. Kirişte kullanılan şerit polimerlerin hepsinde deformasyon değerlerinin birbirinden farklı olabileceği aşikârdır. Bu nedenle gelecek çalışmalarda polimerler üzerinden deformasyon ölçümü yapılarak analitik model daha gerçekçi olabilir.

16. Yapılan analitik çalışmada özellikle TB-5 numunesinde ACI standardının oldukça yakın sonuç verdiği görülmüştür. Ayrıca TBEC-2019 ile yalnızca tam sargılama durumu için önerilen formülün olması bir eksiklik olarak değerlendirilmiştir. TBEC-2019'un ACI'da olduğu gibi farklı CFRP yerleşim durumlarına göre revize edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

440.2R-08, A., 2008, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures : reported by ACI Committee 440, *Farmington Hills (MI)*, ACI, p.

Altin, S., Anil, Ö., Kopraman, Y., Mertoğlu, Ç. ve Kara, M. E., 2010, Improving shear capacity and ductility of shear-deficient RC beams using CFRP strips, *Journal of reinforced plastics and composites*, 29 (19), 2975-2991.

Azam, R. ve Soudki, K., 2014, FRCM strengthening of shear-critical RC beams, *Journal of composites for construction*, 18 (5), 04014012.

Baggio, D., Soudki, K. ve Noel, M., 2014, Strengthening of shear critical RC beams with various FRP systems, *Construction and Building Materials*, 66, 634-644.

Belarbi, A., Bae, S.-W. ve Brancaccio, A., 2012, Behavior of full-scale RC T-beams strengthened in shear with externally bonded FRP sheets, *Construction and Building Materials*, 32, 27-40.

Ceroni, F., Pecce, M., Matthys, S. ve Taerwe, L., 2008, Debonding strength and anchorage devices for reinforced concrete elements strengthened with FRP sheets, *Composites Part B: Engineering*, 39 (3), 429-441.

Chen, G., Zhang, Z., Li, Y., Li, X. ve Zhou, C., 2016, T-section RC beams shear-strengthened with anchored CFRP U-strips, *Composite Structures*, 144, 57-79.

El-Saikaly, G., Godat, A. ve Chaallal, O., 2015, New anchorage technique for FRP shear-strengthened RC T-beams using CFRP rope, *Journal of composites for construction*, 19 (4), 04014064.

Eslami, A., Shayegh, H. R., Moghavem, A. ve Ronagh, H. R., 2019, Experimental and analytical investigations of a novel end anchorage for CFRP flexural retrofits, *Composites Part B: Engineering*, 176, 107309.

Eslami, A., Moghavem, A., Shayegh, H. R. ve Ronagh, H. R., 2020, Effect of FRP stitching anchors on ductile performance of shear-deficient RC beams retrofitted using FRP U-wraps, *Structures*, 407-414.

Jung, K., Hong, K., Han, S., Park, J. ve Kim, J., 2015, Prediction of flexural capacity of RC beams strengthened in flexure with FRP fabric and cementitious matrix, *International Journal of Polymer Science*, 2015.

Khalifa, A. ve Nanni, A., 2000, Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites, *Cement and Concrete Composites*, 22 (3), 165-174.

Kim, Y., Quinn, K., Satrom, N., Garcia, J., Sun, W., Ghannoum, W. M. ve Jirsa, J. O., 2012, Shear strengthening of reinforced and prestressed concrete beams using carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets and anchors.

Koutas, L. ve Triantafillou, T. C., 2013, Use of anchors in shear strengthening of reinforced concrete T-beams with FRP, *Journal of composites for construction*, 17 (1), 101-107.

Loreto, G., Babaeidarabad, S., Leardini, L. ve Nanni, A., 2015, RC beams shear-strengthened with fabric-reinforced-cementitious-matrix (FRCM) composite, *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)*, 7 (4), 341-352.

Ozbakkaloglu, T. ve Saatcioglu, M., 2009, Tensile behavior of FRP anchors in concrete, *Journal of composites for construction*, 13 (2), 82-92.

Ozden, S., Atalay, H. M., Akpinar, E., Erdogan, H. ve Vulaş, Y. Z., 2014, Shear strengthening of reinforced concrete T-beams with fully or partially bonded fibre-reinforced polymer composites, *Structural Concrete*, 15 (2), 229-239.

Pham, H. B. ve Al-Mahaidi, R., 2006, Prediction models for debonding failure loads of carbon fiber reinforced polymer retrofitted reinforced concrete beams, *Journal of composites for construction*, 10 (1), 48-59.

Saribiyik, A., Abodan, B. ve Balci, M. T., 2021, Experimental study on shear strengthening of RC beams with basalt FRP strips using different wrapping methods, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24 (1), 192-204.

Tetta, Z. C., Koutas, L. N. ve Bournas, D. A., 2015, Textile-reinforced mortar (TRM) versus fiber-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams, *Composites Part B: Engineering*, 77, 338-348.

Yu, F., Guo, S., Wang, S. ve Fang, Y., 2019, Experimental study on high pre-cracked RC beams shear-strengthened with CFRP strips, *Composite Structures*, 225, 111163.

440.2R-08, A., 2008, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures : reported by ACI Committee 440, *Farmington Hills (MI)*, ACI, p.

ACI-2R-440-17 ve American Concrete, I., 2017, Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures, p.

Altin, S., Anil, Ö., Kopraman, Y., Mertoğlu, Ç. ve Kara, M. E., 2010, Improving shear capacity and ductility of shear-deficient RC beams using CFRP strips, *Journal of reinforced plastics and composites*, 29 (19), 2975-2991.

Azam, R. ve Soudki, K., 2014, FRCM strengthening of shear-critical RC beams, *Journal of composites for construction*, 18 (5), 04014012.

Baggio, D., Soudki, K. ve Noel, M., 2014, Strengthening of shear critical RC beams with various FRP systems, *Construction and Building Materials*, 66, 634-644.

Belarbi, A., Bae, S.-W. ve Brancaccio, A., 2012, Behavior of full-scale RC T-beams strengthened in shear with externally bonded FRP sheets, *Construction and Building Materials*, 32, 27-40.

Ceroni, F., Pecce, M., Matthys, S. ve Taerwe, L., 2008, Debonding strength and anchorage devices for reinforced concrete elements strengthened with FRP sheets, *Composites Part B: Engineering*, 39 (3), 429-441.

Chen, G., Zhang, Z., Li, Y., Li, X. ve Zhou, C., 2016, T-section RC beams shear-strengthened with anchored CFRP U-strips, *Composite Structures*, 144, 57-79.

Chen, J. F. ve Teng, J., 2003, Shear capacity of fiber-reinforced polymer-strengthened reinforced concrete beams: Fiber reinforced polymer rupture, *Journal of Structural Engineering*, 129 (5), 615-625.

Chen, J.-F. ve Teng, J., 2003, Shear capacity of FRP-strengthened RC beams: FRP debonding, Construction and Building Materials, 17 (1), 27-41.

Deifalla, A. ve Ghobarah, A., 2010, Strengthening RC T-beams subjected to combined torsion and shear using FRP fabrics: Experimental study, Journal of composites for construction, 14 (3), 301-311.

Dias, S. J. ve Barros, J. A., 2006, NSM CFRP laminates for the shear strengthening of T section RC beams.

Dias, S. J. ve Barros, J. A., 2010, Performance of reinforced concrete T beams strengthened in shear with NSM CFRP laminates, Engineering Structures, 32 (2), 373-384.

Elgabbas, F., El-Ghandour, A., Abdelrahman, A. ve El-Dieb, A., 2010, Different CFRP strengthening techniques for prestressed hollow core concrete slabs: Experimental study and analytical investigation, Composite Structures, 92 (2), 401-411.

El-Saikaly, G., Godat, A. ve Chaallal, O., 2015, New anchorage technique for FRP shear-strengthened RC T-beams using CFRP rope, *Journal of composites for construction*, 19 (4), 04014064.

Eslami, A., Shayegh, H. R., Moghavem, A. ve Ronagh, H. R., 2019, Experimental and analytical investigations of a novel end anchorage for CFRP flexural retrofits, *Composites Part B: Engineering*, 176, 107309.

Eslami, A., Moghavem, A., Shayegh, H. R. ve Ronagh, H. R., 2020, Effect of FRP stitching anchors on ductile performance of shear-deficient RC beams retrofitted using FRP U-wraps, *Structures*, 407-414.

Ferreira, D., Oller, E., Marí, A. ve Bairán, J., 2016, Analysis of FRP shear strengthening solutions for reinforced concrete beams considering debonding failure, Journal of composites for construction, 20 (5), 04016018.

Godat, A., Chaallal, O. ve Obaidat, Y., 2020, Non-linear finite-element investigation of the parameters affecting externally-bonded FRP flexural-strengthened RC beams, Results in Engineering, 8, 100168.

Godat, A., Hammad, F. ve Chaallal, O., 2020b, State-of-the-art review of anchored FRP shear-strengthened RC beams: A study of influencing factors, Composite Structures, 254, 112767.

Ibrahim, M., Ebead, U. ve Al-Ansari, M., 2020, Life Cycle Assessment for Fiber-Reinforced Polymer (FRP) nComposites Used in Concrete Beams: A State-of-the-Art Review.

Jung, K., Hong, K., Han, S., Park, J. ve Kim, J., 2015, Prediction of flexural capacity of RC beams strengthened in flexure with FRP fabric and cementitious matrix, *International Journal of Polymer Science*, 2015.

Juntanalikit, P., Jirawattanasomkul, T. ve Pimanmas, A., 2016, Experimental and numerical study of strengthening non-ductile RC columns with and without lap splice by Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) jacketing, Engineering Structures, 125, 400-418.

Kaltakci, M., Arslan, M., Korkmaz, H. H. ve Ozturk, M., 2007, An investigation on failed or damaged reinforced concrete structures under their own-weight in Turkey, Engineering Failure Analysis, 14 (6), 962-969.

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

Khalifa, A. ve Nanni, A., 2000, Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites, *Cement and Concrete Composites*, 22 (3), 165-174.

Kim, Y., Quinn, K., Satrom, N., Garcia, J., Sun, W., Ghannoum, W. M. ve Jirsa, J. O., 2012, Shear strengthening of reinforced and prestressed concrete beams using carbon fiber reinforced polymer (CFRP) sheets and anchors.

Koutas, L. ve Triantafillou, T. C., 2013, Use of anchors in shear strengthening of reinforced concrete T-beams with FRP, *Journal of composites for construction*, 17 (1), 101-107.

Lignola, G., Prota, A., Manfredi, G. ve Cosenza, E., 2006, Flexural Behaviour of RC Hollow Columns Confined with CFRP, Proceedings of 2nd fib Congress, 10-37.

Loreto, G., Babaeidarabad, S., Leardini, L. ve Nanni, A., 2015, RC beams shear-strengthened with fabric-reinforced-cementitious-matrix (FRCM) composite, *International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE)*, 7 (4), 341-352.

Ozbakkaloglu, T. ve Saatcioglu, M., 2009, Tensile behavior of FRP anchors in concrete, *Journal of composites for construction*, 13 (2), 82-92.

Ozden, S., Atalay, H. M., Akpinar, E., Erdogan, H. ve Vulaş, Y. Z., 2014, Shear strengthening of reinforced concrete T-beams with fully or partially bonded fibre-reinforced polymer composites, *Structural Concrete*, 15 (2), 229-239.

Panda, K., Bhattacharyya, S. ve Barai, S., 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.

Panigrahi, S. ve Ranjan Das, R., 2016, Study and analysis of damages in functionally graded adhesively bonded joints of laminated FRP composites: A critical review, Reviews of Adhesion and Adhesives, 4 (2), 152-165.

Pham, H. B. ve Al-Mahaidi, R., 2006, Prediction models for debonding failure loads of carbon fiber reinforced polymer retrofitted reinforced concrete beams, *Journal of composites for construction*, 10 (1), 48-59.

Rezazadeh, M., 2015, Innovative methodologies for the enhancement of the flexural strengthening performance of NSM CFRP technique for RC beams.

Saribiyik, A., Abodan, B. ve Balci, M. T., 2021, Experimental study on shear strengthening of RC beams with basalt FRP strips using different wrapping methods, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24 (1), 192-204.

Sezen, H., Whittaker, A. S., Elwood, K. J. ve Mosalam, K. M., 2003, Performance of reinforced concrete buildings during the August 17, 1999 Kocaeli, Turkey earthquake, and seismic design and construction practise in Turkey, Engineering Structures, 25 (1), 103-114.

Tetta, Z. C., Koutas, L. N. ve Bournas, D. A., 2015, Textile-reinforced mortar (TRM) versus fiber-reinforced polymers (FRP) in shear strengthening of concrete beams, *Composites Part B: Engineering*, 77, 338-348.

Triantafillou, T., Matthys, S., Audenaert, K., Balázs, G., Blaschko, M., Blontrock, H., Czaderski, C., David, E., Di Tomasso, A. ve Duckett, W., 2001, Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, International Federation for Structural Concrete (fib). 14.

Yu, F., Guo, S., Wang, S. ve Fang, Y., 2019, Experimental study on high pre-cracked RC beams shear-strengthened with CFRP strips, *Composite Structures*, 225, 111163.

Zaki, M. A., Rasheed, H. A., Roukerd, R. R. ve Raheem, M., 2020, Performance of reinforced concrete T beams strengthened with flexural CFRP sheets and secured using CFRP splay anchors, Engineering Structures, 210, 110304.