



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

**BETONARME KİRİŞLERİN CAM FİBER PLAKALARLA KESMEYE
KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİNDE ANKRAJ SAYISININ ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zeynel Çağdaş KANKAL

**DANIŞMAN
Yrd.Doç.Dr. Mustafa KAYA**

**HAZİRAN 2011
AKSARAY**

Her hakkı saklıdır

T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ KABUL ve ONAY BELGESİ

Zeynel Çağdaş Kankal'ın "Betonarme Kirişlerin Cam Fiber Plakalarla Kesmeye Karşı Güçlendirilmesinde Ankraj Sayısının Etkisi" başlıklı Yüksek Lisans tez çalışması, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 16.06.2011 tarih ve B.30.2.ASÜ.0.40.00.00/372 sayılı kararı ile oluşturulan aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Mustafa Kaya, Aksaray Üniversitesi

1. Jüri : Yrd. Doç. Dr. M. Emin Kara, Aksaray Üniversitesi

2. Jüri : Yrd. Doç. Dr. Faruk Şen, Aksaray Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih : 28.06.2011

ONAY

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 13.2011 tarih ve 2011/22-11 sayılı kararı ile Zeynel Çağdaş KANKAL'ın İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans derecesi alması onaylanmıştır.


Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Doç. Dr. Selçuk REİS

ÖNSÖZ

Ülkemizde mevcut binalarda yapılmış çeşitli incelemelerde yapı stoğunun büyük bir bölümünün çok önemli kesme problemleriyle karşılaştığı görülmüştür. Hasarsız kusurlu yapıların güçlendirilmesi ve deprem sonrası hasar görmüş yapıların onarılması, deprem kuşağı üzerinde yer alan ülkemiz için oldukça önemlidir. Bu çalışmada betonarme kirişlerin cam lifli polimerlerle (GFRP) güçlendirilmesi çalışılmıştır. GFRP şeritlerde kullanılan ankraj sayılarının ve ankraj yerleşim planının, betonarme kirişlerin kesme dayanımı, rijitlik, süneklik ve göçme mekanizmaları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamındaki deneysel çalışmalar Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca beni yönlendiren, bilgi ve tecrübesini benden esirgemeyen tez danışmanım Yrd. Doç.Dr. Mustafa Kaya'ya teşekkürü borç bilirim.

Laboratuvar çalışmalarında ve deneysel çalışmanın yapılmasında emeği geçen Yrd.Doç.Dr. Mehmet Emin Kara'ya teşekkür ederim.

Tüm çalışma boyunca desteklerini her zaman hissettiğim sevgili nişanlıma ve değerli aileme teşekkür ederim

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BETONARME KİRİŞLERİN CAM FİBER PLAKALARLA KESMEYE KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİNDE ANKRAJ SAYISININ ETKİSİ

Zeynel Çağdaş KANKAL

T.C.

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Mustafa KAYA

Yetersiz kesme donatılı kirişlerin güçlendirilmesinde cam elyaf (GFRP) ve karbon elyaf (CFRP) lifli polimerlerin kuvvetli yapısal yapıştırıcılarla kiriş yüzeylerine yapıştırılması yöntemi son yıllarda araştırmalarda uygulanmaktadır. Bu yöntemde her iki malzeme de epoksi bazlı yapıştırıcı kullanılarak kiriş yüzeyine yapıştırılmaktadır. Ayrıca bazı uygulamalarda plakaların kiriş yüzeyinden sıyrılmasını önlemek için bulon, kaynak gibi ek önlemlere başvurulmaktadır. Bu çalışmada yetersiz kesme donatılı betonarme kirişler cam lifli polimer (GFRP) plakalarla güçlendirilmiştir. GFRP şeritler kiriş yan yüzlerine yapıştırılarak ve GFRP şeritlerin betondan ayrılmasını önlemek için değişik sayıda ankraj bulonu kullanılmıştır. Çalışmada ankraj bulonlarının sayısının güçlendirilmiş bu kirişlerin kapasitelerine etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada 5 adet basit mesnetli betonarme kiriş test edilmiştir. Çalışmada Afet Yönetmeliğine göre tasarlanmış bir adet iyi referans eleman, kesme donatısı yetersiz bir adet kötü referans eleman ve GFRP plakalarla güçlendirilmiş üç adet eleman kullanılmıştır. Kiriş yüzeyine yapıştırılan GFRP şeritlerin kiriş yüzeylerine sırayla 2, 3 ve 4 adet bulonla ankraj yapılmıştır. Çalışmadaki tüm kirişler monotonik yükler altında test edilmiştir. Güçlendirilmiş kirişlerin testlerinden elde edilen sonuçlar iyi referans ve kötü referans olarak adlandırılan deney elemanlarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Güçlendirilen üç adet kirişten 2 ve 3 adet bulon kullanılan kirişler kötü referans olarak adlandırılan ve kesme kırılmasından dolayı göçen kirişten daha çok yük taşımıştır. Fakat bu iki kirişte de kötü referans gibi kesme kırılması gözlenmiştir. GFRP şeritlerin kiriş yüzeylerine yapıştırılmasında 4 adet bulon kullanılan kiriş kötü referans olarak adlandırılan ve kesme kırılmasından dolayı göçen kirişten daha çok yük taşımış ve iyi referans olarak adlandırılan ve eğilme kırılması gözlenen kirişe yaklaşık olarak eşit yük taşımıştır. Ayrıca bu kiriş sünek davranış göstererek eğilmeden dolayı kırılmıştır.

2011, 60 sayfa

Anahtar Kelimeler : Betonarme kiriş, güçlendirme, GFRP şerit
Bilim Kodu : 911.1.145

ABSTRACT

Master of Science

EFFECT OF ANCHORAGE NUMBER ON STRENGTHENING REINFORCED CONCRETE BEAMS AGAINST SHEAR WITH GFRP

Zeynel Çağdaş KANKAL

T.C.

Aksaray University Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst.Prof. Mustafa KAYA

Strengthening beams which have insufficient shear reinforcement using GFRP and CFRP with strong structural additives an beam surface has become a widely used method in researches. In these methods, both materials are glued on beam surface using epoxy based adhesive. Moreover, it's applied to additional measurements like bolt and welding to prevent delamination of plates from beam surface in some applications. In this study, RC beams with deficient shear reinforcement were strengthened using CFRP plates. GFRP strips were glued onto the beam sides and a number of anchor bolt used to prevent delamination of GFRP strips. In the study, effect of number of anchor bolts on capacity of these strengthened beams has been studied. In this study, 5 RC simply supported beams were tested. In the study, one good reference member designed to earthquake code, one bad reference member with deficient shear reinforcement and three members strengthened with GFRP plates. Anchor bolting application was executed in the strengthened three members. Anchorage was performed 2, 3, and 4 bolts, respectively onto the beam surfaces of GFRP strips fixed on beam. All the beams in the study were test under monotonic loads. The obtained results by strengthened beam tests were compared to the results obtained from experiment members called good and bad reference. Beams using 2 and 3 anchor bolt from strengthened beams bear much load than the beam called bad reference and failure by shear fracture. However, shear fracture was observed in these two beams as well as bad reference. Beams using 4 anchor bolts for fixing GFRP strips onto the beam surfaces have bear much load than the beam called bad reference and failure by shear fracture. Besides this, load bearing capacity of this beam is approximately equal to the beam called good reference and observed bending failure. Finally, this beam failure resulted bending with ductile behavior.

2011, 60 pages

Key Words : RC beams, strengthening, GFRP straps
Science Code : 911.1.145

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa No

ÖNSÖZ.....	i
TEŞEKKÜR.....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
RESİMLER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER DİZİNİ.....	x
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Genel Açıklamalar.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	2
1.3. Geçmişteki Çalışmalar.....	3
2. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	12
2.1. Genel.....	12
2.2. Deney Elemanlarının Detaylandırılması.....	13
2.3. Malzeme Özellikleri ve Dayanımları.....	24
2.3.1. Beton.....	24
2.3.2. Donatı.....	25
2.3.3. GFRP.....	25
2.3.4. Yapısal yapıştırıcı.....	26
2.4. Deney Elemanlarının Üretilmesi.....	27
2.4.1. Donatıların hazırlanması.....	27
2.4.2. Kalıpların hazırlanması.....	28

2.4.3. Beton dökümü.....	29
2.4.4. Ankrajların hazırlanması.....	30
2.4.5. GFRP şeritlerin hazırlanması.....	30
2.5. Deney Düzeni.....	33
2.5.1. Yükleme ve ölçüm düzeneği.....	33
2.5.2. Verilerin değerlendirilmesi.....	36
3. DENEYLER.....	37
3.1. Deney Elemanı 1.....	37
3.2. Deney Elemanı 2.....	39
3.3. Deney Elemanı 3.....	41
3.4. Deney Elemanı 4.....	43
3.5. Deney Elemanı 5.....	45
4. DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI.....	47
4.1. Deney Elemanlarının Davranışı.....	47
4.2. Kesme Dayanımı.....	52
4.3. Rijitlik.....	53
4.4. Süneklik.....	54
5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER.....	55
5.1. Sonuçların Değerlendirilmesi.....	55
5.2. Öneriler.....	56
KAYNAKLAR.....	57
ÖZGEÇMİŞ.....	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Güç tükenmesi ve çatlama biçimleri.....	12
Şekil 2.2. Deney elemanı 1 donatı planı.....	15
Şekil 2.3. Deney elemanı 2, 3, 4 ve 5 donatı planı.....	16
Şekil 2.4. Deney elemanı 1 ve 2.....	20
Şekil 2.5. Deney elemanı 3.....	21
Şekil 2.6. Deney elemanı 4.....	22
Şekil 2.7. Deney elemanı 5.....	23
Şekil 2.8. Deney elemanında yükleme ve ölçüm düzeni.....	34
Şekil 2.9. Kirişte oluşan iç kuvvetler.....	35
Şekil 3.1. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 1.....	37
Şekil 3.2. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 2.....	39
Şekil 3.3. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 3.....	41
Şekil 3.4. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 4.....	43
Şekil 3.5. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 5.....	45
Şekil 4.1. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 2, 3, 4 ve 5.....	48
Şekil 4.2. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 1, 3, 4 ve 5.....	50
Şekil 4.3. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 1, 2, 3, 4 ve 5.....	51

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Deney elemanlarının donatı durumu.....	17
Çizelge 2.2. Deney elemanlarının GFRP şerit durumu.....	18
Çizelge 2.3. Deney elemanlarının ankraj durumu.....	19
Çizelge 2.4. Beton numunelerinin ortalama basınç dayanımları.....	25
Çizelge 2.5. Donatıların özellikleri.....	25
Çizelge 2.6. GFRP'nin özellikleri.....	26
Çizelge 2.7. Sikadur 31, epoksi yapıştırıcının mekanik/fiziksel özellikleri.....	26
Çizelge 4.1. Deney sonuçlarının özeti.....	47
Çizelge 4.2. Deney elemanlarının ölçülen kesme dayanımları.....	52
Çizelge 4.3. Deney elemanlarında rijitlikler.....	53
Çizelge 4.4. Deplasman-süneklik oranları.....	54

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa No

Resim 2.1. Beton numunesi alınması.....	24
Resim 2.2. Donatı kafesi yerleştirilmiş deney elemanı 1.....	27
Resim 2.3. Donatı kafesi yerleştirilmiş deney elemanı 2, 3, 4 ve 5.....	28
Resim 2.4. Beton dökümüne hazır deney elemanları.....	29
Resim 2.5. Beton dökümü.....	29
Resim 2.6. Beton deney elemanına yerleştirilen ankrajlar.....	30
Resim 2.7. GFRP şeritlere Sikadur 31 epoksi yapıştırıcı sürülmesi.....	31
Resim 2.8. Kiriş yan yüzeylerine yapıştırılan GFRP şeritler.....	31
Resim 2.9. Deney elemanı 3.....	32
Resim 2.10. Deney elemanı 4.....	32
Resim 2.11. Deney elemanı 5.....	33
Resim 3.1. Göçmeden sonra, deney elemanı 1.....	38
Resim 3.2. Tabla betonunda ezilme, deney elemanı 1.....	38
Resim 3.3. Göçmeden sonra, deney elemanı 2.....	40
Resim 3.4. Kesme kırılması, deney elemanı 2.....	40
Resim 3.5. Göçmeden sonra, deney elemanı 3.....	42
Resim 3.6. Kesme kırılması, deney elemanı 3.....	42
Resim 3.7. Göçmeden sonra, deney elemanı 4.....	44
Resim 3.8. Kesme kırılması, deney elemanı 4.....	44
Resim 3.9. Göçmeden sonra, deney elemanı 5.....	46
Resim 3.10. Tabla betonunda ezilme, deney elemanı 5.....	46

SİMGELER DİZİNİ

a	Tekil yükün mesnete olan uzaklığı
d	Kiriş faydalı yüksekliği
M	Eğilme momenti
s_f	GFRP şerit eksen aralığı
P	Kesme kuvveti
w_f	GFRP şerit genişliği
ρ	Boyuna donatı oranı
ρ_b	Dengeli donatı oranı
ρ_w	Kesme donatısı oranı
δ_{net}	Kiriş orta noktası düşey net deplasmanı
δ_1	Sol mesnet düşey deplasmanı
δ_2	Kiriş orta noktası düşey deplasmanı
δ_3	Sağ mesnet düşey deplasmanı

KISALTMALAR DİZİNİ

ABYYHY	Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
ACI	American Concrete Institute
CFRP	Karbon lif donatılı polimer
DE 1	Deney Elemanı 1
DE 2	Deney Elemanı 2
DE 3	Deney Elemanı 3
DE 4	Deney Elemanı 4
DE 5	Deney Elemanı 5
EBR	Dış yüzey güçlendirmesi
FRP	Lif donatılı polimer
GFRP	Cam lif donatılı polimer
LVDT	Elektronik doğrusal deplasman ölçer
NSM	Yüzey altı güçlendirmesi
TS500	Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları

1. GİRİŞ

1.1. Genel Açıklamalar

Betonarme taşıyıcı sistemler yapısal projelendirme, malzeme ve uygulama hatalarından dolayı betonarme elemanları gevrek ve ani kırılmaya yönlendiren çok önemli kesme problemleriyle karşılaşmaktadırlar. Betonarme elemanlar eğilme etkisi altında sünek davranış mekanizmasını gösterebilmektedirler. Ancak; asal çekme gerilmeleri etkisi altındaki beton kesit betonun çekme dayanımı düşük olması sebebiyle ani ve gevrek bir göçme modunda davranış gösterir. Betonarme elemanlarda eğik çekme kırılması olarak adlandırılan bu kırılma şekli, elemanın enerji tüketim mekanizmasını yeterli kullanamamasına neden olur.

Betonarme sistemlerde yatay taşıyıcı elemanlar olan kirişlerde kesme kırılmasını önleyebilmek için TS500 ve Deprem Yönetmeliği'nde kiriş uzunluğu boyunca enine donatı yerleştirilmesi zorunludur. Kesme donatısı olarak boyuna donatıya dik olarak yerleştirilen etriyeler kullanılmaktadır. Etriyeler dışında pilyeler veya hasır donatılar kesme donatısı olarak kullanılabilir. Yeterli kesme donatısı bulunan bir kirişte eğik çatlaklar kılcal düzeyde kalırken eleman sünek davranış göstermektedir. Sünek davranış gösteren bir eleman büyük deformasyon yapabilme yeteneğine sahiptir.

Yönetmeliklerde enine donatı kullanımı zorunlu olmasına rağmen, projelendirme ve uygulama hatalarından dolayı ülkemizde mevcut yapıların önemli bir bölümünde betonarme elemanlar eğilme kapasitesine ulaşmadan eğik çekme kırılması nedeniyle göçmekte veya hasar görmektedirler. Hasar gören yapı elemanlarında, elemanı eski durumuna ya da daha iyi bir duruma getirebilmek için yapılan iyileştirme çalışmalarına onarım adı verilir. Onarım çalışmaları ekonomik olmayan çözümlere ayrıca büyük zaman ve enerji kaybına yol açabilmektedir. Bu nedenle hatalı yapıların hasar görmeden iyileştirilmesi, büyük zaman ve enerji kaybı olmadan daha ekonomik çözümlere ulaşılmasını sağlamaktadır.

Betonarme yapıların hasar görmeden önce yük taşıma kapasitesini, sünekliğini, rijitliğini ve stabilitesini artırmak için yapılan iyileştirme çalışmaları güçlendirme olarak adlandırılır. Kesme dayanımı yetersiz kirişlerin güçlendirilmesinde çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri mantolama yöntemidir. Mantolama yönteminde

kiriş içinde boyuna donatı ve enine donatı bulunan yeni bir betonarme katman eklenir. Yöntemin başarılı olabilmesi için boyuna donatıların sürekliliği ve mevcut donatı ile yeni donatı arasındaki bağın kaynaklanan çubuklarla iyi kurulması gerekmektedir. Ayrıca yeni katmandaki betonun mevcut betonla aderansı ve eklenen betonun homojen dağıtılabilmesi yani iyi sıkıştırılması gerekmektedir. Kiriş kolon birleşiminde boyuna donatı kolona uygun bir şekilde kenetlenmeli ya da kolonu delip karşıya geçmelidir. Mantolama yöntemi sağlıklı uygulanabildiği takdirde hem eğilme etkisine hem de kesme etkisine karşı başarılı sonuçlar elde edilmektedir. Ancak bahsedilen problemler nedeniyle pratikte bu yöntemin kirişlerde uygulanabilmesi oldukça zordur.

Kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinde kullanılan diğer bir yöntem kelepçeleme yöntemidir. Bu yöntemin uygulanmasında güçlendirme için kiriş dışından çeşitli biçim ve düzenlemelerde, belirlenen kesitlere çelik kelepçeler yerleştirilir. Kesme dayanımı yetersiz olan kirişlerde kullanılan bu yöntem, kesme dayanımı artırmak ve elemanı sünek bir davranışa yönlendirmek için başarılı bir yöntemdir. Ancak pratikte kullanım zorluğu, kullanılan kelepçelerin özel üretim olması gerekliliği ve eleman üzerine yerleştirilmesinde karşılaşılan zorluklar nedeniyle tercih edilmemektedir.

Yetersiz kesme donatılı kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan diğer bir yöntem ise kiriş yüzlerine epoksi bazlı yapısal yapıştırıcılar kullanılarak uygun malzemenin yapıştırılmasıdır. Yapıştırılan malzemeler iki ana başlıkta toplanabilir. Malzemelerden birincisi çelik plakalardır. Kullanılan diğer malzeme ise karbon (CFRP) veya cam elyafı (GFRP) takviyeli polimerlerdir. Bu yöntemde her iki malzeme de epoksi bazlı yapıştırıcı kullanılarak kiriş yüzeyine yapıştırılmakta ve plakaların sıyrılmasını önlemek için ankraj uygulaması yapılmaktadır. Yapıştırmada kullanılan malzemeler, kullanılan malzemelerin kiriş üzerindeki biçim ve aralığı, ankraj kullanımı, ankraj kullanımındaki düzenlemeler araştırmalarda kullanılan ve kesme dayanımını etkileyen parametrelerdir.

1.2. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada yetersiz kesme donatılı kirişlerin, kiriş eksenine dik yapıştırılan cam lifli polimer (GFRP) plakalarla güçlendirilmesinde, GFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulmasını engelleyen ankrajların sayısının kirişlerin kesme dayanımı kapasitesi üzerindeki etkinliği araştırılmıştır.

Çalışmada 4000 mm uzunluğunda T kesitli 5 adet basit mesnetli betonarme kiriş test edilmiştir. Çalışmada Afet Yönetmeliğine göre tasarlanmış 1 adet iyi referans eleman, 1 adet yetersiz kesme donatılı kötü referans eleman ve 3 adet GFRP plaklarla güçlendirilmiş eleman kullanılmıştır. Yetersiz kesme donatılı 4 elemanın tamamındaki etriye oranı $\rho_w=0.00157$ 'dir. Bu etriye oranı istenilen oranının yaklaşık $\frac{1}{4}$ 'ü kadardır. Güçlendirilmiş olan 3 adet elemanda GFRP şeritler kiriş yan yüzlerine karşılıklı olarak epoksi bazlı yapısal yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Güçlendirmede kullanılan GFRP şeritler 90 mm genişliğindedir. Kiriş yan yüzeylerine yapıştırılmış olan GFRP şeritlerin eksen aralığı 100 mm olarak seçilmiştir. Güçlendirilen tüm elemanlarda kullanılan GFRP şerit aralığı ve GFRP şerit genişliği aynı biçimdedir. Güçlendirilmiş 3 elemanda da ankraj uygulaması yapılmıştır. Ankrajlar GFRP şeritlere yapıştırılarak şeritlerin soyulmasını engellemeyi ve elemanın kapasitesini artırmayı amaçlamıştır. Güçlendirilen elemanlarda kullanılan ankraj sayısı ve aralığı farklı seçilmiştir. Ankraj aralığı 2 ankrajlı elemanda 180 mm, 3 ankrajlı elemanda 90 mm ve 4 ankrajlı elemanda 60 mm olarak uygulanmıştır. Çalışmadaki tüm kirişler monotonik yükler altında test edilmiştir. Test sonuçları yeterli kesme donatılı referans elemanı ve yetersiz kesme donatılı referans elemanı ile karşılaştırılmış ve kullanılan farklı sayıdaki ankrajların bu kirişlerin kapasitesindeki etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmanın sonucunda, deney elemanlarında gözlenen kesme dayanımı kapasitesi, rijitlik, süneklik ve göçme mekanizması değerlendirilmiştir.

Çalışmada kullanılan değişkenler, GFRP şeritlere uygulanan ankraj elemanlarının sayısıdır.

1.3.Geçmişteki Çalışmalar

Trianafillou, (1998), yapmış olduğu çalışmada, 1000 mm uzunluğunda, 70 mm eninde ve 110 mm yüksekliğinde olan 11 adet betonarme kirişi test etmiştir. Kesme donatısı kullanılmayan bu elemanlarda 4 nokta yükleme uygulanmıştır. Kiriş yüzeyine farklı düzenlemelerde CFRP şerit yapıştırılmıştır. Bütün deneylerde CFRP şeritler kiriş yüzeyinden soyulmuş ve eğik çekme kırılması nedeniyle kirişler göçmüştür. Kirişlerde %65 ile %95 arasında kesme dayanımları artmıştır.

Khalifa ve Nanni, (2000), yapmış oldukları çalışmada, test edilen kirişlerin kesme kapasitesini artırmak için karbon donatılı lif kullanmışlardır. 6 adet T kesitli deney

elemanında değişik düzenlemelerde CFRP kullanılmıştır. Kesme açıklılığında kesme donatısı kullanılmamıştır. a/d oranı 3 olarak seçilen deney elemanlarına 4 nokta yüklemesi yapılmıştır. Deney sonuçlarında kiriş taşıma kapasitesinin %145 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Deney elemanlarında uygulanan ankrajların göçme modunu değiştirdiği ve U biçiminde CFRP şerit uygulanmış elemanların, iki yana ayrı ayrı yapıştırılan CFRP şeritli elemanlardan daha fazla yük taşıdığı gözlemlenmiştir. Deneylerde kiriş eksenine paralel yapıştırılan CFRP şeritlerin kesme kapasitesine etki etmediği anlaşılmıştır. Ayrıca optimum CFRP kullanımının yeterli olduğu, iki elemanda %40 daha fazla CFRP şerit kullanılmasına rağmen aynı taşıma gne erişildiği tespit edilmiştir.

Adhikary vd., (2000), yaptıkları çalışmada 2600 mm uzunluğunda 150x200 mm boyutlarında sargı donatısı bulunmayan toplam 12 adet kirişi güçlendirmeyi çalışmışlardır. Tüm kirişlerde kullanılan basınç donatısı aynı fakat çekme donatısı iki farklı grup olarak kullanılmıştır. Güçlendirmede kiriş yan yüzlerine yapıştırılan elik levhalar kullanılmıştır. elik levha kalınlıkları 2.0 mm, 3.0 mm ve 4.5 mm olmak üzere farklılık göstermiştir. Deney sonuçlarına göre kirişlerin kesme kapasitesinde belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Levha genişliğinin artması ile kesme kapasitesinin de arttığı, en büyük kesme dayanımının %84 artışla 4.5 mm kalınlılığında ve 100 mm genişliğinde levhaların uygulandığı elemanda olduğu belirtilmiştir.

Taljsten ve Elfgren, (2000), yaptıkları çalışmada, 8 adet kirişi test etmiştir. Test edilen kirişler 4500 mm uzunluğunda 500x180 mm dikdörtgen kesitte seçilmiştir. 3 adet kiriş referans kirişi olarak seçilmiştir. Deney elemanlarında CFRP şeritler yatayla 45° ve 135° açıyla uygulanmıştır. Sadece bir elemanda iki yn st üste uygulanmıştır. Elemanlara 4 nokta yüklemesi uygulanmıştır. Test edilen elemanlarda CFRP şeritlerin kopması, beton basınç bölgesinde ezilme ve CFRP şeritlerin soyulması şeklinde üç farklı göçme şekli oluşmuştur. Test sonuçlarına göre, CFRP şeritlerle 45° olarak uygulanan güçlendirmede %300'e kadar kiriş kesme kapasitesinde artış gözlemlenmiştir. Hasarlı kirişlerin güçlendirilmesinde bile %100 oranında kesme kapasitesinin arttığı tespit edilmiştir.

Kachlakev ve McCurry, (2000), yaptıkları çalışmada kesme dayanımı yetersiz 4 adet kirişi test etmişlerdir. Bir tanesi kontrol elemanı olan kirişlerin diğer 3 tanesi GFRP ve CFRP şeritlerle güçlendirilmiştir. Dört nokta yüklemesi uygulanan kirişlerde, GFRP ile

kesme ve CFRP ile eğilme kapasitesindeki artış amaçlanmıştır. Deney sonuçlarında sadece çekme bölgesinde yapıştırılan CFRP şeritlerin eğilme kapasitesini %31 artırdığı tespit edilmiştir. GFRP ile kesmeye karşı yapılan güçlendirmede ise kontrol elemanına göre kesme kapasitesinin %200 arttığı tespit edilmiştir.

Raghu vd., (2000), yaptıkları çalışmada T kesitli betonarme kirişlerin karbon lif donatılı polimerlerle güçlendirilmesini, hasarlı kirişlerin onarılmasını ve kirişlerin kesme kapasitesini arttırmayı amaçlamışlardır. Bu amaçla CFRP şeritleri, tüm kiriş yüzeyine ankrajlı ve ankrajsız olarak uygulamışlardır. Kiriş uzunluğu 2640 mm olarak seçilmiştir. İki adet kiriş referans deney elemanı olarak test edilmiş diğer kirişlere CFRP şeritler yapıştırılmıştır. Bunun dışında 510 mm genişliğinde CFRP şerit negatif moment bölgesine, 100 mm genişliğinde CFRP şerit pozitif moment bölgesine yapıştırılmıştır. Aynı koşullarda bulunan diğer bir deney grubuna ise CFRP şeritler iki kat olarak uygulanmıştır. Deneyler sonucunda, kiriş kesme dayanımlarının %11 ile %34 arasında arttığı gözlemlenmiş, U şeklinde CFRP şerit yapıştırılan elemanlarda daha başarılı sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir. Ankraj uygulanan şeritlerde ankraj uygulanmayan şeritlere göre %17 daha fazla kesme kuvveti taşıdığı gözlemlenmiştir. Çift kat CFRP şerit kullanmanın kemse kapasitesine büyük ölçüde değiştirmedeği gözlemlenmiş, çift kat CFRP şerit kullanılan elemanlarda, tek kat CFRP şerit kullanılanlara göre %4 oranında kesme kapasitesi artışı tespit edilmiştir.

Li vd., (2001), yapmış oldukları çalışmada 14 adet yetersiz kesme donatılı kirişi test etmişlerdir. Deneysel sonuçlarda kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan CFRP miktarı arttıkça kiriş kesme dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Kirişlerin kapasitesinde kullanılan boyuna donatı ve etriye oranının, güçlendirmede kullanılan CFRP miktarı ile ilişkili olduğu görülmüştür. Sonuçlara göre beton, donatı ve CFRP arasındaki etkileşimin ancak süperpozisyonla açıklanabileceği ve analitik bir formül önermenin oldukça karmaşık olabileceği belirtilmiştir.

Ali vd., (2001), yaptıkları çalışmada 2800 mm uzunluğunda 150x250 mm kesitinde toplam 13 adet kirişi eğilme ve kesme yönünden güçlendirmede sıyrılma mekanizmalarını çalışmışlardır. Çalışmada güçlendirmede kullanılan çelik levhalar ve FRP karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre çekme yüzüne ve yan yüzlere çelik levha veya FRP uygulanan elemanlarda eğilme sıyrılma mekanizması aynı şekilde olduğu gözlemlenmiştir. Ancak kullanılan malzemelerin eğilme direncinin farklılık

gösterdiği ve kesme sıyrılma direncinin elastisite modülü düşük olan malzemede daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Barnes vd., (2001), yaptıkları çalışmada 2370 mm uzunluğunda 175x400 mm kesitinde toplam 9 adet kirişin kesmeye karşı güçlendirilmesini çalışmışlardır. Güçlendirmede çelik levhalar, 4 adet kirişte kiriş gövdesine yapıştırılarak veya 3 adet kirişte bulonlanarak uygulanmıştır. Deneylerde kullanılan çelik levhaların genişliği 360 mm, boyu 2330 mm olarak seçilmiştir. Çelik levha kalınlıkları 2.0 mm, 4.0 mm ve 6.0 mm olmak üzere 3 farklı tipte kullanılmıştır. Deney sonuçlarında ince levhalarda kesme kapasitesinde kalın levhalarda eğilme kapasitesinde önemli artışlar gözlemlenmiştir. Bulonlanarak yapılan uygulamalarda maksimum kapasiteye ulaşılmıştır. Yapıştırılarak yapılan uygulamalarda çelik levhaların kiriş yüzeyinden sıyrılması gözlemlenebilmektedir. Bunun dışında hem bulonlamanın hem de yapıştırmanın uygulandığı elemanlar en iyi sonuçları vermiştir.

Khalifa ve Nanni, (2002), yapmış oldukları çalışmada, dikdörtgen kesitli 12 adet kirişin CFRP şerit kullanılarak kesme kapasitesini arttırmayı amaçlamışlardır. Kullanılan CFRP şeritlerin genişliği ve a/d oranı çalışmadaki değişkenlerdir. Kirişlerin uzunluğu 3050 mm ve 150x305 mm kesitinde seçilmiştir. Kirişlere 4 nokta yüklemesi uygulanmıştır. Deney elemanlarında a/d oranı 3 ve 4 olarak iki gruba ayrılmış ve kirişlerin bir tarafı eksik bir tarafı tam olarak etriye kullanılmıştır. Test sonuçlarına göre 50 mm ve 75 mm genişliğinde CFRP şerit kullanılan elemanlarda çok farklı kesme kapasitesi gözlemlenmemiştir. Farklı kesme donatısı içeren fakat a/d oranı aynı olan iki kirişin kesme kapasiteleri çok yakın tespit edilmiştir. Kirişlerde a/d oranı azaldıkça CFRP şeritlerin kesme kapasitesine katkısı azalmıştır. Ayrıca CFRP miktarının gereken miktardan fazla olması kiriş kesme kapasitesine belirgin bir artış sağlamamıştır.

Diagana vd., (2003), yapmış oldukları çalışmada, yetersiz kesme donatılı dikdörtgen kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesini amaçlamışlardır. Test edilen kiriş yüzeyine 4 farklı şekilde CFRP şerit yapıştırılmıştır. 2 referans kirişi olmak üzere toplam 10 adet kiriş test edilmiştir. CFRP şeritler yataya dik ve 45° olmak üzere yapıştırılmıştır. Deney sonuçlarında CFRP şeritlerin kesme kapasitesini arttırdığı ve şerit aralığının ve şeridin düzlem açısının kesme kapasitesinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. CFRP şeritlerin U şeklinde ve 45°'lik eğik çatlaklara dik olarak yapıştırılan elemanlarda en fazla kesme kapasitesine ulaşılmıştır.

Taljesten, (2003), yaptığı çalışmada, 4000 mm uzunluğunda 500x180 mm kesitinde 7 adet kiriş test etmiştir. Deney elemanlarına 4 nokta yüklemesi uygulanmış ve bir adet kiriş referans elemanı olarak belirlenmiştir. Deney elemanlarına değişik kalınlık ve açılarda CFRP şerit yapıştırılmıştır. Kirişlerin kesme açıklıklarında kesme donatısı kullanılmamıştır. Testler sonucunda CFRP şeritlerin eğik çatlaklara dik yapıştırıldığında, kesme kapasitesinin en fazla arttığı tespit edilmiştir.

Akyüz ve Özdemir, (2004), yaptıkları çalışmada, ankrajların yük taşıma kapasitelerini araştırmışlardır. Beton basınç dayanımı, ankraj derinliği, ankraj çapı ve CFRP şerit genişliği deney parameterleri olarak belirlenmiştir. Çekme donatısı olmayan 16 MPa ve 20 MPa beton basınç dayanımı olan, 4000 mm uzunluğunda iki adet kiriş deneylerde kullanılmıştır. 12 mm ve 14 mm olmak üzere iki tip ankraj çapı belirlenmiştir. Ankraj etrafına 80,120 ve 160 mm genişliğinde CFRP şerit kullanılmıştır. Ankraj derinlikleri ise 70, 100 ve 150 mm seçilmiştir. Yapılan eksenel çekme deneyi sonucunda, ankraj etrafına sarılan CFRP şeridin genişliği arttıkça ankrajın taşıdığı eksenel yükün arttığı, ankraj çapı arttıkça taşınan yükün arttığı belirlenmiştir. Ankraj derinliği açısından en fazla yük 100 mm ankraj derinliğinde taşınmıştır. Beton dayanımındaki farklılığın ankrajların taşıma kapasitesinde büyük bir farklılık göstermediği tespit edilmiştir.

Altın vd., (2005), yaptıkları çalışmada 4000 mm uzunluğunda T kesitli kesme yönünden yetersiz toplam 11 adet kiriş çelik levhalarla güçlendirmeyi çalışmışlardır. Deney elemanlarının genişliği 120 mm, yüksekliği 360 mm ve tabla genişliği 360 mm olarak seçilmiştir. Tüm deney elemanlarında aynı çekme donatısı kullanılmıştır. Toplam 11 adet kirişin 2 tanesi kontrol elemanı olarak düzenlenmiştir. Kontrol elemanlarından 1 tanesi yeterli kesme donatılı eleman, 1 tanesi ise yetersiz kesme donatılı eleman olarak uygulanmıştır. Güçlendirilen elemanlarda çelik levhalar değişik tip ve düzenlemelerde kirişlere yapıştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre güçlendirilen tüm elemanlarda kesme dayanımı, süneklik ve rijitlik artmıştır. Çelik levhaların tip ve düzenlemeleri kirişlerin davranışını farklı etkilemiştir. L biçiminde uygulanan levhalarda süneklik oranlarının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca kesme açıklığı boyunca parçalı levha kullanmanın, tek bir levha kullanmadan daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir.

Wegian ve Abdalla, (2006), yaptıkları çalışmada 7 adet kirişin kesmeye karşı güçlendirilmesini çalışmışlardır. Çalışmada 3 adet kiriş GFRP, 2 adet kiriş CFRP ve 2 adet kiriş FRP ile güçlendirilmiş, test edilen elemanlarda GFRP, CFRP ve FRP

karşılaştırılması yapılmıştır. Deney sonuçlarında FRP ile güçlendirilen elemanlarda standart etriyeli kirişlere göre daha büyük kesme kapasitesi sağlamıştır. FRP ile güçlendirilen elemanlar en iyi sonucu vermiş ve ACI 440 da belirtilen değerlerden daha büyük kesme kapasitesine ulaşmışlardır.

Bousselham ve Chaallal, (2006), yaptıkları çalışmada CFRP ile güçlendirilmiş 3000 mm uzunluğunda T kesitli 12 adet kirişin güçlendirilmesini çalışmışlardır. Deney sonuçlarına göre etkili yüksekliği büyük olan kirişler daha büyük kesme kapasitesine ulaşmışlarına rağmen, etkili yüksekliği küçük olan kirişlerde uygulanan CFRP kesme kapasitesinde daha fazla katkı sağlamıştır. İki kat uygulanan CFRP'nin derin kirişlerde belirgin bir katkı sağlamadığı, fakat narin kirişlerde kesme kapasitesinde büyük katkılar sağladığı gözlemlenmiştir. Bunun dışında CFRP şeritlerin uygulanmasıyla elemanlarda deformasyon yapabilme yeteneği artmış ve büyük deformasyonlara ulaşılmıştır.

Riyadh ve Riadh, (2006), yaptıkları çalışmada betonarme kirişlerin kesme ve eğilmeye karşı CFRP plakalarla güçlendirilmesini amaçla 1 tanesi referans eleman olmak üzere toplam 7 adet kirişi test etmişlerdir. Çalışmada CFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulmasını önlemek amacıyla CFRP bantlar ve ankrajlar kullanılmıştır. Deneyler sonucunda CFRP şeritlerle güçlendirilen elemanların kesme dayanımı kapasitesinin arttığı gözlemlenmiştir. CFRP şeritlerde ankraj kullanılmasının kapasiteyi daha arttırdığı ve CFRP plakaların kiriş yüzeyinden soyulmasının engellendiği belirtilmiştir. Sadece CFRP plaka kullanılan elemanlarda %15 kapasite artışı gözlemlenirken, CFRP şeritlerin ankrajlarla birlikte kullanıldığı elemanlarda %95 kapasite artışı gözlemlenmiştir.

Barros ve Dias, (2006), yaptıkları çalışmada, betonarme kirişlerin eğilme ve kesmeye karşı güçlendirilmesini çalışmışlardır. Bu amaçla EBR (Externally Bonded Reinforcement) ve NSM (Near Surface Method) metotlarını kullanmışlar ve bu metotları karşılaştırmışlardır. EBR methodu CFRP şeritlerin kiriş yüzeyine yapıştırılması yöntemidir. NSM methodu ise CFRP kullanılarak kesme donatısına kadar oyuklar açılarak kirişe epoksi ile yapıştırılma yöntemidir. 4 nokta yüklemesi uygulanan deneylerde, CFRP şerit genişliği 10 mm ve 25 mm olarak seçilmiştir. CFRP şeritler yatayla 90°, 45° ve 135° açıyla uygulanmıştır. Deneyler sonucunda hem EBR methodunda hem de NSM methodunda kirişlerin eğilme ve kesme kapasiteleri artmıştır. NSM methodunun eğilme ve kesme etkisinde daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

NSM methodunda %83, EBR methodunda %54 oranında kapasite artışı gözlemlenmiştir. NSM methodu ile güçlendirilen kirişlerin aynı yük altında %9 daha fazla deplasman yaptığı tespit edilmiştir.

Anıl, (2006), yaptığı çalışmada 6 adet betonarme kirişin CFRP şeritler kullanılarak kesmeye karşı güçlendirilmesini amaçlamıştır. Çalışmada tersinir tekrarlanır yükler altında T kesitli kirişler test edilmiştir. CFRP şerit genişliği, şeritlerin uygulanma biçimi ve şeritlerin uçlarında uygulanan ankrajlar deney parameterleri olarak belirlenmiştir. Deney sonuçlarında CFRP şeritlerin kesme kapasitesini arttırdığı, epoksi ile birlikte kesme açıklığı boyunca uygulanan CFRP şeritlerin kesmeye karşı güçlendirmede etkili olduğu gözlemlenmiştir. Deneysel sonuçlar ACI 440 da verilen yaklaşımlarla karşılaştırılmış ve yaklaşımların doğru olduğu belirtilmiştir.

Barnes ve Mays, (2006), yaptıkları çalışmada 155x250 mm boyutlarında dikdörtgen kesitli toplam 15 adet ve 160x230 mm gövde genişliği ve derinliğinde 400x75 mm tabla genişliği ve yüksekliğinde T kesitli toplam 15 adet kirişi çelik levhalar yapıştırarak kesmeye karşı güçlendirilmesini çalışmışlardır. Deneylerde a/d oranı 4.0/ 1.8 ve 0.8 olmak üzere üç farklı tipte belirlenmiştir. Çelik levhaların kalınlığı 3 mm seçilmiştir. Deney sonuçlarına göre dikdörtgen ve T kesitli kirişlerde kesme dayanımında belirgin artış gözlemlenmiştir. Levha derinliği daha büyük olan kirişlerde levha derinliği küçük olan kirişlere oranla daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Bencardino vd., (2007), yaptıkları çalışmada kesme donatısı bulunmayan 5000 mm uzunluğunda 140x300 mm kesitinde 4 adet kirişin CFRP ile kesmeye karşı güçlendirilmesini çalışmışlardır. Donatı oranı ve geometrisi aynı olan kirişlere yükler farklı noktalardan uygulanarak, kirişlerin yük kapasiteleri ve göçme modları araştırılmıştır. Deneyler sonucunda çekme bölgesine yapıştırılan CFRP şeritlerin kesme kapasitesine etkili bir katkı sağlamadığı ve elemanda göçme modunu değiştirmede belirlenmiştir. CFRP şeritlerin ankraj uygulanarak yapıştırıldığı elemanda kesme kapasitesinin arttığı ve elemanın sünek davranış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Barros vd., (2007), yapmış oldukları çalışmada 1000 mm boyutunda 170x120 mm kesitinde kirişleri eğilme ve kesmeye karşı NSM ve EBR tekniklerini kullanarak güçlendirmeyi ve sonuçları karşılaştırmayı çalışmışlardır. Deney sonuçlarına göre CFRP tekniği ile güçlendirilen kirişlerde kesme kapasitesin ve kiriş deformasyon

kapasitesinde büyük artışlar sağlanmıştır. Eğilmeye karşı NSM tekniğinin EBR tekniğine göre daha etkin olduğu gözlemlenmiştir. Güçlendirme sonrası göçme modları karşılaştırılmış ve EBR tekniği kullanılan elemanlarda sünek kırılmalar, NSM tekniği kullanılan elemanlarda gevrek kırılmalar gözlemlenmiştir. Bunun dışında kiriş derinliği arttıkça 45° olarak uygulanan CFRP şeritlerin 90° olarak uygulanan CFRP şeritlere göre daha etkili olduğu belirtilmiştir.

Kim vd., (2008), yaptıkları çalışmada kirişlerin CFRP kullanılarak kesmeye karşı güçlendirilmesinde plastik model ve kafes model olmak üzere, 2 farklı analitik yöntem önermişlerdir. Deneysel çalışmayı önerdikleri analitik yöntemlerle karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinde karbon lif donatılı polimerlerin dayanımı, şeritlerin yapıştırılma sıklığı ve şeritlerin kiriş yüzeyi ile yapışma dayanımı önemli parametreler olarak belirlenmiştir.

Francesca vd., (2008), yılında yaptıkları çalışmada T kesitli 14 adet deney elemanını test etmişlerdir. CFRP şeritlerin uçlarının sabitlenmesi için farklı ankraj çözümleri belirlemişlerdir. 6 adet deney elemanına CFRP şerit tüm yüzey boyunca uygulanmıştır. 8 adet deney elemanına CFRP şeritler beton bloğun T kesitin alt kenarına kadar dairesel form verilerek uzatılmıştır. CFRP şeritlerin uçlarının sabitlenmesinde 4 farklı tipte ankraj uygulaması yapılmıştır. Fan ankrajlarının derinliği 75 mm ve çapı 7 mm olarak belirlenmiştir. Test edilen deney elemanlarında, CFRP şeritlerin L şeklinde ankrajsız ve ankrajlı olduğu durumlarda kiriş yüzeyinden soyulduğu gözlemlenmiştir. Fan ankrajların kiriş göçme mekanizmasını değiştirdiği tespit edilmiştir.

Galal ve Sekar, (2008), yılında yapmış oldukları çalışmada ters T kesitli 8 adet prekast köprü kirişlerini CFRP şeritler ve ankrajlar kullanarak güçlendirme amacı ile test etmişlerdir. Kirişlerde 4 nokta yüklemesi uygulanmıştır. Elemanlarda sünek olmayan davranışın önlenilmesine çalışılmıştır. Test sonuçlarında amaçlanan sünek davranış elde edilmiştir. Deney elemanlarının da süneklik oranı ve kesme dayanımı artmıştır. Ankraj kullanılan elemanların süneklik ve kesme kapasitesi bakımından ankraj kullanılmayan elemanlara göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Jayaprakash vd., (2008), yaptıkları çalışmada, 16 adet betonarme kirişi test etmişlerdir. Kirişlerin boyu 2980 mm kesiti 120x340 mm olarak belirlenmiştir. 4 adet kiriş referans elemanı olarak belirlenmiş, 6 adet kirişe hasar verilip CFRP ile onarılmış ve 6 adet

kiriş hasar verilmeden CFRP ile güçlendirilmiştir. a/d oranı, kullanılan çekme donatısı oranı, CFRP şerit eksen açıklığı, CFRP şerit sayısı ve yapıştırma şekli çalışmada kullanılan parametreler olarak belirlenmiştir. Şeritler yüzeye yatay düzlemle 45°, 90° ve 135° olarak yapıştırılmıştır. Şeritler U biçiminde ve L biçiminde kirişlere yapıştırılmıştır. Deneyler sonucunda CFRP şeritlerin kesme kapasitesini artırdığı, kesme kapasitesinin güçlendirme ile %11 ile %139 oranında arttığı tespit edilmiştir. a/d oranı 4 olan kirişlerde, a/d oranı 2.5 olan kirişlere göre %83 daha fazla kesme dayanımı arttığı gözlenmiştir. Yapıştırılan şeritlerin 45° olması durumunda daha fazla kesme dayanımı sağlandığı tespit edilmiştir.

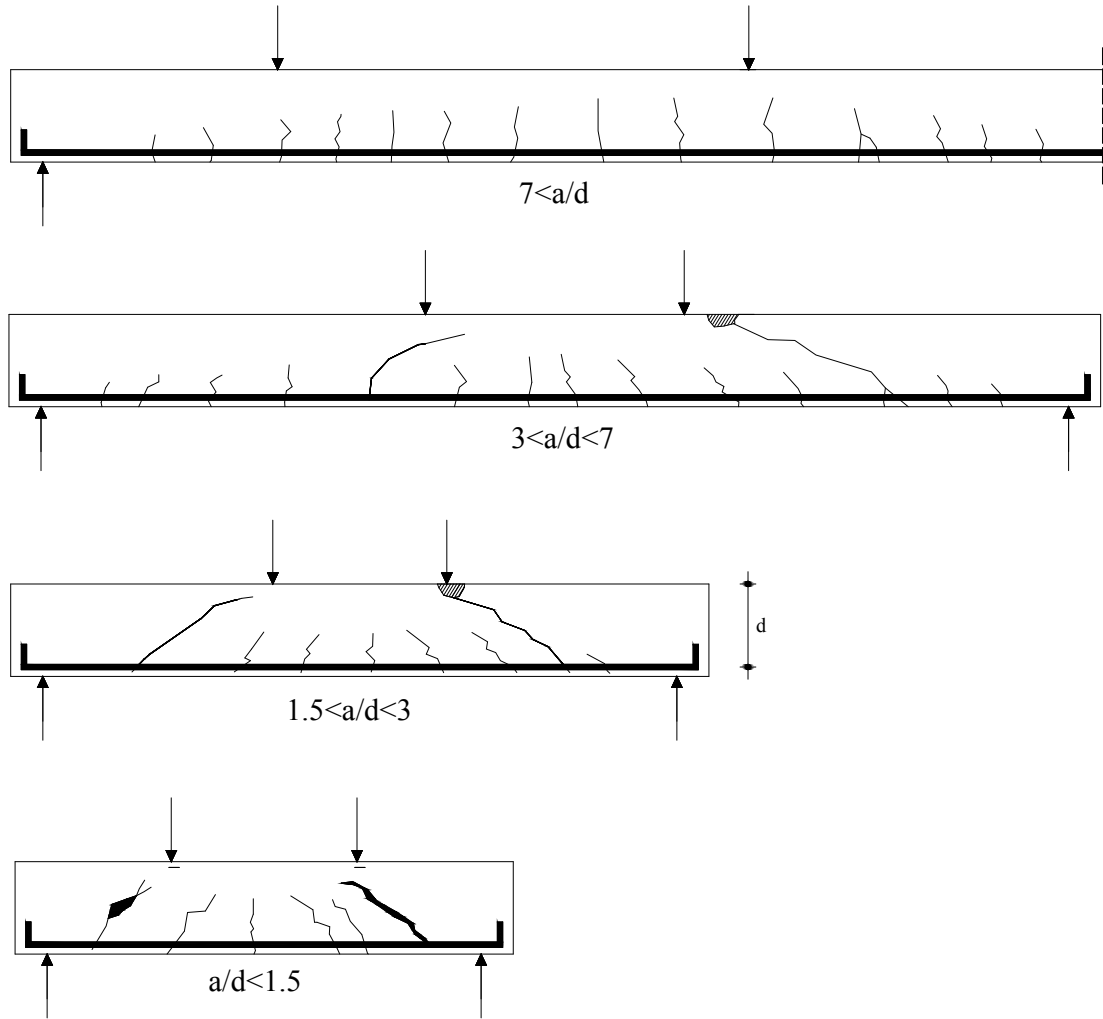
Tanarşlan H.M, (2010), yılında yaptığı çalışmada 9 adet betonarme kiriş kesmeye karşı CFRP şeritlerle güçlendirmeyi çalışmıştır. Test edilen kirişlerin boyu 1600 mm kesiti 200x350 mm olarak belirlenmiştir. a/d oranı 5 olarak seçilmiştir. NSM yöntemi kullanılan çalışmada CFRP şeritlerin yerleşim düzeni ve uygulama şekli çalışmanın değişkeni olarak belirlenmiştir. Test sonuçlarına göre güçlendirilen bütün deney elemanlarında betonarme elemanların kesme dayanımının gözlemlenmiştir. Deney sonuçları yönetmeliklerdeki bağıntılarla hesaplanan değerlerle karşılaştırılmış, testlerden elde edilen sonuçların hesaplanan değerlerle benzerlik gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Geçmişte yapılan çalışmalar incelediğinde, betonarme kirişlerin kesmeye karşı güçlendirilmesinde CFRP şeritlerin GFRP şeritlere göre daha fazla kullanıldığı görülmektedir. Yapılan araştırmalarda GFRP şeritlerin ve ankraj sayısının güçlendirmedeki etkinliği üzerine sınırlı sayıda çalışma olması ayrıca GFRP'nin CFRP'ye göre daha ucuz olmasından GFRP kullanılmasının daha ekonomik çözümler getirmesi nedeniyle bu çalışmada polimer olarak GFRP ve değişken olarak ankraj sayısı belirlenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Genel

Eğilme donatısı olan fakat kesme kuvveti donatısı bulunmayan basit mesnetli bir kirişte göçme mekanizmasını belirleyen en önemli faktörlerden biri kiriş kesme açıklığının (a), kiriş faydalı yüksekliğine (d) oranıdır. Yapılan deneysel çalışmalara göre a/d oranına göre kirişte güç tükenmesi ve çatlama biçimi dört grupta toplanmaktadır. Şekil 2.1.'de a/d oranına göre güç tükenmesi ve çatlama biçimleri gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Güç tükenmesi ve çatlama biçimleri (Celep ve Kumbasar, 2005)

a/d oranının 7'den büyük olduğu durumlarda kesme açıklığı büyük olduğundan kirişte kesme kuvveti küçük düzeyde kalırken eğilme momenti büyük düzeylere ulaşır. Kesme kuvvetinden meydana gelen eğik çekme gerilmeleri büyük değerlere ulaşamaz. Güç tükenmesi eğilme çatlaklarının ilerlemesiyle çekme donatısının akması ve büyük yer değiştirmeler sonucunda sünek meydana gelir. Beton basınç bölgesindeki betonun

ezilmesiyle kiriş tamamen göçer. Bu tür göçme modu eğilme çatlaklarından kaynaklanan sünek ve haberli bir göçme modudur.

a/d oranının 3'ten büyük 7'den küçük olduğu durumlarda, kesme açıklığı azaldığından, eğilme momentinin artmasıyla kesme kuvveti de artar. Kirişte yük armasıyla ilk olarak eğilme çatlakları oluşurken, eğik çekme gerilmeleri de artmasıyla eğik çatlaklar oluşur. Oluşan eğik çatlakların eğimi düşüktür. Göçmeye yakın durumda eğilme çatlaklarının bir veya birkaçı eğik çatlakla birleşir ve önemli yer değiştirmeler olmadan habersiz ve gevrek bir kırılma modunda kiriş göçer. Kiriş altında aderans çatlağının olduğu bölümde beton ve çekme donatısının kenetlenmesi azalmıştır. Bu kırılma biçimine gerçek eğik çekme kırılması adı verilir. Bu çalışmada kesme açıklığı 1550 mm ve faydalı yükseklik 330 mm belirlenerek a/d oranının 4.7 olması sağlanmıştır. a/d oranının 4.7 olarak belirlenmesinin nedeni gerçek eğik çekmenin 3 ile 7 aralığında oluşabilmesidir.

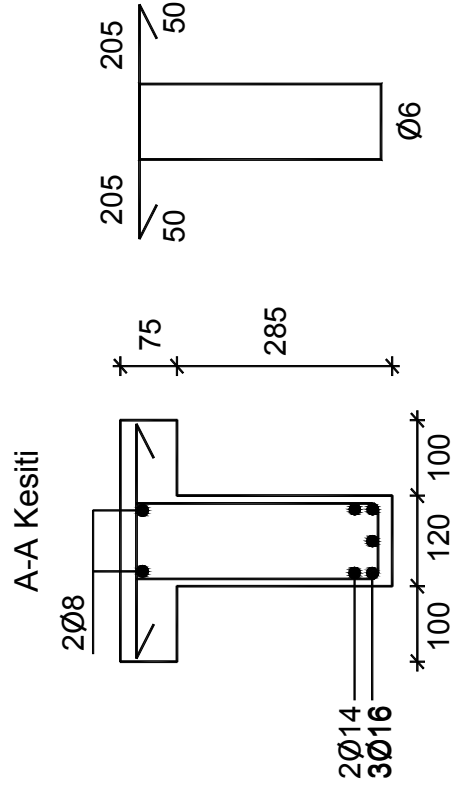
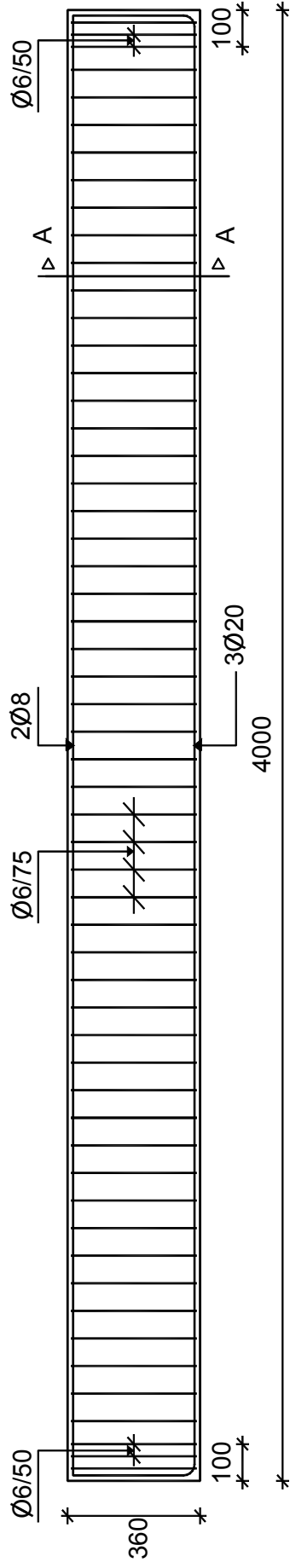
a/d oranının 1.5'ten büyük 3'ten küçük olduğu durumlarda, eğik çatlakların oluşmasına rağmen beton basınç bölgesinde oluşan basınç çubuklarıyla yük iletilir. Eğik çatlaklar arasında oluşan beton basınç bölgeleri dikleşir ve kemerlenme etkisi belirginleşir. Kemerlenme betonun asal basınç gerilmelerini karşılamasıyla ve çekme donatısının gergi görevi yapmasıyla meydana gelir. Bu durumda eğik çatlağın ilerlemesi durur ve beton basınç çubuklarında en büyük gerilmenin olduğu noktada basınç bölgesindeki betonun ezilmesiyle göçme meydana gelir. Ezilme nedeniyle oluşan bu güç tükenmesinde kiriş kesit eğilme taşıma gücü kapasitesine yaklaşır ve göçme ani olarak meydana gelmez. Bu durum kesme-ezilme kırılması olarak adlandırılır (Ersoy ve Özcebe, 2004)

a/d oranının 1.5'ten küçük olduğu durumlarda, kemerlenme etkisi daha da artar. Beton basınç çubuğunun ezilmesi ile göçme meydana gelir. Kemerlenmenin belirginleştiği bu durumda çekme donatısı mesnet bölgesinde aderansı yok olur. Kırılma biçimi ani ve gevrek bir modda meydana gelir.

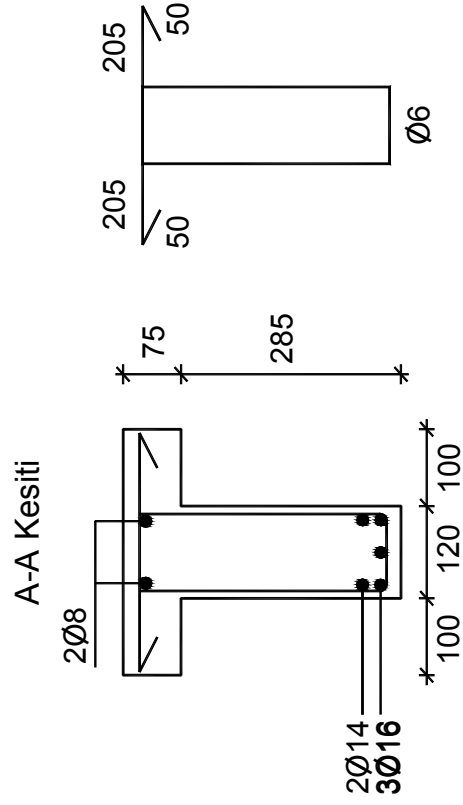
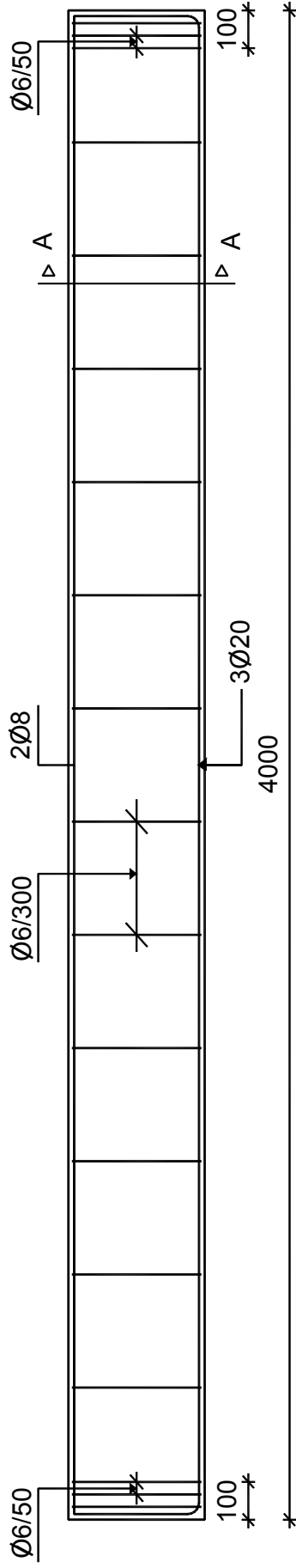
2.2. Deney Elemanlarının Detaylandırılması

Laboratuvar koşulları, yükleme ve ölçüm aletlerinin kapasiteleri göz önünde bulundurularak deney elemanlarının geometrik boyutları tasarlanmıştır. Deney

elemanları 1/2 ölçekli olarak detaylandırılmıştır. Deney programında 5 adet kiriş üretilmiştir. Deney elemanları 4000 mm uzunluğunda T kesitli tablalı kiriş olarak belirlenmiştir. Kiriş kesitinde gövde genişliği 120 mm, kiriş yüksekliği 360 mm, tabla genişliği 320 mm ve tabla derinliği 75 mm olarak tasarlanmıştır. Tüm deney elemanlarında çekme donatısı ve montaj donatısı aynı kullanılmıştır. Çekme donatısı olarak 16 mm çapında 3 adet nervürlü donatı ve 14 mm çapında 2 adet nervürlü donatı kullanılmıştır. Kirişlerde çekme donatısı pürsantajı $p=0.0230$ 'dur. Bu oran TS 500, (2000), de belirtilen dengeli donatı oranı $p_b=0.0305$ 'den küçük olduğundan kirişlerde denge altı donatı bulunmaktadır. Montaj donatısı olarak 8 mm çapında 2 adet nervürlü donatı kullanılmıştır. Kirişlerde 6 mm çapında düz donatıdan üretilmiş enine donatı kullanılmıştır. Enine donatılar iki farklı modelde tasarlanmıştır. Yeterli kesme donatılı referans deney elemanında enine donatılar 75 mm aralıkla, yetersiz kesme donatılı diğer deney elemanlarında enine donatılar 300 mm aralıkla yerleştirilmiştir. Yetersiz kesme donatılı kirişlerde etriye oranı $\rho_w=0.00157$ 'dir. Bu etriye oranı ile kesme kapasitesinin küçük düzeyde kalması amaçlanmıştır. Lokal kırılmaların önlenmesi amacıyla tüm kirişlerin mesnetlerine 3 adet etriye 33 mm aralıkla yerleştirilmiştir. Deney elemanlarının geometrik biçimi ve donatı planı Şekil 2.2 ve Şekil 2.3.de verilmiştir.



Şekil 2.2. Deney elemanı 1 donatı planı



Şekil 2.3. Deney elemanı 2, 3, 4 ve 5 donatı planı

Deneysel çalışma için 1 tane yeterli kesme donatılı referans elemanı, 1 tane yetersiz kesme donatılı referans elemanı ve 3 tane GFRP şeritlerle güçlendirilmiş eleman olmak üzere toplam 5 adet kiriş üretilmiştir. Yeterli kesme donatılı referans elemanında etriyeler 75 mm aralıkla, diğer 4 elemanda etriyeler 300 mm aralıkla yerleştirilmiştir. Yeterli ve yetersiz kesme donatılı referans elemanlarında GFRP şerit kullanılmamıştır. Diğer 3 adet deney elemanında GFRP şeritler kiriş yan yüzlerine yapıştırılmıştır. GFRP şeritleri yapıştırmada epoksi bazlı yapısal yapıştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan GFRP şeritler güçlendirilen kirişlerde özdeştir. GFRP şerit kalınlığı 5 mm, GFRP şerit genişliği (w_f) 90 mm ve GFRP şeritlerin eksenleri arası mesafe (s_f) 100 mm olarak tasarlanmıştır. Güçlendirilen tüm elemanlarda GFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulmasını engellemek amacıyla ankraj kullanılmıştır. Ankraj sayıları ve ankraj eksenleri arası mesafe her elemanda farklıdır. İki ankrajlı elemanda ankraj eksenleri arası mesafe 180 mm, üç ankrajlı elemanda ankraj eksenleri arası mesafe 90 mm ve dört ankrajlı elemanda ankraj eksenleri arası mesafe 60 mm olarak hazırlanmıştır. Deneylerde gerçek eğik çekme kırılmasının meydana gelebilmesi için a/d oranının 3'ten büyük 7'den küçük olması sağlanmıştır. Yükleme mesnetten 1550 mm mesafede uygulanarak kesme açıklığının 1550 mm olması sağlanmıştır. Kiriş faydalı yüksekliği 330 mm olduğundan a/d oranı 4.7 olarak belirlenmiştir. Deney elemanlarının donatı durumu Çizelge 2.1.de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Deney elemanlarının donatı durumu

Deney Elemanı No	(a/d)	Boyuna Donatı		Enine Donatı	
		Adet/Çap (mm)	Oranı	Çap/Aralık (mm)	Oranı
1 (Referans)	4.7	3Ø16 + 2Ø14	0.0230	Ø6/75	0.00628
2 (Referans)	4.7	3Ø16 + 2Ø14	0.0230	Ø6/300	0.00157
3 (Güçlendirme)	4.7	3Ø16 + 2Ø14	0.0230	Ø6/300	0.00157
4 (Güçlendirme)	4.7	3Ø16 + 2Ø14	0.0230	Ø6/300	0.00157
5 (Güçlendirme)	4.7	3Ø16 + 2Ø14	0.0230	Ø6/300	0.00157

Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, (2007), de , FRP'nin şeritler halinde kullanılması halinde şeritlerin eksenleri arasındaki mesafenin (s_f), şerit genişliği (w_f) ile kiriş faydalı yüksekliğinin (d) dörtte birinin toplamından ($w_f + d/4$) küçük olması şartı bulunmaktadır [30]. Bu koşula göre kullanabilecek şerit eksenleri

arası mesafe maksimum 172.5 mm'dir ($90+330/4=172.5$). Bu çalışmada GFRP şerit eksenleri arası mesafe 100 mm olarak uygulandığından, yönetmelikteki değerlere uygun olarak bir tasarım yapılmıştır.

Güçlendirilen 3 deney elemanında özdeş GFRP şeritler kullanılmıştır. GFRP şeritlerin boyu 280 mm, genişliği 90 mm ve kalınlığı 5 mm'dir. GFRP şerit eksenleri arası mesafe tüm kesme açıklığı boyunca sabit tutulup 100 mm olarak uygulanmıştır. Kullanılan şeritler kirişlere aynı bölgelere ve eş sayıda olacak şekilde kesme açıklığı boyunca yapıştırılmıştır. GFRP şeritler kiriş tabanından 2.5 mm yukarda ve kiriş tablasından 2.5 mm aşağıda olacak şekilde kiriş yan yüzlerine karşılıklı olarak yapıştırılmıştır. Yapıştırma epoksi bazlı yapısal yapıştırıcı kullanılarak yapılmıştır. Deney elemanlarının GFRP şerit durumu Çizelge 2.2. de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Deney elemanlarının GFRP şerit durumu

Deney Elemanı No	GFRP Şerit			GFRP Şerit Aralığı (mm)
	Boy (mm)	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	
1 (Referans)	-	-	-	-
2 (Referans)	-	-	-	-
3 (Güçlendirme)	280	90	5	100
4 (Güçlendirme)	280	90	5	100
5 (Güçlendirme)	280	90	5	100

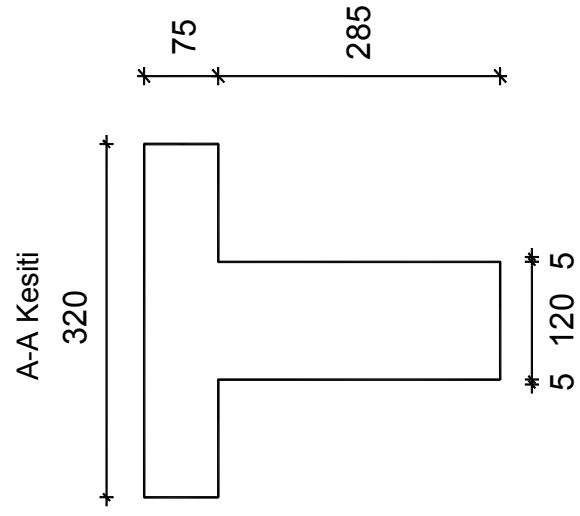
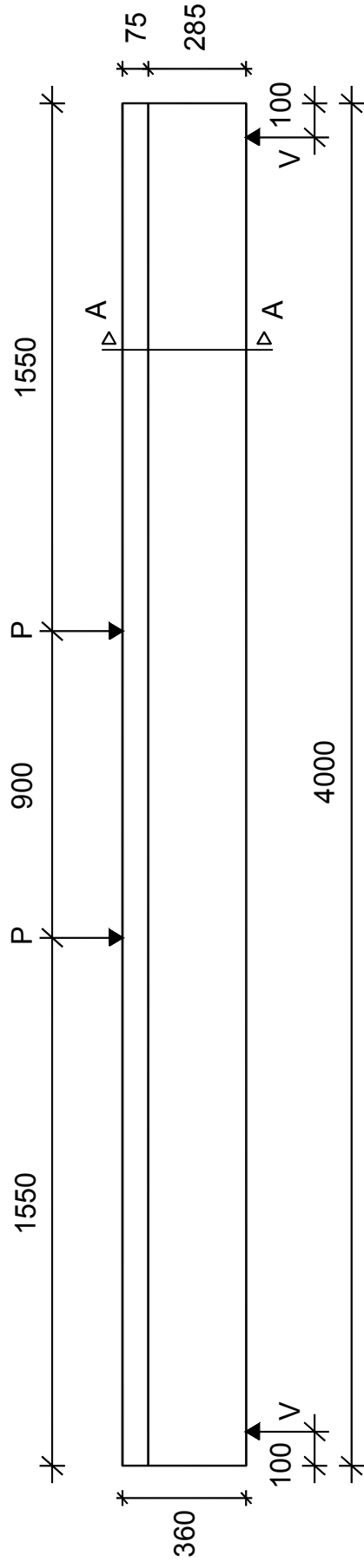
Yapılan deneysel çalışmalarda kirişlerde karbon lif ve cam lif takviyeli polimerlerin yapıştırılmasıyla yapılan güçlendirme tekniğinde ankraj kullanılmaması durumunda şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulduğu ve bunun elemanın enerji tüketim mekanizmasının yeterli kullanılmadığı sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada GFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulmasını engellemek için ankraj kullanılmıştır. Ankrajların sayısı ve aralığı farklı tutularak ankraj sayısı ve aralığının elemanlardaki kesme kuvveti kapasitesi, rijitlik, süneklik ve göçme modu üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda etkin gömülme derinliği ile ankraj çapı arasındaki oranın 5 olduğu sonucuna varılmıştır (Barros ve Dias, 2006). Deneysel çalışmada ankraj çapı 8 mm olarak uygulanmıştır. Ankraj olarak sonsuz dişli metrik vida kullanıldığından

ankraj derinliği sonsuzdur. Dolayısıyla gömülme derinliği ile ankraj çapı arasındaki oran sağlanmıştır. Deney elemanlarının ankraj durumu izelge 2.3.de verilmiştir.

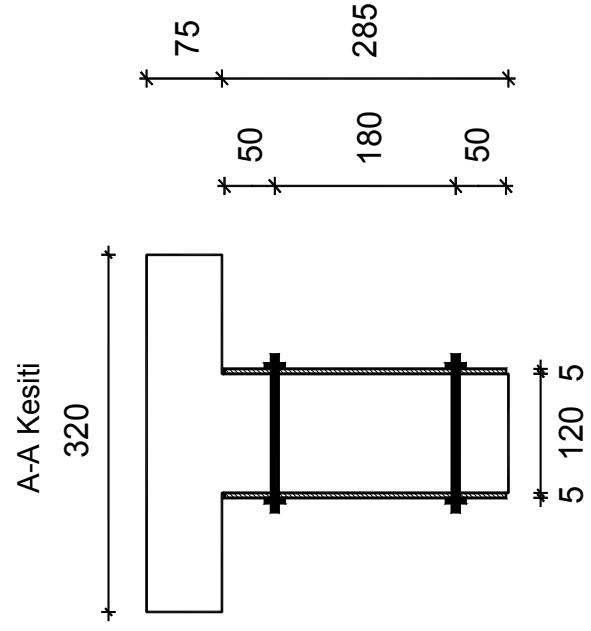
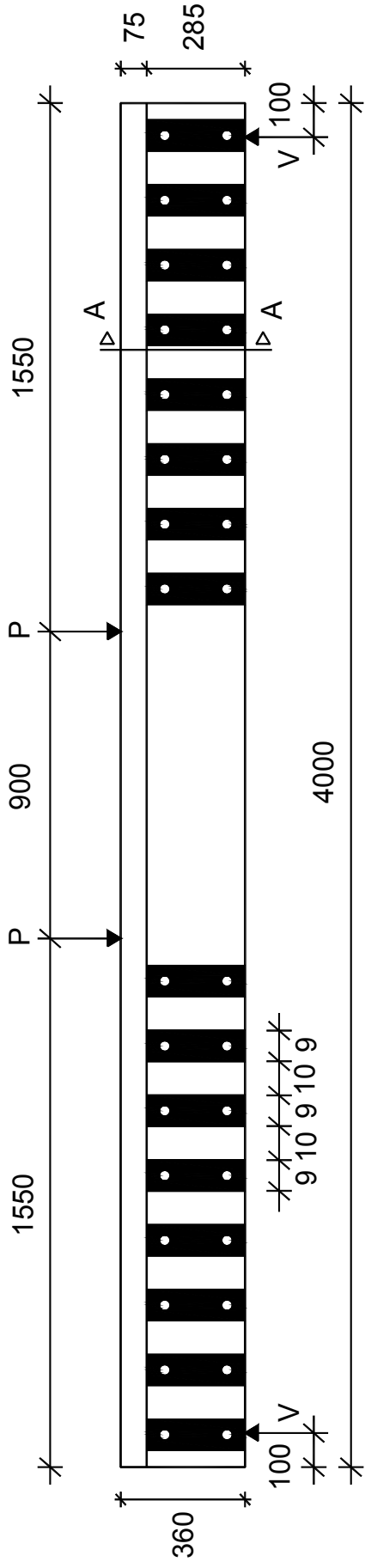
izelge 2.3. Deney elemanlarının ankraj durumu

Deney Elemanı No	Ankraj		
	apı (mm)	Sayısı	Aralığı (mm)
1 (Referans)	-	-	-
2 (Referans)	-	-	-
3 (Glendirme)	8	2	180
4 (Glendirme)	8	3	90
5 (Glendirme)	8	4	60

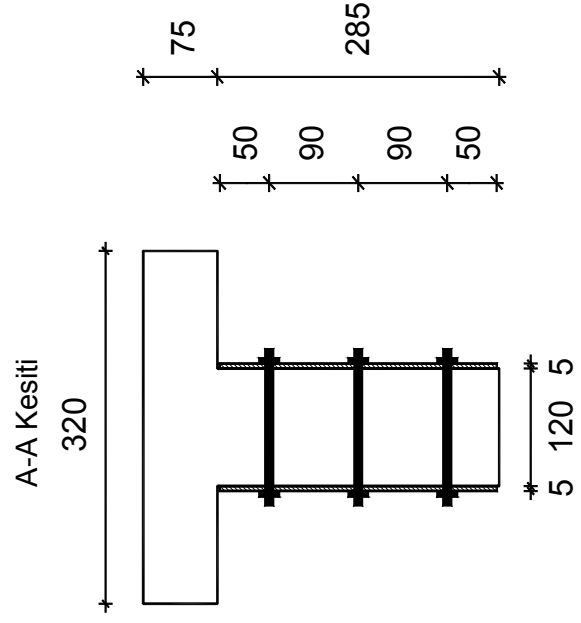
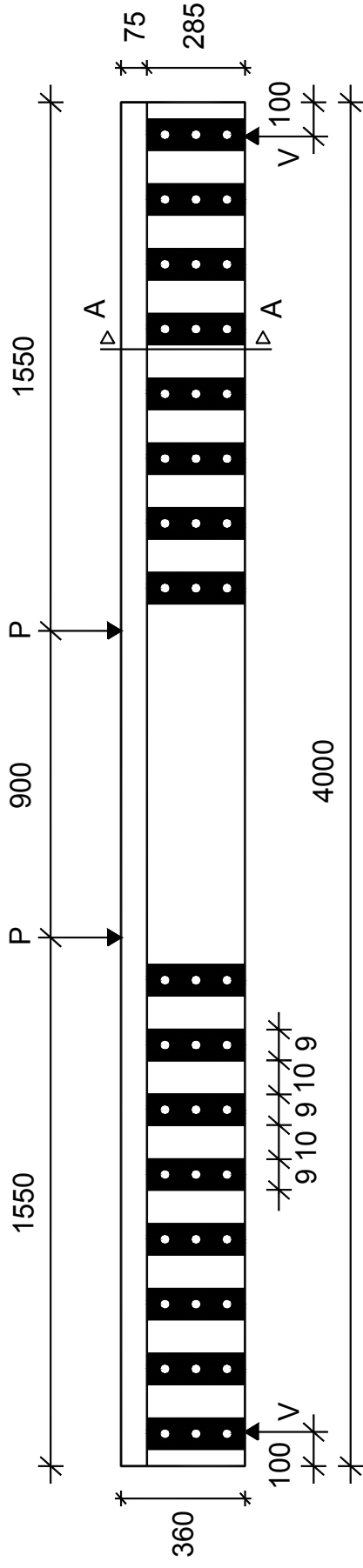
Deney elemanlarında kullanılan GFRP şerit yerleşimi ve ankraj detayları şekil 2.4.-2.7.de verilmiştir.



Şekil 2.4. Deney elemanı 1 ve 2



Şekil 2.5. Deney elemanı 3



Şekil 2.6. Deney elemanı 4

2.3. Malzeme Özellikleri ve Dayanımları

Deneysel çalışmanın sonuçlarının doğru irdelenebilmesi için deney elemanlarının aynı karakteristik özellikte malzemelerden üretilmesi gereklidir. Bunun için deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri aynı olmalıdır.

2.3.1. Beton

Deney elemanlarının üretiminde aynı karakteristik özellikte beton kullanılmıştır. Beton sınıfı olarak basınç dayanımı 16 MPa olan BS 16 (C16) beton kullanılmıştır. Beton üretimi laboratuvar ortamında hazırlanmamış, beton santralinden hazır beton temin edilmiştir. Çalışmalarda kullanılan betonun karakteristik basınç dayanımını belirlemek için 150x150x150 mm boyutlarında küp numuneler alınmıştır. Beton numune alınması Resim 2.1.de verilmiştir.



Resim 2.1. Beton numunesi alınması

Beton numuneleri laboratuvar ortamında kür havuzunda bekletildikten sonra 28 günlük basınç dayanımlarını ölçmek için kırılmıştır. Beton basınç dayanımları tasarlanan dayanım olan 16 MPa ile yaklaşık aynı değerde çıkmıştır. Beton numunelerinin 28 günlük kırım sonucunda elde edilen ortalama basınç dayanımları Çizelge 2.4. de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Beton numunelerinin ortalama basınç dayanımları

Numune No	Beton Basınç Dayanımları (MPa)
1	15.8
2	16.0
3	16.2
4	15.9
5	16.4
6	16.1

2.3.2. Donatı

Deney elemanlarında kullanılan donatıların özellikleri Çizelge 2.5.de verilmiştir.

Çizelge 2.5. Donatıların özellikleri

Donatı Çapı	Çelik Sınıfı	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)
Ø6	S220	390	630
Ø8	S420	440	670
Ø14	S420	450	680
Ø16	S420	470	695

2.3.3. GFRP

Cam elyaf sodyum, kalsiyum, alüminyum, bor ve demir elementlerinin oksitleri ve esasını oluşturan silis-kumdan (SiO_2) oluşur. Cam elyaf polimer üretiminde kullanılan takviye malzemeleri içinde en ucuz olan takviye malzemesidir. Ucuz ve yerli üretimde kolayca ulaşılabilmesi nedeniyle bu çalışmada cam elyaf takviyeli polimer kullanılması uygun görülmüştür. Cam elyaflar karbon kadar hafif ve rijit olmasına rağmen oldukça ucuz takviye malzemesidir. Deney elemanlarında kullanılan cam lif donatılı polimerler (GFRP- glass fiber reinforcement polymer) Doğu Plastik Sanayi tarafından üretilmiştir. Tüm kirişlerde aynı türden GFRP kullanılmasına özen gösterilmiştir. Deney elemanlarında kullanılan GFRP'nin özellikleri çizelge 2.6.da verilmiştir.

Çizelge 2.6. GFRP'nin özellikleri (URL-1)

Özgül ağırlık (g/cm ³)	1.85
Bükülme kuvveti (kg/cm ²)	3500
Darbe mukavemeti (kJ/m ²)	33
Laminasyona dikey elektrik dayanımı (MV/m)	14,2
90°C'de transformatör yayı içinde laminasyona paralel kırılma voltajı (KV)	35
Su içinde doyurulduktan sonraki elektriksel direnç (OHM)	5x108
Renk	Kirli sarı

2.3.4. Yapısal yapıştırıcı

GFRP şeritlerin kiriş yüzeylerine yapıştırılması için Sika Yapı Kimyasallar A.Ş. tarafından üretilen Sikadur 31 kullanılmıştır. Sikadur 31, solvent içermeyen, neme toleranslı, tiksotropik, 2 bileşenli, epoksi reçineler ve özel dolgular içeren, yapısal yapıştırma ve tamir harcıdır. Bileşenlerin (A Bileşeni:beyaz, B Bileşeni:koyu gri) karışım oranları ağırlıkça veya hacimce (A:B) 3:1 dir. Sikadur 31, 2 bileşenli tiksotropik epoksi yapıştırıcının mekanik/ fiziksel özellikleri Çizelge 2.7.de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Sikadur 31, epoksi yapıştırıcının mekanik/fiziksel özellikleri (URL-2)

	Kür süresi	Kür sıcaklığı	
		+20 C ^o	+10 C ^o
Basınç dayanımı	1 gün	40-45 N/mm ²	35-40 N/mm ²
	10 gün	60-70 N/mm ²	50-60 N/mm ²
	Kür süresi	Kür sıcaklığı	
		+10 C ^o ile +20 C ^o	
Eğilmede çekme dayanımı	10 gün	30-40 N/mm ²	
Çekme dayanımı	10 gün	15-20 N/mm ²	
Yapışma dayanımı	10 gün (betona)	3.0-3.5 N/mm ²	
	10 gün (çeliğe)	15 N/mm ²	
Elastisite modülü	4300 N/mm ²		
Yoğunluk	1.65 kg/l		

2.4. Deney Elemanlarının Üretilmesi

2.4.1. Donatıların hazırlanması

Deney elemanlarının detaylandırılıp tasarlanmasından sonra üretim aşamasına geçilmiştir. Üretime kirişlerde uygulanmak istenen donatı kafesinin üretilmesiyle başlanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılacak çekme donatısı ve montaj donatısı tüm elemanlarda aynı kullanılmıştır. Tüm kirişlerin çekme yüzüne 16 mm çapında 3 adet nervürlü ve 14 mm çapında 2 adet nervürlü donatı olmak üzere toplam 5 adet nervürlü donatı kullanılmıştır. Kirişlerde çekme donatısı oranı $\rho=0.0230$ 'dur. Kiriş kesitinde donatı oranı TS 500 de verilen dengeli donatı oranı olan $\rho_b=0.0305$ 'den küçük dizayn edilerek denge altı donatı elde edilmiştir. Deney Elemanı 1'de kesme donatıları 75 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Kesme donatısı olarak 6 mm çapında düz kapalı etriyeler kullanılmıştır. Donatı kafesi yerleştirilmiş Deney Elemanı 1 Resim 2.2. de verilmiştir.



Resim 2.2. Donatı kafesi yerleştirilmiş deney elemanı 1

Deney Elemanı 1 dışındaki diğer tüm deney elemanlarına kesme donatısı olarak 6 mm çapında düz kapalı etriye 300 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Bu etriye oranı $\rho_w=0.00157$ ve bulunması gereken etriye oranının yaklaşık 1/4'ü kadardır. Elemanlarda yetersiz kesme donatısı kullanılarak elemanın eğik çekme kırılmasına yönlendirilmesi amaçlanmıştır. Donatı kafesi yerleştirilmiş Deney Elemanı 2, 3, 4 ve 5 Resim 2.3. de verilmiştir.



Resim 2.3. Donatı kafesi yerleştirilmiş deney elemanı 2,3,4 ve 5

Kirişlerde lokal kırılmaları önlemek amacıyla kiriş mesnetlerine 33 mm aralıkla 3 adet enine donatı yerleştirilmiştir. Çekme donatısı, montaj donatısı ve enine donatıları montajlanan donatı kafesleri kalıplara yerleştirilmeye hazır hale getirilmiştir.

2.4.2. Kalıpların hazırlanması

Deney elemanlarında T kesitli ahşap kalıplar kullanılmıştır. Her eleman için ayrı ahşap kalıp hazırlandığından, ahşap kalıplar sadece birer kez kullanılmış ve kalıplar tekrar kullanılmamıştır. Ahşap kalıp kullanılmasının nedeni ucuz olması ve üretimin hızlı yapılabilmesidir. Ancak kalıplar sadece birer kez kullanılabildiğinden her eleman için ayrı olmak üzere toplam 5 adet ahşap kalıp üretilmiştir. Ahşap kalıpların içerisine donatı kafesleri yerleştirilerek deney elemanları beton dökümüne hazır hale getirilmiştir. Beton dökümüne hazır deney elemanları Resim 2.4. verilmiştir.



Resim 2.4. Beton dökümüne hazır deney elemanları

2.4.3. Beton dökümü

Beton dökümüne hazır hale getirilmiş elemanlara beton dökümü yapılmıştır. Dökümde C16 hazır beton kullanılmıştır. Beton dökümü sırasında betonun kalıp içerisinde homojen olarak yerleşmesi için beton vibratörü kullanılmıştır. Beton dökümü Resim 2.5. de verilmiştir.



Resim 2.5. Beton dökümü

2.4.4. Ankrajların hazırlanması

Deney elemanlarının güçlendirilmesinde 8 mm çapında sonsuz dişli metrik vidalar kullanılmıştır. 1 ve 2 nolu deney elemanında ankrajlar kullanılmamıştır. 3 nolu deney elemanında her GFRP şerit başına 2 adet, 4 nolu deney elemanında her GFRP şerit başına 3 adet, 5 nolu deney elemanında ise her GFRP şerit başına 4 adet ankraj kullanılmıştır. Ankraj eksenleri arası mesafe ise 3 nolu deney elemanında 180 mm, 4 nolu deney elemanında 90 mm ve 5 nolu deney elemanında 60 mm olarak belirlenmiştir. Deney elemanları için belirlenen ankraj sayısı ve mesafeler için kalıptan çıkarılmış ve en az 28 günlük prizini almış beton deney elemanları, işaretlenen noktalardan ankraj vidalarının geçebilmesi için delinmiştir. Ankraj deliklerinin çapı 10 mm'dir. Ayrıca her ankraj için 1 mm kalınlığında 10 mm delik çaplı çelik pul kullanılmıştır. Delinen tüm noktalara ankrajlar yerleştirilmiştir. Resim 2.6. da beton deney elemanına yerleştirilen ankrajlar gösterilmiştir.



Resim 2.6. Beton deney elemanına yerleştirilen ankrajlar

2.4.5. GFRP şeritlerin hazırlanması

GFRP şeritlerin yapıştırılacağı bölgeler, kiriş yan yüzeylerinde işaretlenmiş ve işaretlenen bölgeler sağlam ve temiz bir yapışma yüzey alanı oluşturabilmek için temizlenmiştir. GFRP şeritlerin yapışacağı yüzey alanından beton şerbetinin temizlenmesi yapıştırıcı ile beton arasındaki aderansın sağlanması için oldukça önemlidir. Deney elemanı 1 ve 2 de GFRP şerit kullanılmamış, deney elemanı 3,4 ve 5

de GFRP şerit kullanılmıştır. GFRP şeritlere ankraj vidalarının yerleşeceği noktalar işaretlenmiş ve işaretlenen noktalar ankraj vidalarının geçebilmesi için delinmiştir. Delinen GFRP şeritler kiriş yan yüzeyine yapıştırılmaya hazır hale getirilmiştir. GFRP şeritlerin yapıştırılacağı yüzeylere Sikadur 31 epoksi yapıştırıcı 1 mm kalınlığında srlmştir. Resim 2.7. de GFRP şeritlere Sikadur 31 epoksi yapıştırıcı sürülmesi ve Resim 2.8. de kiriş yan yüzeyine yapıştırılan GFRP şeritler verilmiştir.



Resim 2.7. GFRP şeritlere Sikadur 31 epoksi yapıştırıcı sürülmesi



Resim 2.8. Kiriş yan yüzeylerine yapıştırılan GFRP şeritler

GFRP şeritlerin kiriş yan y¼zeylerine yapıştırılması ile g¼çlendirme işlemleri tamamlanmış ve test edilecek kirişler y¼kleme d¼zenegine yerleştirilmeye hazır hale getirilmiştir. 2, 3 ve 4 ankrajlı GFRP şeritlerle g¼çlendirilmiř deney elemanı 3, 4 ve 5 Resim 2.9. – Resim 2.11. de verilmiştir



Resim 2.9. Deney elemanı 3



Resim 2.10. Deney elemanı 4



Resim 2.11. Deney elemanı 5

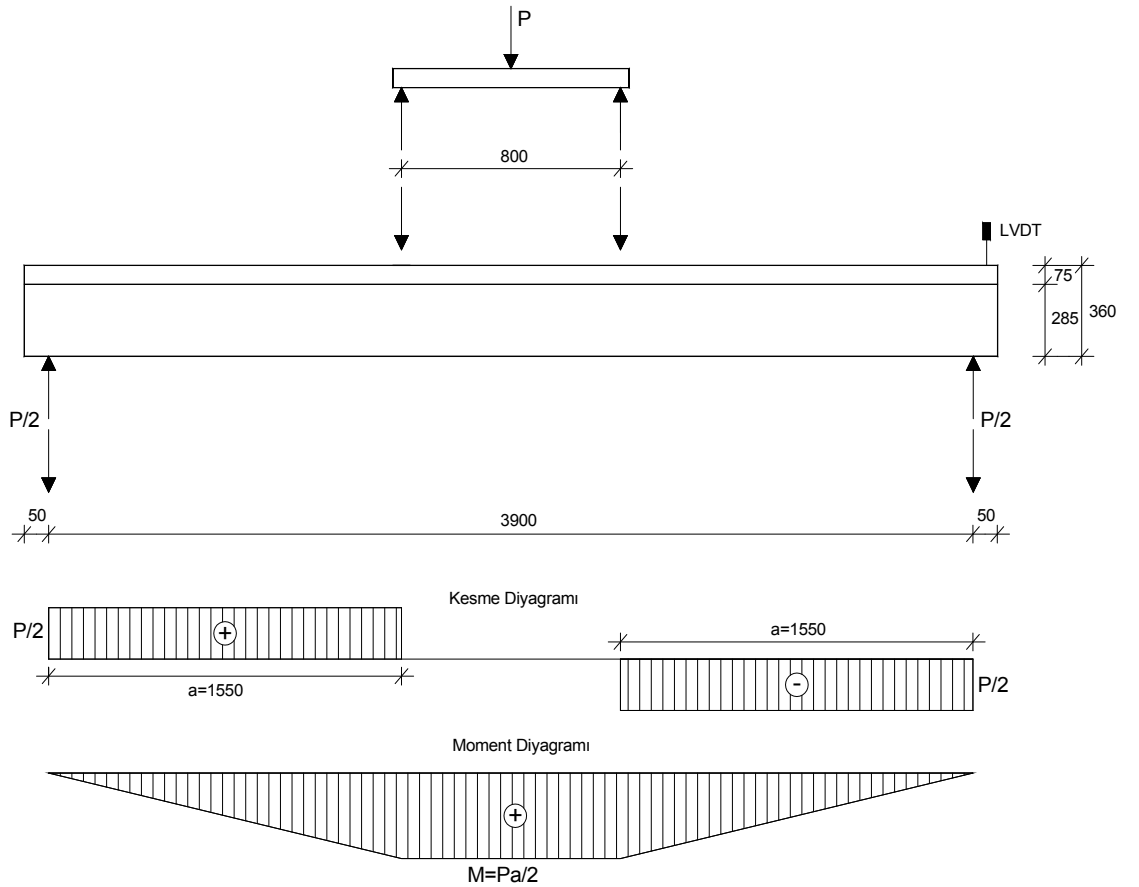
2.5. Deney Düzeni

2.5.1. Yükleme ve ölçüm düzeneği

Deneyler Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deney elemanlarının yükleme düzeneğinde yük hidrolik krikoya bağlı mekanik pompa aracılığı ile verilmiş, yükün büyüklüğü yük hücresi (load cell) ile ölçülmüştür. Deney elemanlarının tablası üzerine kutu kesitli 900 mm açıklı reaksiyon kirişi basit mesnetli olarak yerleştirilmiştir. Reaksiyon kirişin ortasına yerleştirilen yük hücresi ile yükün büyüklüğü ölçülmüştür. Reaksiyon kirişine hidrolik krikodan iletilen P büyüklüğündeki tekil yük, $P/2$ büyüklüğün eşit iki tekil yük halinde deney elemanlarına iletilmiştir. Yüklemeye sıfırdan başlayıp göçme meydana gelene kadar devam edilmiştir. Deney elemanlarında yükleme ve ölçüm düzeni Şekil 2.8. de verilmiştir.

Deney elemanları tekil kuvvetler arasında sabit moment kalırken, kesme açıklığında moment değişmektedir. Kesme kuvveti ise kesme açıklığı boyunca sabit ve reaksiyon kirişi mesnetleri arasında moment sabit bölgesinde sıfırdır. Kesme kuvveti ve moment diyagramlarının gösterildiği kirişte oluşan iç kuvvetler Şekil 2.9.de verilmiştir.

Deney elemanlarının orta nokta deplasmanını ve mesnet çökmelerinin ölçmek amacıyla kiriş orta noktasına ve mesnetlere elektronik ölçüm aletleri (LVDT) yerleştirilmiştir. LVDT çok hassas derecelere kadar deplasman ölçebilen elektronik aletlerdir. Her elemenda deneyler sırasında üç adet LVDT kullanılmıştır. Kullanılan üç adet LVDT kiriş orta nokta deplasmanı, sağ mesnet çökmesi ve sol mesnet çökmesi değerlerini ölçmüştür. Deneyler sırasında hidrolik krikodan verilen yük yük hücresi ile, mesnet çökmeleri ve orta nokta deplasmanı LVDT ile ölçülerek yük ve deplasman değerleri elde edilmiştir. Elde edilen yük ve deplasman değerleri bilgisayara aktarılarak deney elemanlarına ait yük-deplasman grafikleri çizilmiştir. Yük-deplasman grafikleri deney sonuçlarının değerlendirilmesi açısından oldukça önemli verilerdir. Bu grafiklerle kirişlerin deney boyunca davranışları yorumlanabilmektedir.



Şekil 2.9. Kirişte oluşan iç kuvvetler

2.5.2. Verilerin değeriendirilmesi

Deney elemanlarındaki tüm düşey deplasmanlar LVDT kullanılarak ölçülmüştür. Deneylerde ölçülen kiriş orta noktasındaki net deplasman, kiriş orta noktasındaki deplasmandan mesnetlerdeki deplasmanların ortalaması çıkarılarak hesaplanmıştır. Kullanılan hesaplama formülü Eşitlik 2.1.de verilmiştir.

$$\delta_{\text{net}} = \delta_2 - \left(\frac{\delta_3 + \delta_1}{2} \right) \quad (2.1)$$

Eşitlikte kullanılan terimler aşağıda açıklanmıştır.

δ_{net} = Kiriş orta noktasındaki düşey net deplasman (mm)

δ_2 = Kiriş orta noktası düşey deplasmanı (mm)

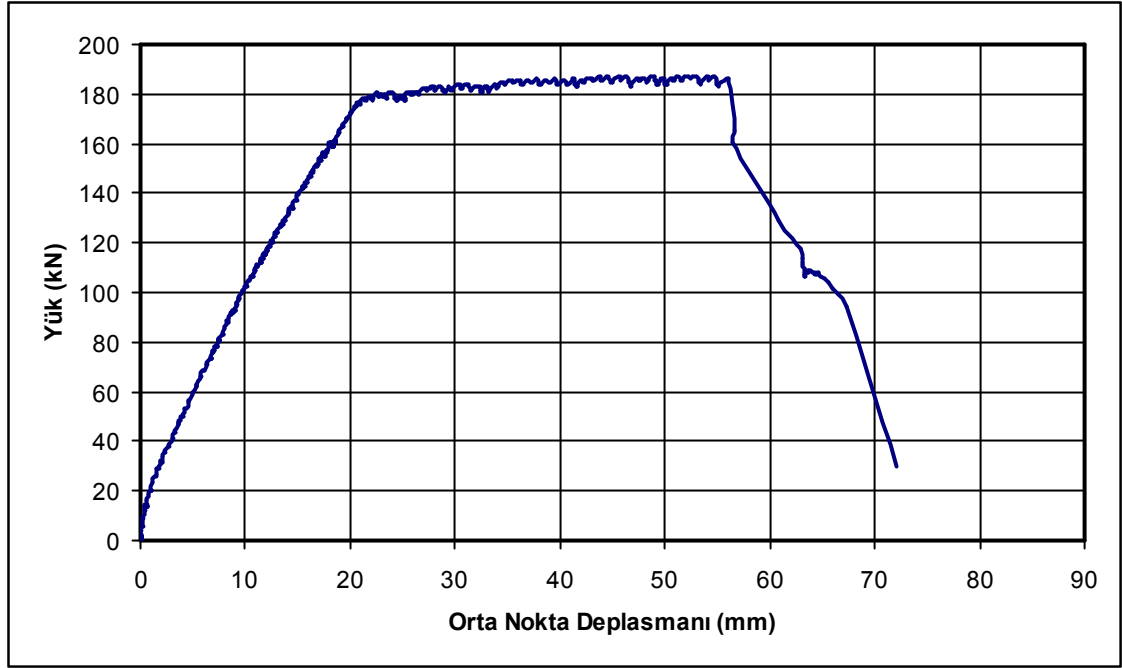
δ_3 = Sağ mesnet çökmesi (mm)

δ_1 = Sol mesnet çökmesi (mm)

3. DENEYLER

3.1. Deney Elemanı 1

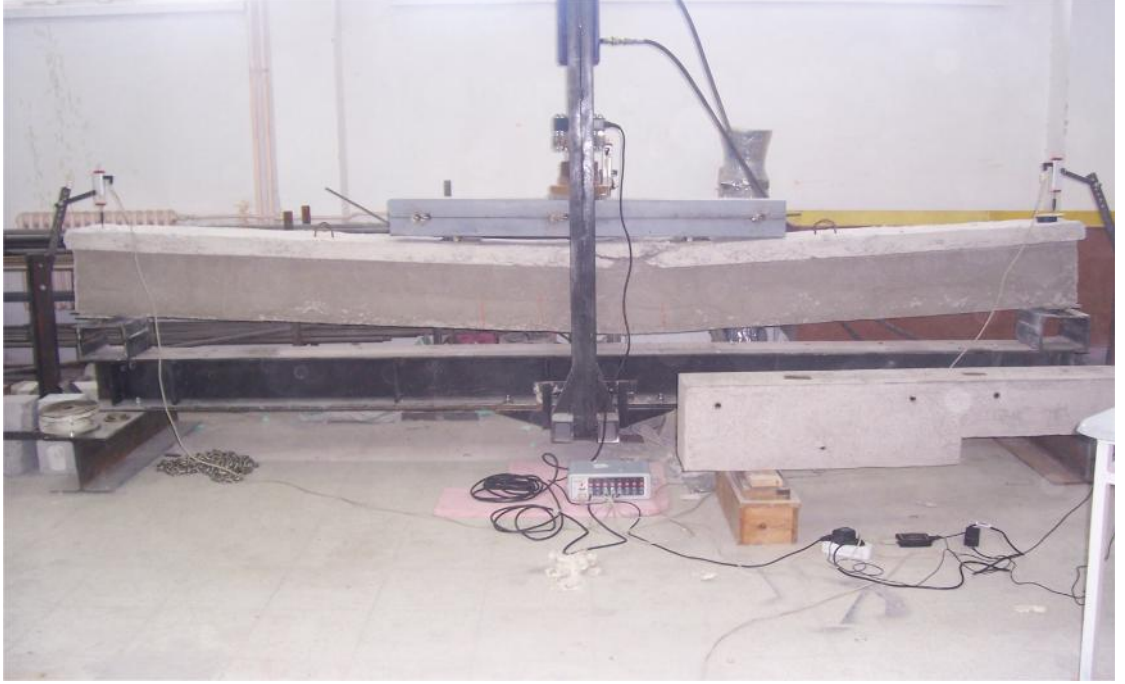
Güçlendirilen deney elemanlarıyla karşılaştırılmak üzere Ø6/75 enine donatı ve etriye oranı $\rho_w=0.00628$ olan yeterli kesme donatılı referans elemanıdır. Deney elemanı 1'e ait deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 3.1. de verilmiştir.



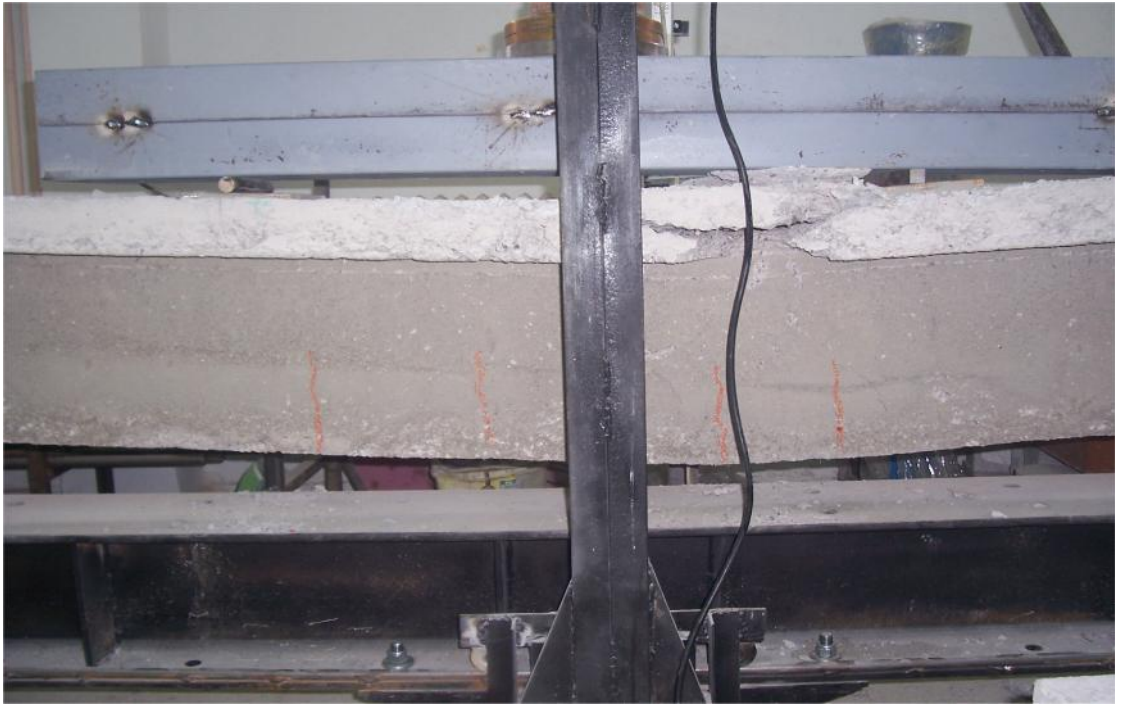
Şekil 3.1. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 1

Deney elemanı 1'de ilk çatlak 45.4 kN yükte eğilme çatlakları olarak oluşmuştur. Sabit moment bölgesinde oluşan ilk çatlak anında ölçülen orta nokta deplasmanı 3,80 mm dir. Yüklemenin artmasıyla 150.0 kN yük düzeyinde sabit moment bölgesinde eğilme çatlakları sayısında artış olmuştur. 160.0 kN yük düzeyinde sol kesme açıklığında kesme çatlakları oluşmaya başlamıştır. Sol kesme açıklığında kesme çatlaklarının sayısı artarken, sağ kesme açıklığında da kesme çatlakları kılcal düzeyde oluşmuştur. 170.0 kN yük düzeyinde eğilme çatlakları 1 mm genişliğine ulaşmıştır. 180.24 kN yükte donatı akmaya başlamıştır. Bu yük düzeyinde 25.42 mm orta nokta deplasmanı ölçülmüştür. Bu yük düzeyinden sonra kesme kuvveti değerinde belirgin bir artış olmazken orta nokta deplasmanı devam etmiş eleman sünek bir davranış sergilemiştir. Deney elemanında en büyük yük değeri 187.38 kN olarak ölçülmüştür. Bu değerle orta nokta deplasmanı 51.95 mm olmuştur. Yükleme devam ederken elemanda deplasman değeri artmaya devam etmiş ve 185.96 kN yük değerinde deney elemanı beton basınç

bölgesindeki betonun ezilmesi sonucu göçmüştür. Resim 3.1.de deney elemanının göçmeden sonraki görünüşü verilmiştir. Deney elemanı göçme anında ölçülen orta nokta deplasmanı 56,08 mm'dir. Deney elemanın kırılma modu eğilme kırılması olarak gerçekleşmiştir. Kırılma biçimi sünek ve haberli biçimde olmuştur. Deney elemanı 1'de tabla betonunda ezilme görünüşü Resim 3.2. de verilmiştir.



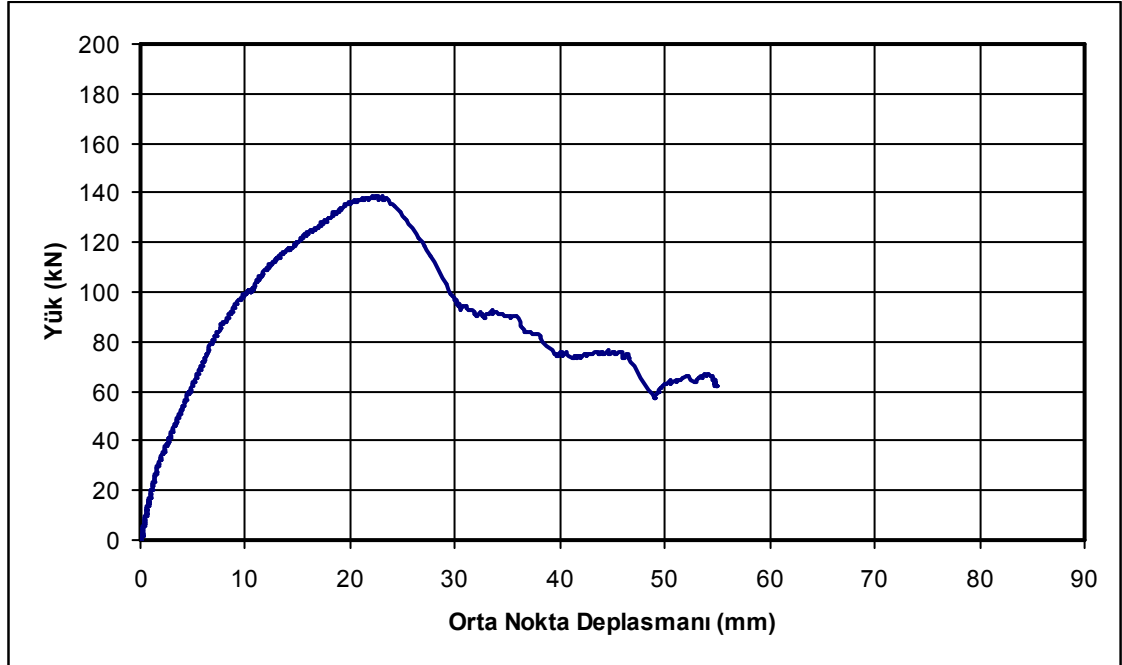
Resim 3.1. Göçmeden sonra, deney elemanı 1



Resim 3.2. Tabla betonunda ezilme, deney elemanı 1

3.2. Deney Elemanı 2

Güçlendirilen deney elemanlarıyla karşılaştırılmak üzere Ø6/300 enine donatı ve etriye oranı $\rho_w=0.00157$ olan yetersiz kesme donatılı referans elemanıdır. Deney elemanı 2'e ait deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 3.2. de verilmiştir.



Şekil 3.2. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 2

Deney elemanı 2'de ilk çatlak sabit moment bölgesinde eğilme çatlağı olarak oluşmuştur. İlk eğilme çatlağı anında 39.2 kN yük ve 3.98 mm orta nokta deplasman değeri ölçülmüştür. Yüklemenin artmasıyla birlikte kesme çatlakları oluşmuştur. 100.0 kN yük düzeyinde sağ kesme açıklığında ilk kesme çatlağı ve 120.0 kN yük düzeyinde sol kesme açıklığında kesme çatlağı oluşmuştur. 130.0 kN yükte sağ kesme açıklığında iki adet kesme çatlağı belirginleşmiştir. 138.76 kN yükte sağ kesme açıklığındaki ana kesme çatlağının ilerlemesi ve tabla betonuna ulaşması sonucu deney elemanı göçmüştür. Göçme anında deney elemanında 22.07 mm orta nokta deplasmanı ölçülmüştür. Deney elemanı 2'nin göçmeden sonraki görünüşü Resim 3.3. de verilmiştir. Deney elemanın göçme mekanizması kesme kırılması biçiminde meydana gelmiştir. Deney elemanı 2'de kesme kırılması görünüşü Resim 3.4. de verilmiştir.



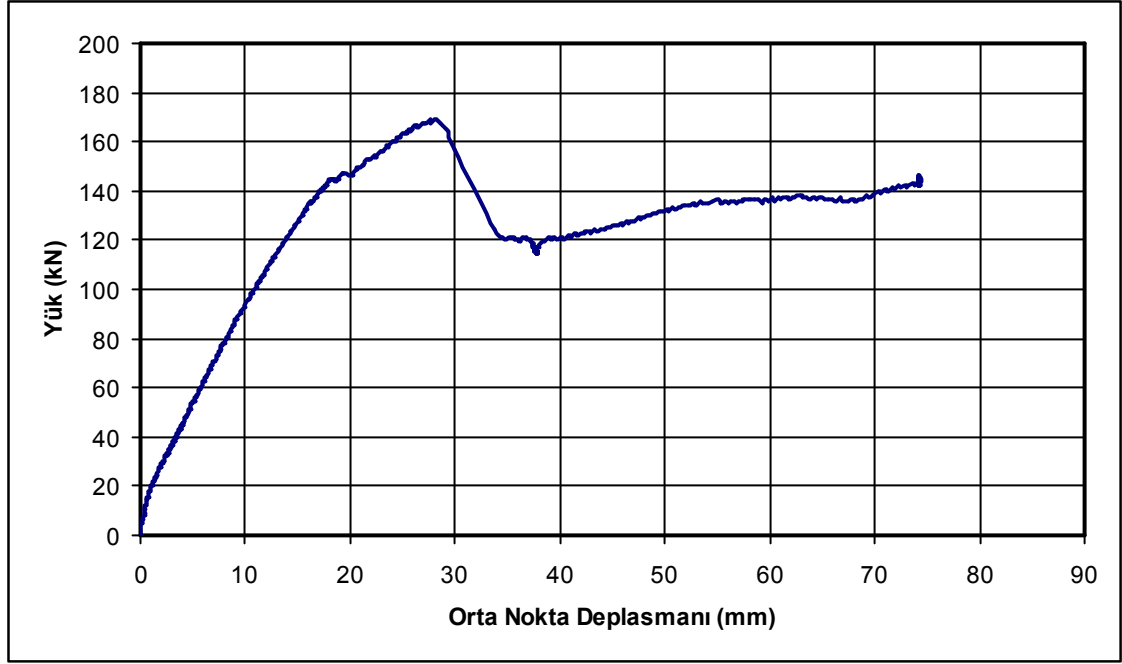
Resim 3.3. Göçmeden sonra, deney elemanı 2



Resim 3.4. Kesme kırılması, deney elemanı 2

3.3. Deney Elemanı 3

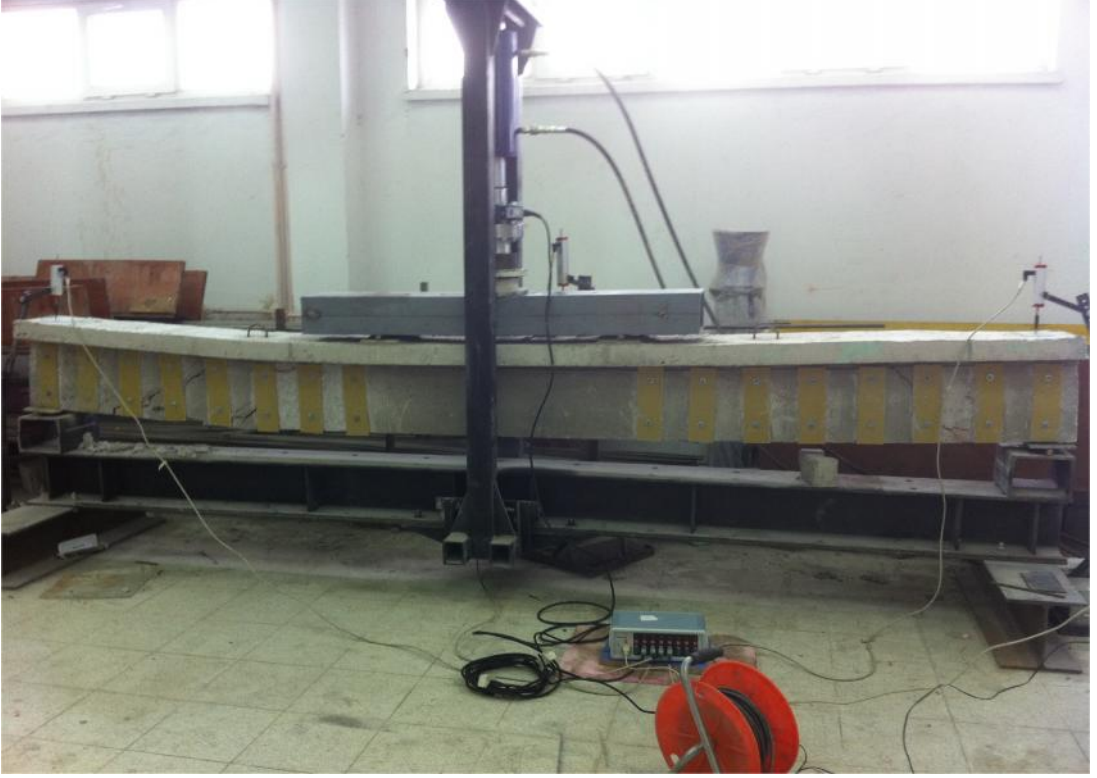
Ankraj eksenleri arası 180 mm olan 2 adet ankrajın kullanıldığı GFRP şeritlerle güçlendirilmiş ve referans deney elemanlarıyla karşılaştırılmak için üretilmiş olan deney elemanıdır. Deney elemanı 3'e ait deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 3.3. de verilmiştir.



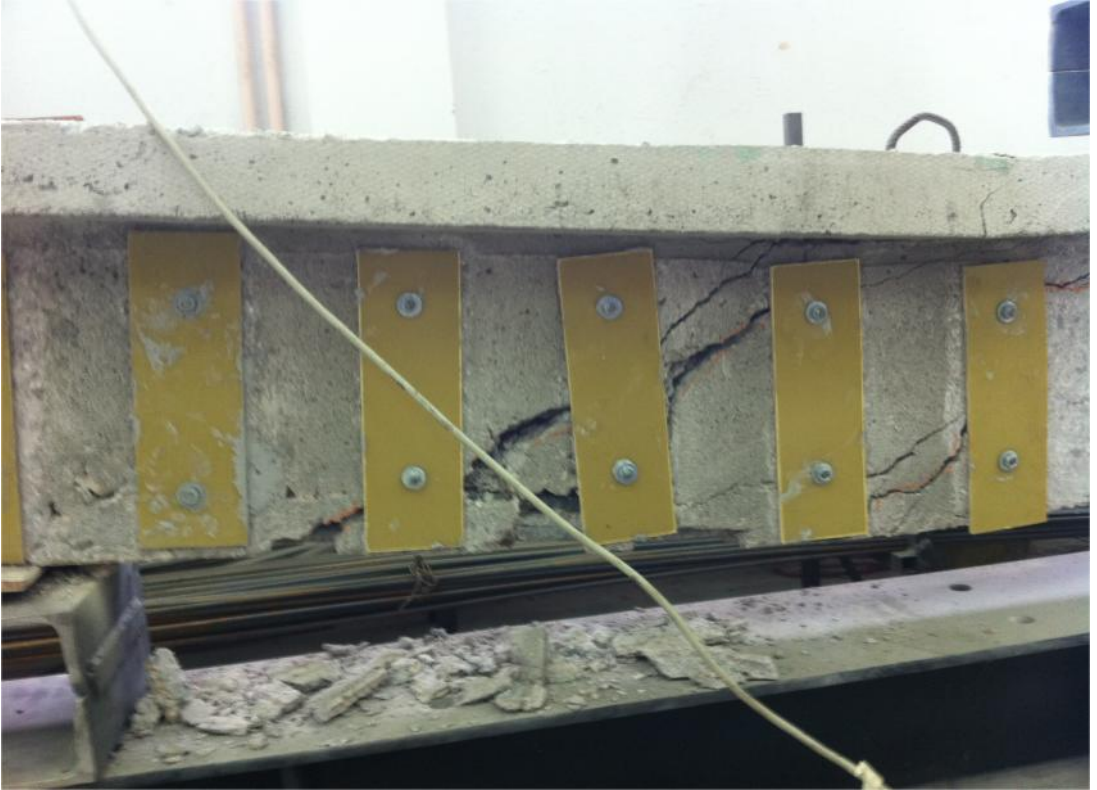
Şekil 3.3. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 3

Deney elemanı 3'de ilk çatlak sabit moment bölgesinde eğilme çatlağı olarak kılcal düzeyde 41.0 kN yük ve 3.64 mm orta nokta deplasmanda meydana gelmiştir. Elemanda yüklemenin artmasıyla eğilme çatlakları artmış ve kesme çatlakları oluşmuştur. 130.0 kN yük düzeyinde sağ kesme çatlağında ilk kesme çatlağı oluşmuştur. Oluşan çatlak 14 nolu şeritte meydana gelmiş ve şeritin altından geçip ilerlemeye devam ederek 1 mm kalınlığa erişmiştir. Yük artışıyla sol kesme açıklığında 3 nolu ve ardından 6 nolu şeritte kesme çatlakları oluşmuştur. 168.0 kN yükte sol kesme açıklığında bu iki ana kesme çatlağı belirginleşmiştir. 3 nolu şeritteki çatlak şeritin altından ilerleyip 4 ve 5 nolu şeritleri geçmiştir. Bu ana çatlağın tabla betonuna erişmesi sonucu 169.08 kN yük düzeyinde deney elemanı göçmüştür. Deney elemanının göçme anında ölçülen orta nokta deplasmanı 28.23 mm'dir. Deney elemanı 3'ün göçmeden sonraki görünüşü Resim 3.5. de verilmiştir. Göçme mekanizması kesme kırılması modunda ani ve gevrek biçimde oluşmuştur. Deney elemanında GFRP şeritlerde

herhangi bir bozulma ve kırış yüzeyinden soyulma gerçekleşmemiştir. Deney elemanı 3’de kesme kırılması görünüşü Resim 3.6. da verilmiştir.



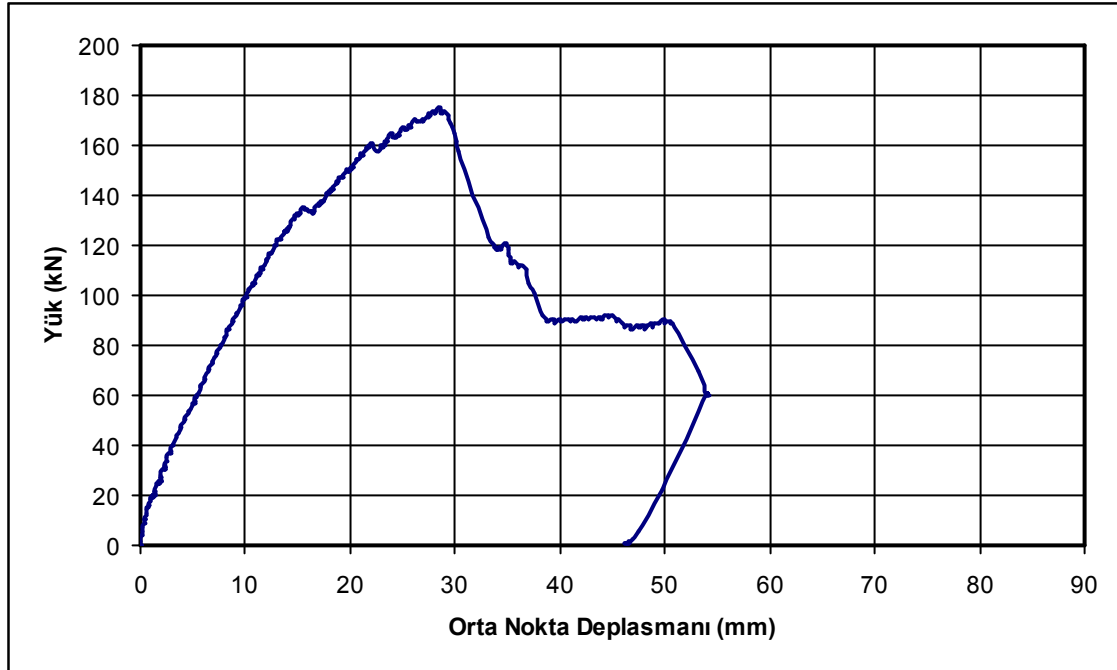
Resim 3.5. Göçmeden sonra, deney elemanı 3



Resim 3.6. Kesme kırılması, deney elemanı 3

3.4. Deney Elemanı 4

Ankraj eksenleri arası 90 mm olan 3 adet ankrajın kullanıldığı GFRP şeritlerle güçlendirilmiş ve referans deney elemanlarıyla karşılaştırılmak için üretilmiş olan deney elemanıdır. Deney elemanı 3'e ait deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 3.4. de verilmiştir.



Şekil 3.4. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 4

Deney elemanı 4'de ilk eğilme çatlağı sabit moment bölgesinde 43.8 kN yükte oluşmuştur. Bu yük düzeyinde orta nokta deplasmanı 3.79 mm ölçülmüştür. Yük artışıyla 100.0 kN yük düzeyinde eğilme çatlakları artmaya başlamış ve kesme çatlakları oluşmuştur. İlk kesme çatlağı sağ kesme açıklığında oluşmuştur. Sağ kesme açıklığında oluşan ilk çatlak 12 nolu şeriti geçerek 13 nolu şerite ulaşmıştır. Yük artışıyla sol kesme çatlağında 2 nolu şeritte kesme çatlağı oluşmuş fakat çatlak ilerleyememiştir. Sağ kesme açıklığında ikinci ana kesme çatlağı 13 nolu şeritte oluşmuştur. Ayrıca sağ mesnette çökmeler oluşmaya başlamış ve aderans çatlağı gözlemlenmiştir. Yüklemin artmasıyla sağ kesme açıklığında üçüncü ana kesme çatlağı 8 ve 9 nolu şeritlerde oluşmuştur. Deney elemanı 174.94 kN yük düzeyinde 11 ve 12 nolu şeritlerde oluşan kesme çatlağının tabla betonuna ulaşması sonucu ani ve gevrek bir biçimde kesme kırılması sonucu göçmüştür. Göçme anında deney elemanında 28.45 mm orta nokta deplasmanı ölçülmüştür. Deney elemanı 4'ün göçmeden sonraki görünüşü Resim 3.7. de verilmiştir. Deney sırasında GFRP şeritlerde herhangi bir bozulma veya kırış

yüzeyinden soyulma gerçekleşmemiştir. Deney elemanın göçme mekanizması kesme kırılması modunda gerçekleşmiştir. Deney elemanı 4’de kesme kırılması görünüşü Resim 3.8. de verilmiştir.



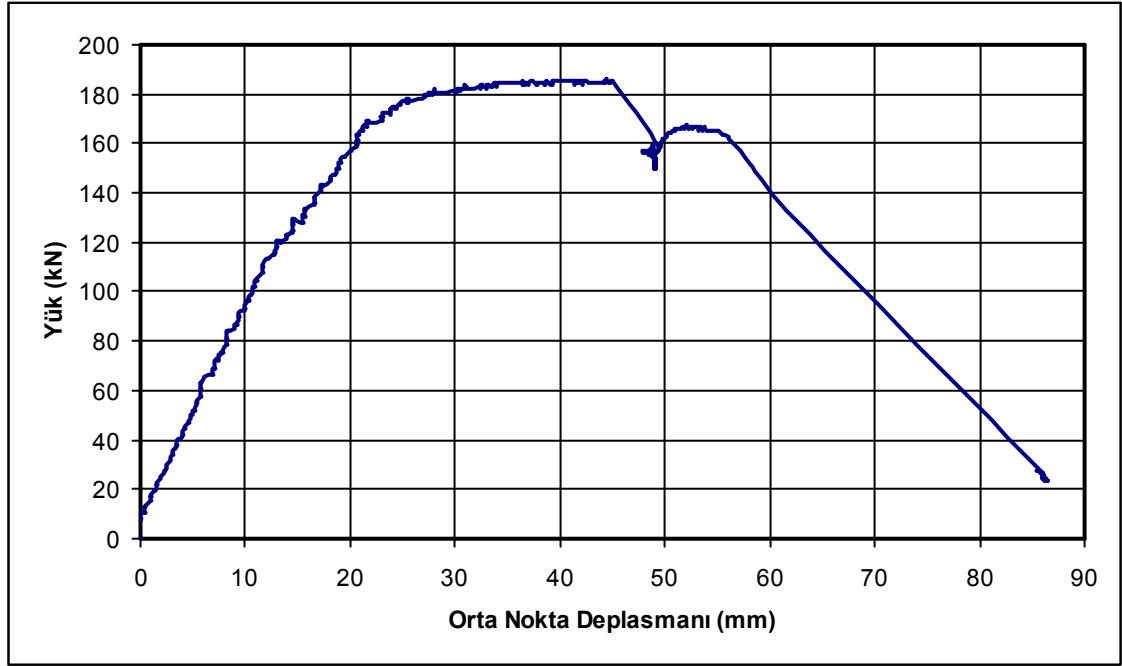
Resim 3.7. Göçmeden sonra, deney elemanı 4



Resim 3.8. Kesme kırılması, deney elemanı 4

3.5. Deney Elemanı 5

Ankraj eksenleri arası 60 mm olan 4 adet ankrajın kullanıldığı GFRP şeritlerle güçlendirilmiş ve referans deney elemanlarıyla karşılaştırılmak için üretilmiş olan deney elemanıdır. Deney elemanı 3'e ait deney sırasında ölçülen yük-deplasman grafiği Şekil 3.5. de verilmiştir.



Şekil 3.5. Yük-deplasman grafiği, deney elemanı 5

Deney elemanı 5'de sabit moment bölgesinde oluşan ilk eğilme çatlağı 43,2 kN yük düzeyinde ve 3.65 mm orta nokta deplasmanında belirlenmiştir. Eğilme çatlakları yük artışıyla artma eğilimi göstermiştir. 140.0 kN yük düzeyinde sağ kesme açıklığında kesme çatlağı oluşmuştur. Ancak çatlak kılcal düzeyde kalmış ve ilerlememiştir. Yükün artmasıyla elemanda eğilme çatlakları artmaya devam etmiştir. 178.28 kN yük düzeyinde çekme donatısı akmaya başlamıştır. Akma anında orta nokta deplasmanı 25.44 mm olarak ölçülmüştür. Yüklemin devam etmesiyle eksenel yük düzeyi yaklaşık aynı kalırken orta nokta deplasmanı artmaya devam etmiş ve deney elemanında sünek davranış sergilenmiştir. En büyük kesme kuvveti değerine 186.04 kN yük düzeyinde ve 44.38 mm orta nokta deplasman değerinde ulaşılmıştır. Deney elemanı 185.30 kN yükte basınç bölgesinde tabla betonunun ezilmesiyle göçmüştür. Göçme anında 44.98 mm orta nokta deplasmanı ölçülmüştür. Deney elemanı 5'in göçme anındaki görünümü Resim 3.9. da verilmiştir. Deney elemanın göçme mekanizması

eğilme kırılması modundadır. Elemanda çekme donatısı akmış ve sünek bir davranış gözlemlenmiştir. Deney elemanı 5’de beton basınç bölgesinde tabla betonu ezilmesi görünüşü Resim 3.10. da verilmiştir.



Resim 3.9. Göçmeden sonra, deney elemanı 5



Resim 3.10. Tabla betonunda ezilme, deney elemanı 5

4. DENEY SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde deney elemanlarında kullanılan GFRP şeritlerin ve GFRP şeritlerde uygulanan ankraj sayısı ve aralığının, deney elemanlarının kesme dayanımları, rijitlikleri, süneklikleri ve göçme mekanizmaları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar ile deneyler sırasında elemanların davranışları karşılaştırılmıştır. Değerlendirmelerde deneyler sırasında oluşturulmuş olan yük-deplasman grafikleri kullanılmıştır.

Bölüm 3’de verilmiş olan deneylerin sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney sonuçlarının özeti

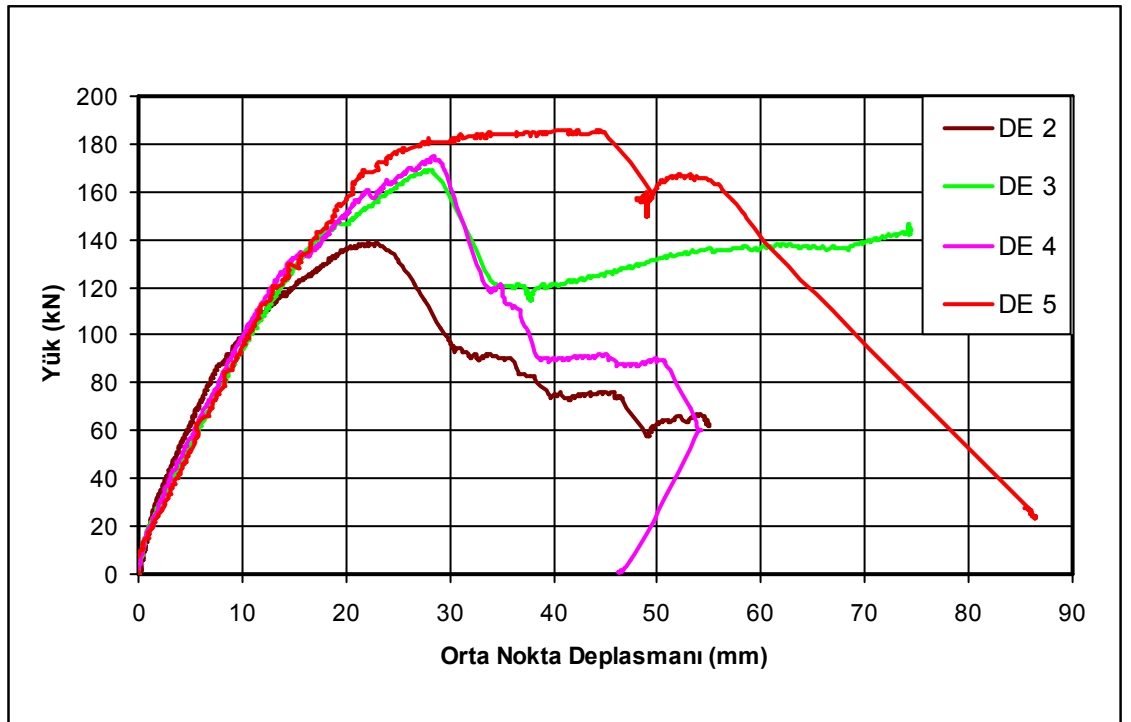
Deney Elemanı No	Akma Yüğü (kN)	Akma Yüğündeki Deplasman (mm)	Göçme Yüğü (kN)	Göçme Yüğündeki Deplasman (mm)	Göçme Mekanizması
1	180.24	25.42	185.96	56.08	Eğilme
2	-	-	138.76	22.07	Kesme
3	-	-	169.08	28.23	Kesme
4	-	-	174.94	28.45	Kesme
5	178.28	25.44	185.30	44.98	Eğilme

4.1. Deney Elemanlarının Davranışı

Güçlendirmede kullanılan GFRP şeritlere uygulanan ankraj sayısı ve aralığının, deney elemanlarındaki etkisini belirleyebilmek için, elemanlara ait yük-deplasman grafikleri

incelenmiştir. Şekil 4.1, Şekil 4.2. ve Şekil 4.3.de deney elemanlarına ait yük deplasman grafikleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu grafikler yorumlanarak elemanların davranışları değerlendirilmiştir.

Şekil 4.1. de yetersiz kesme donatılı referans deney elemanı 2 ile iki ankrajlı GFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanı 3 (DE 3), üç ankrajlı GFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanı 4 (DE 4) ve dört ankrajlı GFRP şeritlere güçlendirilmiş deney elemanı 5 (DE 5) karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.1. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 2, 3, 4 ve 5

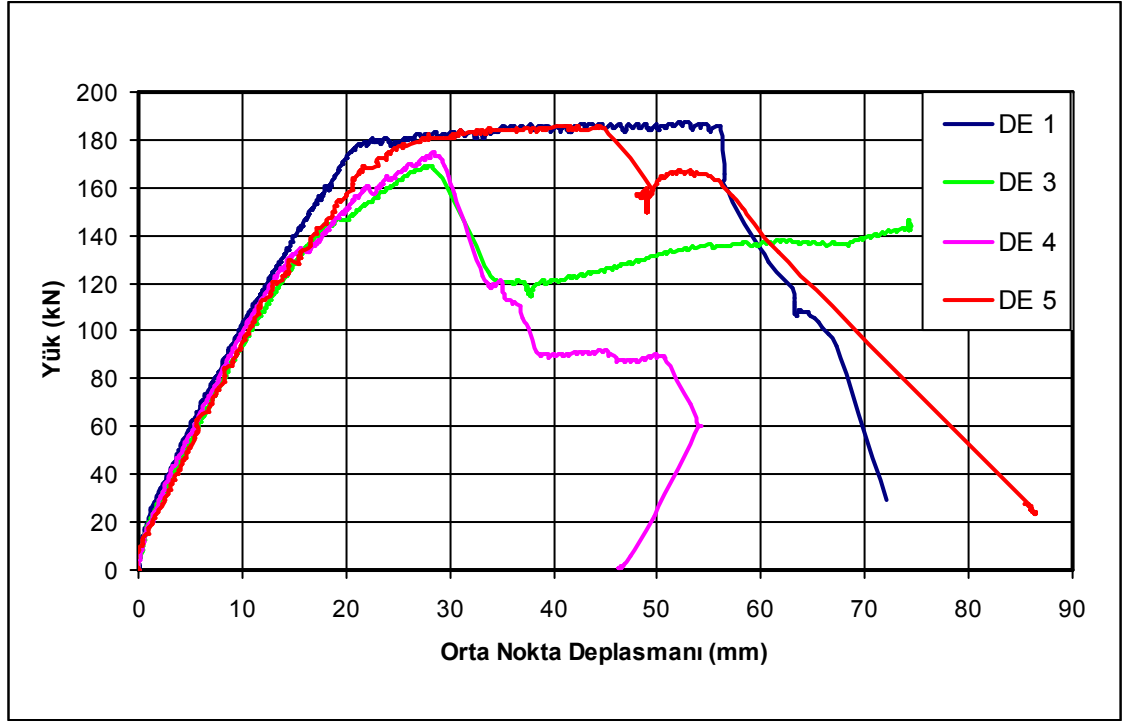
Güçlendirilen deney elemanları (DE 3, DE 4 ve DE 5) ile referans deney elemanı 2 yaklaşık 115.0 kN yük değerine kadar aynı davranışı sergilemişlerdir. Bu yüke kadar elemanların rijitlikleri yaklaşık aynı değerdedir. 115.0 kN yükten sonra yetersiz kesme donatılı referans deney elemanı 2 taşıma kuvveti kapasitesini kaybetmiştir. Deney elemanı 2 akmaya erişmeden, kesme kırılması sonucu göçmüştür. Elemanın taşıdığı en büyük kesme kuvveti değeri 138.76 kN dur. Bu yükde 22.07 mm deplasman yapmıştır. Güçlendirilen deney elemanları referans deney elemanından daha büyük kesme kuvveti kapasitesine erişmişlerdir. Güçlendirme yöntemi ile kesme kuvveti kapasitesi, rijitlik, süneklik ve göçme modu açılarından daha sağlıklı sonuçlar elde etmişlerdir.

115.0 kN yükten sonra GFRP şeritlere ankraj eksen aralığı 180 mm olan 2 adet ankraj uygulanmış deney elemanı 3, 169.08 kN yük düzeyine kadar ulaşmış bu yük düzeyinde kesme kırılması sonucu göçmüştür. Göçme anında eleman 28.23 mm orta nokta deplasman değerine erişmiştir. Deney elemanı 3 deney elemanı 2'ye göre %22 daha büyük kesme kapasitesine erişmiştir. Ancak eleman sünek davranış gösterememiş ve kesme kırılması sonucu ani ve gevrek bir şekilde göçmüştür.

Ankraj eksen aralığı 90 mm ve GFRP şeritlere 3 adet ankraj uygulanmış deney elemanı 4, deney elemanı 3 ile yaklaşık aynı rijitlikte deformasyon yapmış ve deney elemanı 3'de elde edilmiş maksimum kesme kapasitesinden daha büyük kesme kapasitesine ulaşmıştır. Deney elemanı 3, maksimum kesme kapasitesine 174.94 kN yük değerinde ulaşmış ve bu yükte orta nokta deplasmanı 28.45 mm ölçülmüştür. 3 adet ankrajlı GFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanı 4, deney elemanı 2'ye ve deney elemanı 3'e göre daha büyük kesme kapasitesine ve göçme anında daha büyük orta nokta deplasmana ulaşmıştır. Bu deney elemanı referans deney elemanından %26 daha büyük bir kesme kapasitesine ulaşmıştır. Ancak eleman sünek davranış göstermemiş ve kesme kırılması mekanizmasıyla göçmüştür.

Ankraj eksen aralığı 60 mm ve GFRP şeritlere 4 adet ankraj uygulanmış deney elemanı 5, akma yüküne eriştikten sonra sünek eğilme davranışı sergilemiş ve tabla betonunda gelişen ezilme sonucu göçmüştür. Deney elemanı 5, diğer deney elemanlarına göre daha büyük yük kapasitesine ve orta nokta deplasman değerine ulaşmıştır. GFRP şeritlere uygulanan ankraj sayısı arttıkça elemanın kesme kuvveti kapasitesi artmış ve en fazla ankraj uygulanmış olan deney elemanı 5 kesme kırılmasından dolayı göçmemiş ve sünek bir davranış sergilemiştir. Deney elemanı 5'de çekme donatısı akma konumuna geçmiş ve güç tüketim mekanizmaları verimli ve sağlıklı kullanılmıştır.

Yeterli kesme donatılı eleman (DE 1=Deney elemanı 1) ile ankrajlı GFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanlarının (DE 3=Deney elemanı 3, DE 4=Deney elemanı 4 ve DE 5=Deney elemanı 5) yük deplasman grafiği Şekil 4.2.de verilmiştir. Şekil 4.2.de verilen grafikte farklı sayıda ankrajlı GFRP şeritle güçlendirilmiş deney elemanlarının davranışı yeterli kesme donatılı referans elemanı ile karşılaştırılmıştır.



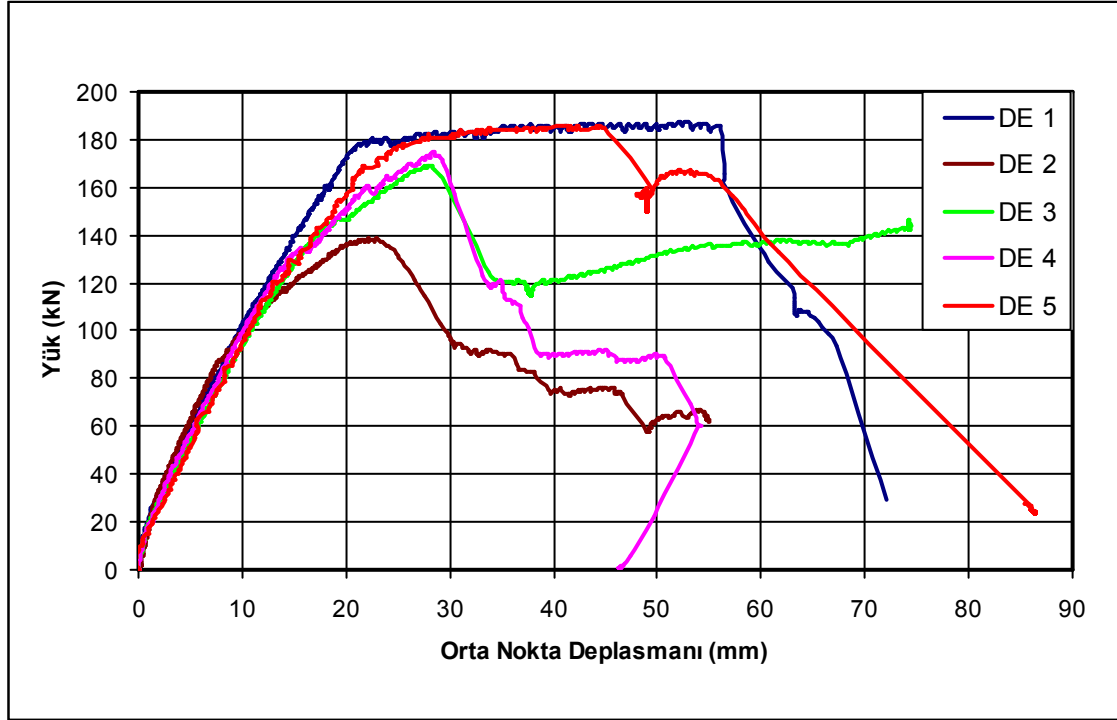
Şekil 4.2. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 1, 3, 4 ve 5

Referans deney elemanı 1, güçlendirilen 3, 4 ve 5 nolu deney elemanları ile birlikte 120.0 kN yük düzeyine kadar yaklaşık aynı rijitlikle deformasyon yapmışlardır. 120.0 kN yük düzeyinden sonra deney elemanı 3 ve deney elemanı 4, diğer iki deney elemanından farklı rijitlikle deformasyon yapmışlardır. Deney elemanı 3 maksimum kesme kuvveti kapasitesine 169.08 kN yükte, deney elemanı 4 ise maksimum kesme kuvveti kapasitesine 174.94 kN yükte ulaşmıştır. Her iki elemenda kesme kırılmasından dolayı göçmüştür. Göçme anında deney elemanı 3’de 28.23 mm, deney elemanı 4’de 28.45 mm orta nokta deplasmanı ölçülmüştür. 2 ankrajlı GFRP şeritle güçlendirilmiş deney elemanı 3 ve 3 ankrajlı GFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanı 4, yeterli kesme donatılı referans deney elemanı 1 ile benzer davranış sergileyememiştir.

120.0 kN yük düzeyinden sonra yeterli kesme donatılı referans deney elemanı 1 ve 4 ankrajlı GFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanı 5 yaklaşık aynı rijitlikle deformasyon yapmışlardır. Her iki elemenda akma yüküne eriştikten sonra eğilme donatısının akmasıyla sünek davranış sergilemişler ve tabla betonunda ezilme sonucu eğilme mekanizması kırılmasıyla göçmüşlerdir. Deney elemanı 1’de akma yükü 180.24 kN, deney elemanı 5’de akma yükü 178.28 kN olarak ölçülmüştür. Deney elemanı 1’de göçme yükü 185.96 kN, deney elemanı 5’de göçme yükü 185.30 kN olarak ölçülmüştür. 4 ankrajlı GFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanı 5, yeterli kesme

donatılı referans deney elemanı 1'in taşıma kapasitesine ulaşmış akma yükü, göçme yükü ve göçme mekanizması açısından referans deney elemanı 1 ile benzer davranış sergilemiştir.

Yeterli kesme donatılı referans elemanı (DE 1=Deney elemanı 1) ve yetersiz kesme donatılı referans elemanı (DE 2=Deney elemanı 2) ile ankrajlı GFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanlarının (DE 3=Deney elemanı 3, DE 4=Deney elemanı 4 ve DE 5= Deney elemanı 5) yük deplasman grafiği Şekil 4.3.de verilmiştir



Şekil 4.3. Yük-deplasman grafikleri, deney elemanları 1, 2, 3, 4 ve 5

İki ankrajlı GFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanı 3, ve üç ankrajlı GFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanı 4, yetersiz kesme donatılı referans deney elemanı 1'den daha büyük kesme kuvveti kapasitesine erişmiştir. Deney elemanı 3 referans deney elemanı 2'den %22, deney elemanı 4 referans deney elemanı 2'den %26 daha büyük kesme kuvveti kapasitesine ulaşmıştır. Üç ankrajlı GFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanı, iki ankrajlı GFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanından daha büyük kapasiteye erişmiş ancak her iki elemanda sünek davranış sergileyememiş ve deney elemanları kesme kırılması mekanizması sonucu göçmüştür.

Dört ankrajlı GFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanı, güçlendirilen deney elemanları içerisinde en büyük kesme kuvveti kapasitesine ulaşmış ve deney elemanı

sünek bir davranış sergileyerek eğilme kırılması mekanizması sonucu göçmüştür. Güçlendirilen deney elemanı, yeterli kesme donatılı referans deney elemanı 1 ile akma yükü, göçme yükü ve göçme mekanizması açısından benzer davranış sergilemiştir. GFRP şeritlerle güçlendirilmiş deney elemanlarında ankraj sayısının artmasıyla kesme kuvveti taşıma kapasitesinde artış gözlenmiştir.

4.2. Kesme Dayanımı

GFRP şeritlerle güçlendirilen elemanlardaki ankraj sayısının kesme kuvveti dayanımına etkisi değerlendirilmiştir. Deney elemanlarında ölçülen akma yükü, göçme yükü ve göçme mekanizması değerleri Çizelge 4.2.de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Deney elemanlarının ölçülen kesme dayanımları

Deney Elemanı No	Akma Yükü (kN)	Göçme Yükü (kN)	Göçme Mekanizması
1 (Referans)	180.24	185.96	Eğilme
2 (Referans)	-	138.76	Kesme
3 (Güçlendirme)	-	169.08	Kesme
4 (Güçlendirme)	-	174.94	Kesme
5 (Güçlendirme)	178.28	185.30	Eğilme

Güçlendirilen deney elemanları referans deney elemanı 2'ye göre daha büyük kesme kapasitesine ulaşmışlardır. Güçlendirilen deney elemanlarında GFRP şeritlerde kullanılan ankraj sayısı arttıkça elemanın kesme kuvveti taşıma kapasitesi artmıştır. Deney elemanı 3 referans deney elemanı 2'ye göre %22, deney elemanı 4 referans deney elemanı 2'ye göre %26 daha büyük kesme kuvveti taşıma kapasitesine erişmişlerdir. Ancak deney elemanı 3 ve deney elemanı 4, referans deney elemanı 1'in taşıma kapasitesine erişememişlerdir. Güçlendirilen deney elemanlarından GFRP şeritlerinde en fazla ankraj bulunan deney elemanı 5, diğer güçlendirilen elemanlara göre en büyük taşıma kapasitesine erişmiş, yeterli kesme donatılı referans deney elemanı 1'in taşıma kapasitesine ulaşmış, eleman çekme donatısının akması ve tabla betonunda ezilme sonucu referans deney elemanı 1'e benzer sünek davranış sergilemiştir. Eleman akma yükü ve göçme yükü açısından referans deney elemanına benzer davranış sergilemiştir.

4.3. Rijitlik

GFRP şeritlerle güçlendirilen elemanlardaki ankraj sayısının rijitlik üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Deney elemanlarında rijitlik başlangıç rijitliği, akmada rijitlik ve göçmede rijitlik olarak değerlendirilmiştir. Başlangıç rijitliği olarak yük-deplasman grafiğinde ilk çatlağın görüldüğü yerdeki eğim olarak belirlenmiştir. Bunun için ilk çatlağa denk gelen yükün bu yükteki deplasmana oranı hesaplanmıştır. Benzer şekilde amada rijitlik akma anındaki yükün akma anındaki deplasmana oranı ve göçmede rijitlik göçme anındaki yükün göçme anındaki deplasmana oranı olarak hesaplanmıştır. Deney elemanlarındaki başlangıç rijitliği, akmada rijitlik ve göçmede rijitlik değerleri çizelge 4.3.de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Deney elemanlarında rijitlikler

Deney Elemanı No	Başlangıç Rijitliği	Akmada Rijitlik	Göçmede Rijitlik
1	11.95	7.09	3.31
2	9.85	-	6.29
3	11.26	-	5.99
4	11.56	-	6.15
5	11.84	7.01	4.12

GRFP şeritlerle güçlendirilen deney elemanlarının başlangıç rijitlikleri yetersiz kesme donatılı referans elemanın başlangıç rijitliğine göre artış göstermiştir. Deney elemanı 5 yeterli kesme donatılı referans deney elemanına göre yaklaşık aynı başlangıç rijitliği değerine ulaşmıştır. Deney elemanı 1 ve deney elemanı 5 akma anında yaklaşık aynı rijitliği göstermişlerdir. Ancak deney elemanı 5 deney elemanı göçme anında deney elemanı 1 kadar deplasman yapamamıştır. Deney elemanı 1 göçme anında daha büyük orta nokta deplasman değerine eriştiğinden, göçmede rijitlik değeri deney elemanı 5'e göre daha küçük bir değerde olmuştur. Deney elemanı 2,3 ve 4'de kesme kırılması nedeniyle göçme olduğundan ve çekme donatısı akmadığı için akma rijitliği hesaplanamamıştır.

4.4. Süneklik

Deneylerden elde edilen yük-deplasman grafikleriyle akma ve göçme anındaki deplasmanlar belirlenerek süneklik oranları hesaplanmıştır. Süneklik oranı göçme anındaki deplasmanın akma anındaki deplasmana oranı olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.4. de deney elemanlarına ait süneklik oranları ile akma ve göçme anındaki deplasman değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.4. Deplasman-süneklik oranları

Deney Elemanı No	Akmada Deplasman	Göçmede Deplasman	Süneklik Oranları
1	25.42	56.08	2.21
2	-	22.07	-
3	-	28.23	-
4	-	28.45	-
5	25.44	44.98	1.77

Deney elemanı 3 ve deney elemanı 4, yetersiz kesme donatılı referans deney elemanı 2'ye benzer şekilde kesme kırılması sonucu göçmüş ve sünek davranış sergileyememiştir. Deney elemanı 2, 3 ve 4'de donatı akması gerçekleşmediğinden süneklik oranı hesaplanamamıştır. Deney elemanı 5 akma kapasitesine ulaşmış ve yeterli kesme donatılı deney elemanı 1 ile benzer sünek davranış sergileyerek göçmüştür. Ancak deney elemanı 5 referans deney elemanı 1'in süneklik oranına ulaşamamıştır. Donatı akması gerçekleştiğinde, akmadan göçmeye kadar deney elemanı 1, deney elemanı 5'e göre daha büyük deplasman değerine ulaşmıştır. Deney elemanı 1'de süneklik oranı 2.21, deney elemanı 5'de süneklik oranı 1.77 olarak hesaplanmıştır. Referans deney elemanı 1 süneklik oranı, deney elemanı 5'den % 25 daha fazla olduğu belirlenmiştir. GFRP şeritlerde kullanılan ankraj sayısı deney elemanlarının deplasman süneklik oranı üzerinde etkilidir. Güçlendirilen deney elemanlarında GFRP şeritlerde kullanılan ankraj sayısı arttırıldıkça eğik çatlakların kontrolü artmış, en fazla ankraj kullanılan deney elemanı sünek bir davranış sergilemiştir.

5. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu çalışmada T kesitli 5 adet deney elemanı test edilmiştir. Deney elemanlarında 1 tanesi yetersiz kesme donatılı referans deney elemanı, 1 tanesi yeterli kesme donatılı referans deney elemanı ve 3 tanesi güçlendirilmiş deney elemanı olarak belirlenmiştir. Güçlendirilen deney elemanlarında GFRP şeritler 90 mm genişliğinde ve eksenleri arası 100 mm olarak kesme açıklığı boyunca kiriş eksenine dik olacak şekilde iki yüzeye karşılıklı olarak epoksi bazlı yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmıştır. Deney elemanlarında kullanılan GFRP şeritler özdeş seçilmiş fakat ankraj sayısı ve aralığı değişken olarak kullanılmıştır. GFRP şeritler deney elemanı 3’de eksenleri arası 180 mm olan 2 adet ankrajla, deney elemanı 4’de eksenleri arası 120 mm olan 3 adet ankrajla ve deney elemanı 5’de eksenleri arası 60 mm olan 4 adet ankrajla kiriş yan yüzeylerine sabitlenmiştir. Testlerde kirişlere sıfırdan başlayarak göçmeye kadar yükleme yapılmış ve test sırasında kirişten elde edilen yük-deplasman grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler ve deney sırasındaki gözlemler sayesinde kirişlerin rijitlik, süneklik, kesme dayanımı kapasitesi ve eğilme mekanizmaları hem birbirleriyle hem de referans deney elemanlarıyla karşılaştırılmıştır. Testlerden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

Güçlendirilen deney elemanlarındaki ölçülen kesme dayanımı kapasitesi, yetersiz kesme donatılı referans elemanında ölçülen kesme dayanımı kapasitesine göre artmıştır. Deney elemanı 3, deney elemanı 2’ye göre %22 daha büyük, deney elemanı 4, deney elemanı 2’ye göre %26 daha büyük kesme kapasitesine ulaşmıştır. Güçlendirilmede GFRP şeritlerde kullanılan ankraj sayısının artırılması elemanın kesme dayanımı kapasitesi arttırmaktadır.

Güçlendirmede kullanılan ankraj sayısının artmasıyla deney elemanlarının göçme modu değişmiş ve kesme dayanımının artmıştır. En fazla ankraj kullanılmış olan deney elemanı 5, akma kapasitesine ulaşmış, akma yükünden göçme yüküne kadar deformasyonlar yaparak basınç bölgesindeki beton ezilmesi sonucu sünek eğilme kırılması sonucu göçmüştür. Güçlendirilmede GFRP şeritlerde kullanılan ankraj sayısının artırılması, elemanın göçme modunu değiştirmektedir.

Güçlendirilen deney elemanlarının başlangıç rijitlik değerleri, yetersiz kesme donatılı referans deney elemanına göre artmıştır. Güçlendirilen elemanlarda GFRP şeritlerde kullanılan ankraj sayısı arttıkça elemanın başlangıç rijitlik değerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Güçlendirilen deney elemanı 3 ve deney elemanı 4 kesme kırılmasından göçmesine rağmen, daha fazla ankraj kullanılarak güçlendirilen deney elemanı 5 sünek eğilme davranışı sergilemiştir. Güçlendirmede GFRP şeritlerde kullanılan ankraj sayısı arttıkça elemanın süneklik oranı artmaktadır.

Ankraj kullanılan güçlendirilmiş deney elemanlarında GFRP şeritlerin kiriş yüzeyinden soyulması engellenmiştir. GFRP şeritlerde herhangi bir bozulma veya kiriş yüzeyinden soyulma gözlenmemiştir.

5.2. Öneriler

Bu çalışmada elde edilen deneysel sonuçlar ışığında aşağıdaki öneriler sunulmuştur.

Kesme donatısı yetersiz kirişlerin GFRP şeritlerle güçlendirilmesi uygulamada kullanılabilir bir yöntemdir. Kiriş yüzeyine yapıştırılan GFRP şeritlerin ankrajlarla sabitlenmesi sünek eğilme davranışı elde edilebilmesi için oldukça önemlidir.

Deneysel çalışma kapsamında kullanılan güçlendirme tekniğinin, kullanılan farklı ankraj çapları üzerindeki etkinliği araştırılmalıdır.

Deneysel çalışma kapsamında kullanılan güçlendirme tekniğinin, kullanılan farklı ankraj derinlikleri üzerindeki etkinliği araştırılmalıdır

Deneysel çalışma kapsamında kullanılan güçlendirme tekniğinin, tersinir tekrarlanır yükler altında performanslarının belirlenmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- ABYYHY, 2007. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara
- Adhikary, B.B., Mutsuyoshi, H., ve Sano, M., 2000. Shear strengthening of reinforced concrete beams using steel plates bonded on beam, Construction and Building Materials, 14, 5, 237-244
- Akyüz, U., ve Özdemir, G., 2004. Mechanical properties of CFRP anchorages, 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Kanada, 1-6
- Ali, M.S.M., Oehlers, D.J., ve Park, S.M., 2001. Comparision between FRP and steel plating of reinforced concrete beams, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 32, 9, 1319-1328
- Altın, S., Anıl, Ö., ve Kara, M.E., 2005. Improving shear capacity of existing RC beams using external bonding of steel plates, Engineering Structures, 27, 5, 781-791
- Anıl, Ö., 2006. Improving shear capacity of RC T-beams using CFRP composites subjected to cyclic load, Cement and Concrete Composites, 28, 7, 638-649
- Barnes, R.A., Baglin, P.S., Mays, G.C., ve Subedi, N.K., 2001. External steel plate systems fort he shear strengthening of reinforced concrete beams, Engineering Structures, 23, 9, 1162-1176
- Barnes, R.A., ve Mays, G.C., 2006. Strengthening of reinforced concrete beams in shear by the use of externally bonded steel plates, Construction and Building Materials, 20, 6, 396-402
- Barros, J.A.O., ve Dias, S.J.E., 2006. Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams, Cement and Concrete Composites, 28, 3, 276-292
- Barros, J.A.O., Dias, S.J.E., ve Lima, J.L.T., 2007. Efficacy of CFRP-based techniques fort he flexural and shear strengthening of concrete beams, Cement and Concrete Composites, 29, 3, 203-217
- Bencardino, F., Spadea, G., ve Swamy, R.N., 2007. The problem of shear in RC beams strengthened with CFRP laminates, Construction and Building Materials, 21, 11, 1997-2006
- Bousselham, A., ve Chaallal, O., 2006. Effect of transverse steel and shear span on the performance of RC beams strengthened in shear with CFRP, Composites PartB: Engineering, 37, 1, 37-46
- Celep, Z., ve Kumbasar, N., 2005, Betonarme Yapılar, Dördüncü Baskı, İhlas Gazetecilik, İstanbul
- Diagana, A., Li, A., Gedalia, B., ve Delmas Y., 2003. Shear strengthening with CFF strips, Engineering Structures, 25, 4, 507-516

- Ersoy, U., ve Özcebe, G., 2004, Betonarme Temel İlkeler TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap, İkinci Baskı, Evrim Yayınevi, İstanbul
- Francesca, C., Marisa, P., Stjin, M., ve Luc, T., 2008. Debonding strength and anchorage devices for reinforced concrete elements strengthened with FRP sheets, Composites Part B: Engineering, 39, 3, 429-441
- Galal, K., ve Sekar, M., 2008, Rehabilitation of RC inverted-T girders using anchored CFRP sheets, Composites: Part B, 39, 4, 604-617
- Jayaprakash, J., Samad, A.A.A., Abbasovich, A.A., ve Ali, A.A.A., 2008. Shear capacity of precracked and non-precracked reinforced concrete shear beams with externally bonded bi-directional CFRP strips, Construction and Building Materials, 22, 6, 1148-1165
- Kachlakev, D., ve McCurry, D.D., 2000. Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates, 31, 6-7, 445-452
- Khalifia, 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
- Khalifa, A., ve Nanni, A., 2002. Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites, Construction and Building Materials, 16, 3, 135-146
- Kim, G., Sim., J., ve Oh, H., 2008. Shear strength of strengthened RC beams with FRPs in shear, Construction and Building Materials, 22, 6, 1261-1270
- Li, A., Diagana, C., ve Delmas, Y., 2001. CFRP contribution to shear capacity of strengthened RC beams, Engineering Structures, 23, 10, 1212-1220
- Raghu, A., Mettemeyer, M.M., Myers, J.J., ve Nanni, A., 2000. An assessment of in-situ FRP shear and flexural strengthening of reinforced concrete joists, ASCE Structures Congress, Philadelphia, PA, M. Elgaaly, Ed., May 8-10, CD version, 8
- Riyadh, A., ve Riadh, A., 2006. Coupled flexural-shear retrofitting of RC beams using CFRP straps, Composite Structures, 75, 1-4, 457-464
- Taljsten, B., ve Elfgren, L., 2000. Strengthening concrete beams for shear using CFRP materials: evaluation of different application methods, Composites: Part B: Engineering, 31, 2, 87-96
- Taljsten, B., 2003. Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets, Construction and Building Materials, 17, 1, 15-26
- Tanarlan, H.M., 2010, The effects of NSM CFRP reinforcements for improving the shear capacity of RC beams, Construction and Building Materials, 25, 2663-2673
- Trianafillou, T.C., 1998. Shear strengthening of RC beams using epoxy bonded FRP composites, CI Structural Journal, 95, 2, 107-115
- TSE 500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, TSE, Ankara

URL-1, www.dogusplastiksanayi.com/index.php?pg=epoxy. 23 Haziran 2011

URL-2, www.sika.com.tr/index.php?s=2&s2=products&s3=4. 23 Haziran 2011

Wegian, F.M., ve Abdala, H.A., 2006. Shear capacity of concrete beams reinforced with fiber reinforced polymers, *Composite Structures*, 71, 1, 130-138

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı, Soyadı : Zeynel Çağdaş KANKAL
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri :01.01.1981 Hacıbektaş
Medeni Hali : Bekar

Eğitim

Lisans : Gazi Üniversitesi MMF İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2008
Lise : Ankara İncirli Lisesi (Y.D.A),1999

İş Deneyimi

2008-2009	METAG İnşaat Ticaret A.Ş.	İnşaat Mühendisi
2009-2011	Ahi Evran Üni. Yapı İşl. ve Tek. Dai. Bşk.	İnşaat Mühendisi

İletişim

Adres : Ahi Evran Üniversitesi Bağbaşı Yerleşkesi Yapı İşleri ve Teknik
Daire Başkanlığı / KIRŞEHİR
Telefon : 0386 2804464
E-posta :zckankal@ahievran.edu.tr

Yabancı Dil

İngilizce