

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CFRP İLE GÜÇLENDİRİLEN ÇELİK LİFLİ BETONARME KİRİŞLERDE DAYANIM
ARTIŞLARININ İRDELENMESİ**

KADİR ŞENGÜN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YAPI PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. GÜRAY ARSLAN**

İSTANBUL, 2016

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CFRP İLE GÜÇLENDİRİLEN ÇELİK LİFLİ BETONARME KİRİŞLERDE DAYANIM
ARTIŞLARININ İRDELENMESİ**

Kadir ŞENGÜN tarafından hazırlanan tez çalışması 15.11.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

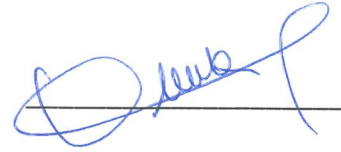
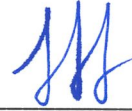
Prof. Dr. Güray ARSLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Güray ARSLAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Sema ALACALI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Almıla UZEL
Yeditepe Üniversitesi



ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bana yardımcı olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, bana rehberlik eden değerli Hocam Sn. Prof. Dr. Güray ARSLAN'a ve gerek deney öncesi hazırlıklarda gerekse deney aşamasındaki katkılarından ötürü Sn. Dr. Rıza Secer Orkun KESKİN'e teşekkür ederim.

Gerek eğitim hayatında gerekse hayatın her alanında yanımda olan benden maddi manevi desteklerini esirgemeyen babam Şaban ŞENGÜN'e, annem Nuran ŞENGÜN'e ve kardeşim Zeynep ŞENGÜN'e teşekkür ederim.

Kasım, 2016

Kadir ŞENGÜN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	5
1.3 Hipotez	5
BÖLÜM 2	
DENEY DÜZENEĞİ VE KİRİŞLERİN ÖZELLİKLERİ.....	6
2.1 Kirişlerin Geometrisi ve Malzeme Özellikleri.....	6
2.1.1 CFRP Özellikleri ve Güçlendirme Şeması	7
2.1.2 Üretimde Kullanılan Betonun Özellikleri	8
2.2 Deney Öncesi Yapılan Hazırlıklar.....	9
2.3 Deney Düzeneği ve Deneyin Gerçekleştirilmesi	11
BÖLÜM 3	
DENEY SONUÇLARI VE TEMEL DEĞİŞKENLERİN ETKİSİ.....	12
3.1 Kiriş Deney Sonuçları.....	12
3.1.1 F2.0 Serisi Kirişleri	12
3.1.2 R (Referans) Serisi Kirişler.....	17

BÖLÜM 4

CFRP İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ ÇELİK LİFLİ BETONARME KİRİŞLERİN DAYANIMI21

4.1 Kesme Dayanımı.....21

4.2 Eğilme Dayanımı.....25

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER26

KAYNAKLAR.....28

ÖZGEÇMİŞ.....31



SİMGE LİSTESİ

a	Kiriş kesme açıklığı
A_{fv}	CFRP alanı
b_w	Kiriş kesit genişliği
c	Tarafsız eksen yüksekliği
d	Kiriş etkili yüksekliği
d_f	Çelik lif aderans katsayısı
D_f	Çelik lif çapı
d_{fv}	CFRP etkili yüksekliği
E_f	CFRP elastisite modülü
ε	Birim şekildeğiştirme
F	Çelik lif faktörü
f_c	Beton basınç dayanımı
f_{ct}	Betonun çekme dayanımı
f_{cuf}	Çelik lifli betonun küp dayanımı
f_{Ftu}	Maksimum çatlak genişliğine karşılık gelen eğilme-çekme dayanımı
k_v	Yapışmaya bağlı bir katsayı
L_f	Çelik lif uzunluğu
$M_{flex,ACI}$	ACI 318-14 (2014)'e göre hesaplanan eğilme momenti kapasitesi
P_{co}	Maksimum yük
$P_{flex,ACI}$	$M_{flex,ACI}$ kullanılarak hesaplanan yük
s_f	CFRP şeritler arasındaki mesafe
t_f	CFRP kalınlığı
V_f	Hacimsel çelik lif yüzdesi
V_{CFRP}	CFRP kesme dayanımı
v_{oc}	Betonun karşıladığı kesme dayanımı
w_f	CFRP şerit genişliği
α	CFRP şeritlerin kiriş eksenine yaptıkları açı
z	Moment kolu
δ_u	Göçmede açıklık ortası yerdeğiştirme
ρ	Çekme donatısı oranı

KISALTMA LİSTESİ

ACI	American Concrete Institute
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer
DBYBHY	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
FRP	Fiber Reinforced Polymer
PDT	Potentiometric Displacement Transducer
SFRC	Steel Fiber Reinforced Concrete
TEC	Turkish Earthquake Code
TS500	Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1	Kesmeye karşı önerilen güçlendirme şekilleri [14]4
Şekil 2.1	Güçlendirme şekilleri8
Şekil 2.2	Deney öncesi yapılan hazırlıklar10
Şekil 2.3	Deney düzeneği11
Şekil 3.1	Yükleme öncesi A2.5F2.0C5/10 kirişi ön yüzü13
Şekil 3.2	Güç tükenmesi oluşumu sonrası A2.5F2.0C5/10 kirişi.....13
Şekil 3.3	Yükleme öncesi A2.5F2.0C10/10 kirişi ön yüzü14
Şekil 3.4	Güç tükenmesi oluşumu sonrası A2.5F2.0C10/10 kirişi.....14
Şekil 3.5	Yükleme öncesi DA2.5F2.0C10/10 kirişi ön yüzü.....15
Şekil 3.6	Güç tükenmesi oluşumu sonrası DA2.5F2.0C10/10 kirişi16
Şekil 3.7	F2.0 Serisi kirişleri yük-yerdeğiştirme eğrileri17
Şekil 3.8	Yükleme öncesi A2.5RC10/10 kirişi ön yüzü.....18
Şekil 3.9	Güç tükenmesi oluşumu sonrası A2.5RC10/10 kirişi18
Şekil 3.10	Yükleme öncesi DA2.5RC10/10 kirişi ön yüzü19
Şekil 3.11	Güç tükenmesi oluşumu sonrası DA2.5RC10/10 kirişi.....19
Şekil 3.12	R (Referans) Serisi kirişleri yük-yerdeğiştirme eğrileri.....20

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1 Kirişlerin özellikleri	7
Çizelge 2.2 Betonda kullanılan malzemelerin karışım oranları	9
Çizelge 4.1 Verilen bağıntılarla hesaplanan yük taşıma kapasiteleri	24
Çizelge 4.2 Deney numunelerinin eğilme dayanımları	25

CFRP İLE GÜÇLENDİRİLEN ÇELİK LİFLİ BETONARME KİRİŞLERDE DAYANIM ARTIŞLARININ İRDELENMESİ

Kadir ŞENGÜN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Güray ARSLAN

Bu çalışmada kesme açıklığının kirişin etkili yüksekliğine oranı (a/d) 2.5, çelik lifsiz ve %2 çelik lif oranına sahip etriyesiz betonarme kirişlerde Karbon Lifli Polimer (CFRP) ile güçlendirme sonucunda dayanımda meydana gelen değişimler incelenmiştir. Güçlendirmede, CFRP şerit aralıkları Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY 2007)'de verilen koşulu sağlamamaktadır. Bu koşulun da değerlendirilmesi amacıyla, üç adet hasarsız ve iki adet hasarlı betonarme kiriş tek yönlü yerdeğiştirme kontrollü artan yük etkilerine maruz bırakılmıştır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, DBYBHY (2007) verilen CFRP şerit aralıkları koşulunu sağlamayan kirişlerde de kirişlerin dayanım ve sünekliğinde artış görülmüştür. Ayrıca, literatürde CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin kesme dayanımının hesabı için önerilen bağıntıların tahminleri deneysel verilerle karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çelik lif, CFRP, Betonarme, Kiriş, Kesme dayanımı, Eğilme dayanımı

**INVESTIGATION OF STRENGTH INCREASE IN STEEL FIBER REINFORCED
CONCRETE BEAMS RETROFITTED WITH CFRP**

Kadir ŞENGÜN

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Güray ARSLAN

In this study, the changes in the strength of reinforced concrete beams without stirrups due to retrofitting with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) were investigated. The beams have a shear span-to-effective depth ratio (a/d) of 2.5 and either no steel fibers or a volume fraction of steel fibers in the amount of 2%. The spacings of CFRP sheets used for retrofitting do not satisfy the requirement given by Turkish Earthquake Code (TEC 2007). Also with the aim of assessing this requirement, three undamaged and two damaged reinforced concrete beams were subjected to monotonic displacement-controlled increasing loads. Improvements in the strength and ductility of beams were observed even in the case of beams that does not satisfy the CFRP sheet spacing requirement given by TEC (2007). Besides, the predictions obtained from the equations available in the literature for estimating the shear strength of beams retrofitted with CFRP were compared with experimental results.

Keywords: Steel fiber, CFRP, Reinforced Concrete, Beam, Shear Strength, Flexural Strength

1.1 Literatür Özeti

Bu çalışmada, çelik lifsiz ve %2 çelik lif içeren betonarme kirişlerin farklı şerit genişliklerine sahip karbon lifli donatılı polimer (carbon fiber reinforced polymer, CFRP) ile güçlendirilmesi sonucu dayanımda meydana gelen değişimler deneysel olarak incelenmiştir. Lifli polimerler son yıllarda mevcut yapıların taşıma gücünü ve sünekliğini arttırmada, bir başka ifade ile güçlendirmede en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Bu malzemelerin yüksek dayanım, düşük ağırlık, yüksek korozyon direnci, istenilen özellikte üretilebilmesi vb. nedenlerden ötürü güçlendirmede kullanılması malzemenin olumlu özelliklerini yansıtır. Söz konusu malzemelerin dezavantajları ise, pahalı olması, üretiminin ileri teknoloji gerektirmesi sayılabilir. Son yıllarda güçlendirme uygulamalarında oldukça fazla kullanılan CFRP hakkında deneysel ve teorik çalışmalarda artış gözlenmektedir. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Khalifa vd. (1998) tarafından yapılan çalışmada, "Fiber Reinforced Polymer (FRP)" şeritlerinin kirişlerin güçlendirilmesinde ve kesme dayanımının arttırılmasında kullanılması incelenmiştir. Söz konusu çalışmada, kesme dayanımının FRP kullanılarak arttırılması amacıyla önerilen çok sayıda güçlendirme şeklinin olduğu belirtilmiş ve FRP malzemesinin kesme dayanımına katkısının hesaplanması için iki adet bağlantı önerilmiştir [1].

Khalifa ve Nanni (2000) tarafından yapılan çalışmada, T kesitli betonarme kirişler FRP ile farklı şekillerde güçlendirilmiştir. Çalışmalarının sonucunda FRP kullanılmasının kiriş kesme dayanımını önemli oranda arttırdığı, yönetmeliklerde verilen bağıntıların güvenli tarafta kaldıkları ve kabul edilebilir oldukları belirtilmiştir [2].

Khalifa ve Nanni (2002) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise, kesme dayanımı yetersiz olan basit mesnetli kirişlerde CFRP şeritler ile güçlendirmenin kiriş kesme dayanımına etkisi incelenmiştir. Söz konusu çalışmada temel değişkenler; etriye, kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı (a/d), CFRP ile güçlendirme şekilleri ve güçlendirmede kullanılan CFRP oranıdır. Çalışmanın sonucunda CFRP'nin kesme dayanımını önemli oranda arttırdığı, söz konusu artış miktarının değişkenlere bağlı olduğu ifade edilmiştir [3].

Önal (2009) tarafından yapılan çalışmada, kesme ve eğilme dayanımı yetersiz olan kirişlerin CFRP kullanarak güçlendirilmesi ile kesme dayanımında meydana gelen artışlar incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Güçlendirilen kirişlerden bazıları eğilme dayanımını, bazıları ise kesme dayanımını arttıracak şekilde güçlendirilmiş ve güç tükenmesi oluşana kadar yük uygulanmıştır. Çalışma sonucunda CFRP'nin hem eğilme ve kesme dayanımlarını 40% oranında arttırdığı belirtilmiştir [4].

Bukhari vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada, CFRP şeritlerle güçlendirilmiş kirişlerde dayanım artışları ve CFRP'in kesme dayanımına katkısının hesabı için yönetmelikler ve çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen bağıntıların doğrulukları incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Deneyler sonucunda CFRP'in kesme dayanımını önemli oranda arttırdığı ve CFRP'in kiriş eksenine 45° açı yapacak şekilde kullanılmasının en faydalı durum olduğu belirlenmiş ve kesme dayanımına CFRP'in katkısının tahmini için bağıntı önerilmiştir [5].

CFRP şeritlerinin kiriş kesme dayanımını artırıp artırmayacağını araştırıldığı Triantafillou (1998) tarafından yapılan çalışmada, farklı miktarlarda ve şekillerde CFRP ile güçlendirilen kirişlerin kesme dayanımı tahmini için bağıntı önerilmiştir [6].

Menegotto vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada güçlendirme şekline bağlı olarak uygun sınır koşulları, kesme çatlağının genişliğine göre FRP'nin sahip olması gereken koşullar ve uygulanma biçimi araştırılmıştır. Söz konusu parametreler göz önüne alınarak FRP ile güçlendirilen yapı elemanlarının kesme dayanımı tahmini için analitik bağıntı önerilmiştir [7].

Alzate vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada, kesme dayanımının artırılması amacıyla FRP ile güçlendirilen yapı elemanlarında, etriye ve beton arasındaki etkileşim deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Çalışmaların sonucunda, FRP ile güçlendirmenin yapı elemanlarının kesme dayanımını önemli ölçüde arttırdığı, özellikle tüm yüzeylerin FRP ile sarılması durumunda bu dayanım artışının daha fazla olduğunu belirtilmiştir. Ayrıca yapı elemanlarında güç tükenmesi durumuna gelmeden önce çatlak bölgelerindeki etriyelerin aktığı, kesme dayanımında betonun, etriyenin ve FRP'nin katkısının olduğu ifade edilmiştir [8].

Norris vd. (1997) tarafından yapılan çalışmada CFRP şeritlerle güçlendirilmiş hasarlı kirişlerin davranışının anlaşılması için deneysel ve analitik çalışmalar yapılmıştır. CFRP şeritler, kirişlerin çekme yüzlerine ve gövdelerine epoksi kullanılarak yapıştırılmıştır. Kirişlerde güç tükenmesi oluşana kadar yük uygulanmış, farklı güçlendirme uygulamaları yapılarak kırılma biçimleri ve bulunan dayanımlar karşılaştırılmıştır [9].

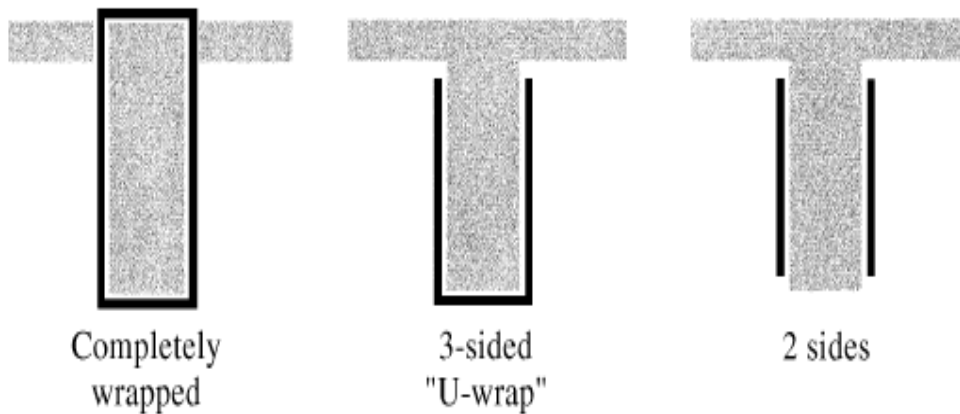
Pellegrino vd. (2002) tarafından yapılan deneysel çalışmada etriyeli, etriyesiz ve farklı miktarlarda CFRP şeritlerle güçlendirilen kirişlerin dayanımları incelenmiştir. CFRP ile güçlendirmenin kirişlerin dayanımlarını önemli ölçüde arttığı, bu artışın güçlendirme şemasına, CFRP şeritlerin genişlik-kalınlık vb. özelliklerine ve etriye oranına bağlı olduğu ifade edilmiştir [10].

FRP ile güçlendirilen kirişlerin kesme dayanımı tahmini için literatürde önerilen bağıntılar ve bağıntılardaki parametrelerinin değerlendirildiği Chen vd.(2003) tarafından çalışmada, kesme dayanımı tahmini için yeni bir analitik model önerilmiş ve bu yeni modeli literatürden toplanan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır [11].

Barros vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada, FRP ile güçlendirilen yapı elemanlarının kesme dayanımının hesaplanması için önerilen bağıntıların, literatürdeki deneysel çalışmalar kullanılarak istatistiksel değerlendirilmesi yapılmıştır. Çalışma sonucunda, hiçbir bağıntının FRP ile güçlendirmenin kesme dayanımına katkısını yeterli doğrulukta tahmin etmediği ifade edilmiştir [12].

Belarbi ve Acun (2013) tarafından yapılan çalışmada ise kirişlerin kesme dayanımını arttırmada FRP kullanılma nedenlerini ve FRP kullanılarak güçlendirilen kirişlerin tasarımıyla ilgili mevcut yönetmelikler incelenmiştir. Çalışma sonucu dünyada doğruluğu tam olarak kabul edilmiş bir yönetmeliğin olmadığını belirtmiş ve yapılması gereken çalışmalarla ilgili bilgi vermişlerdir [13].

Bu çalışmada, çelik lifli/lifsiz, hasarlı/hasarsız kirişlerin CFRP şerit genişliği/aralığı değişken alınarak kesme dayanımlarındaki değişim deneysel olarak değerlendirilmiştir. Literatür ve yönetmeliklerde (ACI, CSA) kirişlerin kesmeye göre CFRP kullanılarak güçlendirilmesi için üç farklı güçlendirme şekli önerilmiştir [14]. Bu güçlendirme şekilleri Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında "Completely Wrapped" yani kirişin dört tarafından sarılarak güçlendirilmesi tekniği kullanılmıştır. Elemanlarda meydana gelebilecek sıyrılma, yırtılma ve CFRP ile ilgili oluşabilecek diğer kusurların oluşumunun giderilmesi amacıyla, tüm kirişler 2 kat tam sargılı CFRP ile güçlendirilmiştir. CFRP ile güçlendirmede, DBYBHY'de tanımlanan CFRP şerit genişliği ve aralığı sınırlarının altında kullanılmıştır.



Şekil 1.1 Kesmeye karşı önerilen güçlendirme şekilleri [14]

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada, kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı 2.5 ve etriyesiz olan kirişler CFRP ile güçlendirilmiş, çelik lifli ve lifsiz kirişlerin dayanımlarındaki artışları ve yük altındaki davranışları incelenmiştir. Deney sonuçları literatürde bazı araştırmacılar ve yönetmeliklerde verilen analitik bağıntılar kullanılarak değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada kendi içlerinde farklı beton dayanımına, farklı çelik lif oranına ve farklı CFRP şerit genişlikleriyle tam sargılı güçlendirilmiş olan beş adet etriyesiz kiriş üzerinde tek yönlü yerdeğiştirme kontrollü artan yük etkilerine maruz kiriş deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre çelik lif oranının, beton dayanımının ve CFRP şerit genişliklerinin kiriş dayanımına olan etkileri incelenmiştir.

1.3 Hipotez

Özellikle ülkemiz gibi deprem ülkelerinde hasarlı yapıların güçlendirilmesi büyük önem arz etmektedir. Bunun için kullanılan birçok yöntem vardır. Bu çalışmamızda bu yöntemlerden biri olan CFRP ile güçlendirme incelenmiştir. Lifli polimerler yüksek dayanımlı, düşük ağırlıklı, yüksek korozyon direncine sahip malzemelerdir. Bu özelliklerinden ötürü güçlendirmede sıklıkla kullanılmaktadır. Literatür kısmında verilen çalışmalardan özetlendiği gibi elemanda FRP kullanımı, elemanların dayanımlarını ve sünekliklerini arttırır, meydana gelen çatlak genişliklerini ise sınırlar. Betonarme kirişlerde çelik lif kullanımı betonun sünekliğini ve dayanımını lifsiz betona göre arttırır. Bu çalışmada çelik lifli/lifsiz, hasarlı/hasarsız kirişlerde CFRP ile güçlendirme sonucu dayanımdaki değişim, CFRP'nin söz konusu elemanların güçlendirilmesinde kullanılıp kullanılmayacağı ve değişken parametrelerin etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Değişken parametreler: çelik lifli/lifsiz, hasarlı/hasarsız, CFRP şerit genişliği/aralığı'dır.

DENEY DÜZENEĞİ VE KİRİŞLERİN ÖZELLİKLERİ

2.1 Kirişlerin Geometrisi ve Malzeme Özellikleri

Bu çalışmada, kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı (a/d) 2.5, biri sabit diğeri hareketli olan iki mesnetli, açıklık ortasından tekil yükle yüklenmiş kirişler yerdeğiştirme kontrollü olarak test edilmiştir. Yükleme hızı $30 \mu\text{m/s}$ 'dir. Bütün kirişlerin mesnet koşulları, açıklığı, yükleme hızı aynıdır. Kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı (a/d) 2.5, etriyesiz narin kirişlerde beklenen kırılma biçimi kesme kırılmasıdır. Deneyde kullanılan kirişlerin yükseklikleri (h) 230 mm, genişlikleri (b_w) 150 mm ve etkili yükseklikleri (d) 200 mm'dir. Kirişlerde 2 adet 16 mm çaplı S420 sınıfı çekme donatısı kullanılmıştır. Kirişlerde kullanılan çekme donatısı oranı (ρ) 0.0134'dür. Bu oran, çekme donatısı oranı için TS500(2000)'de tanımlanan alt ve üst donatı oranı sınırları arasındadır. Kirişlerin özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir. CFRP şerit aralıkları Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY 2007)'de verilen koşulu sağlamamaktadır [15].

DBYBHY'e göre şeritlerin merkezinden merkezine olan mesafe (2.1) bağıntısında verilen koşulu sağlamalıdır [15].

$$s_f < w_f + d/4 \quad (2.1)$$

Burada s_f şeritlerin merkezinden merkezine olan mesafeyi, w_f kullanılan CFRP şerit genişliğini, d ise kiriş etkili yüksekliğini ifade etmektedir.

Deneylerde kullanılan kirişlerin isimlendirilmesinde; A harfinden sonraki sayı kesme açıklığının etkili yüksekliğine oranını; D (Damaged) kirişin güçlendirme yapılmadan önce hasarlı olduğunu; F harfinden sonraki sayı hacimsel çelik lif oranını; C harfinden sonraki sayılar ise sırayla CFRP şerit genişliklerini ve şeritler arasındaki mesafeyi göstermektedir. Örneğin, A2.5F2.0C5/10 kirişinde a/d oranı 2.5, hacimsel çelik lif oranı %2, CFRP şerit genişliğinin 5 cm ve aralığının ise 10 cm olduğunu göstermektedir.

Deneyde kullanılan kirişler iki gruba ayrılmıştır. Bir grup hasarlı ve hasarsız çelik lif içermeyen, aynı şerit genişlikleriyle güçlendirilmiş olan iki adet kirişi kapsamaktadır (A2.5RC10/10- DA2.5RC10/10). Diğer grup ise iki tanesi hasarsız bir tanesi hasarlı olan, hacimsel çelik lif oranı %2 ve farklı şerit genişlikleriyle güçlendirilmiş olan üç adet kirişi içermektedir (A2.5F2.0C5/10, A2.5F2.0C10/10, DA2.5F2.0C10/10). Çizelge 2.1’de verilen parametreler; CFRP genişliği, şeritlerin merkezinden merkezine olan mesafesi, CFRP şeritler arasındaki mesafe ve tek sıra CFRP kalınlığı, sırası ile, w_f , s_f , s ve t_f ile tanımlanmıştır. CFRP ile güçlendirilen tüm kirişlerde iki kat sargı kullanılmıştır.

Çizelge 2.1 Kirişlerin özellikleri

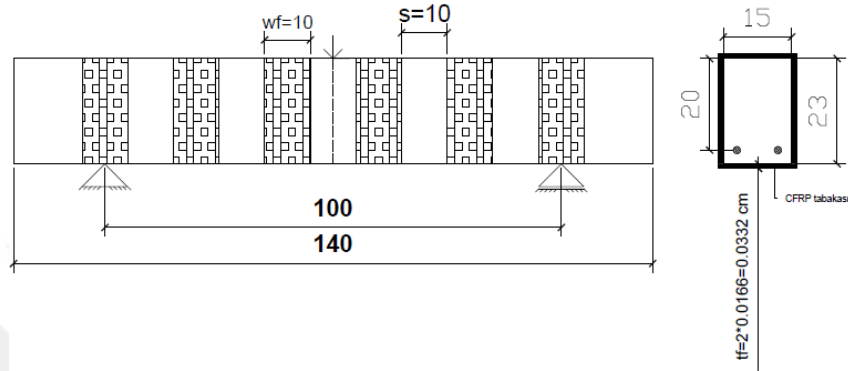
Kirişin Adı	f_c (MPa)	b_w (mm)	h (mm)	d (mm)	ρ (%)	V_f (%)	w_f (cm)	s (cm)	s_f (cm)	t_f (mm)
A2.5RC10/10	39	150	230	200	1,34	-	10	10	20	0.166
A2.5F2.0C5/10	21.43	150	230	200	1,34	2%	5	10	15	0.166
A2.5F2.0C10/10	21.43	150	230	200	1,34	2%	10	10	20	0.166
DA2.5RC10/10 (Hasarlı)	39	150	230	200	1,34	-	10	10	20	0.166
DA2.5F2.0C10/10 (Hasarlı)	21.43	150	230	200	1,34	2%	10	10	20	0.166

2.1.1 CFRP Özellikleri ve Güçlendirme Şeması

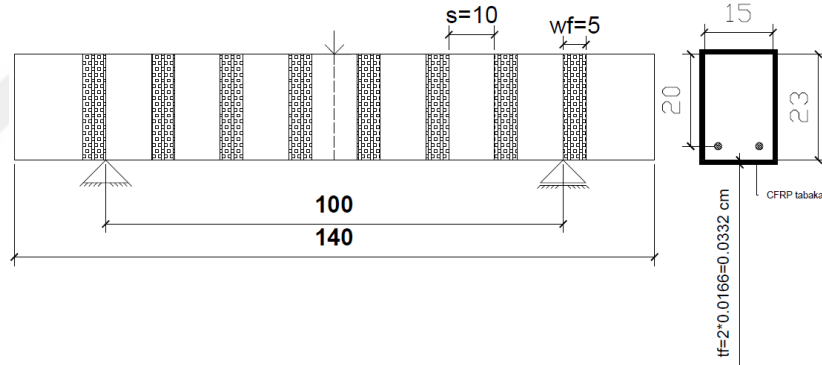
Bu çalışmada tek doğrultulu CFRP kullanılmış olup farklı şerit genişliği ve aralığı alınarak CFRP ile güçlendirilen kirişlerin dayanımındaki değişim incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Üretici firma kataloğunda, CFRP’nin elastisite modülü 230 GPa, kopma gerilmesi 4900 MPa ve kopma şekildeğiştirmesi %2.1 verilmiştir.

Kirişlerin ve diğer yapı elemanların kesmeye karşı CFRP ile güçlendirmede DBYBHY’de ve diğer birçok yönetmelikte (ACI, CSA) önerilen ve daha önce Şekil 1.1’de gösterilen yöntemlerden biri olan elemanın tam sarılarak (dört tarafından) uygulanan güçlendirme tekniği kullanılmıştır. Bu çalışmada, test esnasında beton-lifli polimer

arayüzünde çatlak, şekilgeğiştirme ve bunun gibi nedenlerden ötürü meydana gelebilecek olan sıyrılmaları azaltmak ve güçlendirmeden en fazla verimi almak amacıyla tam sargı yöntemi kullanılmıştır. Kirişlerin CFRP ile güçlendirilmesinde köşelerdeki CFRP yırtılmalarının önlenmesi amacıyla kirişlerin köşeleri yuvarlatılmıştır. Kiriş güçlendirme örnekleri Şekil 2.1’de verilmiştir. Kiriş mesnetleri arası mesafe 100 cm’dir.



C10/10 Kirişleri Serisi



C5/10 Kirişleri Serisi

Şekil 2.1 Güçlendirme şekilleri

2.1.2 Üretimde Kullanılan Betonun Özellikleri

Üretimde kullanılan betonu oluşturan malzemelerin karışım oranları Çizelge 2.2’de verilmiştir. Kimyasal katkı olarak ASTM C94, Type A olan akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Yapılan çökme deneylerinde çökme miktarı 12-13 cm (kıvam sınıfı S3) olarak bulunmuştur. Betonun küp dayanımından ortalama standart silindir basınç dayanımına geçilmiştir. Kiriş beton basınç dayanımları Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.2 Betonda kullanılan malzemelerin karışım oranları

Kullanılan malzeme	Miktar	
	A2.5RC	A2.5F2.0
0–5 mm Kırma kum	1180	1150
5–12 mm Kırma taş	721	310
12-22 mm Kırma taş	---	470
Uçucu kül (%40'ı bağlayıcı)	80	90
Çimento CEMI 42.5R	240	220
Su / Bağlayıcı	0.55	0.55
Akışkanlaştırıcı katkı miktarı	3.20	3.10

2.2 Deney Öncesi Yapılan Hazırlıklar

İlk olarak hasarlı kirişlerdeki (DA2.5RC10/10 ve DA2.5F2.0C10/10) çatlakların etrafı 1 cm içe doğru açıldı. Epoksi bazlı tamir harçlarının çatlak içerisine girmesi sağlanarak çatlakların onarımı yapılmıştır. Kiriş dışına çıkan çelik lifler CFRP'ye zarar vermemesi açısından kesildi. Daha sonra kirişlerin üzerinde lifli polimer şeritlerin yapıştırılacağı yerler işaretlendi ve kompresör yardımıyla kirişlerin yüzeyleri kirden, tozdan vb. maddelerden temizlendi. Böylece, epoksi bazlı kimyasal reçine ile lifli polimerin yapıştırılacağı yerlerin pürüzsüz olması ve beton yapıştırıcı FRP arayüzünde aderansı artırılması amaçlandı. Son olarak, uygun boyutlarda kesilen CFRP şeritler beton yüzeyine yapıştırıldı ve çevresel şartlardan etkilenmemesi açısından uygun yerlere taşındı. Bu hazırlıklarla ilgili aşamalar Şekil 2.2'de verilmiştir.



a) Hasarların tamir harcı kullanılarak giderilmesi ve CFRP şeritlerin yapıştırılacağı yerlerin işaretlenmesi



b) CFRP şeritlerin yapıştırılacağı yerlerin astarlanması

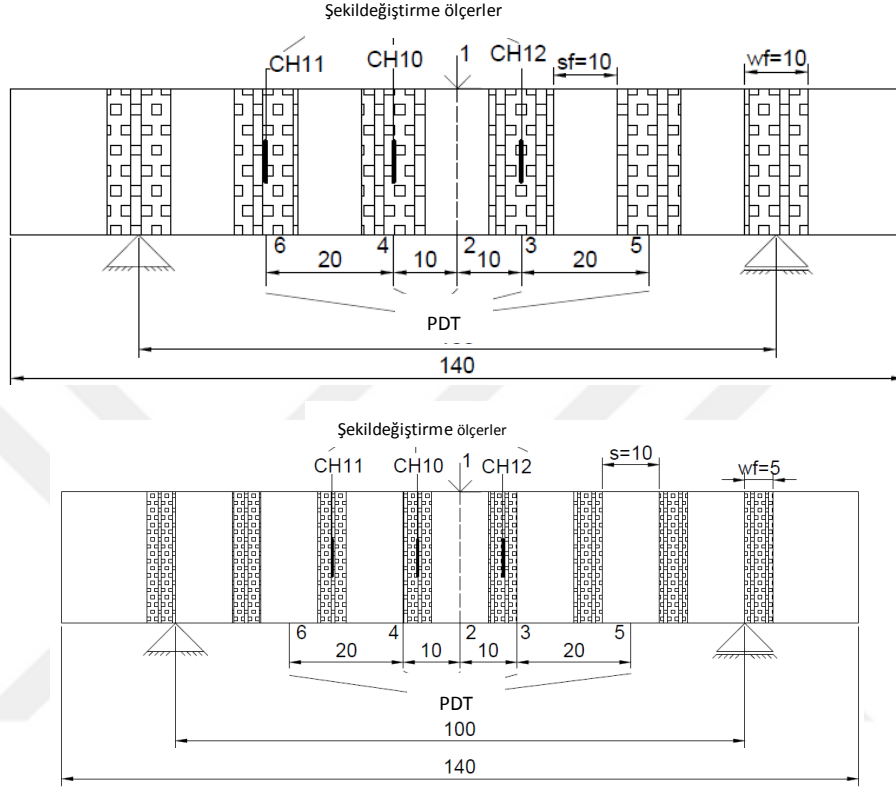


c) CFRP şeritlerin yapıştırılması

Şekil 2.2. Deney öncesi yapılan hazırlıklar

2.3 Deney Düzenegi ve Deneyin Gerçeklestirilmesi

Kirişler biri sabit diğeri hareketli olan iki mesnet üzerine koyularak açıklık ortasında tekil yük etkisinde yerdeğıştirme kontrollü olarak test edilmiştir. Kirişlerin yükleme hızı $30 \mu\text{m/s}$ 'dir.



Şekil 2.3 Deney düzenegi

Test esnasında kirişlerin farklı noktalarında meydana gelen yerdeğıştirmelerin ölçülmesi için toplam 6 adet PDT (potentiometric displacement transducer) kullanılmıştır. PDT'lerden bir tanesi yük uygulanan pistonun üzerinde, bir tanesi açıklık ortasında, iki tanesi açıklık ortasının 10 cm yanlarında, diğeri iki tanesi açıklık ortasının 30 cm yanlarında konumlandırılmıştır (Şekil 2.3). Ayrıca deney süresince CFRP şeritleri üzerindeki şekildeğıştirmelerin ölçülmesi için, üç adet şekildeğıştirme ölçer (CH10, CH11, CH12) CFRP şerit asal eksenine paralel olarak yapıştırıldı. Şekildeğıştirme ölçerlerin konumlandırılması hakkında şema Şekil 2.3'de verilmiştir.

Deney sırasında kirişlerin davranışları, meydana gelen hasarlar ve yük-yerdeğıştirme eğrileri ayrıntılı olarak Bölüm 3'te verilmiştir.

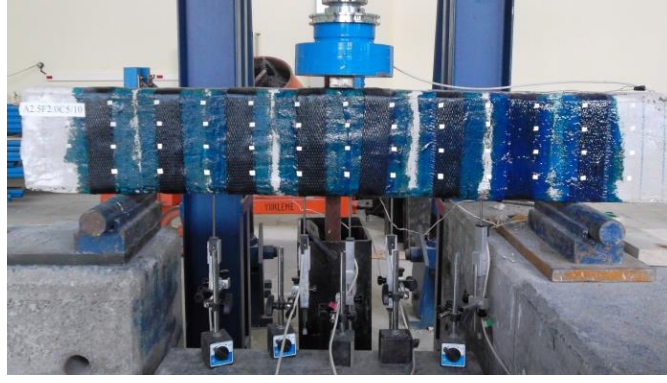
DENEY SONUÇLARI VE TEMEL DEĞİŞKENLERİN ETKİSİ

3.1 Kiriş Deney Sonuçları

Kiriş kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranı (a/d) 2.5 olan etriyesiz betonarme kirişlerin kırılma durumuna ne şekilde geldiği, yani kırılmanın biçimi bu bölümde açıklanmıştır. Üç tane hasarsız, 2 tane hasarlı betonarme kirişlerin deney sonuçları ve davranışları daha önceden bahsedilen iki grup kendi içlerinde karşılaştırılarak deney sırasındaki davranışları yük-yerdeğiştirme diyagramları kullanılarak açıklanmıştır.

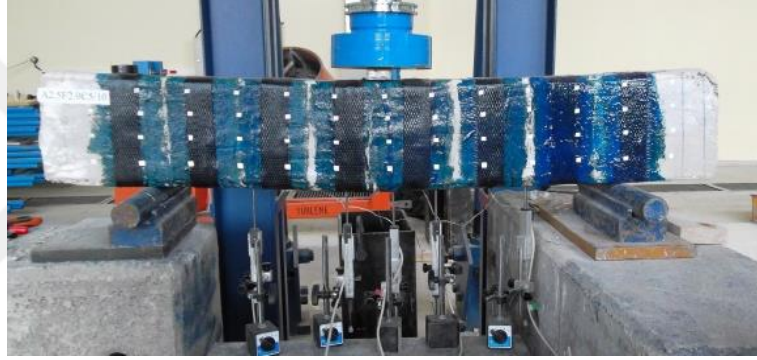
3.1.1 F2.0 Serisi Kirişleri

Hacimsel çelik lif oranı %2, CFRP şerit genişliği 5 cm ve şeritlerin merkezinden merkezine mesafesi (s_f) 15 cm olan A2.5F2.0C5/10 kirişinin yük uygulanmaya başlamadan önce görünüşü ve mesnet koşulları Şekil 3.1'de verilmiştir. Kirişte güç tükenmesi oluşumu sonrası, A2.5F2.0C5/10 kirişi ön yüzü ve arka yüzü görünüşleri Şekil 3.2'de verilmiştir.

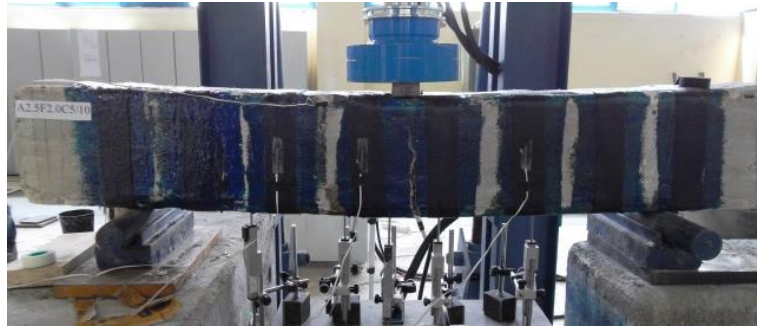


Şekil 3.1 Yükleme öncesi A2.5F2.0C5/10 kirişi ön yüzü

Yerdeğiştirme artışı ile A2.5F2.0C5/10 kirişi kesme ve eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerleme eğiliminde olduğu, kirişin güç tükenmesine eğilme kırılması ile ulaştığı görülmüştür.



a) A2.5F2.0C5/10 Kirişi ön yüzü

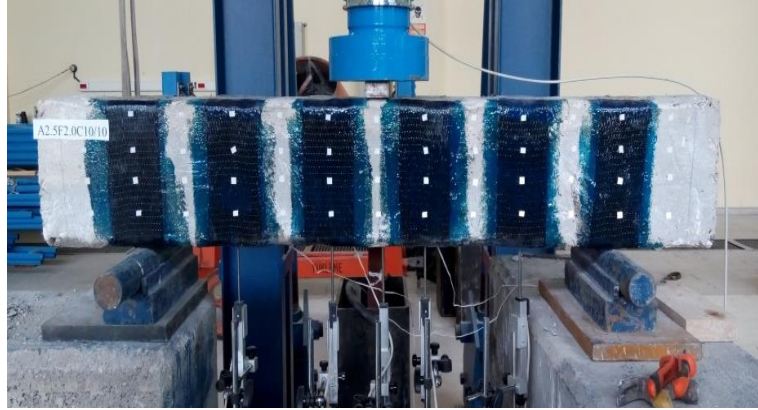


b) A2.5F2.0C5/10 Kirişi arka yüzü

Şekil 3.2 Güç tükenmesi oluşumu sonrası A2.5F2.0C5/10 kirişi

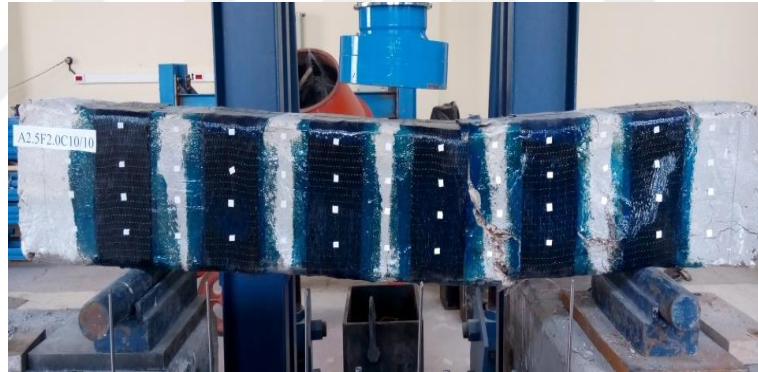
Hacimsel çelik lif oranı %2, CFRP şerit genişliği 10 cm ve şeritlerin merkezinden merkezine mesafesi (S_f) 20 cm olan A2.5F2.0C10/10 kirişinin yük uygulanmaya başlamadan önce görünüşü ve mesnet koşulları Şekil 3.3'de verilmiştir. Kirişte güç

tükenmesi oluşumu sonrası A2.5F2.0C10/10 kirişi ön yüzü ve arka yüzü görünümüleri Şekil 3.4’de verilmiştir.

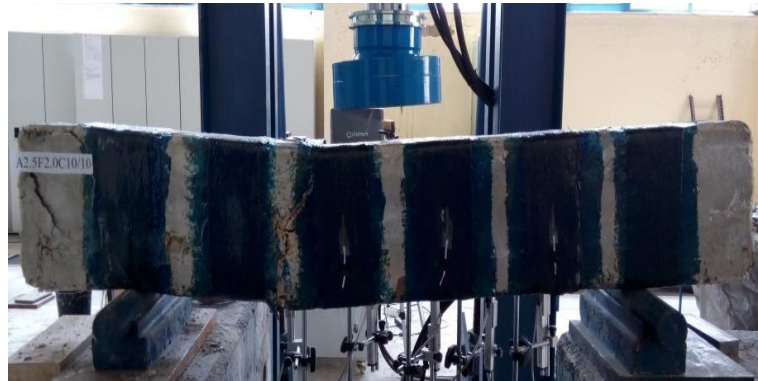


Şekil 3.3 Yükleme öncesi A2.5F2.0C10/10 kirişi ön yüzü

Yerdeğiştirme artışı ile A2.5F2.0C10/10 kirişi kesme ve eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerleme eğiliminde olduğu, kirişin güç tükenmesine eğilme kırılması ile ulaştığı görülmüştür.



a) A2.5F2.0C10/10 Kirişi ön yüzü

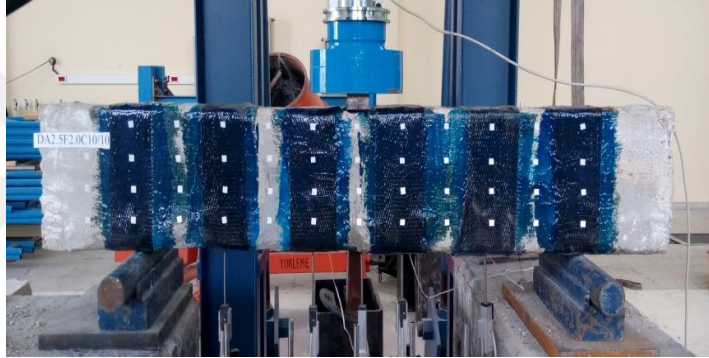


b) A2.5F2.0C10/10 Kirişi arka yüzü

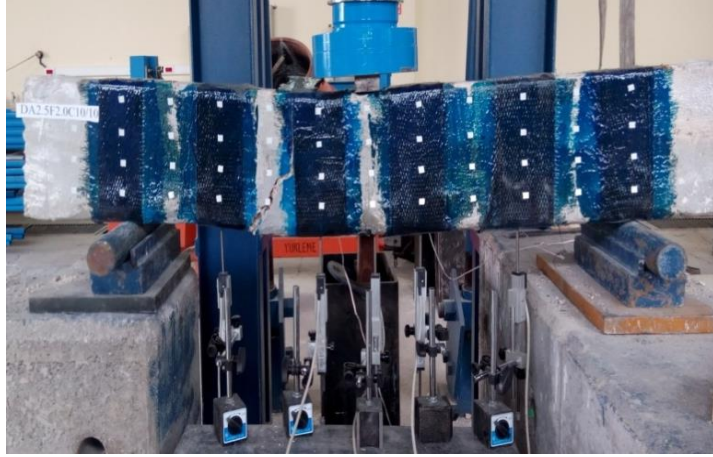
Şekil 3.4 Güç tükenmesi oluşumu sonrası A2.5F2.0C10/10 kirişi

Ulusoy (2015) [16] tarafından yapılan çalışmada, A2.5F2.0C10/10 olarak isimlendirilen ve deneysel çalışma ile eleman davranışının incelendiği çalışmada kullanılan kirişin onarımı ve CFRP ile güçlendirilmesi bu çalışmada yapılmıştır. Bu çalışmada kiriş adı DA2.5F2.0C10/10 olarak anılmaktadır. Kirişte, CFRP şerit genişliği 10 cm ve şeritlerin merkezinden merkezine olan mesafesi (s_f) 20 cm'dir. DA2.5F2.0C10/10 kirişinin yük uygulanmaya başlamadan önce görünüşü ve mesnet koşulları Şekil 3.5'te verilmiştir. Kirişte güç tükenmesi oluşumu sonrası, DA2.5F2.0C10/10 kirişi ön yüzü ve arka yüzü görünüşleri Şekil 3.6'da verilmiştir.

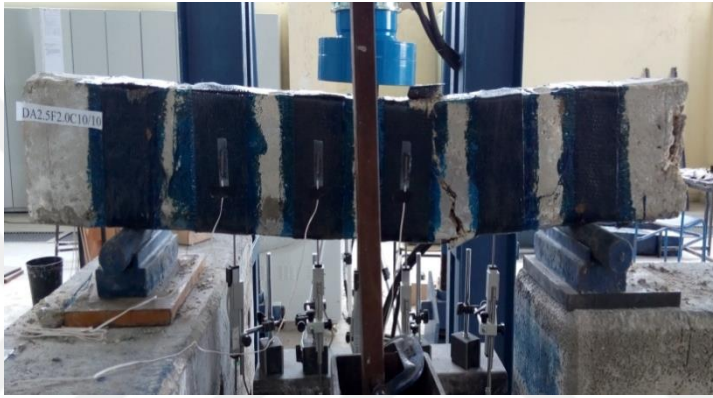
Yerdeğiştirme artışı ile DA2.5F2.0C10/10 kirişi kesme ve eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerleme eğiliminde olduğu, kirişin güç tükenmesine eğilme kırılması ile ulaştığı görülmüştür.



Şekil 3.5 Yükleme öncesi DA2.5F2.0C10/10 kirişi ön yüzü



a) DA2.5F2.0C10/10 Kirişı ön yüzü



b) DA2.5F2.0C10/10 Kirişı ön yüzü

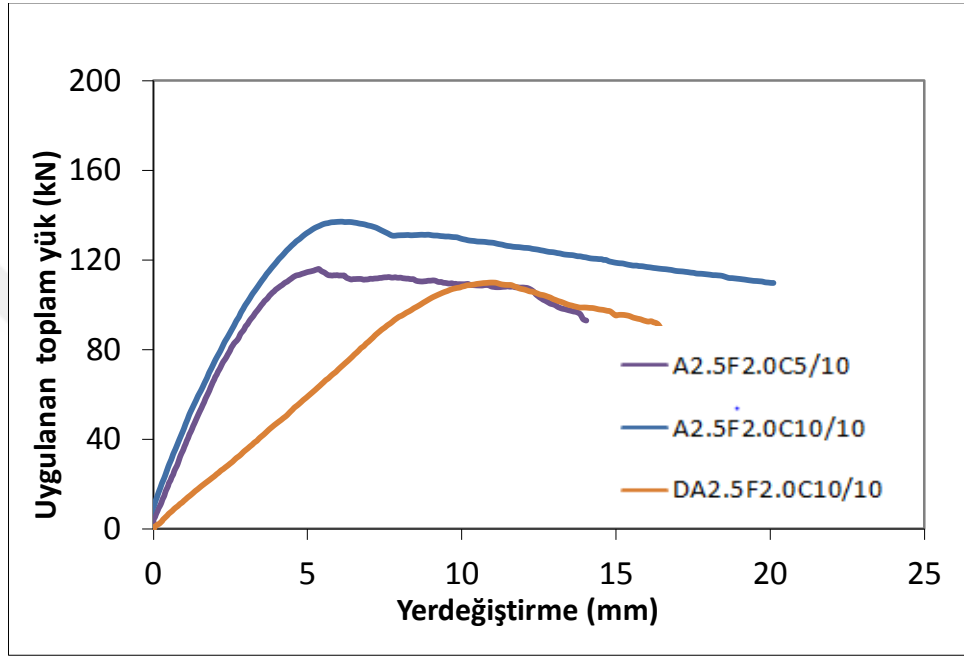
Şekil 3.6 Güç tükenmesi oluşumu sonrası DA2.5F2.0C10/10 kirişi

F2.0 Serisi kirişlerde yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 3.7'de verilmiştir. Kesit boyutları, çelik lif oranı ve kullanılan malzemelerin özellikleri aynı olan kirişlerde, değişken olan kirişlerin hasar/hasarsız oluşu ve CFRP ile güçlendirmede şerit genişliği ve aralığıdır. Yerdeğiştirme artışı ile kiriş davranışı ve deneysel veriler değerlendirildiğinde, kesme ve eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerleme eğiliminde olduğu, CFRP'nin kiriş kesme dayanımını artırdığı dolayısıyla kirişin güç tükenmesine eğilme kırılması ile ulaştığı görülmüştür.

A2.5F2.0C5/10 ve A2.5F2.0C10/10 kirişleri yük taşıma kapasitesi 115.9 kN ve 137 kN bulunmuştur. CFRP şerit genişliği artışı ile kiriş yük taşıma kapasitesi %18 artmıştır.

A2.5F2.0C10/10 ve A2.5F2.0C5/10 kirişlerinin yük yerdeğiştirme eğrileri incelendiğinde A2.5F2.0C10/10 kirişinin daha fazla yerdeğiştirme kapasitesine sahip olduğu yani daha sünek davranış gösterdiği söylenilebilir.

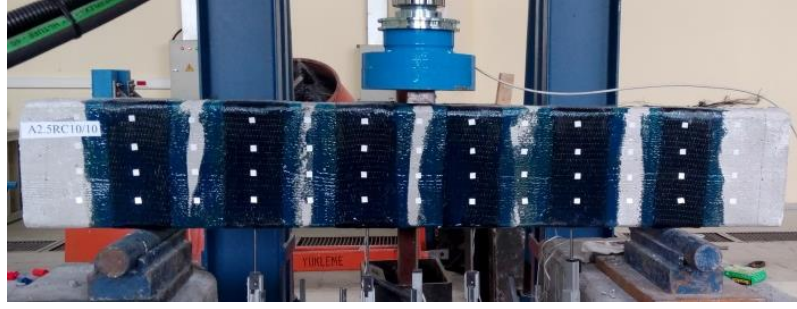
Güç tükenmesi durumunda, hasarlı DA2.5F2.0C10/10 kirişi yerdeğiştirmesi A2.5F2.0C5/10 ve A2.5F2.0C10/10 kirişleri yerdeğiştirmelerinden daha fazladır. A2.5F2.0C10/10 ve A2.5F2.0C5/10 kirişlerinin başlangıçta rijitliklerinin hemen hemen aynı olduğu, hasarlı DA2.5F2.0C10/10 kirişinin rijitliğinin ise daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak, hasarlı kirişte kiriş hasarının özellikle de çatlakların yeteri kadar onarılamadığından kaynaklandığı düşünölmektedir.



Şekil 3.7 F2.0 Serisi kirişleri yük-yerdeğiştirme eğrileri

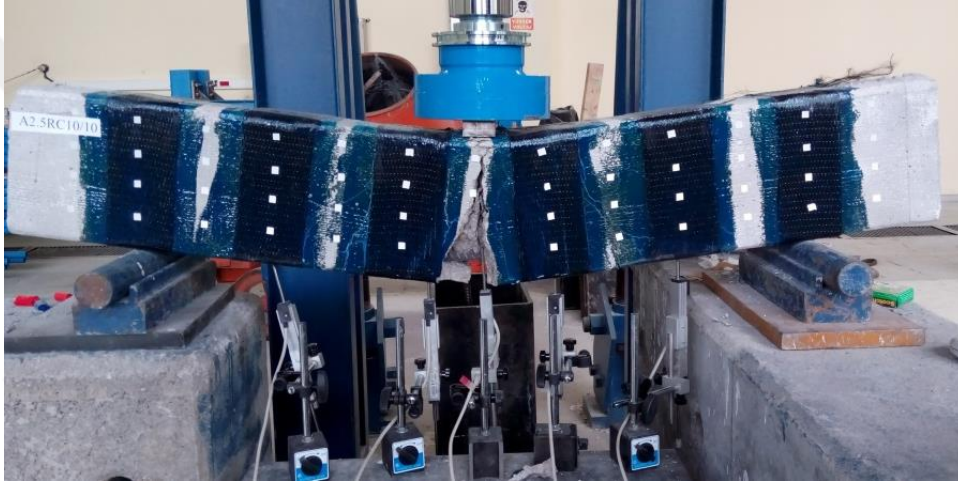
3.1.2 R (Referans) Serisi Kirişler

Çelik lifsiz, CFRP şerit genişliği 10 cm ve şeritlerin merkezinden merkezine mesafesi (S_f) 20 cm olan A2.5RC10/10 kirişi yük uygulanmaya başlamadan önce görünüşü ve mesnet koşulları Şekil 3.8'de verilmiştir. Kirişte güç tükenmesi oluşumu sonrası A2.5RC10/10 kirişi ön yüzü ve arka yüzü görünömleri Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.8 Yükleme öncesi A2.5RC10/10 kirişi ön yüzü

Yerdeğiştirme artışı ile A2.5RC10/10 kirişi kesme ve eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerleme eğiliminde olduğu, kirişin güç tükenmesine eğilme kırılması ile ulaştığı görülmüştür.



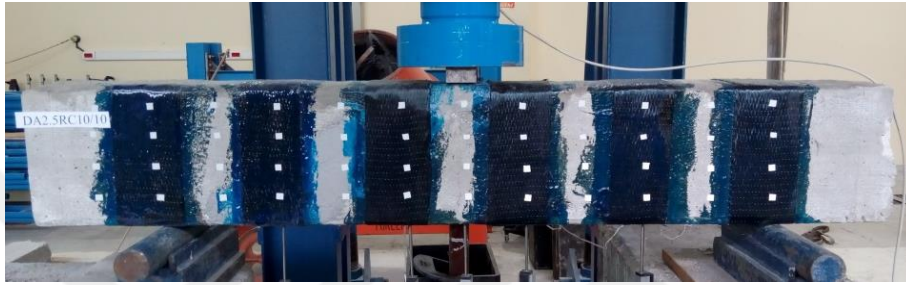
a) A2.5RC10/10 Kirişi ön yüzü



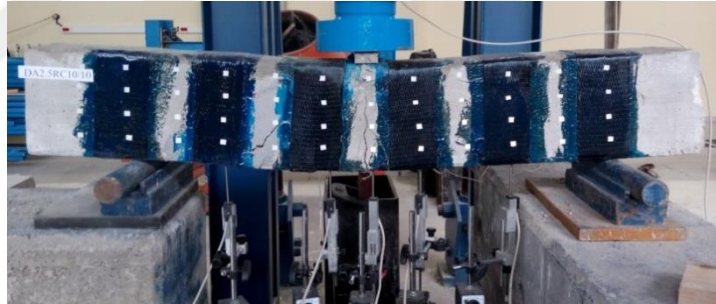
b) A2.5RC10/10 Kirişi arka yüzü

Şekil 3.9 Güç tükenmesi oluşumu sonrası A2.5RC10/10 kirişi

Ulusoy (2015) [16] tarafından yapılan çalışmada, A2.5RC10/10 olarak isimlendirilen ve deneysel çalışma ile eleman davranışının incelendiği çalışmada kullanılan kirişin onarımı ve CFRP ile güçlendirilmesi yapılmıştır. Bu çalışmada kiriş adı DA2.5RC10/10 olarak anılmaktadır. Kirişte, CFRP şerit genişliği 10 cm ve şeritlerin merkezinden merkezine mesafesi (s_f) 20 cm'dir. DA2.5RC10/10 kirişi yük uygulanmaya başlamadan önce görünüşü ve mesnet koşulları Şekil 3.10'da verilmiştir. Kirişin güç tükenmesine eğilme kırılması ile ulaştığı görülmüş olup, kirişte güç tükenmesi oluşumu sonrası DA2.5F2.0C10/10 kirişi ön yüzü ve arka yüzü görünüşleri Şekil 3.11'de verilmiştir.



Şekil 3.10 Yükleme öncesi DA2.5RC10/10 kirişi ön yüzü



a) DA2.5RC10/10 Kirişi ön yüzü

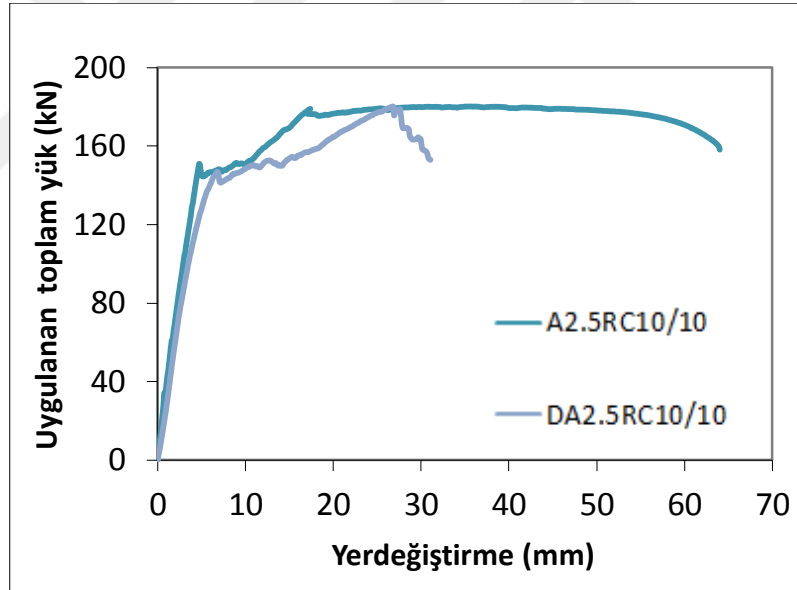


b) DA2.5RC10/10 Kirişi arka yüzü

Şekil 3.11 Güç tükenmesi oluşumu sonrası DA2.5RC10/10 kirişi

R (Referans) Serisi kirişlerde yük-yerdeğiştirme eğrileri Şekil 3.12’de verilmiştir. Kesit boyutları ve kullanılan malzemelerin özellikleri aynı olan kirişlerde, değişken olan hasarlı ve hasarsız kirişlerin CFRP ile güçlendirmesidir. Yerdeğiştirme artışı ile kiriş davranışı ve deneysel veriler değerlendirildiğinde kesme ve eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerleme eğiliminde olduğu, CFRP’nin kiriş kesme dayanımını artırdığı dolayısıyla kirişin güç tükenmesine eğilme kırılması ile ulaştığı görülmüştür.

A2.5RC10/10 ve DA2.5RC10/10 kirişleri maksimum yük taşıma kapasitesi 180.00 kN ve 179.91 kN bulunmuştur. Hasarlı kirişin onarım ve güçlendirilmesi sonrası hasarsız kiriş ile yaklaşık aynı yük taşıma kapasitesine erişilmiş, ancak hasarlı kirişin yerdeğiştirme kapasitesi ise hasarsız güçlendirilen kirişe göre daha az bulunmuştur. Bir başka ifade ile, A2.5RC10/10 kirişinin daha sünek bir davranış sergilediği görülmüştür. Kirişlerinin başlangıçta rijitliklerinde önemli fark görülmemiştir.



Şekil 3.12 R (Referans) Serisi kirişleri yük-yerdeğiştirme eğrileri

CFRP İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ ÇELİK LİFLİ BETONARME KİRİŞLERİN DAYANIMI

CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme dayanımı için farklı araştırmacılar ve yönetmeliklerde bağıntılar önerilmiştir. Bu çalışmada, literatürde verilen bazı bağıntılar kullanılarak bulunan kesme ve eğilme dayanımları deneysel değerlerle karşılaştırılmıştır.

4.1 Kesme Dayanımı

CFRP ile güçlendirilen çelik lifli betonarme kirişlerde kesme dayanımı, beton kesit ve CFRP tarafından karşılanan kesme dayanımının toplamından oluşmaktadır. Beton kesit tarafından karşılanan kesme dayanımı ise kesme dayanımına betonun ve çelik lifin katkısından oluşmaktadır. Daha sonra kesme dayanımına CFRP katkısı çeşitli bağıntılarla hesaplanmıştır. CFRP ile güçlendirilmiş çelik lifli betonarme kirişlerin kesme dayanımı için (4.1) bağıntısı kullanılmıştır.

$$v_n = v_c + v_{CFRP} \quad (4.1)$$

Burada v_n kesitin karşıladığı kesme dayanımı, v_{CFRP} CFRP tarafından karşılanan kesme dayanımını, v_c ise kesme dayanımına betonun ve çelik lifin katkısını tanımlamaktadır. Arslan (2014) tarafından yapılan çalışmada, çelik lifli betonarme kirişler için önerilen kesme dayanımı bağıntısının karşılaştırılan diğer bağıntılara göre en düşük varyasyon katsayısını verdiği görülmüştür. Önerilen bağıntı literatürde mevcut 170 kirişin deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve önerilen bağıntının tahmininin deney sonuçları ile

oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Bu nedenle CFRP ile güçlendirilen çelik lifli betonarme kirişlerde kesme dayanımı tahmini için Arslan (2014) tarafından önerilen (4.2) bağıntısı kullanılmıştır [17].

$$v_c = v_{oc} + v_d \quad (4.2)$$

Burada v_{oc} kesme dayanımına betonun katkısını, v_d ise kesme dayanımına beton içindeki çelik liflerin ve çekme donatılarının katkısını göstermektedir. Kesme dayanımına betonun katkısı, v_{oc} , (4.3) bağıntısıyla hesaplanabilir.

$$v_{oc} = 0.2 f_c^{2/3} \left(\frac{c}{d} \right) \left(1 + 0.032 f_c^{1/6} \right) \quad (4.3)$$

Burada c/d tarafsız eksen yüksekliğinin kiriş etkili yüksekliğe oranını, f_c beton basınç dayanımını göstermektedir. Beton içindeki çelik liflerin kesme dayanımına katkısı, v_d (4.4) bağıntısıyla hesaplanabilir.

$$v_d = \sqrt{\rho (1 + 4F) f_c} \quad (4.4)$$

Burada F çelik lif faktörüdür ve (4.5) bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

$$F = \frac{L_f}{D_f} V_f d_f \quad (4.5)$$

Burada d_f lif şekline bağlı aderans katsayısıdır. Narayanan ve Darwish (1987) [18] tarafından d_f değerinin, dairesel lifler için 0.5, kıvrımlı lifler için 0.75 ve diğer lif şekilleri için 1 alınması önerilmiştir. (4.3) bağıntısında a/d oranı etkisi de katılarak (4.6) bağıntısı önerilmiştir.

$$v_c = \left(0.2 f_c^{2/3} \left(\frac{c}{d} \right) + \sqrt{\rho (1 + 4F) f_c} \right) + (3d/a)^{1/3} \quad (4.6)$$

Burada v_{oc} nin hesabında kullanılan $\left(1 + 0.032 f_c^{1/6} \right)$ ifadesinin dayanıma katkısı ihmal edilmiştir. (c/d) değeri ise, $(c/d)^2 + 600(\rho/f_c)(c/d) - 600(\rho/f_c) = 0$ denkleminin çözümünden bulunur.

Çelik lifli etriyesiz betonarme kirişlerin kesme dayanımı hesabı için Sharma (1986) tarafından (4.7) bağıntısı önerilmiştir [19].

$$v_c = k f_{ct} \left(\frac{d}{a} \right)^{0.25} \quad (4.7)$$

Burada f_{ct} beton çekme dayanımıdır. Çekme dayanımı doğrudan çekme deneyinden bulunduğu k=1, dolaylı çekme deneylerinden bulunduğu k=2/3, eğer kırılma modülü kullanılarak bulunursa k=4/9 alınması önerilmektedir.

(4.7) bağıntısındaki f_{ct} değeri aşağıda verilen (4.8) bağıntısıyla hesaplanabilir.

$$f_{ct} = 0.79 f_c^{0.5} \quad (4.8)$$

Kesme dayanımına CFRP katkısının hesabı, v_{CFRP} , için ACI 440-2R (2008)'de aşağıdaki bağıntılar önerilmiştir [14]:

$$v_{CFRP} = \frac{A_{fv} \times f_{fe} \times (\sin \alpha + \cos \alpha) \times d_f}{s_f} \quad (4.9)$$

$$A_{fv} = 2 \times n \times t_f \times w_f \quad (4.10)$$

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} \times E_{fu} \quad (4.11)$$

$$\varepsilon_{fe} = k_v \times \varepsilon_{fu} \quad (4.12)$$

$$k_v = \frac{k_1 \times k_2 \times L_e}{11900 \times \varepsilon_{fu}} \quad (4.13)$$

$$L_e = \frac{23300}{(n \times t_f \times E_{fu})^{0.58}} \quad (4.14)$$

$$k_1 = \left(\frac{f_c}{27} \right)^{2/3} \quad (4.15)$$

$$k_2 = \frac{d - L_e}{d} \quad (4.16)$$

Burada, n CFRP şerit tabaka sayısını, t_f CFRP şerit kalınlığını, L_e etkili bağ uzunluğunu, w_f CFRP şerit genişliğini ve f_{fe} CFRP'de yük altından meydana gelen etkili gerilmeyi ifade etmektedir. ε_{fe} , CFRP'in genellikle kopma şekildeğiştirmesinden küçük olan etkili şekildeğiştirmedir. E_{fu} ise CFRP elastisite modülüdür.

Yukarıda verilen bağıntılar yardımıyla CFRP şeritlerle güçlendirilmiş çelik lifli betonarme kirişlerin kesme dayanımı (4.17) ve (4.18) bağıntılarıyla hesaplanabilir.

$$v_{n,1} = \left(0.2 f_c^{2/3} \left(\frac{c}{d} \right) + \sqrt{\rho(1+4F)} f_c \right) \left(\frac{3.0}{a/d} \right)^{1/3} + \frac{A_{f_v} f_{f_e} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{f_v}}{s_f} \quad (4.17)$$

$$v_{n,2} = k f_{ct} \left(\frac{d}{a} \right)^{0.25} + \frac{A_{f_v} f_{f_e} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{f_v}}{s_f} \quad (4.18)$$

Deney sırasında CFRP şeritler üzerine yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerlerdeki değerler ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$) kullanılarak (4.17) ve (4.18) bağıntılarıyla yük taşıma kapasiteleri ($P_{n,1}$ ve $P_{n,2}$) bulunmuştur. ε_1 ve ε_3 kirişin orta noktasının sağında ve solundaki şeritlerde ölçülen değerlerdir. ε_2 ise ε_1 'in ölçüldüğü şeridin yanındaki şeritte ölçülen değerdir. (4.18) bağıntısıyla taşıma gücü hesaplanırken Sharma (1986) tarafından önerilen bağıntı yerine ACI 318-14 (2014)'te verilen basitleştirilmiş olan (4.19) bağıntısı kullanılmıştır[20].

$$v_c = 0.17 \sqrt{f_c} \quad (4.19)$$

$P_{n,3}$ boyuna donatıdaki şekildeğiştirme kullanılarak hesaplanan taşıma kapasitesidir. Sadece A2.5F2.0C5/10 kirişi çekme donatısında şekildeğiştirme ölçer bulunduğundan A2.5F2.0C5/10 kirişi eğilmede taşıma kapasitesi hesaplanmıştır. P_{co} deneyde elde edilen taşıma gücünü göstermektedir. Deney sonuçları ve hesaplanan taşıma kapasiteleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Verilen bağıntılarla hesaplanan yük taşıma kapasiteleri

Kiriş	$P_{n,1}$ (kN)			$P_{n,2}$ (kN)			$P_{n,3}$ (kN)	P_{co} (kN)
	ε_1	ε_2	ε_3	ε_1	ε_2	ε_3		
A2.5RC10/10	400.7	238.6	273.3	365.2	203.1	237.8	---	180.2
DA2.5RC10/10	265.7	207.6	523.6	230.1	172.0	488.0	---	179.9
A2.5F2.0C5/10	144.1	132.6	149.9	143.0	131.5	148.8	116.7	115.9
A2.5F2.0C10/10	216.6	166.4	203.5	215.5	165.3	202.4	---	137.0
DA2.5F2.0C10/10	152.0	---	183.8	150.9	---	182.7	---	109.8

Çizelge 4.1'de verilen sonuçlar dikkate alındığında (4.17) bağıntısıyla bulunan sonuçlar (4.18) bağıntısından bulunan sonuçlardan daha büyüktür. (4.18) bağıntısıyla hesaplanan taşıma güçleri DA2.5RC10/10 kirişi hariç deneylerde ölçülen değerlerden daha büyük değerler vermiştir.

4.2 Eğilme Dayanımı

Deneyde kullanılan kirişlerin eğilme dayanımı ACI 318-14 (2014) kullanılarak hesaplanmıştır. Deney numuneleri kesmeye karşı güçlendirildiklerinden eğilme dayanımlarına CFRP'nin katkısı ihmal edilmiştir. Hesaplanan eğilme dayanımları, deneyde elde edilen taşıma güçleri ve deney numunelerinin açıklık ortasında meydana gelen düşen yerdeğiştirmeler Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Deney numunelerinin eğilme dayanımları

Beam	$M_{cr,flex}$ (kNm)	$P_{cr,flex}$ (kN)	$M_{flex,ACI}$ (kNm)	$P_{flex,ACI}$ (kN)	P_{co} (kN)	δ_{co} (mm)	P_u (kN)	δ_u (mm)	δ_u / δ_{co}
A2.5RC10/10	9.1	36.5	30.9	123.6	180.2	35.4	158.2	64.0	1.81
DA2.5RC10/10					179.9	26.8	153	31.1	1.16
A2.5F2.0C5/10	6.1	24.5	28.6	114.2	115.9	5.4	92.9	14.0	2.61
A2.5F2.0C10/10					137.0	6.1	105.7	22.1	3.61
DA2.5F2.0C10/10					109.8	11.0	87.9	16.6	1.51

Çizelge 4.2'deki $M_{cr,flex}$ kirişlerin eğilmeye çatlama moment kapasitesini, $P_{cr,flex}$ $M_{cr,flex}$ kullanılarak hesaplanan eğilmeye çatlama yükünü, $M_{flex,ACI}$ ACI 318-14 (2014) kullanılarak hesaplanan eğilme momenti kapasitesini, $P_{flex,ACI}$ $M_{flex,ACI}$ kullanılarak hesaplanan eğilmeye göçme yükünü göstermektedir. P_{co} deneyde elde edilen maksimum yükü ve δ_{co} ise bu yük değerinde ölçülen düşey yerdeğiştirme değeridir. P_u ise P_{co} 'nun %80'i alınarak hesaplanan göçme yükünü ve δ_u bu yük değerinde ölçülen düşey yerdeğiştirme değeridir.

Deney numuneleri eğilme kırılmasıyla taşıma gücüne eriştiklerinden (4.17) ve (4.18) bağıntısıyla hesaplanan taşıma gücü daha fazla çıkmıştır. ACI 318-14 (2014) kullanılarak hesaplanan ve Çizelge 4.2'de verilmiş olan sonuçlar değerlendirildiğinde, deney numuneleri eğilme kırılmasıyla taşıma gücüne eriştiklerinden ACI 318-14 göre bulunan tahminlerin uygun ve güvenli tarafta kaldıkları söylenebilir. Ayrıca Çizelge 4.2'deki δ_u / δ_{co} değerleri incelendiğinde, hasarlı kirişlerin daha az sünek davrandıkları ve CFRP şerit genişliklerinin artmasının sünekliği arttırdığını söyleyebiliriz.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Tek yönlü yerdeğiştirme kontrollü artan yük etkilerine maruz etriyesiz ve lifsiz kirişlerle %2 çelik lif oranlarına sahip etriyesiz kirişlerin farklı şerit genişliklerine sahip CFRP ile güçlendirilmesi sonucu dayanımda meydana gelen dayanım artışları deneysel ve analitik olarak incelenmiştir.

Yüklemenin ilk aşamalarında kirişlerin orta açıklıklarında eğilme çatlaklarının oluştuğu, yerdeğiştirme artışı ile kiriş davranışı ve deneysel veriler değerlendirildiğinde kesme ve eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerleme eğiliminde olduğu, CFRP'nin kiriş kesme dayanımını artırdığı dolayısıyla kirişin güç tükenmesine eğilme kırılması ile ulaştığı görülmüştür.

Deneysel çalışmalardan aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Tüm kirişlerde, yerdeğiştirme artışı ile kesme ve eğilme çatlaklarının mesnetten yük uygulama noktasına doğru ilerleme eğiliminde olduğu, CFRP'nin kirişlerin kesme dayanımını artırdığı, dolayısıyla kirişlerin güç tükenmesine eğilme kırılması ile ulaştığı görülmüştür.
- CFRP şerit aralıkları (DBYBHY 2007)'de verilen koşulu sağlamamaktadır. Buna rağmen kirişlerin dayanımlarında ve sünekliğinde önemli artışlar olduğu görülmüştür.
- CFRP şerit genişlikleri arttıkça kirişlerin taşıma güçlerinin de arttığı görülmüştür.

- İleriki çalışmalarda CFRP ile güçlendirilen çelik lifli kirişlerde daha farklı güçlendirme şekillerine, farklı beton dayanımlarına ve etriyeli ya da etriyesiz betonarme kirişlerde dayanım artışları deneysel olarak incelenebilir, kesme ve eğilme dayanımlarının tahminlerinin araştırılması önerilebilir.

CFRP ile güçlendirmede şerit genişliği/aralığı ile hasarlı/hasarsız olması değişken olan F2.0 serisi kirişlerde:

- A2.5F2.0C5/10 ve A2.5F2.0C10/10 kirişleri yük taşıma kapasiteleri 115.9 kN ve 137 kN bulunmuştur. CFRP şerit genişliği artışı ile kiriş yük taşıma kapasitesi %18 artmıştır.
- A2.5F2.0C10/10 ve A2.5F2.0C5/10 kirişlerinin yük yerdeğiştirme eğrileri incelendiğinde A2.5F2.0C10/10 kirişinin daha fazla yerdeğiştirme kapasitesine sahip olduğu, bir başka ifade ile daha sünek davranış gösterdiği söylenilebilir.
- Güç tükenmesi durumunda, hasarlı DA2.5F2.0C10/10 kirişi yerdeğiştirmesi A2.5F2.0C5/10 ve A2.5F2.0C10/10 kirişleri yerdeğiştirmelerinden daha büyüktür. A2.5F2.0C10/10 ve A2.5F2.0C5/10 kirişlerinin başlangıçtaki rijitliklerinin hemen hemen aynı olduğu, hasarlı DA2.5F2.0C10/10 kirişinin rijitliğinin ise daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun nedeni olarak, hasarlı kirişte kiriş hasarının özellikle de çatlakların yeteri kadar onarılmadığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

CFRP ile güçlendirmede hasarlı/hasarsız olması değişken olan R (Referans) serisi kirişlerde:

- A2.5RC10/10 ve DA2.5RC10/10 kirişleri maksimum yük taşıma kapasitesi 180.00 kN ve 179.91 kN bulunmuştur. Hasarlı kirişin onarım ve güçlendirilmesi sonrası hasarsız kiriş ile yaklaşık aynı yük taşıma kapasitesine erişilmiş, ancak hasarlı kirişin yerdeğiştirme kapasitesi ise hasarsız güçlendirilen kirişe göre daha az bulunmuştur. Bir başka ifade ile A2.5RC10/10 kirişinin daha sünek bir davranış sergilediği görülmüştür. Ayrıca, kirişlerin başlangıç rijitliklerinde önemli fark görülmemiştir.

KAYNAKLAR

-
- [1] Khalifa, A., Gold, W.J., Nanni, A., Abdel Aziz, M.I.,(1998)." Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of RC Flexural Members", J Compos Construct,2(4):195–202.
 - [2] Khalifa, A., and Nanni, A., (2000). "Improving Shear Capacity of Existing RC T-Section Beams Using CFRP Composites",Cement and Concrete Composites, 22(2): 165-174.
 - [3] Khalifa, A., Nanni, A.,(2002)." Rehabilitation of Rectangular Simply Supported RC Beams with Shear Deficiencies Using CFRP Composites", Construct Build Mater,16(3):135–46.
 - [4] Önal, M.M.,(2009)." Reinforcement of Beams by Using Carbon Fiber Reinforced Polimer in Concrete Buildings",Scientific Research and Essay,4 (10):1136-1145
 - [5] Bukhari, I.A., Vollum, R.L., Ahmad, S. and Sagaseta J., (2010)."Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with CFRP", Magazine of Concrete Research 62(1): 65-77.
 - [6] Triantafillou, T.C., (1998)." Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites", ACI Structural Journal, 95(2): 107-115.
 - [7] Menegotto,M.,Monti, G.and Liotta,A. M.,(2009)."Modelling Shear Mechanisms in Frp-Strengthened R/C Beams",Architecture Civil Engineering Environment,3:57-68
 - [8] Alzate, A.,Arteaga,A.,Diego,D.A. and Perera,R.,(2009)." Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Fibre Reinforced Polymers (FRP)", European Journal of Environmental And Civil Engineering,10
 - [9] Norris,T.,Saadatmanesh,H. and Ehsani,R.M.,(1997)."Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets",Journal of Structural Engineering,123:7
 - [10] Pellegrino, C. and Modena, C.,(2002)." FRP Shear Strengthening of RC Beams with Transverse Steel Reinforcement", J Compos Construct,6(2):104–11.
 - [11] Chen, J.F., Teng, J.G.,(2003)." Shear Capacity of FRP-Strengthened RC Beams: FRP Debonding", Construct Build Mater,17:27–41.

- [12] Barros, O. A. J., (2007). "Design Models for Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded FRP Composites: A Statistical Vs Reliability Approach", FRPRCS, 8
- [13] Belarbi, A. and Acun, B., (2013), "FRP Systems in Shear Strengthening of Reinforced Concrete Structures", Procedia Engineering, 57:2-8
- [14] ACI 440.2R-08, (2008). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening of Concrete Structure, American Concrete Institute, Farmington Hill, Mich., USA.
- [15] Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2. Baskı, Ankara.
- [16] Ulusoy, S., (2015). Etriyesiz Çelik Lifli Betonarme Kirişlerin Kesme Mukavemeti, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17] Arslan, G., (2014). "Shear Strength of Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) Slender Beams", KSCE Journal of Civil Engineering, 18(2):587-594.
- [18] Narayanan, R., and Darwish, I.Y.S., (1987). "Use of Steel Fibers as Shear Reinforcement", ACI Structural Journal, 84(3): 216-227.
- [19] Sharma, A.K., (1986). "Influence of Steel Fibers on the Shear Resistance of Light Weight Concrete-Beams", ACI J. Proc., 83(4):624-628.
- [20] ACI Committee 318, (2014). Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
- [21] ACI 318R-05, (2005). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute Farmington Hills, Mich., USA;
- [22] Kwak, Y.K., Eberhard, M. O., Kim, W.S. ve Kim, J., (2002). "Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams without Stirrups", ACI Struct. J., 99(4):530-538.
- [23] Dinh, H.H., Parra-Montesinos, G.J. ve Wight, J.K., (2011). "Shear Strength Model for Steel Fiber Reinforced Concrete Beams without Stirrup Reinforcement", ASCE J. Struct. Eng., 137(10):1039-1051.
- [24] Arslan G and Keskin R.S.O., (in review) "Minimum Amount of Steel Fibers as Shear Reinforcement in SFRC Beams", Computers and Concrete.
- [25] Arslan, G., Keskin R.S.O., Birincioglu, M.I., and Ulusoy, S., (in review) "An Experimental Study on the Shear Strength of SFRC Beams without Stirrups", Structural Engineering and Mechanics.
- [26] Susetyo, J., Gauvreau, P., and Vecchio, F.J., (2011). "Effectiveness of Steel Fiber as Minimum Shear Reinforcement", ACI Structural Journal, 108(4): 488-496.
- [27] Kadir, M.R.A., and Saeed, J.A., (1986). "Shear Strength of Fiber Reinforced Concrete Beams", Journal of Engineering and Technology, 4(3): 98-112.

- [28] CNR-DT 200,(2004). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Materials, RC and PC Structures, Masonry Structures, CNR-Italian Research Council, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, Rome, Italy.
- [29] fib-TG9.3. 2001. Design and Use of Externally Bonded Fiber Polymer Reinforcement (FRP EBR) for Reinforced Concrete Structures. Technical Report Prepared by EBR Task Group 9.3, Bulletin 14, Lausanne, Swiss.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Kadir ŞENGÜN
Doğum Tarihi ve Yeri :31.03.1992, BAKIRKÖY
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :kkadirsengun@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Yapı Anabilim Dalı	Yıldız Teknik Üniversitesi	-
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2015
Lise	Fen Bilimleri	Ergün Öner Mehmet Öner Anadolu Lisesi	2010

YAYINLARI

Makale

1. Şengün, K ve Arslan, G., (2016). "Influence of CFRP on the Strength of Retrofitted RC Beams without Stirrups", Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, YTUJENS-2016-133 (Baskıda).

