

**BETONARME KİRİŞLERİN KARBON ELYAFLA
GÜÇLENDİRİLMESİ ÜZERİNE DENEYSEL BİR
İNCELEME**

142813

142913

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Mehmet Selim ÖKTEN
(501001223)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2003
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Mayıs 2003

Tez Danışmanı :

Prof.Dr. Mehmet UYAN

M. Uyan

Diğer Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Kaya ÖZGEN

Kaya ÖZGEN

Yrd.Doç.Dr. Fevzi DANSIK (M.S.Ü.)

Fevzi Dansik

MAYIS 2003

ÖNSÖZ

Tez çalışmamdaki yapıcı eleştirileri ile çalışmalarına yön veren ve her türlü konuda ilgi, destek ve hoşgörüsünü esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof.Dr. Mehmet UYAN'a,

Bu süreçte sürekli desteğini gördüğüm değerli hocam Sayın Prof.Dr. Kaya ÖZGEN ve ailesine,

Deneysel çalışmalarına malzeme desteği sağlayan Sayın Ünal MUTLU ve MUTLU YAPI firmasına, deneysel çalışmalarındaki en büyük yardımcım teknisyen İbrahim ÖZTÜRK'e,

Her zaman beni destekleyen ve yanımda olduklarını bildiğim aileme, annem ve babam Meriç ve Sadettin ÖKTEN'e, tez çalışmamda sürekli destek olan kardeşim Hatice Eser ÖKTEN'e en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Mayıs, 2003

Mehmet Selim ÖKTEN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÖZET	xi
SUMMARY	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel	1
1.2. Karbon Elyafın (CFRP) Üretim Yöntemleri	5
1.2.1. Tel sarma	6
1.2.2. Püskürtme	6
1.2.3. Santrifüjlü dökme	7
1.2.4. Karşılıklı kalıp biçimlendirme	7
1.2.5. Temasla biçimlendirme	8
1.2.6. Sürekli pultrusyon işlemi	8
1.3. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı	9
1.4. Konuya İlişkin Çalışmalar ve Tanımlamalar	12
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	19
2.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	19
2.2. Beton	19
2.2.1. Kum	19
2.2.2. Kırmataş	20
2.2.3. Çimento özellikleri	21
2.3. Donatı	22
2.4. Beton Koruyucu Astar	22

2.5. Beton Yapıştırıcısı	24
2.6. Epoksi	25
2.7. Karbon Elyaf (CFRP)	25
2.8. Deney Ortamı ve Kullanılan Cihazlar	27
2.8.1. Deneysel çalışma programı	28
2.8.2. Deney modellerinin üretimi	30
2.8.3. Deney değişkenleri	32
2.8.3.1. Kiriş elemanlarının uç uca eklenme şekilleri	32
2.8.3.2. Karbon elyaf sarım teknikleri	33
2.8.4. Deneylerde kullanılan kiriş grupları	37
2.8.4.1. Kontrol kirişi modeli	38
2.8.4.2. C16 kalitesinde bohçalı beton yapıştırıcılı kiriş modeli	38
2.8.4.3. C16 kalitesinde bantlı beton yapıştırıcılı kiriş modeli	38
2.8.4.4. C16 kalitesinde bohçalı beton yapıştırıcısız kiriş modeli	39
2.8.4.5. C16 kalitesinde bantlı beton yapıştırıcısız kiriş modeli	39
2.8.4.6. C30 kalitesinde bohçalı beton yapıştırıcısız kiriş modeli	40
2.8.4.7. C30 kalitesinde bantlı beton yapıştırıcısız kiriş modeli	40
3. DEĞERLENDİRME	42
3.1. Genel	42
3.2. Kontrol Kirişi ve Birleştirilmiş Kiriş Deney Sonuçları	43
3.2.1. Genel	43
3.2.2. Kontrol kirişi (C16)	44
3.2.3. Bohçalı beton yapıştırıcılı kirişler (C16)	47
3.2.4. Bantlı beton yapıştırıcılı kirişler (C16)	49
3.2.5. Bohçalı beton yapıştırıcısız kirişler (C16)	53
3.2.6. Bantlı beton yapıştırıcısız kirişler (C16)	56
3.2.7. Bohçalı beton yapıştırıcısız kirişler (C30)	59
3.2.8. Bantlı beton yapıştırıcısız kirişler (C30)	62
3.3. Aderans Deneyi Sonuçları	65
4. SONUÇLAR	69
4.1. Genel	69
4.2. Sarım Tekniğinin Etkisi	70
4.3. Beton Yapıştırıcısının Etkisi	72
4.4. Beton Kalitesinin Etkisi	74

4.5. Sonuçların Değerlendirilmesi	77
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	81



KISALTMALAR

- FRP** : Fiber Reinforced Plastics
- CFRP** : Carbon Fiber Reinforced Plastics
- GFRP** : Glass Fiber Reinforced Plastics



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1	Agregaların ve karışımın granülometrik analizi..... 20
Tablo 2.2	Agregaların özgül ve birim ağırlıkları 20
Tablo 2.3	Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri 22
Tablo 2.4	Çesan beton çelik hasırı..... 22
Tablo 2.5	Beton koruyucu emprenye astarın teknik özellikleri..... 23
Tablo 2.6	Eski/yeni beton yapıştırıcısının teknik özellikleri..... 24
Tablo 2.7	Epoksi laminasyon reçinesinin teknik özellikleri..... 25
Tablo 2.8	Karbon elyafın özellikleri..... 26
Tablo 2.9	Üretilen betonun karışımına giren gerçek malzeme miktarı..... 29
Tablo 2.10	Basınç deneyi sonuçları..... 29
Tablo 3.1	Bütün modellerin eğilme deneyi sonuçları..... 43
Tablo 3.2	Epoksi ve beton yapıştırıcısının çelik yüzey ile oluşturdukları aderans değerleri..... 66
Tablo 3.3	Epoksinin betonarme yüzey ile oluşturduğu aderans değerleri..... 67
Tablo 3.4	Beton yapıştırıcısının betonarme yüzey ile oluşturduğu aderans değerleri..... 68
Tablo 4.1	Bütün grupların süneklik ve taşıma gücü oranları..... 69

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : FRP ile yapılan kiriş takviyesi	1
Şekil 1.2 : FRP uygulaması esnasında	1
Şekil 1.3 : Üç boyutlu modelleme	2
Şekil 1.4 : Sea Fort Square binası.....	2
Şekil 1.5 : FRP malzeme ile yapılan kiriş takviyesi.....	3
Şekil 1.6 : Eğilme kırılması.....	5
Şekil 1.7 : Yerel kırılma.....	5
Şekil 1.8 : Tel sarma yöntemine ait FRP üretim aşamaları.....	6
Şekil 1.9 : Püskürtme yöntemine ait FRP üretim şeması.....	6
Şekil 1.10 : Santrifüjlü dökme yöntemine ait FRP üretim şeması.....	7
Şekil 1.11 : Karşılıklı kalıp biçimlendirme yöntemine ait FRP üretim şeması...	7
Şekil 1.12 : Temasla biçimlendirme yöntemine ait FRP üretim şeması.....	8
Şekil 1.13 : Sürekli pultrusyon yöntemine ait FRP üretim aşamaları.....	8
Şekil 2.1 : Kum.....	20
Şekil 2.2 : Kırmataş I-II.....	21
Şekil 2.3 : TS 706 [22] referans ve karışımın granülometri eğrisi.....	21
Şekil 2.4 : Beton koruyucu astar.....	23
Şekil 2.5 : Beton yapıştırıcısının hazırlanması.....	24
Şekil 2.6 : Kesilmiş karbon elyaf.....	26
Şekil 2.7 : Seidner marka test cihazı.....	27
Şekil 2.8 : Pull off tester deney aleti.....	28
Şekil 2.9 : Küp numuneler.....	29
Şekil 2.10 : Küp numuneler kür havuzunda.....	29
Şekil 2.11 : Yükleme modeli.....	30
Şekil 2.12 : Ahşap kalıplar.....	30
Şekil 2.13 : 100x150x750 mm.lik elemanlar.....	31
Şekil 2.14 : 100x150x1500 mm.lik eleman.....	31
Şekil 2.15 : Kür Ortamı.....	31
Şekil 2.16 : 100x150x750 mm.lik eleman modelinin donatı açılımı.....	31
Şekil 2.17 : 100x150x1500 mm.lik kiriş kontrol modelinin donatı açılımı.....	32
Şekil 2.18 : Beton yapıştırıcılı ekleme.....	33
Şekil 2.19 : Beton yapıştırıcısız ekleme.....	33
Şekil 2.20 : Karbon elyaf sarım tekniği.....	34
Şekil 2.21 : Bohçalı kirişlerin boyuna görüntüsü.....	34
Şekil 2.22 : Bohçalama sistemi ile sarılmış kirişler.....	35
Şekil 2.23 : Karbon elyaf etriye sarımı.....	35
Şekil 2.24 : Karbon elyaf bant sistemi.....	36
Şekil 2.25 : Karbon elyaf bantlı kiriş görüntüsü.....	37
Şekil 2.26 : Karbon elyaf bantlı sistemin boyuna görüntüsü.....	37
Şekil 2.27 : Kontrol modeli.....	38
Şekil 2.28 : Birinci grup kiriş modeli.....	38

Şekil 2.29	: İkinci grup kiriş modeli.....	39
Şekil 2.30	: Üçüncü grup kiriş modeli.....	39
Şekil 2.31	: Dördüncü grup kiriş modeli.....	40
Şekil 2.32	: Beşinci grup kiriş modeli.....	40
Şekil 2.33	: Altıncı grup kiriş modeli.....	41
Şekil 3.1	: Betonarme bir elemanda genel yük – yer değiştirme bağıntısı.....	44
Şekil 3.2	: Kontrol kirişi.....	45
Şekil 3.3	: Kontrol kirişi (K100) yük-çökme diyagramı.....	46
Şekil 3.4	: Eğilme çatlağı.....	47
Şekil 3.5	: K201 kirişi.....	47
Şekil 3.6	: Birinci grup kiriş modellerinin yük-çökme değerleri ortalamalarının (O1), kontrol modeli (K100) ile karşılaştırılması....	48
Şekil 3.7	: Bohçalı beton yapıştırıcılı kiriş modellerinin tipik göçme şekli.....	49
Şekil 3.8	: K212 kirişi.....	50
Şekil 3.9	: İkinci grup kiriş modellerinin yük-çökme değerleri ortalamalarının (O2), kontrol modeli (K100) ile karşılaştırılması.....	51
Şekil 3.10	: Bantlı beton yapıştırıcılı kiriş modellerinin tipik göçme şekli.....	52
Şekil 3.11	: Kırılma bölgesi.....	53
Şekil 3.12	: K301 kirişi.....	53
Şekil 3.13	: Üçüncü grup kiriş modellerinin yük-çökme değerleri ortalamalarının (O3), kontrol modeli (K100) ile karşılaştırılması....	54
Şekil 3.14	: Bohçalı beton yapıştırıcısız kiriş modellerinin tipik göçme şekli.....	55
Şekil 3.15	: Kayma çatlağı.....	56
Şekil 3.16	: K313 kirişi.....	56
Şekil 3.17	: Dördüncü grup kiriş modellerinin yük-çökme değerleri ortalamalarının (O4), kontrol modeli (K100) ile karşılaştırılması....	57
Şekil 3.18	: Orta noktadaki kırılma.....	58
Şekil 3.19	: Bantlı beton yapıştırıcısız kirişlerin tipik göçme şekli.....	59
Şekil 3.20	: K402 kirişi.....	60
Şekil 3.21	: Beşinci grup kiriş modellerinin yük-çökme değerleri ortalamalarının (O5), kontrol modeli (K100) ile karşılaştırılması....	61
Şekil 3.22	: Sıyırılma.....	62
Şekil 3.23	: C30 kalitesindeki bantlı beton yapıştırıcısız kirişlerin tipik göçme şekli.....	63
Şekil 3.24	: Altıncı grup kiriş modellerinin yük-çökme değerleri ortalamalarının (O6), kontrol modeli (K100) ile karşılaştırılması.....	64
Şekil 3.25	: Aynı beton yüzeye epoksi ve beton yapıştırıcısı uygulanması.....	65
Şekil 3.26	: Epoksi ve beton yapıştırıcısı ile çelik-standart alüminyum başlık birleşimi.....	66
Şekil 3.27	: Beton yapıştırıcısının dağılma yüzeyi.....	66
Şekil 3.28	: Epoksi ile yapıştırılmış yüzey.....	67
Şekil 3.29	: Beton yapıştırıcısı ile yapıştırılmış yüzey.....	68
Şekil 4.1	: Bohçalı sistem birinci grup.....	70
Şekil 4.2	: Bantlı sistem ikinci grup.....	70
Şekil 4.3	: Birinci ve ikinci grup kirişlerin karşılaştırılması.....	70
Şekil 4.4	: Bohçalı sistem üçüncü grup.....	71
Şekil 4.5	: Bantlı sistem dördüncü grup.....	71
Şekil 4.6	: Üçüncü ve dördüncü grup kirişlerin karşılaştırılması.....	71
Şekil 4.7	: Beton yapıştırıcılı birinci grup.....	72
Şekil 4.8	: Beton yapıştırıcısız üçüncü grup.....	72

Şekil 4.9	: Birinci ve üçüncü grup kirişlerin karşılaştırılması.....	72
Şekil 4.10	: Beton yapıştırıcılı ikinci grup.....	73
Şekil 4.11	: Beton yapıştırıcısız dördüncü grup.....	73
Şekil 4.12	: İkinci ve dördüncü grup kirişlerin karşılaştırılması.....	73
Şekil 4.13	: Üçüncü grup, C16.....	75
Şekil 4.14	: Dördüncü grup, C30.....	75
Şekil 4.15	: Üçüncü ve beşinci grup kirişlerin karşılaştırılması.....	75
Şekil 4.16	: Dördüncü grup, C16.....	76
Şekil 4.17	: Altıncı grup, C30.....	76
Şekil 4.18	: Dördüncü ve altıncı grup kirişlerin karşılaştırılması.....	76



BETONARME KİRİŞLERİN KARBON ELYAFLA GÜÇLENDİRİLMESİ ÜZERİNE DENEYSEL BİR İNCELEME

ÖZET

Son otuz yıl boyunca deprem kuvvetlerine maruz kalan yapılar hakkında geniş çaplı araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar depreme dayanıklı yapı tasarımı için çeşitli yöntem ve uygulamaların geliştirilmesini amaçlamaktadır. Bununla birlikte halen kullanımda olan ve yeni deprem yönetmeliğinde ön görülen koşulları sağlamadığından güçlendirme yapılması gereken bir çok bina ve köprü vardır. Bu yapılar deprem sırasında, halkın güvenliği açısından büyük bir risk teşkil etmektedir. Günümüzde, mevcut yapıların onarımı ve güçlendirilmesi, inşaat mühendisliğinin en önemli hedeflerinden biri haline gelmiştir. Yapıların güçlendirilmesinin başlıca sebepleri olarak; önceden tahmin edilemeyen yüklere karşı güvenliği sağlamak, fonksiyon değişikliğinden dolayı yük taşıma kapasitesini arttırmak, inşaat sırasındaki yetersiz uygulamadan doğabilecek kusurları gidermek ve korozyon ile yaşanmadan ötürü oluşan yapısal bozulmalara bağlı olarak yük taşıma kapasitesindeki azalmayı önlemek verilebilir.

Bu yapısal eksiklikleri giderebilmek için farklı teknikler geliştirilmiştir. Betonarme kolonlar için yanal bir sargı vazifesi gören çelik plakalarla mantolama veya fiberle güçlendirilmiş elyaf (FRP) sarımı örnek olarak verilebilir. Betonarme kirişler için ise, kirişlerin eğilme ve kesme mukavemetini arttıran, çekme bölgesine ve gövdesine epoksiyle yapıştırılan çelik levhalar veya fiberle güçlendirilmiş elyaf malzeme iyi bir güçlendirme metodudur. Çelik levhalar bir çok ülkede yıllardan beri kirişlerin eğilme mukavemetini arttırmak için kullanılmaktadır. Çelik levha kullanımının en büyük dezavantajı beton ile arasındaki yapışmaya etki eden korozyon problemidir. Bu korozyon problemini giderebilmek için çelik levhalar fiberle güçlendirilmiş elyaf (FRP) malzeme ile yer değiştirmektedir.

Bu çalışmada, fiberle güçlendirilmiş karbon elyaf malzeme kullanılarak (CFRP), iki farklı sarım tekniği ile güçlendirilen betonarme kiriş modelinin, yük altındaki davranışı incelenmiştir. Deneyler sırasında sadece tek yönde çalışan karbon elyaf malzeme kullanılmıştır. Deneyler ayrı ayrı ve farklı beton kalitesinde üretilen betonarme elemanların, ikişer ikişer ve farklı sarım teknikleri kullanılarak birleştirilmesi ile elde edilen numuneler üzerinde yapılmıştır. Bu numuneler eğilme deneyine tabi tutulmuş göçmeye ulaşılıncaya kadar yük ve deplasman değerleri okunarak her kirişin davranışını belirten yük-deplasman diyagramları çizilmiştir.

Ayrıca birleştirilmiş numunenin boyutlarında ve donatısında monolitik bir mukayese kirişi üretilmiştir. Genellikle CFRP ile birleştirilen numunelerin göçme yükü ile mukayese kirişinin göçme yükü büyük bir fark göstermemekte hatta daha yüksek kaliteli betonla üretilip birleştirilen kirişlerin göçme yükü mukayese kirişinin göçme yükünden daha fazla çıkmaktadır. Buna karşılık deney numunelerinde kontrol

kirişine oranla daha düşük bir süneklik düzeyi gözlemlenmiştir. Bu karbon fiber elyafla güçlendirilen kirişlerin yetersiz süneklik kapasitesine sahip olması demektir.

Bir sonraki çalışmada FRP yapıştırma düzeni ve detayı değiştirilerek numunelerin sünekliğinin nasıl arttırılabileceği incelenebilir.



AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION ABOUT R/C BEAMS STRENGTHENED WITH CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC

SUMMARY

During the last three decades, there has been a great deal of research on the behavior of structures subjected to earthquake forces. These activities have resulted in the development of sophisticated methodologies and procedures for the design of earthquake-resistant structures. However, there still exist a very large number of buildings and bridges that were designed prior to the development of modern seismic design guidelines that require retrofit. These structures present significant risk to the safety of the public in the event of an earthquake.

In recent years, repair and retrofit of existing structures have been among the most important challenges in civil engineering. The primary reasons for strengthening of structures include: upgrading of resistance to withstand underestimated loads, increasing the load-carrying capacity for new use of the building, eliminating premature failure due to inadequate detailing, restoring decreased load carrying capacity due to corrosion or other types of degradation caused by aging.

Different techniques have been developed to retrofit a variety of structural deficiencies. For concrete columns, lateral confinement has been provided by means of steel jackets or fiber reinforced plastic (FRP) wraps. For concrete beams, flexural and shear strengthening have been performed by epoxy bonding steel or FRP plates to the tension face and the web of the beams. Steel plates have been used in many countries for flexural strengthening of concrete beams for several years. The main disadvantage of using steel plate is corrosion of steel which adversely affects the bond at the steel concrete interface. In order to eliminate the corrosion problem, steel plate has been replaced by FRP plate.

In this study, the behavior of the reinforced concrete (R/C) beam model, strengthened with carbon fiber reinforced plastic (CFRP), has been investigated under the bending moment. CFRP has been wrapped with two different techniques on R/C beam model. In this experimental work, only unidirectional CFRP is used. In the experimental study concrete beam models, connected two beams, using two different confinement techniques have been used. These are casted using two different concrete quality and loaded up to the failure. The load-deflection values for the each beam model have been measured in this study. However, comparison beam model, consisting of one piece, casted with the same dimensions as the beam model connected with two beams. Generally, no major differences are observed in the test results between comparison beam model and the beam model connected with two beams at the ultimate load capacities. In addition, beam model connected with two high quality concrete beams has more load capacity than comparison beam. However comparison beam model is more ductile than all beam models. It means

that bending moment behavior of beams strengthened with CFRP has insufficient deformation capacity.

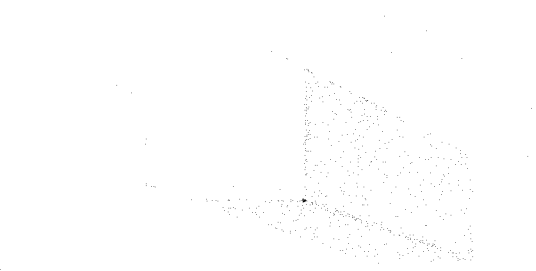
As a further study, the ways to increase the ductility of the beams strengthened with CFRP may be investigated under different details or parameters.



1. GİRİŞ

1.1. Genel

Geleneksel yapı malzemelerinin öz ağırlıkları taşıdıkları faydalı yüke göre oldukça büyüktür. Ayrıca bu malzemeler sürekli ve dikkatli bir bakım gerektirir. Yapıların çoğu bu tür bir bakım eksikliği nedeniyle hızlı bir şekilde yıpranır. Eğer hafif, güçlü ve bununla birlikte korozyona, parazitlere ve kimyasallara karşı daha dayanıklı yeni bir tür yapı malzemesi üretilebilseydi, çelik, beton, kargir ve ahşabın yerini alabilirdi. Ancak bu özellikleri taşıyan bir malzeme henüz söz konusu değildir. Bunun yerine yapıyı güçlendiren veya onaran uygulamalar gündeme gelmektedir. Bu aşamada kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve kullanımı ile bu probleme yeni çözüm önerileri getirilmiştir. Sürekli bir “yara bandı” olarak görev yapan, yapısal elemanda kullanılan malzemenin çevresel faktörlerle etkileşime girmesini önleyen ve onarıma başlamadan önce büyük ölçüde yıkım gerektirmeyen yeni malzemelere gerek vardır. Bu gerekleri sağlayan bir uygulama yapıda Fiber Reinforced Plastics, kısaca FRP, kullanmaktır. Ayrıca istenen performansı göstermeyen yapıların güçlendirilmesi için basit FRP eklemelerinin yapılabilmesi de bu malzemenin etkinliğini arttırmaktadır (Şekil 1.1, 1.2). [1,2]



Şekil 1.1. FRP ile yapılan kiriş takviyesi

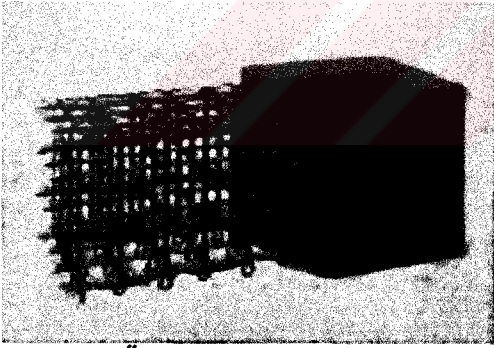


Şekil 1.2. FRP uygulaması esnasında

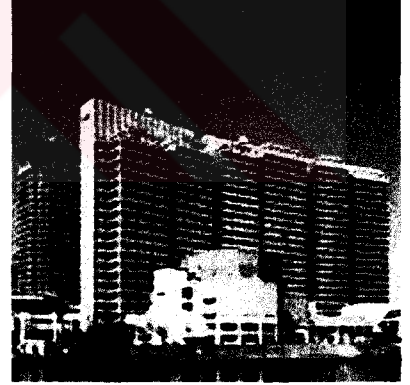
Isı ayarlı reçineler kullanılarak yapı elemanlarına yapıştırılan fiber çubuk ve levhalar, yapısal sistemlerin onarımında ve iyileştirilmesinde bir süredir kullanılmaktadır. Yukarıdaki ihtiyaçlara cevap verebilme potansiyeline sahip yeni bir malzeme olan FRP(Fiberle Güçlendirilmiş Elyaf) yapı endüstrisi pazarında yeni yeni ortaya çıkmaktadır. Öncelikli olarak kolonları ve kirişleri rijitleştirmek ve bozulmuş beton

öğeleri onarmak amacıyla kullanılan fiberle güçlendirilmiş elyafın (FRP), kullanımları yaygınlaştıkça hizmet alanlarının da genişlemesi kaçınılmazdır. Örneğin, kullanımlarındaki pratiklik nedeniyle oldukça revaçta olan yüksek mukavemetli FRP bir köprü ayağına, bir betonarme kolona ya da bir betonarme kirişe çok kolaylıkla sarılabilmekte ya da çok katlı binalarda çelik kabloların yerine kullanılabilir. [3]

FRP sabit en kesite sahip, W-kesit ve boru kesit gibi geometrik şekillerde dökülebilmektedir. İstenen herhangi bir şekil ya da şekiller kombinasyonu elde edilebilmektedir. Elde edilen yapısal şekiller iyi mukavemet özelliklerine sahiptirler, oldukça hafiftirler, çok az ya da hiç bakım gerektirmemektedirler ve kolayca kurulabilmektedirler. FRP, beton yapılarda yeterli çekme ve basınç güçlendirmesi için esas olan tüm önemli gereksinimlere sahiptir. Ayrıca standart çeliğin zayıf yanları FRP’de yoktur. Bu malzeme bir, iki ve hatta üç yönde takviye gerektiren uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilir. Japon Kajima firması tarafından üretilmiş olan üç boyutlu karbon elyaf (Şekil 1.3), Japonya’nın sahil kesimindeki Sea Fort Square binasının perde duvar panellerinde kullanılmıştır (Şekil 1.4). [3]



Şekil 1.3. Üç boyutlu modelleme



Şekil 1.4. Sea Fort Square binası

Büyük yapılarda genellikle, betonun çekme gerilmelerine dayanmasına, çatlama ve yer değiştirmesinin azaltılmasına yardımcı olmak üzere, yüksek mukavemetli çelik kablolarla sonradan germe (post-tensioning) yöntemi kullanılarak bir öngerilme uygulanır. Buna karşılık FRP malzemeyi çeliğe kıyasla, beton yapılardaki kirişler için daha iyi bir aday yapan yüksek çekme mukavemeti, ebat ve şekle bağlı çok seçeneklilik, hafiflik ve korozyona dayanıklılık gibi özelliklerdir. FRP çevresel faktörlerin ters etkilerinden etkilenmediği için, sonradan germe (post-tensioning) kablolarının yapının dışından geçmesine olanak sağlar. Böylece yapım büyük ölçüde basite indirgenebilir. Bu değişiklikte betonun içinde açılması gereken ön gerilme

kablosu kanallarına gerek kalmaz, betonun yapılma süresi azalır, FRP kabloların düzenlenmesi ise çok daha kolay olur. FRP malzemenin bu tür uygulamalar için sakıncalı noktaları halen araştırılmakla beraber, bunlar yüksek elastisite modülü, sünmede ve yorulmada yetersiz davranış olarak sayılabilir. Eğer FRP güçlendirme amacıyla yaygın olarak kullanılacaksa, bu konuların irdelenmesi ve çözümlenmesi gerekmektedir.

FRP ile sarılmış ve sarılmamış yapısal elemanlarla yürütülen testler göstermiştir ki, FRP ile sarılmış elemanların mukavemet ve rijitlikleri, FRP ile sarılmamış elemanların mukavemet ve rijitliklerinden %50 ila %500 daha yüksektir. İlave olarak, kolon-temel birleşim bölgesi gibi yapısal sistemin zayıf noktaları FRP ile deprem kuvvetlerine dayanacak şekilde güçlendirilebilir. Üstelik, FRP malzemeyi uygulamak çok kolaydır çünkü sadece yapının yüzeyine yapıştırılmaları gerekmektedir ki bu da çelik levhalarla kıyaslandığında inşaat alanında daha az iş gücü anlamına gelir.

Fiberle güçlendirilmiş elyaf malzemenin hafif olması, yüksek mukavemete sahip olması, uygulanmasının kolay olması ve korozyona dayanıklılığı, bu malzemenin pratikte kullanım için tercih nedenleridir (Şekil 1.5). [1,2]



Şekil 1.5. FRP malzeme ile yapılan kiriş takviyesi

Bu faktörlerin tümünün birlikte göz önünde bulundurulmaları ile sonuç olarak düşük inşaat ve işletme maliyetleri ortaya çıkar. Halen süren araştırmalar sonuçlanıp FRP malzemenin üretim yöntemleri optimum bir düzeye ulaştığında ve bu malzeme ile ilgili standartlar belirlendiğinde üretim maliyetinin de azalması beklenmektedir. Üretim, inşaat ve işletme maliyetlerinin tümünde beklenen düşüş gerçekleştiğinde FRP malzemenin geleneksel yapı malzemeleri üzerindeki üstünlüğü kanıtlanmış olacaktır.

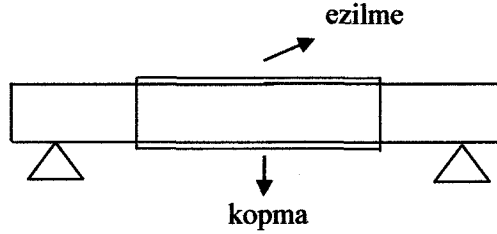
FRP malzeme kullanan teknolojilerin yaygınlaşmasının önündeki engellerden biri henüz bu malzemenin yapı otoriteleri tarafından genel bir kabul görmemesidir. Ayrıca, FRP malzemenin yangına dayanımı, uzun dönemli sünme özelliği ve kırılma mekanizması halen tam olarak açıklığa kavuşturulmamış konulardır. Her FRP üreticisinin farklı bir reçine, fiber ve geometri kombinasyonu ile çalışıyor olması da ayrı bir konudur. Bu durum, markadan markaya büyük değişikliklere yol açmaktadır ve FRP için bir standardın gelişmemesine sebep olmuştur. Ayrıca, kırılma davranışını ve güçlendirilmiş betonarme elemanın mukavemet ve rijitliğindeki artışları sağlıklı bir biçimde yansıtacak analitik modellerin tamamen anlaşılması gibi konuların daha geliştirilmesi gereklidir.

Son yıllarda, inşaat mühendisliğinin en önemli ve zorlu işleri arasında, mevcut yapıların onarımı veya güçlendirilmesi yer almaktadır. Yapıların güçlendirilmesindeki başlıca sebepler arasında hesaplarda küçük alınmış yükler yerine gerçek yük değerlerine karşı dayanıklılığı arttırmak, işlev değişimi veya iyileştirme nedeniyle yük taşıma kapasitesini arttırmak, yetersiz detaylandırmaya bağlı ortaya çıkan erken kırılmaları önlemek, korozyon veya yaşlanmayla oluşan bozulmalara bağlı yük taşıma kapasitesinde meydana gelen kayıpları bertaraf etmek, vb. sayılabilir. Değişik yapısal hataları iyileştirmek adına farklı teknikler geliştirilmiştir. Betonarme kolonlar için, çelik mantolama veya fiberle güçlendirilmiş elyaf (FRP) kaplama gibi, yan yüzeylerin bir çeşit koruma içine alınması sağlanmıştır. Betonarme kirişlerde, kirişlerin çekme yüzeyine ve gövdelerine FRP malzemeyi veya çelik plakaları epoksi kullanarak yapıştırmak suretiyle eğilme ve kesme güçlendirmesi yapılmıştır. Çelik plakalar birkaç yıldır bir çok ülkede betonarme kirişlerde eğilme güçlendirmesi uygulamalarında kullanılmaktadır. Çelik plaka kullanmanın en önemli dezavantajı çelik-beton ara yüzeyindeki bağlantıya zarar veren çeliğin korozyon problemidir. Bu problem, sıcaklığın düşük olduğu mevsimler boyunca buzlanmayı önleyici kimyasalların sıklıkla kullanıldığı köprülerde daha da şiddetlidir. Korozyon problemini ortadan kaldırmak üzere, çelik plakalar yerine FRP malzeme kullanılmıştır.

Bu malzemeler değişik tipte fiberlerden ve bunları birbirine bağlayan reçine esaslı bir ortamdan oluşmaktadır. FRP malzemeler elektrokimyasal korozyona çelik kadar eğilimli değildir. Dahası, FRP malzeme ile biçim vermek, detay üretmek ve bağlamak çelik plakalardan daha kolaydır. FRP'ler kırılmaya karşı genellikle lineer

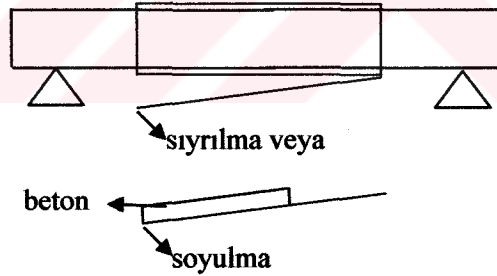
elastik davranış gösterirler. FRP'nin mekanik özellikleri dokusunu oluşturan fiber ipliklerin düzenleniş biçimine ve tiplerine bağlı olarak değişir. Bununla beraber, fiber iplikler istenen yönde mukavemeti maksimize etmek için herhangi bir düzenleniş biçiminde yerleştirilebilirler.

Betonarme kirişlerin FRP malzemeyle takviyesinde, farklı kırılma türleri söz konusudur. Bu türler “eğilme kırılması” ve “yerel kırılma” olmak üzere iki ana kategoride ele alınabilir. “Eğilme kırılması”, betonun basınç etkisi altında ezilmesi veya çekme kuvveti nedeniyle FRP'nin kopması olarak tanımlanır (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. Eğilme kırılması

“Yerel kırılma” ise, FRP malzemenin yapışma yüzeyinde, kayma gerilmelerinin yüksek olduğu yerlerde soyulması veya kiriş uzunluğu boyunca güçlendirilmiş bölgede beton tabakanın pas payı kalınlığında kayma kırılmasına uğraması olarak tanımlanır (Şekil 1.7).



Şekil 1.7. Yerel kırılma

Güçlendirilmiş kirişlerdeki kırılmalar çoğu kez “yerel kırılma” tabir edilen kırılma türünden olduğu için, beton/FRP ara yüzeyinde oluşan gerilmelerin araştırılması, bu tür kirişlerin analiz ve tasarımında önemli bir noktadır.

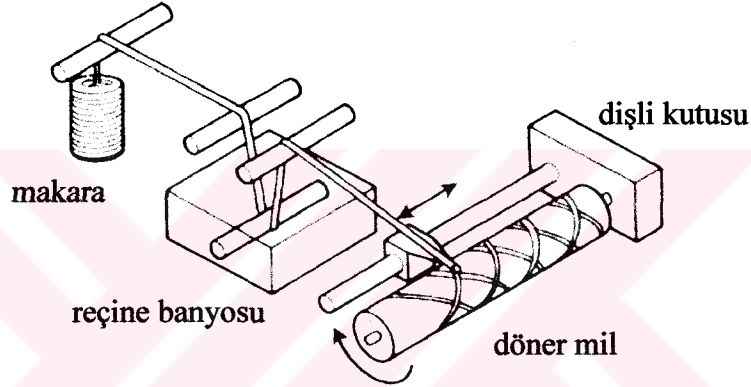
1.2. Karbon Elyafın (CFRP) Üretim Yöntemleri

Güçlendirilmiş karbon elyaf yapımında kullanılmak üzere birçok üretim tekniği geliştirilmiştir. Her bir proses bir yönden, diğerlerinde olmayan bir kullanışlılığa sahiptir. Millard ve diğerlerinin yaptığı bir çalışmada, fiberle güçlendirilmiş karbon

elyaf yapımında en sıklıkla kullanılan 6 proses; tel sarma, püskürtme, santrifüjlü dökme, karşılıklı kalıp biçimlendirme, temaslı biçimlendirme ve sürekli pultrusyon işlemi olarak sıralanmaktadır. [4]

1.2.1. Tel Sarma

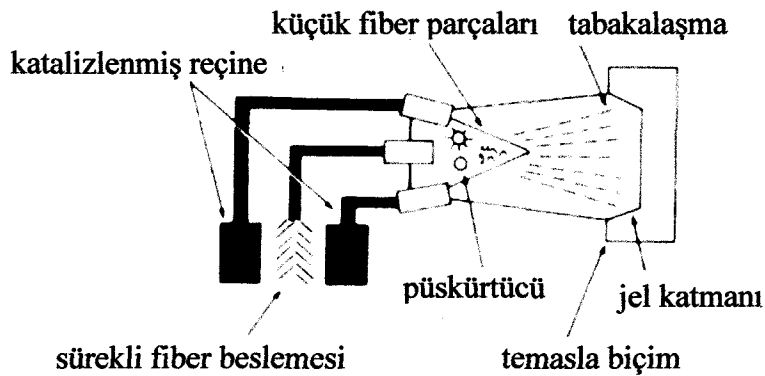
Fiberler sürekli bir şekilde reçine banyosuna batırılır ve iyice emdirilir. Sonra fiber bir milin üzerine sarılır. Normal sarma modeli çoklu daireler şeklindedir (Şekil 1.8). Bu proses genellikle karbon fiberi yapımında kullanılır. Tel sarma yöntemi ile üretilen elyaflar birkaç yönde mukavemete sahiptirler ve basınç dayanımları da yüksektir. Yöntemin zayıf tarafı ise üretilmek istenen bütün şekillere uyamaması ve sarma işleminin programlanmasının güç olmasıdır.



Şekil 1.8. Tel sarma yöntemine ait FRP üretim aşamaları

1.2.2. Püskürtme

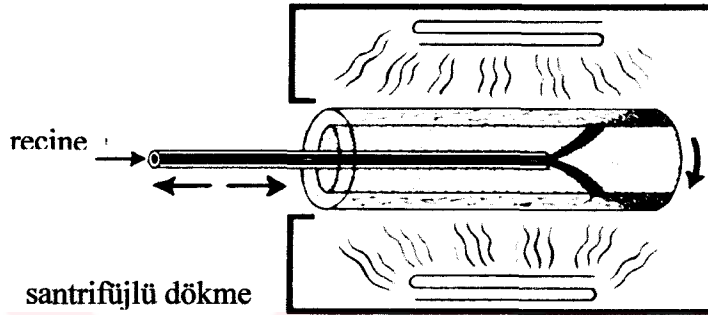
Bükülmüş fiber iplikler püskürtücüye beslenir, ve daha kısa fiberlere bölünerek bir panele püskürtülürler (Şekil 1.9). Reçine üstten fırçalanır. İki boyutlu rast gele fiber konfigürasyonları ortaya çıkar. Bu prosesle düz yüzeyli ve karmaşık şekiller (tekneler gibi) için istenen sonuç elde edilir.



Şekil 1.9. Püskürtme yöntemine ait FRP üretim şeması

1.2.3. Santrifüjlü Dökme

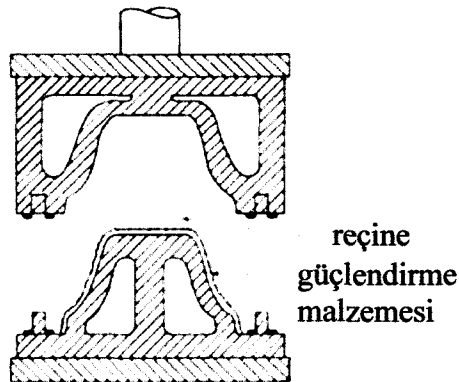
Kesilmiş keçe veya elyaf lifleri bir milin içine yerleştirilir. Mil kendi eksenini etrafında dönerken reçine karışımı ilave edilir ve santrifüj kuvvetleri yardımıyla reçine, mil iç yüzeyinde eşit olarak dağıtılır (Şekil 1.10). Bu proses oda sıcaklığında işlevsel değildir. Bu nedenden ötürü ya milin bir fırına konması ya da mil çeperine ısı uygulaması gerektirmektedir. Santrifüjlü dökme, güçlendirilmiş plastik boru yapımında çokça kullanılan, oldukça işlevsel bir metoddur.



Şekil 1.10. Santrifüjlü dökme yöntemine ait FRP üretim şeması

1.2.4. Karşılıklı Kalıp Biçimlendirme

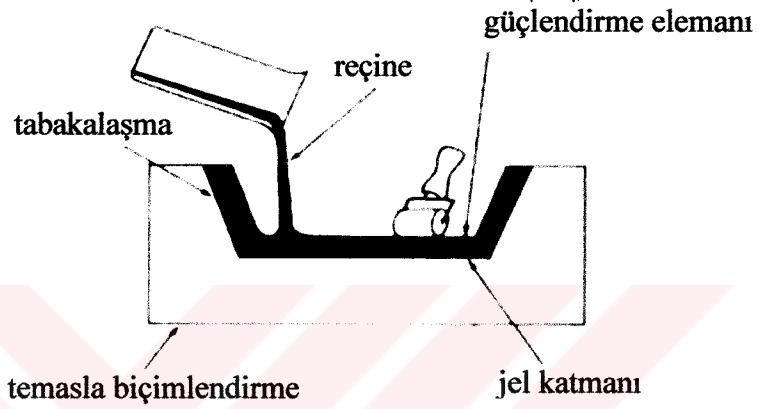
Bu methoda malzeme olarak elyaf, keçe veya önceden şekil verilen güçlendirilmiş elyaf, reçine ile beraber kullanılmaktadır. Kullanılan malzeme ile reçine ısıtılmış kalıba dökme işleminden önce veya sonra karıştırılır (Şekil 1.11). Yaklaşık 150°C sıcaklıkta veya 2 MPa'dan yüksek basınçlarda biçimlendirme işlemi yapılır. Biçimlendirme süresi reçine türü, kalıp sıcaklığı, üretilen malzemenin boyutu, şekli ve kalınlığı ile ilişkili olarak, yaklaşık 30 sn. ile 5 dakika arasında değişir. Karşılıklı kalıp biçimlendirme metodu, güçlendirilmiş malzemenin büyük ölçekli üretimini mümkün kılar.



Şekil 1.11. Karşılıklı kalıp biçimlendirme yöntemine ait FRP üretim şeması

1.2.5. Temasla Biçimlendirme

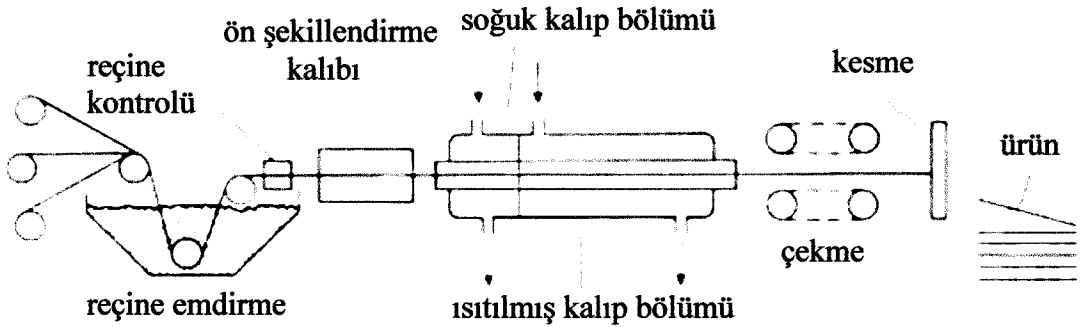
Kalıp üzerine öncelikle bir jel tabakası kaplanır. Fiber ve reçine tabakaları jel örtüsünün üzerine dökülerek sıkılaştırılır (Şekil 1.12). Bu dökme ve sıkılaştırma işlemi istenen kalınlık elde edilene kadar devam eder. Bu metodun üstünlükleri arasında malzeme ebadına bir sınırlama getirmemesi, dökme işleminin karmaşık olmaması ve çok az araç-gereç gerektirmesi sayılabilir. Temasla biçimlendirme yönteminin zayıf yönleri ise, çok fazla iş gücü gerektirmesi, pahalı olması ve ürünün kalite kontrolünün yapılmasının zor olmasıdır.



Şekil 1.12. Temasla biçimlendirme yöntemine ait FRP üretim şeması

1.2.6. Sürekli Pultrusyon İşlemi

Fiber lifler reçine banyosunda reçine karışımına batırılır. Reçine ile kaplanan lifler, bir seri kalıptan geçerek şekillenirler (Şekil 1.13). Son kalıp, elyafın nihai şeklini almasını sağlamak amacıyla ısıtılır. Bu yöntem sürekli pultrusyon işlemi denir. Bu yöntem ile değişik şekilli güçlendirilmiş plastik malzeme üretmek veya tek bir şekli seri halinde üretmek mümkündür. Ancak üretim hatalarını bertaraf etmek için, sıcaklığın çok dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Ayrıca sürekli pultrusyon işleminde kullanılan araç ve gereçler oldukça pahalıdır.



Şekil 1.13. Sürekli pultrusyon yöntemine ait FRP üretim aşamaları

Her bir yöntemin diğerine göre üstün ve zayıf yönlerinin olmasına karşın, her birinin belli türde üretim proseslerine ve tasarım kısıtlamalarına uyması söz konusudur. Fiberle güçlendirilmiş elyafın üretimi konusu gelişmeye ve ilerlemeye halen oldukça açık bir konudur.

1.3. Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Betonarme kirişlerde deprem ile birlikte hasar meydana getiren en büyük etken aşırı yüküdür. Projesine uygun şekilde kullanılmayan veya hatalı üretim yapılan taşıyıcı sistemlerdeki kirişlerin gövde kısmında kesme mukavemetinin yetersizliğinden kaynaklanan enine çatlaklar çok rastlanan bir hasar şeklidir. Betonarme elemana kullanım halinde iken karbon elyaf (CFRP), epoksi reçinesi ve beton yapıştırıcısı kullanılarak ek yapımının incelenmesi, bu çalışmanın kapsamı içindedir. Bu çalışma kapsamında betonarme kirişlerin takviyesinde karbon elyaf kullanımının işlevselliğini araştırmak üzere deneysel bir çalışma yapılmıştır. Kirişlerde meydana gelmesi muhtemel hasarları simule etmek üzere iki benzer kiriş elemanı uç uca iki şekilde eklenerek bohçalı ve bantlı olmak üzere farklı iki sarım tekniğiyle birleştirilmiştir. Böyle oluşturulan deney numunelerinde karbon elyaf ile yapılan birleşimin eğilme etkisi altında davranışı incelenmiştir.

Bu konuda farklı bakış açılarına göre yapılmış pek çok araştırma vardır. Bu araştırmalarda çoğunlukla yapıştırılan değişik çeşitlerdeki elyafın yük altında maruz kaldıkları gerilmeler ve yapıştırıldıkları elemanlardaki etkileri incelenmiştir. Ancak bu konunun yeni bir çalışma alanı olmasından ve henüz belirli bir standarda sahip olmamasından dolayı işlem prensipleri, kesin davranış ve etkiler hakkında yeterli düzeyde bir bilgi yoktur. Bu çalışmalar, çoğunlukla betonarme kirişlerin, kolonların ve kargir duvarların güçlendirilme metotları ile ilgili yapılmıştır. Tamamen deneysel verilerle ortaya konan bu araştırmaları, bir sistematik içinde değerlendirmek mümkündür. Bu çalışmalarda öncelikle bir deney programı doğrultusunda betonarme kiriş, kolon veya kargir duvar elemanı hasara uğratılmakta, daha sonra kopan parçaların temizlenmesi, kesit kayıplarının epoksi harcı ile doldurularak elemanın eski formuna getirilmesi işlemleri uygulanmaktadır. Ayrıca çatlaklara epoksi enjeksiyonu yapılmak kaydıyla eleman onararak sertleşmeye bırakılmaktadır. Onarılan eleman daha sonra tekrar hasara uğratılarak, orijinal eleman ile

karşılaştırmalı bir şekilde deney sonuçları elde edilmektedir. Bu çalışmalarda genel olarak araştırılan parametreler ve varılmak istenen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Elyaf boyutları: Fiberle güçlendirilmiş değişik tipteki elyaftan (cam, karbon, vs.) meydana gelen, betonarme elemanın çekme bölgesindeki taşıma gücünü arttıran elyaftır. Elyafın kalınlık ve uzunluğunun artması, kolonların, kirişlerin ve kargir elemanların taşıma güçlerini ve rijitliklerini büyük bir oranda arttırmakta aynı zamanda sünekliğini azaltmaktadır.
- Elyaf malzemesi ve özellikleri: Güçlendirme işleminde kullanılan elyafın karşılaştırmasını gerilmeler, deplasmanlar, işlenebilirlik ve maliyet açısından yapmak gerekmektedir.
- Yapıştırıcı etkileri: Yapıştırma işleminde kullanılan kimyasal malzemenin kalınlığının deformasyon ve gerilmeler üzerine etkisini belirlemek, ayrıca şantiye kullanımında yapıştırıcı kalınlığını sabitlemek için yöntem geliştirmek, yapıştırıcının betonarme üzerindeki kullanım ömründe karşılaşılabileceği çeşitli çevresel faktörler karşısındaki davranışlarını belirlemek ve bunların betonarme ile kompozit bir davranış içinde olması için ampirik ve nümerik değerler, formüller geliştirmek gereklidir.
- Gerilme yığılma bölgesi: Betonarme elemanların değişiklik gösteren gerilme yığılma bölgelerini tespit ederek sadece bu bölgelere karbon elyaf ile müdahale ederek malzeme kullanımını azaltmak ve onarılan elemana yeterli olan en az müdahaleyi yaparak fayda sağlanmak istenmektedir.
- Çatlak haritası tespiti ve yorumlanması: Betonarme elemanı farklı mesnet açıklıkları ve yükleme yerleri ile yapılan deneylerde hasara uğratarak, oluşan çatlakları güçlendirme mantığı ve malzemeleri açısından yorumlamak gerekmektedir.

Ayrıca onarım tekniğinin ve onarım malzemelerinin etkinliğini belirlemek veya onarılan çatlakların tekrar hasara uğratma esnasındaki kopma yüklemesinde yaptığı davranışları tespit etmek, yapılan araştırmaların genel amaçlarındandır.

Bu tez çalışmasının hareket noktası, epoksi reçinesinin betonarme yüzey ve karbon elyaf arasında oluşturduğu aderansı yüksek ve dış etkilere alternatif olmayacak kadar az etkilenen yapışkan bağdır. Amaç betonarme elemana karbon elyafı dış yüzeylerinden epoksi ile yapıştırarak yapılan güçlendirme metodunu, uygulama

kriterleri ve kullanılan malzemelerin verimlilikleri açısından deneysel olarak ortaya koymaktır. Bu bağlamda literatür taraması ile elde edilen önemli ve faydalı nitelikler referans alınıp, belirli olumsuz noktalar da kontrol altında tutularak deneysel çalışma için üretilen güçlendirme modellerinin performansları araştırılmıştır.

Bu tez kapsamında, iki betonarme elemanın değişik sarım teknikleri ile farklı şekilde birleştirilmesi ve tek kütle olarak üretilmiş, aynı boyuttaki betonarme kiriş ile karşılaştırılması ile elde edilen deney sonuçlarının, malzeme etkileşimleri, göçme mekanizması ve uygulama ile ilişkili girdileri kontrol altına alarak verimin artırılması noktalarında yorumlanması ve önerilerin sunulması amaçlanmıştır. Güçlendirme ve onarım işlemlerindeki temel amaçlardan biri olan maliyet kriteri, bu çalışmada minimum malzeme, optimum performans sonucuna ulaşma doğrultusunda temel kriterlerden biri olarak kabul edilmiştir. Tez bölümlerinde aktarılan konulardan aşağıda kısaca bahsedilmektedir.

İkinci bölümde deneysel çalışma programı açıklanmıştır. Bu program doğrultusunda kullanılacak deney örnekleri, deney cihazları ve değişkenleri, referans çalışmalar ve standartlara bağlı olarak belirlenmiştir. Yapılan deneyler aşağıda belirtilen iki ana grupta ele alınmıştır:

- İki standart betonarme elemanın beton yapıştırıcılı veya yapıştırıcısız eklenip, epoksi reçinesi ile yapıştırılan değişik sarım tekniklerine sahip karbon elyaf ile birleştirilmesinden üretilen kirişin, aynı boyut ve taşıma gücü değerine sahip tek parça kiriş ile göçme yükü ve bu yük altındaki deplasman açısından karşılaştırılıp deneysel olarak karşılaştırmalı sonuçların sunulması,
- Aynı şekilde iki standart betonarme elemandan oluşturulan karbon elyaf takviyeli kirişin, aynı boyutlarda beton kalitesi daha yüksek iki betonarme elemandan oluşturulan karbon elyaf takviyeli kirişlerle göçme yükü ve bu yük altındaki deplasman açısından karşılaştırılması.

Üçüncü bölümde, elde edilen deney sonuçları, grafik ve fotoğraf anlatımları ile ifade edilmektedir. Bu bölümde kiriş modellerinin yük altındaki davranışları anlatılmış ve kirişlerin orta noktalarında hesaplanan servis yükü altındaki deplasman değerleri verilmiştir.

Dördüncü ve son bölümde ise, deneysel sonuç ve gözlemlere dayanılarak, söz konusu güçlendirme tekniğinin geliştirilmiş modeli sunulmaktadır. Ayrıca işlemler

ve malzemeler açısından, aynı tür güçlendirme uygulamaları için veri oluşturabilecek öneriler bu bölümde yer almaktadır.

Buna ek olarak betonarme kirişlerin karbon elyaflarla güçlendirilmesi işlemlerinde, hesap edilemez girdilerin fazlalığından dolayı güvenlik katsayısının yüksek olduğu bilinmektedir. Bu çalışma ile ortaya konulan uygulama kriterleri sayesinde yeterli ve standart verimin elde edilmesi sonucu güvenlik payı sebebiyle fazla kullanılan malzeme ve işgücünden tasarruf edileceği umulmaktadır.

Bu konu kapsamındaki metodun, uygulama tekniği ve malzeme bilgisine bağlı olarak performansının geliştirilmesi açısından yapılan her türlü akademik ve sektör ile ilgili yayınların, konunun ilgililerini bilinçlendirmesi, bir takım yanlış veya hatalı bilgilerin ortaya çıkmasının engellenmesi açısından önemli bir ihtiyaç olduğu düşünülmektedir.

1.4. Konuya İlişkin Çalışmalar ve Tanımlamalar

Betonarme kirişlerin onarımı ve güçlendirilmesinde, kompozit malzemeden (fiber ve reçine) yapılmış bir elyafı çekme yüzeyine epoksi ile yapıştırmak etkili bir tekniktir. Deneyler, takviye edilmiş kirişlerin, kiriş uzunluğu boyunca güçlendirilmiş bölgede elyafın yapıştırıldığı beton tabakada yerel kırılmalar olduğunu göstermektedir. Bu tip kırılmalar elyaf sonundaki yerel gerilme yığılmasından olduğu kadar eğilmeye bağlı çatlamlar dolayısıyla da meydana gelir. Malek, Saadatmanesh, ve Ehsani [5], elyafın bitim noktasındaki kesme ve normal gerilme yığılmalarını hesaplamada kullanılan bir yöntem sunmaktadırlar. Bu yöntem malzemelerin lineer elastik davranışları temel alınarak geliştirilmiştir. Kiriş boyunca eğilmeye bağlı oluşan büyük çatlakların etkileri de araştırılmıştır. Bu çatlaklardaki kesme gerilmesi yığılmasını bulmak için bir model kullanılmıştır. Model yardımıyla hesaplanan sonuçlar, hem sonlu elemanlar metodundan hem de deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Analitik modeller, tasarım denklemlerine kolayca yerleştirilebilecek şekilde elyaf sonlarındaki gerilemeleri hesaplamak üzere kapalı tür çözümler sağlamıştır.

Ritchie ve diğerleri [6], fiberle güçlendirilmiş elyaf (FRP) kullanarak yapılan dıştan takviyenin ne derece işlevsel olduğunu görmek için 16 adet yetersiz güçlendirilmiş kirişi test etmişlerdir. Cam, karbon ve aramid fiberlerinden imal edilmiş elyaf,

kirişlerin çekme yüzeylerine epoksi kullanılarak yapıştırılmıştır. İyi bir çekme mukavemetine sahip olması, hafifliği ve korozyona dayanıklılığı gibi özellikleri dolayısıyla bu uygulama için FRP tercih edilmiştir. FRP malzemeyle takviye edilmiş kirişin eğilmeye olan maksimum mukavemetini ve rijitliğini hesaplamak üzere analitik bir metot geliştirmişlerdir. Sonuç olarak FRP malzemeyle güçlendirilmiş kirişlerin servis yükü düzeyinde rijitliklerinde %17-%99, taşıma güçlerinde ise %47-%97 oranında artmalar elde edilmiştir. Analitik olarak hesaplanan ve deneysel olarak elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri birbirleri ile büyük bir uyum içindedir. Deneyler sırasında çoğu kirişte, maksimum moment bölgesinde kırılma meydana gelmemiştir. Kirişlere uygulanan ve maksimum moment alanında kırılma ile sonuçlanan limit yük değerleri, hesaplanan değerler ile en çok %5'lik bir fark göstermiştir.

Sharif ve diğerleri [7], önceden yük uygulanmış betonarme kirişlerin, fiberle güçlendirilmiş elyaf (FRP) kullanılarak onarımını çalışmışlardır. Betonarme kirişler öncelikle, eğilmede limit yük kapasitesinin %85'ine kadar yüklenmiş ve bunu izleyen aşamada kirişin alt yüzeyine epoksiyle bağlanan FRP ile onarılmıştır. Elyaf kalınlığı, gerilme yığılması içeren kesme ve sıyrılma gerilmelerine bağlı olarak elyaf kesme alanında başlayan erken kırılmayı değerlendirmek üzere değiştirilerek kullanılmıştır. Bu tür kırılmaları önlemek ve sistemde sünek davranışı garantilemek üzere değişik onarım ve ankraj şekilleri uygulanmıştır. Bu çalışmada, takviye edilmiş kirişlerin davranışları yük-yer değiştirme eğrileriyle gösterilmiş ve kırılmanın farklı modları tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlar genel olarak onarılmış kirişlerin eğilme mukavemetlerinin arttığını göstermektedir. Onarım görmüş kirişlerin sünek davranışları elyaf kalınlığı ile ters orantılıdır. I şeklinde manto elyafın kullanımı uygun bir ankraj sistemi sağlamış ve kalın elyaf ile onarılmış kirişlerin sünekliğini geliştirmiştir.

Quattrone ve diğerleri [8], 1.0 m boyundaki betonarme deney kirişlerinin alt yüzeylerine epoksi kullanarak fiberle güçlendirilmiş elyaf yapıştırmışlar ve bunlarla bir seri deney yürütmüşlerdir. Bu deneylerde, elyaf alanı, elyaf uzunluğu, elyaf malzemesi ve uçlarındaki bağlama metodu parametrelerinin değiştirilmesiyle oluşan, farklı deney özelliklerinin sistemin genel davranışı üzerindeki etkileri araştırılmış ve FRP malzeme ile yapılan güçlendirmenin yapısal avantajları ortaya konulmaya çalışılmıştır. Takviye edilmiş kirişlerin yük altındaki davranışını belirlemek üzere

analitik bir ardışık yaklaşım metodundan yararlanılmış ve deneysel sonuçlar analitik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elyaf alanının küçültülmesi mukavemet ve rijitlikte öngörülen azalmayı beraberinde getirmiş ve uygulanan bir yük için sünekliğin ve elyaf uzamasının artmasına yol açmıştır. Elyaf uzunluğunun sistemin genel tepkisi üzerine düşük bir etkisi olduğu görülmüştür. Cam fiberle güçlendirilmiş elyaf (GFRP) yerine karbon fiberle güçlendirilmiş elyaf (CFRP) kullanarak kaplama yapmak, elemanın kullanılabilirliğini, akma ve limit yüklerini arttırdığı gibi, hem çatlama hem de akma sonrası takviye edilmiş elemanın rijitliğini artırır. Bununla beraber süneklik azalır. CFRP, GFRP ile mukayese edildiğinde aynı uzama meydana geldiğinde daha büyük bir değerde kırılmaktadır. Betonda basınca bağlı kırılmalar öncelikle oluştuğundan kaplama malzemesi olarak GFRP kullanıldığında çekme kuvvetlerinin etki ettiği dış kaplamanın kırılması mümkün görünmemektedir. Elyaf ucu bağlamanın erken plaka ayrışmasını önlediği ve limit yükü arttırdığı sonucuna ulaşılmıştır.

Saadatmanesh ve diğerlerinin [9] yürüttükleri deneysel çalışma, FRP kompozit bantlarla takviye edilmiş beton kolonların sismik dayanımlarının önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Yeni sismik tasarım şartnamelerinin yürürlüğe girmesinden evvel tasarlanan ve olası plastik mafsallık bölgesinde bindirme ekli boyuna donatı olan betonarme köprü kolonları, $u=1.2\sim 1.5$ arasındaki düşük süneklik seviyelerinde başarısız olmuştur. Bunun nedeni, enine donatı eksikliği ve ana donatı çubuklarının uzunluğunun yetersizliği sebebiyle bindirmeli filizlerin sıyrılmasıdır. Daire kesitli kolonlarda, plastik mafsallık bölgesi boyunca sürekli donatının kullanılması tekrarlı deplasman yükleme-boşaltma çevrimlerini nispeten artırır. Yapısal bozulma ise $u= \pm 4$ süneklik seviyelerine kadar ötelenmiş olur. Kolon kırılması ise, mafsallık bölgesindeki ana donatının burkulması dolayısıyla gerçekleşir. Olası plastik mafsallık bölgesinde FRP kompozit bantlarla dıştan sarılan beton kolonların hem mukavemetlerinde hem de deplasman sünekliklerinde önemli ölçüde ilerleme gözlenir. Takviye edilmiş kolonlar, bindirmeli filizlerde soyulma veya ana donatının burkulmasına bağlı yapısal bozunmaya ilişkin hiçbir işaret göstermeksizin, $u= \pm 6$ deplasman sünekliği seviyelerine kadar gayet düzenli yük-deplasman, yükleme-boşaltma çevrimleri geliştirmişlerdir.

Ehsani ve diğerlerinin [10] yaptıkları çalışmada, yakın zamanda meydana gelen depremler dolayısıyla oluşan çatlakların ve hasarın binalarda kapsamlı takviye

gereksinimine işaret ettiği vurgulanmaktadır. Tuğla kargirin kesme mukavemetinin, dış yüzeylere epoksi yapıştırıcı ile FRP bağlanması ile arttırılmasındaki etkinlik araştırılmıştır. Deneyin değişkenleri arasında kompozit dokumanın mukavemeti, fiber liflerin düzenleniş biçimi ve bağlama uzunluğu sayılabilir. Numunelerin mukavemetlerinin ve sünekliklerinin bu teknikle gözle görülür bir şekilde arttığı deney sonuçlarından görülmektedir. Fiber liflerin açısının, yükleme düzlemine göre olan uyumu, takviye edilmiş sistemin rijitliğine büyük etkisi olmasına rağmen nihai mukavemetine belirgin bir etkisi yoktur.

Saadatmanesh ve arkadaşları [11] FRP malzemeyle onarılmış deprem hasarlı betonarme kolonların eğilme davranışlarına ilişkin bir araştırma yapmışlardır. Dört adet kolon numunesine şiddetli bir depremde oluşması muhtemel, elastik olmayan dönüşümlü çevrimsel yüklemeden daha yüksek bir yükleme altında kırılma deneyleri uygulanmıştır. Daha sonra kolonlar, FRP ile onarılmış ve simüle edilmiş deprem yükleri altında tekrar deneye tabi tutulmuşlardır. Onarılmış kolonların sismik performansları değerlendirilerek, orijinal ve onarılmamış kolonların performanslarıyla karşılaştırılmıştır. Onarım görmüş kolonların hem eğilme mukavemetlerinin hem de deplasman sünekliklerinin orijinal kolonlardan daha yüksek olduğu saptanmıştır.

Saadatmanesh ve arkadaşlarının [12] yaptıkları bir diğer çalışmada, halihazırda varolan köprü kolonlarının FRP kompozit malzeme kullanmak suretiyle takviyesi araştırılmıştır. Kolonun sismik kuvvetler altındaki davranışını geliştirmek ve olası plastik mafsallık bölgesinde fretajı iyileştirmek amacıyla kirişin etrafına yüksek mukavemetli FRP şeritler sarılmıştır. Farklı takviye detaylarına sahip beş adet dikdörtgen kolon üretilmiş ve dönüşümlü çevrimsel yükleme altında test edilmiştir. Olası plastik mafsallık bölgesinde FRP kompozit şeritlerle dıştan sarılmış beton kolonlar hem mukavemetleri hem de deplasman süneklikleri açısından önemli bir ilerleme göstermişlerdir. Takviye gören bu kolonlar, bindirmeli filizlerde bağ kopması veya ana donatının burkulması ile ilişkili yapısal bozulmaya dair hiçbir işaret göstermeksizin, $u = \pm 6$ deplasman sünekliği seviyelerine kadar ulaşan oldukça stabil yük-deplasman çevrimleri geliştirmişlerdir.

Norris ve diğerleri [13], karbon fiberle güçlendirilmiş elyaf (CFRP) ince levhalarla takviye edilmiş hasarlı ya da yeterli mukavemete sahip olmayan betonarme kirişlerin

davranışlarına dair deneysel ve analitik bir çalışma yapmışlardır. CFRP malzeme, eğilme ve kesme mukavemetini arttırmak amacıyla kirişlerin çekme yüzeyine ve çevresine epoksi ile yapıştırılmışlardır. Kiriş üzerine bağlanan elyaftaki fiberlerin kiriş eksenine ile yaptıkları açılara (0° , 90° , $\pm 45^\circ$, $0/90^\circ$) göre çeşitli fiber düzenlemeleri belirlenmiş ve CFRP malzemenin kiriş mukavemetine ve rijitliğine olan etkisi, bu fiber düzenlemeleri için ele alınmıştır. On dokuz kiriş üretilmiş, betonun çatlama mukavemetinin üzerinde yük uygulanmış ve üç değişik CFRP sistemi ile takviyeleri yapılmıştır. CFRP ile güçlendirme işlemi bittikten sonra kirişlere, kırılma meydana gelene dek yük uygulanmıştır. Sonuç olarak, fiber düzenlemelerine bağlı olarak kırılmanın farklı türleri ve kiriş mukavemetinde meydana gelen nihai iyileşme gözlemlenmiştir.

Toutanji ve Gomez [14], yaptıkları çalışmada FRP malzemeye dıştan takviye edilmiş betonarme kirişlerin uzun süreli dayanımlarını incelemişlerdir. Islak/kuru çevrimlerde tuzlu su kullanarak, güç çevre koşullarının FRP ile takviye edilmiş betonarme kirişlerin performansı ve fiberle beton arasındaki ara yüzey bağı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Betonarme kirişler, ikisi karbon ve ikisi cam olmak üzere, 4 farklı türde FRP ile takviye edilmiştir. Ara yapıştırıcı olarak da üç değişik tür epoksi kullanılmıştır. Test değişkenleri arasında fiberin türü, epoksi sisteminin türü ve çevresel etkenler sayılmaktadır. Deneyde kullanılan numuneler iki değişik ortama maruz bırakılmışlardır. Ortamlardan biri $+20^\circ\text{C}$ 'lik oda sıcaklığı ve diğeri de 300 adet ıslak/kuru çevrimdir. Islak/kuru çevrim sırasında numuneleri ıslatmak için tuzlu su kullanılmış, ve kurutma kısmında da numuneler 35°C sıcaklıkta %90 nemlilikte bekletilmiştir. Her bir deneyin sonunda numunelerin yük-yer değiştirme eğrileri çizilmiş ve kirişlerin maksimum kapasiteleri, rijitlikleri ve süneklikleri hakkında fikir sahibi olunmuştur. Kirişlerin çekme yüzeylerine FRP kaplandığında, oda sıcaklığında tutulan numunelerin eğilme mukavemetlerinde, ıslak/kuru çevrime tabi olan numunelerinkine nazaran daha fazla yükselme kaydedilmiştir. Numunelerin hiçbirinde FRP malzemenin sıyrılması gibi bir problemle karşılaşılacakla beraber, FRP ile beton ara yüzeyinde bağ kopması gözlenmiştir. Bu da göstermektedir ki özellikle deniz ortamında FRP ile yapılacak takviyelerde epoksinin seçimi önemli bir konudur.

Ehsani ve diğerleri [15], yaptıkları çalışmada güçlendirilmemiş kargir binaların sismik kuvvetler altındaki performanslarını incelemişler ve dikey cam FRP kompozit

şeritlerle güçlendirilmiş, yarı – ölçekli üç adet tuğla duvardan elde edilen deney sonuçlarını sunmuşlardır. Çalışma sonuçlarına göre deneye tabi tutulan duvarların nihai eğilme mukavemeti önemli ölçüde artmıştır; uygulanan basınç yüzey alanına gelen birim duvar ağırlığının 10 ila 32 katı olacak şekilde değişir. Eş yönlü FRP malzemeyle güçlendirilmiş duvarlarda, duvar yüksekliğinin %2.5’u kadar sehim gözlenmiştir; bu duvarlar kargir yapı elemanları için geçerli en son düzenlemede müsaade edilen maksimum sehimin neredeyse 14 katı kadar sehim yapmıştır. Tuğla duvarın rijitliğinin azalması ve GFRP şeritler tabaka ayrışmasının bir sonucu olarak elastik olmayan davranış sergilenmiştir. Bu ise tuğla ve kompozit şeritlerin kendi başlarına gevrek oldukları düşünüldüğünde dikkat çekici bir noktadır. Eş yönlü FRP malzemeyle güçlendirilmiş duvarlarda, tuğla duvarın zayıf kesme transfer kapasitesi kırılma türünün belirlenmesinde etkin rol oynamıştır. Hafif FRP malzemenin kullanıldığı deney numunesinde, GFRP şeritlerinin çekmeye bağlı kopması söz konusudur. Bununla beraber, bu numunede daha rijit davranış, daha düşük sehim yapmayla sonuçlanmıştır. GFRP kompozit şeritlerin, sismik kuvvetleri de aralarında bulunduğu yatay kuvvetlere maruz kalan takviye görmemiş kargir duvarların güçlendirilmesinde iyi bir alternatif olduğu kanıtlanmıştır.

Tavakkolizadeh ve Saadatmanesh’in [16] birlikte gerçekleştirdikleri bir çalışmada karbon elyafla (CFRP) güçlendirilmiş çelik-beton kompozit kirişlerin statik yüklemeye altındaki davranışı üzerine yapılmış bir araştırmanın sonuçları sunulmaktadır. Kullanılan CFRP malzemenin kalınlıkları aynıdır ve teste tabi tutulan üç adet kompozit kirişe sırasıyla 1 kat, 3 kat ve 5 kat olacak şekilde sarılmışlardır. Bir, üç ve beş kat CFRP ile güçlendirme yapılmış kirişlerde nihai yük taşıma kapasitesi sırasıyla %44, %51 ve %76 artmıştır. İlave olarak, kirişlerin akma yükleri de yapılan takviyenin bir sonucu olarak artmıştır. Ayrıca CFRP tabakasının sayısı arttıkça, CFRP kullanımının etkinliği azalmıştır. Tek tabakalı sistem için CFRP malzemesindeki gerilme, nihai mukavemetinin %75’i iken, beş tabakalı sistemde bu, nihai mukavemetin %42’sine kadar düşmüştür. Buradan, CFRP malzemenin mukavemetinden etkin bir şekilde faydalanabilmek için optimum tasarımın geliştirilmesi gerektiği sonucu çıkarılmaktadır.

Tavakkolizadeh ve Saadatmanesh’in [17] yaptıkları bir diğer çalışmada çelik kirişlerin yorulma dayanımlarının artırılmasında, CFRP malzemenin etkinliği araştırılmıştır. Belirli sayıda küçük ölçekli çelik kiriş, karbon elyafla takviye

edilmiştir. Çelik kiriş numunesinde yorulmaya duyarlı bir detay yaratmak üzere, kirişlerin çekme flanşlarının her iki yüzeyinde de çentikler açılmıştır. Çentik açılan bu bölgeleri uzunlukları eş CFRP malzeme yapıştırılmış ve çalışma boyunca 69 MPa'dan 379 MPa'a kadar değişen bir aralıkta farklı gerilmeler uygulanmıştır. Sonuç olarak, yapı elemanında yorulma dayanımının düşmesine neden olan detayların iyileştirilmesinde, detayın etrafına CFRP malzeme sarılmasının etkili bir yöntem olduğu görülmüştür. 345 ila 207 MPa arasında değişen bir gerilme aralığında, takviye edilmiş numunelerin yorulma ömrü, takviye edilmemiş numunelerinkinden 2.6 ila 3.4 kat daha uzundur. Ayrıca takviye edilmeyen numunelerin rijitliğindeki azalma 14.5 mm.lik çatlaklarda görülürken, rijitlikte azalma takviye edilmiş numuneler için 22.5 mm.lik çatlaklarla başlamıştır.

West Virginia Üniversitesi'ndeki İnşaat Faaliyetleri Merkezi, yoğun bir deneysel çalışma yardımıyla karbon fiberle güçlendirilmiş elyafı sarılmış betonarme kirişlerin davranışını anlamak için birkaç Amerikan ve Japon firması yakın bir çalışma içindedir. İki Japon şirketi ürünlerini yapı endüstrisinin kullanımına sunmuştur. Bunlardan biri Mistui Construction Co. tarafından geliştirilen, aramid fiberinden yapılan yapıştırıcı bant ile kolon yüzeyini kaplamak suretiyle betonarme kolonun mevcut kesme mukavemetini ve deformasyon özelliklerini iyileştiren bir metoddur. Diğerisi ise Tonen Corporation tarafından üretilen epoksi reçine yapıştırıcılı bir tabaka ile beraber ince bir ağa örülmüş eş-yönlü karbon ve cam fiberlerinden yapılan kuru tip levha malzemesi olan bir sistemdir. Benzer şekilde Kaliforniya'da, betonarme köprü kolonları eğilme ve kesme mukavemetlerini iyileştirmek amacıyla takviye edilmişlerdir. On yıldan uzun bir süredir, İsviçre Federal Malzeme Deneyleri ve Araştırmaları Laboratuvarları dikdörtgen ve T şeklindeki beton kirişlerin çekme oluşan yüzeylerinde güçlendirme sağlayacak şekilde CFRP malzemenin statik ve yorulma dayanımını araştırmaktadır [1,2].

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Bu bölümde, deneysel çalışmalar için üretilen betonarme kiriş modellerinde kullanılan malzemeler, bu malzemelerin özellikleri, beton karışımları ile üretimi ve deneysel çalışmalarda yapılacak beton deneyleri açıklanmıştır. Bu malzemeler aşağıda verilmiştir:

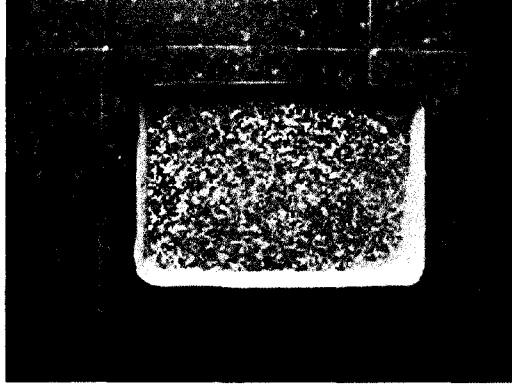
- Beton
- Donatı
- Beton Koruyucu Astar
- Beton Yapıştırıcısı
- Epoksi
- Karbon Elyaf (CFRP)

2.2. Beton

Deneysel çalışmalarda C16 kalitesinde beton üretimi yapılmış ve daha önceden bir doktora programı sırasında üretilen C30 [18] kalitesindeki numunelerden faydalanılmıştır. Üretim sırasında kullanılan agrega ve çimento özellikleri bu bölümde açıklanmıştır. Beton üretiminde iki çeşit agrega kullanılmıştır. Bunlar kum ve kırmataş I-II karışımından oluşan agregalardır. Bu agregalar hakkında bilgi aşağıda verilmiştir. Üretilen betonda kullanılan agregaların granülometri analizi TS 3530 [19]'a göre kare delikli eleklerde yapılmıştır.

2.2.1 Kum

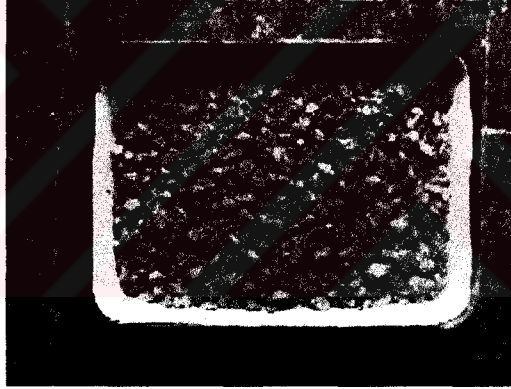
Beton üretiminde dere kumu kullanılmıştır. Deneyde kullanılan kum içindeki çamurdan arındırılmak için yıkanmıştır (Şekil 2.1). Kumun maksimum dane çapı 4 mm'dir ve granülometri analizi sonuçları Tablo 2.1 de verilmiştir. Kullanılan kum üzerinde TS 3526 [20]'ya göre özgül ağırlık deneyi, TS 3529 [21]'a göre de birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Bu deneylere ait sonuçlar Tablo 2.2 de verilmiştir.



Şekil 2.1. Kum

2.2.2 Kırmataş

Beton üretiminde agrega olarak kullanılan kırmataş I-II karışımı agreganın (Şekil 2.2) maksimum dane çapı 16mm'dir ve granülometri analizi sonuçları Tablo 2.1 de verilmiştir. Kullanılan kırmataş üzerinde TS 3526'ya göre özgül ağırlık deneyi, TS 3529'a göre de birim ağırlık deneyi yapılmıştır. Bu deneylere ait sonuçlar Tablo 2.2 de verilmiştir.



Şekil 2.2. Kırmataş I-II

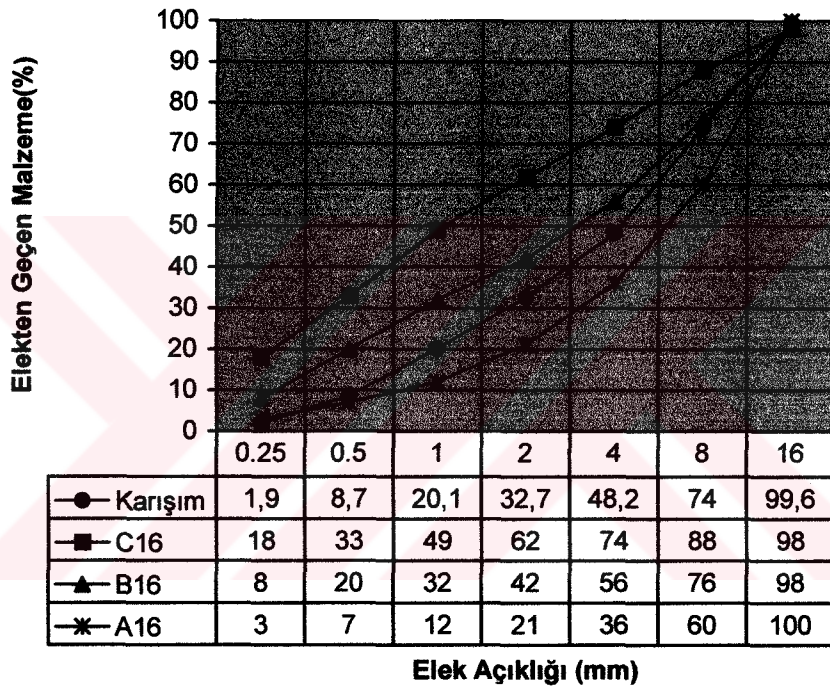
Tablo 2.1 Agregaların ve karışımın granülometrik analizi

Elekt Çapları(mm)	Elekten Geçen Malzeme (%) leri							İncelik Modülü
	16	8	4	2	1	0,5	0,25	
Kum	100	100	92	67	41	17	3	2,8
Kırmataş I-II	100	50	8	1	1	1	1	5,4
Karışım	100	74	48	33	20	9	2	4,15

Tablo 2.2. Agregaların özgül ve birim ağırlıkları

Agrega Cinsi	Özgöl Ağırlık (kg/dm ³)	Birim Ağırlık (kg/dm ³)
Kum	2,62	1,50
Kırmataş I-II	2,73	1,49

Üretilen beton karışımında kullanılan agregaların referans eğrileri ile birlikte karışımın granülometri eğrisi Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. TS 706 [22] referans ve karışımın granülometri eğrisi

2.2.3 Çimento Özellikleri

Beton üretiminde Akçansa Çimento A.Ş. tarafından üretilen TS12143 PKÇ/ B32,5 R Portland Kompoze Çimento kullanılmıştır. Bu çimento, %65-%79 oranında Portland Çimentosu klinkerine %21-%35 katkı maddeleri ve priz düzenleyici olarak da kalsiyum sülfatın katılarak öğütülmesi sonucu elde edilen hidrolik bağlayıcıdır. Kullanılan çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2.3’de verilmiştir.

Tablo 2.3. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Rilem Harcının Basınç Dayanımları(N/mm ²)			
	2 günlük	7 günlük	28 günlük
Akçansa Ort.	14	24	37
	Priz süreleri		
	Başlangıç	Son	Özgül Yüzey
Akçansa Ort.	2 Saat 40 dk.	3 Saat 35 dk.	3950 cm ² /gr

2.3. Donatı

Betonarme deney numunelerinin üretiminde Çesan Yüksek Kaliteli Çelik Sanayii A.Ş. tarafından üretilen Çesan Beton Çelik Hasırı kullanılmıştır. Tablo 2.4’de bu donatının özellikleri verilmektedir.

Tablo 2.4. Çesan beton çelik hasırı

Tanımı	S500bk	TS 708 [23] (min)	Ortalama
Nitelikleri	Akma Sınırı	500 N/mm ²	560 N/mm ²
	Çekme Mukavemeti	550 N/mm ²	612 N/mm ²
	Kopma Uzaması	%5	%7

2.4. Beton Koruyucu Astar

Betonarme deney elemanlarının yüzeyine epoksi ve beton yapıştırıcısı uygulanmadan evvel, yüzeyi tozdan arındırabilmek ve daha iyi bir yapışmanın sağlanabilmesi için beton koruyucu astar sürülmektedir. Bunun için Duratek firmasının Av32 kodlu beton koruyucu emprenye astarı kullanılmıştır (Şekil 2.4). Bu ürün Av32/A ve Av32/B şeklinde olmak üzere iki bileşene sahiptir ve ağırlıkça sırasıyla 70/30 oranında karıştırılarak hazırlanmaktadır. Tablo 2.5’de bu malzemenin teknik özellikleri verilmiştir.



Şekil 2.4. Beton koruyucu astar

Tablo 2.5. Beton koruyucu emprenye astarın teknik özellikleri

Komponent Sayısı	2
Karışma Oranı	A/B: 70/30 (ağırlıkça) A/B: 2/1 (hacimsal)
Karışım Yoğunluğu (g/cm ³ , 20°C'de)	1.0-1.1
Karışım Viskozitesi (No 4, DIN 53211, 25°C'de)	45-75 sn.
Karışım Ömrü (25°C'de, 500g)	30-50 dak.
Katı Madde Oranı(%)	100
Renk	Renksiz
Kuruma Süresi (23°C'de)	
Toz tutma	155-200 dak.
Dokunma (60 mikron, camda)	7-8 saat
Kat Kabul	8-24 saat
Tam Sertleşme	1 hafta

2.5. Beton Yapıştırıcısı

Betonarme deney elemanlarının uç uca eklenmesi solventsiz, epoksi esaslı beton yapıştırıcısı ile yapılmıştır. Bu işlem için Duratek firmasının GSM 510/A ve GSM 510/B bileşenli eski-yeni beton yapıştırıcı macunu ve kum kullanılmıştır (Şekil 2.5). Karışım için A, B ve kum bileşenlerinden ağırlıkça 25/25/50 oranında koyulmuştur.



Şekil 2.5. Beton yapıştırıcısının hazırlanması

Beton yapıştırıcısının teknik özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 2.6).

Tablo 2.6. Eski/yeni beton yapıştırıcısının teknik özellikleri

Komponent Sayısı	2
Karışma Oranı	A/B: 65/35 (ağırlıkça) A/B: 60/40 (hacimsal)
Karışım Yoğunluğu (g/cm ³ , 200C'de)	1.05-1.15
Karışım Viskozitesi (25 ⁰ C'de, m.Pas.)	3000-5000
Karışım Ömrü (25 ⁰ C'de, 200g)	30-50 dak.
Katı Madde Oranı (%)	100
Renk	Renksiz
Kuruma Süresi (23 ⁰ C'de)	
Toz tutma	90-120 dak.
Dokunma	6-7 saat
Kat Kabul	12-24 saat
Tam Sertleşme	1 hafta

2.6. Epoksi

Karbon elyafın betonarme eleman modellerine yapıştırma işlemi iki bileşenli, solventsiz, epoksi bazlı bir laminasyon reçinesi ile sağlanmıştır. Bu işlem için Duratek firmasının Av23 sertleştiricisi ve Bv23 epoksi reçinesi kullanılmıştır. Av23 sertleştiricisinden ve Bv23 epoksi reçinesinden ağırlıkça 65/35 oranında bir karışım hazırlanmıştır. Epoksinin teknik özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 2.7).

Tablo 2.7. Epoksi laminasyon reçinesinin teknik özellikleri

Komponent Sayısı	2
Karışma Oranı	A/B: 65/35 (ağırlıkça) A/B: 60/40 (hacimsal)
Karışım Yoğunluğu (g/cm ³ , 200C'de)	1.05-1.15
Karışım Viskozitesi (250C'de, m.Pas.)	3000-5000
Karışım Ömrü (250C'de, 200g)	30-50 dak.
Katı Madde Oranı(%)	100
Renk	Renksiz
Kuruma Süresi (230C'de)	
Toz tutma	90-120 dak.
Dokunma	6-7 saat
Kat Kabul	12-24 saat
Tam Sertleşme	1 hafta

2.7. Karbon Elyaf (CFRP)

Betonarme deney elemanları uç uca eklendikten sonra bu elemanlar fiberle güçlendirilmiş karbon elyaf (CFRP), uygulamada kullanılan adıyla karbon elyaf ile takviye edilmişlerdir. Kullanılan karbon elyaf, Alman EPO firmasının ürettiği tek yönde dokunmuş ve karbon fiberlerin epoksi reçinesi matrisine yerleştirilmesiyle

oluşturulmuş bir elyafır (şekil 2.6). Bu karbon elyaf 100 ve 200 metrelik toplar halinde satılmaktadır. Elyafın genişliği 30 cm.dir.



şekil 2.6. Kesilmiş karbon elyaf

Kullanılan karbon elyaf 200lk cins olarak adlandırılan m² de 200 gram ağırlığa sahip olan bir malzemedir. Çok iyi derecedeki esneklik kabiliyeti sebebiyle her türlü yüzeye rahatlıkla uygulanabilen bu malzemenin aşağıdaki tabloda özellikleri verilmiştir (Tablo 2.8).

Tablo 2.8. Karbon elyafın zellikleri

	Birim	200 Cinsi
Birim Alandaki Fiber Ağırlığı	g/m ²	200
Fiber Yoğunluğu	g/cm ²	1.8
Dizayn edilen kalınlık	mm	0.11
Reçine ile birlikteki uygulamadan sonraki kalınlık	mm	0.45
Çekme Mukavemeti	N/cm (Genişlik)	3770
Çekme Modülü	kN/cm (Genişlik)	259
Uzama	%	1.4

2.8. Deney Ortamı ve Kullanılan Cihazlar

Bu çalışmanın kapsamındaki tüm deneyler, İ.T.Ü. Mimarlık Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nın mevcut olanakları ile yapılmıştır. Çalışmanın deney programı, karbon elyaf yapıştırılması ile güçlendirilen çeşitli betonarme elemanları konu alan çalışmalarda yapılan deneyler , deney teknikleri , deney örneği üretim kriterleri ve standartlarını referans alarak geliştirilmiştir.

Bu konudaki araştırmaların deneysel çalışmalar bölümlerinde , genellikle yapılan epoksi-karbon elyaf eklemesinin, betonarme kolon veya kirişin mukavemet değerlerindeki artış miktarının tespit edilmesini sağlamaya veya alternatif olarak kullanılan malzemeler (çelik lama , v.b.) ile karşılaştırmasını yapmaya yönelik amaçlar belirtilmiştir. Bu nedenle deney değişkenleri karbon elyaf boyutları (en, boy, kalınlık), epoksi reçinesi çeşitleri, tabaka kalınlıkları ve yapıştırma bölgeleri olarak belirlenmiştir. Deney sabitleri ise çoğunlukla deney örneği olan betonarme elemanın beton sınıfı, çelik donatısı ve boyutlarıdır.

Deneyler için kiriş modellerine 100KN eğilme yükü uygulayabilen , ayrıca küp veya silindirik şeklindeki beton kontrol örneklerine 300KN basınç yüklemesi yapabilen Alman üretimi 1955 Seidner marka test cihazı kullanılmıştır(Şekil 2.7). Deneysel çalışmalar başlamadan bu cihazın kalibrasyonu yeniden yapılmıştır.



Şekil 2.7. Seidner marka test cihazı

Deneysel ortam koşulları, uygulanan tekniğin malzeme özelliklerine ve şantiyede uygulanabilme amacına bağlı olarak $+22^{\circ}\text{C}$ 'deki normal ortam koşullarıdır.

Betonun karbon elyafa, karbon elyafın birbirlerine epoksi reçinesi ile oluşan bağın aderansını tespit etmek için çekme deneyi cihazı (Pull Off Tester) kullanılmıştır(Şekil 2.8). Ayrıca deneylerde kullanılan epoksi reçinesinin standart mukavemetini tespit etmek için 50mm çapındaki alüminyum başlık, geniş yüzeyli çelik bir levhaya yapıştırılarak TS EN 12188 [24]'e göre çekme deneyi uygulanmıştır.



Şekil 2.8. Pull off tester deney aleti

2.8.1. Deneyisel Çalışma Programı

Deneyisel çalışmalarda, üretilcek deney örneklerinin boyutlarını ve yükleme noktalarını dikkate alarak uygun bir deney düzeneği belirlenmiştir. Deneylere veri oluşturmak amacı ile literatürden çeşitli şekil ve boyutlar kullanılarak üretilen örneklerin hasar durumları incelenmiş ve kullanılan numuneler buradan esinlenerek üretilmiştir.

Betonarme deney modelleri, TS 3068 [25]'e göre hazırlanmıştır. Beton karışımından boyutları 150x150x150 mm olan 9 adet küp numunesi üretilmiş, beton numuneleri bir gün sonra kalıplardan çıkarılarak $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ deki kür havuzunda 28 gün saklanmıştır (Şekil 2.9, 2.10). Beton karışımına giren gerçek malzeme miktarları ve betonların üretiminden itibaren 3., 7., 14. ve 28. günde yapılan basınç deneyi sonuçları

aşağıdaki tablolarda verilmiştir(Tablo 2.9, 2.10). Tablo 2.10'da eşdeğer küp basınç dayanımını göstermektedir.



Şekil 2.9. Küp numuneler



Şekil 2.10. Küp numuneler kür havuzunda

Tablo 2.9. Üretilen betonun karışımına giren gerçek malzeme miktarı

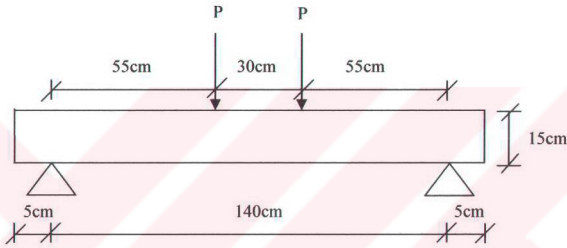
Beton kodu	Çimento (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Kum (kg/m ³)	Kırmatas I-II (kg/m ³)
C16	378	220	812	914
C30	517	250	754	851

Tablo 2.10. Basınç deneyi sonuçları

Gün	Eşdeğer Küp Basınç Dayanımı Ort.(N/mm ²), C16	Eşdeğer Küp Basınç Dayanımı Ort.(N/mm ²), C30
3	13,3	18,4
7	16	23,2
14	19	28
28	19,5	37

Üretilen deney modellerinin öncelikle aynı mukavemet değerlerine sahip olması, sonuçların hatasız değerlendirilebilmesi için gereklidir. Deneysel çalışmalar kapsamında aşağıdaki testler uygulanmıştır:

- Betonarme kiriş deney modellerine, iki noktadan yükleme yapılarak(Şekil 2.11), kırılma mekanizmasının, kırılma yükünün ve yer değiştirme miktarının belirlenmesi,
- Uygulanan güçlendirme-birleştirme tekniğinin temel performans kriteri olan FRP ve betonun aderans değerlerinin tespit edilmesi,
- Uygulanan test metodunun sonuçlarının karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi için, betonarme deney modellerinde kullanılan betonun standart kalıplara alınmış örneklerine basınç testi, donatılarına ve güçlendirmede kullanılan FRP malzemeye çekme testi uygulanması.



Şekil 2.11. Yükleme modeli

2.8.2. Deney modellerinin üretimi

Deneylerde kullanılan betonarme modellere ait elemanlar ahşap kalıplar kullanılarak (Şekil 2.12) bir kerede üretilmiştir. Bunun sebebi karşılaştırmalı deneylerde kullanılacak deney örneklerinin, aynı harç yığından ve aynı ortam şartlarında hazırlanarak beton kalitesinin aynı olmasını sağlamaktır. Kullanılan tüm örneklerin beton kontrol testlerinin yapılmasına karşın, kesin sonuç almak amacıyla bu şekilde bir üretim yapılması planlanmıştır.

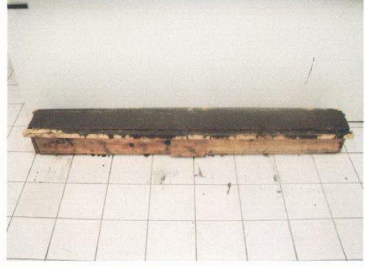


Şekil 2.12. Ahşap kalıplar

Deneyler için C16 beton kalitesinde 24 adet 100x150x750 mm boyutlarında betonarme eleman birimi (Şekil 2.13) , 1 adet C16 beton kalitesinde 100x150x1500 mm boyutlarında kiriş mukayese modeli (Şekil 2.14) üretilmiş ve 28 gün boyunca nemli ortamda kürlenmişlerdir (Şekil 2.15).



Şekil 2.13. 100x150x750 mm.lik elemanlar

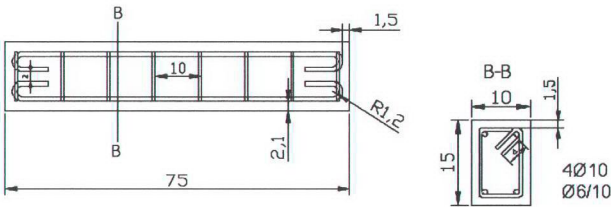


Şekil 2.14. 100x150x1500 mm.lik eleman

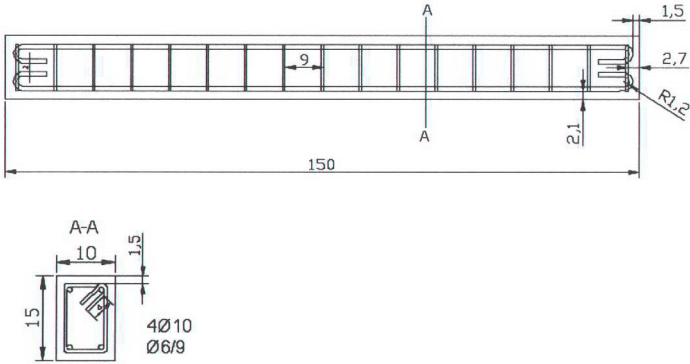


Şekil 2.15. Kür Ortamı

Ayrıca deneyler için daha önceki bir başka proje için üretilmiş olan C30 beton kalitesine sahip 12 adet 100x150x750mm boyutlarında elemandan da faydalanılmıştır. Şekil 2.16 ve Şekil 2.17 de bu elemanların donatı açılımları görülmektedir.



Şekil 2.16. 100x150x750 mm.lik eleman modelinin donatı açılımı



Şekil 2.17. 100x150x1500 mm.lik kiriş mukayese modelinin donatı açılımı

2.8.3. Deney değişkenleri

Ön çalışmalardan elde edilen verilere bağlı olarak kullanılacak deney tekniği ve uygulama şekilleri ve deney modellerinin tipleri belirlenmiştir. Buna göre ana deneyler için kullanılan örnekler aşağıda verilmiştir.

- C16 kalitesinde 100x150x750 mm boyutlarında 24 adet elemandan üretilen 12 adet kiriş modeli (Şekil 2.16),
- C30 kalitesinde 100x150x750 mm boyutlarında 12 adet elemandan üretilen 6 adet kiriş modeli (Şekil 2.16),
- C16 kalitesinde 100x150x1500 mm boyutlarında üretilen 1 adet kiriş modeli (Şekil 2.17).

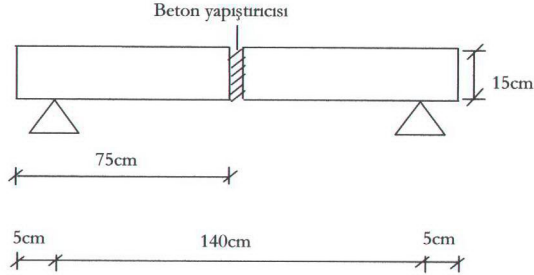
Kiriş modelleri tasarlanırken iki tip deney değişkeni kullanılmıştır. Değişkenlerden birincisi kiriş elemanlarının uç uca eklenme şekilleri, ikincisi kiriş elemanlarının ekleme yerlerinde kullanılan karbon elyaf sarım teknikleridir.

2.8.3.1. Kiriş Elemanlarının Uç Uca Eklenme Şekilleri

100x150x1500 mm boyutlarında kiriş modelleri, 100x150x750 mm boyutlarındaki iki adet elemanın uç uca eklenmesiyle oluşturulmuştur. Bu eklemeler;

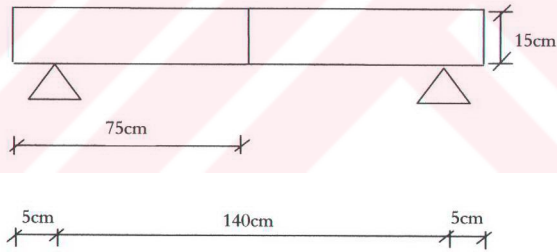
- Beton yapıştırıcılı ekleme ve
- Beton yapıştırıcısız ekleme

olmak üzere iki şekilde yapılmıştır. Beton yapıştırıcılı eklemede iki adet 100x150x750 mm.lik eleman birbirlerine bakan yüzlerinden beton yapıştırıcısı tatbik edilmek suretiyle yüz yüze yapıştırılmışlardır (Şekil 2.18).



Şekil 2.18. Beton yapıştırıcılı ekleme

Beton yapıştırıcısız eklemede iki adet 100x150x750 mm.lik eleman birimi beton yapıştırıcısı kullanılmadan birbirlerine bakan yüzlerinden değiştirilmişlerdir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Beton yapıştırıcısız ekleme

2.8.3.2. Karbon Elyaf Sarım Teknikleri

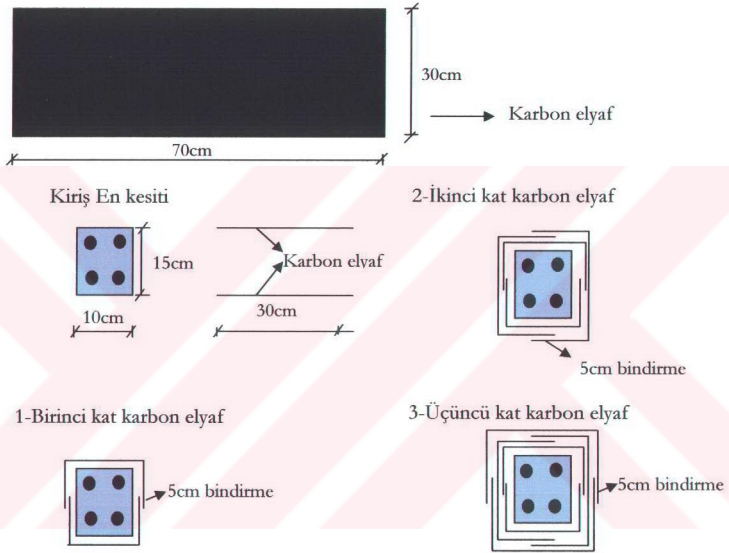
Deney değişkenlerinden ikincisi kiriş elemanlarının ekleme yerlerinde kullanılan karbon elyaf sarım teknikleridir. Sarım teknikleri;

- Bohçalama sistemi ve
- Bant sistemi

olmak üzere iki çeşittir.

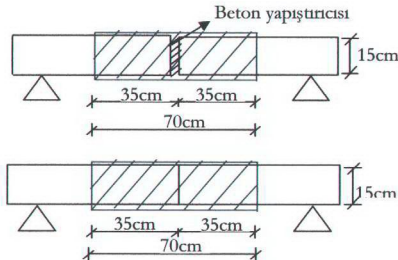
Bohçalama sisteminde, 30cmx70cm ebatlarında kesilen karbon elyaf, iki adet 100x150x750 mm.lik eleman biriminden oluşturulmuş kiriş modelinin basınç

bölgesinin tam orta noktasına 35 santimi bir eleman biriminde, 35 santimi de diğer eleman biriminde kalmak üzere epoksi ile yapıştırılmıştır. Daha sonra aynı işlem çekme bölgesinde de uygulanmak üzere iki adet karbon elyaf birbirlerine 5 cm bindirilmiştir. Bu işlem dizisi birinci kat karbon elyaf sarımı olarak adlandırılmıştır. İkinci kat karbon elyaf sarımı bu sefer aynı işlemlerin kiriş yan yüzeylerinden uygulanması sonucu elde edilmiştir. Üçüncü kat karbon elyaf sarımı ise, birinci kat sarımın tekrarlanması sonucu oluşturulmuştur (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. Karbon elyaf sarım tekniği

Aşağıdaki şekilde karbon elyaf ile sarılmış beton yapıstırıcılı ve beton yapıstırıcısız eklenmiş kirişlerin boyuna görüntüsü verilmiştir (Şekil 2.21, 2.22).



Şekil 2.21. Boşçalı kirişlerin boyuna görüntüsü

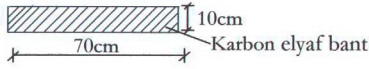


Şekil 2.22. Bohçalama sistemi ile sarılmış kirişler

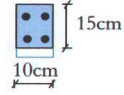
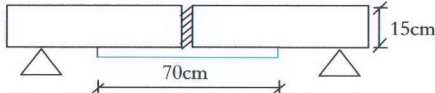
Bant sisteminde 10cmx70cm ebatlarında kesilmiş karbon elyaf, 100x150x750 mm.lik elemanlardan oluşturulmuş kiriş modellerinin çekme bölgesine üç kat, yan yüzeylerine ise birer kat olmak üzere epoksi ile yapıştırılmıştır. Kiriş modellerinin basınç bölgesine karbon elyaf yapıştırılması uygulanmamıştır. Yapıştırma işlemi tamamlandıktan sonra 5cmx70cm boyutlarındaki karbon elyaf etriye ile yapıştırılan bantların uçları bir defa sarmalanmıştır (Şekil 2.23). Karbon elyaf bantla sarım tekniğinin aşamaları aşağıdaki şekilde adım adım gösterilmiştir (Şekil 2.24).



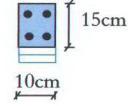
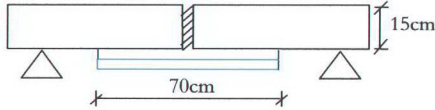
Şekil 2.23. Karbon elyaf etriye sarımı



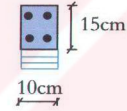
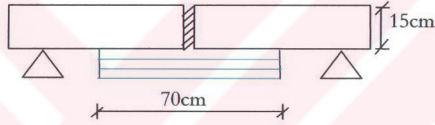
1- Çekme bölgesine birinci kat bandın yapıştırılması



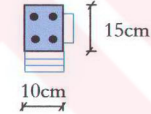
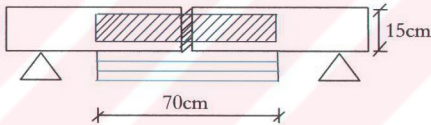
2- Çekme bölgesine ikinci kat bandın yapıştırılması



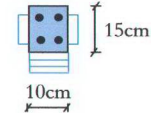
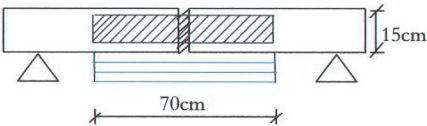
3- Çekme bölgesine üçüncü kat bandın yapıştırılması



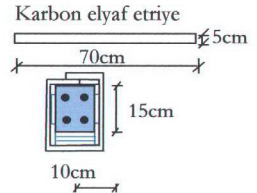
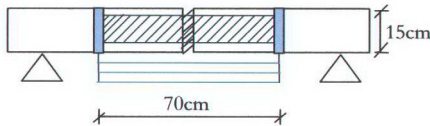
4- Kirişin yan yüzeyine bandın yapıştırılması



5- Kirişin diğer yan yüzeyine bandın yapıştırılması

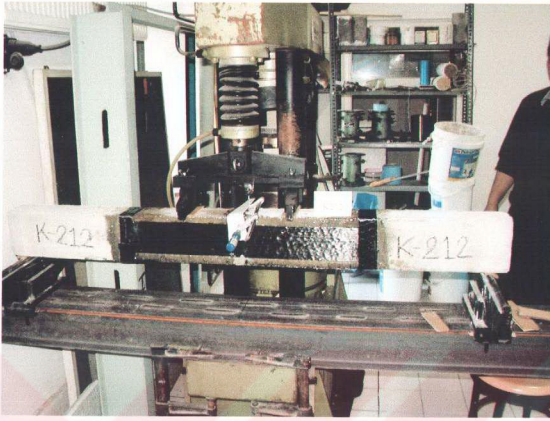


6- Karbon elyaf etriyelerin yapıştırılması

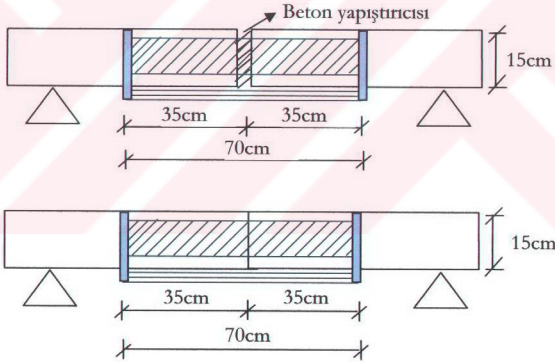


Şekil 2.24. Karbon elyaf bant sistemi

Karbon elyaf bant sistemi uygulanmış (Şekil 2.25) beton yapıştırıcılı ve yapıştırıcısız kiriş modellerinin boyuna görüntüleri aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 2.26).



Şekil 2.25. Karbon elyaf bantlı kiriş görüntüsü



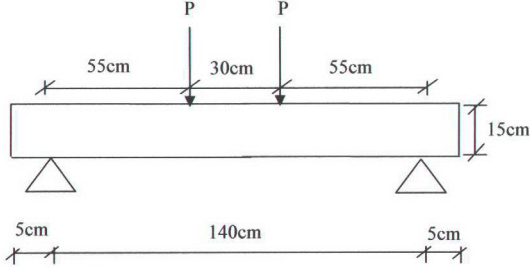
Şekil 2.26. Karbon elyaf bantlı sistemin boyuna görüntüsü

2.8.4. Deneylerde kullanılan kiriş grupları

Deney değişkenleri doğrultusunda 7 tip kiriş grubu oluşturulmuştur. Oluşturulan kiriş grupları ek yerlerinden beton yapıştırıcısıyla yapıştırılıp yapıştırılmadıklarına, karbon elyaf sarım tekniklerine ve beton kalitelerine göre sınıflandırılmışlardır. Bu bölümde sırasıyla 7 tip kiriş grubunun model adları, açıklamaları ve şekilleri verilmiştir.

2.8.4.1. Mukayese Kirişı Modeli

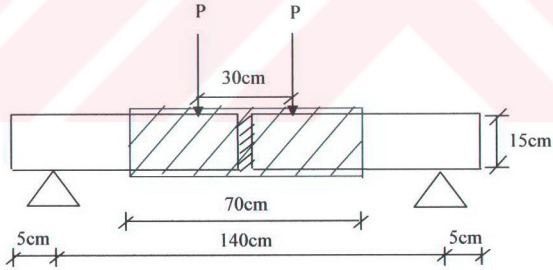
Mukayese kirişı modeli, K100 model adı ile adlandırılmış C16 beton sınıfında 100x150x1500 mm boyutlarında betonarme kiriş modeli olarak üretilmiş bir adet deney mukayese örneğinden oluşmaktadır (Şekil 2.27).



Şekil 2.27. Mukayese modeli

2.8.4.2. C16 Kalitesinde Bohçalı Beton Yapıştırıcılı Kiriş Modeli

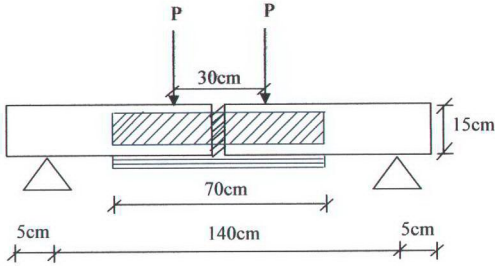
Birinci grup kiriş modeli K201, K202, K203 model adları ile isimlendirilmiş üç adet C16 beton kalitesindeki kirişlerdir. Bu kirişler 100x150x750 mm boyutlarında iki adet elemanın uç uca beton yapıştırıcısı ile eklenmesiyle oluşturulmuştur. Bu kirişlerin eklenme yerlerine uygulanan sarım tekniği bohçalı sistemdir (Şekil 2.28).



Şekil 2.28. Birinci grup kiriş modeli

2.8.4.3. C16 Kalitesinde Bantlı Beton Yapıştırıcılı Kiriş Modeli

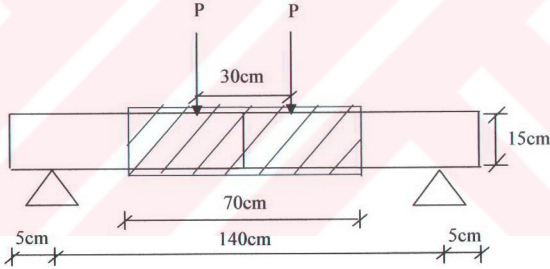
İkinci grup kiriş modeli K211, K212, K213 model adları ile isimlendirilmiş üç adet C16 beton kalitesindeki kirişlerdir. Bu kirişler 100x150x750 mm boyutlarında iki adet elemanın uç uca beton yapıştırıcısı ile eklenmesiyle oluşturulmuştur. Bu kirişlerin eklenme yerlerine uygulanan sarım tekniği bant sistemidir (Şekil 2.29).



Şekil 2.29. İkinci grup kiriş modeli

2.8.4.4. C16 Kalitesinde Bohçalı Beton Yapıştırıcısız Kiriş Modeli

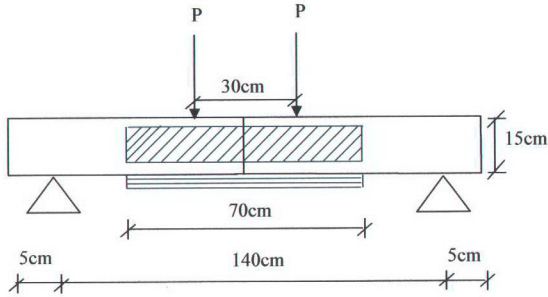
Üçüncü grup kiriş modeli K301, K302, K303 model adları ile isimlendirilmiş üç adet C16 beton kalitesindeki kirişlerdir. Bu kirişler 100x150x750 mm boyutlarında iki adet elemanın uç uca beton yapıştırıcısı kullanılmadan birbirlerine yüz yüze değiştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu kirişlerin eklenme yerlerine uygulanan sarım tekniği bohçalı sistemdir (Şekil 2.30).



Şekil 2.30. Üçüncü grup kiriş modeli

2.8.4.5. C16 Kalitesinde Banth Beton Yapıştırıcısız Kiriş Modeli

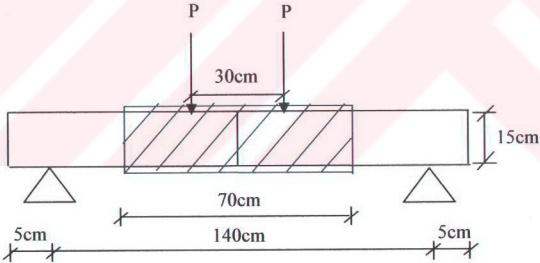
Dördüncü grup kiriş modeli K311, K312, K313 model adları ile isimlendirilmiş üç adet C16 beton kalitesindeki kirişlerdir. Bu kirişler 100x150x750 mm boyutlarında iki adet elemanın uç uca beton yapıştırıcısı kullanılmadan birbirlerine yüz yüze değiştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu kirişlerin eklenme yerlerine uygulanan sarım tekniği bant sistemidir (Şekil 2.31).



Şekil 2.31. Dördüncü grup kiriş modeli

2.8.4.6. C30 Kalitesinde Bohçalı Beton Yapıştırıcısız Kiriş Modeli

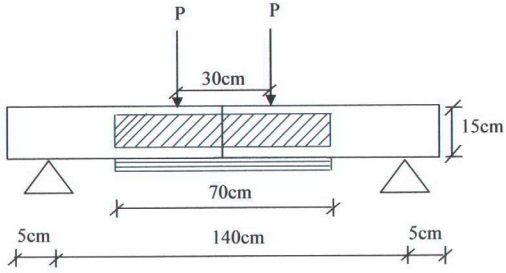
Beşinci grup kiriş modeli K401, K402, K403 model adları ile isimlendirilmiş üç adet C30 beton kalitesindeki kirişlerdir. Bu kirişler 100x150x750 mm boyutlarında iki adet elemanın uç uca beton yapıştırıcısı kullanılmadan birbirlerine yüz yüze değdirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu kirişlerin eklenme yerlerine uygulanan sarım tekniği bohçalı sistemdir (Şekil 2.32).



Şekil 2.32. Beşinci grup kiriş modeli

2.8.4.7. C30 Kalitesinde Banth Beton Yapıştırıcısız Kiriş Modeli

Altıncı grup kiriş modeli K411, K412, K413 model adları ile isimlendirilmiş üç adet C30 beton kalitesindeki kirişlerdir. Bu kirişler 100x150x750 mm boyutlarında iki adet elemanın uç uca beton yapıştırıcısı kullanılmadan birbirlerine yüz yüze değdirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu kirişlerin eklenme yerlerine uygulanan sarım tekniği bant sistemidir (Şekil 2.33).



Şekil 2.33. Altıncı grup kiriş modeli

3. DEĞERLENDİRME

3.1. Genel

Bu çalışmada betonarme elemanlar için kullanılabilen, güçlendirme ve birleştirme yöntemlerinden biri olan karbon elyafın, epoksi reçinesi ile dış yüzeylerinden yapıştırma uygulaması, iki ayrı birleştirme tekniği üzerinde deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan deneylerin sonuçlarından anlaşılabileceği gibi (Tablo 3.1), bu yöntem ile birleştirilen deney modellerine uygulanan test verileri, gerek göçme mekanizması ve taşıma gücü, gerekse aderansın verimli değerlendirilmesi ve malzeme etkileşimlerinin kontrol altına alınabilmesi, dolayısı ile kısmen kompozit davranışın sağlanabilmesi açısından anlamlı bilgiler sunmaktadır.

Konunun genel olarak araştırılmasından ve deneysel çalışmalardan elde edilen sayısal ve gözleme dayalı verilerin yorumlanmasına bağlı olarak, çalışma 6 ana başlık altında toplanmıştır:

- Karbon elyaf ile birleştirilen betonarme eleman deney örneklerinin oluşturduğu kiriş modellerinin performansları ve yük altındaki davranışları,
- Karbon elyaf ve betonarme eleman arasında epoksi reçinesi ile oluşturulan bağın, yapıştırılan yüzeylerde sağladığı aderans performansı ve yük altındaki davranışları,
- Yapıştırılmış birleşimlerde, yapışan taraflara yüzey hazırlığı yapmanın performansa etkisi,
- Yapıştırılmış birleşimlerde genel göçme mekanizmasının yorumlanması,
- Yüksek mukavemet ve işlem-sonuç ilişkisinde standart sağlayabilmek için uygulama kriterleri,
- Yöntemin sonuçlara bağlı olarak yorumlanması ve öneriler.

Tablo 3.1. Bütün modellerin eğilme deneyi sonuçları

Model Adı	Göçme Yüğü 2P(kN)	Model Adı	Göçme Yüğü 2P(kN)
K100	34	K311	21
K201	31,8	K312	24
K202	30,5	K313	23,5
K203	33,5	K401	38
K211	27,5	K402	40,5
K212	25,5	K403	41,5
K213	26,8	K411	28
K301	30,1	K412	26,5
K302	32	K413	26
K303	28		

3.2. Kontrol Kirişi ve Birleştirilmiş Kiriş Deney Sonuçları

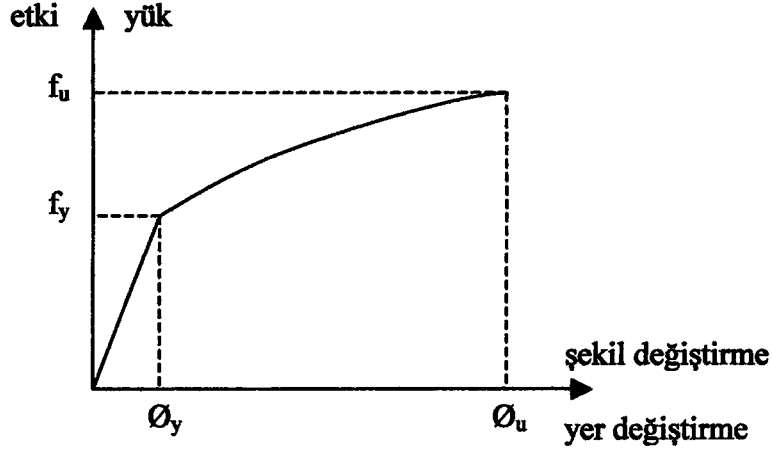
3.2.1. Genel

Betonarme bir elemanda beton ve çelik, dış yüklerin kesitlerde oluşturduğu etkilere beraberce karşı koyarlar. Bunun sonucu olarak, ileri yük kademelerinde, bir betonarme elemanın davranışına beton ve çeliğin doğrusal olmayan davranışı yansır. Herhangi bir etki altında bulunan bir betonarme kesit veya elemanın davranışı Şekil 3.1’de verildiği gibi kabul edilebilir. Burada f_y ve ϕ_y elastik yük (etki) ve yer değiştirme (şekil değiştirme) ye karşı gelirken, f_u ve ϕ_u bu büyüklüklerin dayanımının sona erdiğiindeki değerleri göstermektedir. Bu değerler cinsinden tanımlanacak

$$\mu = \phi_u / \phi_y \quad (3.1)$$

oranı, karşı gelen kesit veya elemanın elastik ötesi şekil değiştirme yapabilme ölçüsünü gösterir ve süneklilik olarak isimlendirilir. Sünek bir yapıda veya elemanda

dayanım hemen hemen sabit kalırken önemli şekil değiştirmeler meydana gelir. Süneklik, yapının güvenliği ile doğrudan ilgili olduğu için projelendirilen ve inşa edilen yapıların sünek olması istenir.



Şekil 3.1. Betonarme bir elemanda genel yük – yer değiştirme bağıntısı

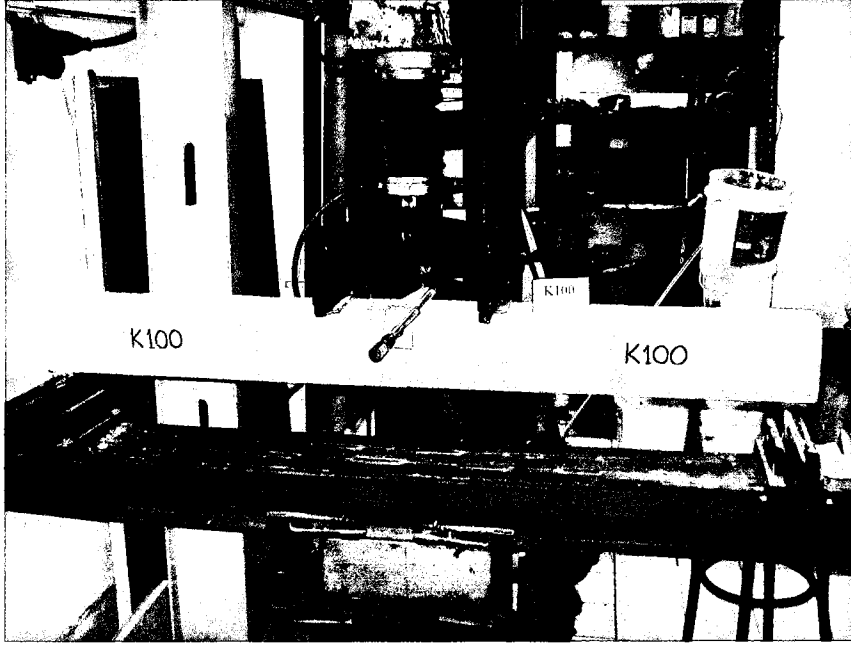
Bu çalışmada süneklik kavramı, kirişin göçme yükü altında orta noktasında meydana gelen toplam çökme değerinin, servis yükü altındaki çökme değerine oranı olarak kabul edilmiştir. Betonarme kirişin servis yükü Mörsch tabloları yardımıyla $2P=20\text{kN}$ olarak hesaplanmıştır .

$$\begin{aligned}
 M_d &= m_d \cdot b \cdot h^2 \cdot f_{cd} & 0,55P_d &= 8,19 & 2P &= 20\text{kN} \\
 M_d &= 0,4 \cdot 100 \cdot 150^2 \cdot 9,1 = 8190000\text{Nmm} & P_d &= 15\text{kN} & & \\
 M_d &= 8,19\text{ kNm} & P &= 15/1,5 = 10\text{kN} & &
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Bütün kiriş modellerinin göçme yükü altında davranışları incelenmiş ve elde edilen veriler karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Her kiriş grubu ayrı bölümler içinde açıklanmıştır. Kiriş gruplarının sırasıyla genel davranışı, servis deplasmanları ve göçme deplasmanı/servis deplasmanı, göçme yükü/servis yükü oranları açıklanmıştır. Karbon elyafı takviye edilen bütün kiriş gruplarında kırılmalar ani olarak oluşmuştur.

3.2.2. Kontrol Kirişi (C16)

Kiriş modeli oluşturmak üzere C16 beton kalitesinde 1 adet eleman modeli $100 \times 150 \times 1500\text{ mm}$ boyutlarında üretilmiştir (Şekil 3.2). Kontrol kiriş modelinin göçme yükü $2P=34\text{ kN}$ 'dur. Komparatör cihazı ile kirişin orta noktasındaki çökme hareketi tespit edilmiştir ve bu değer maksimum yük altında 15 mm ölçülmüştür.



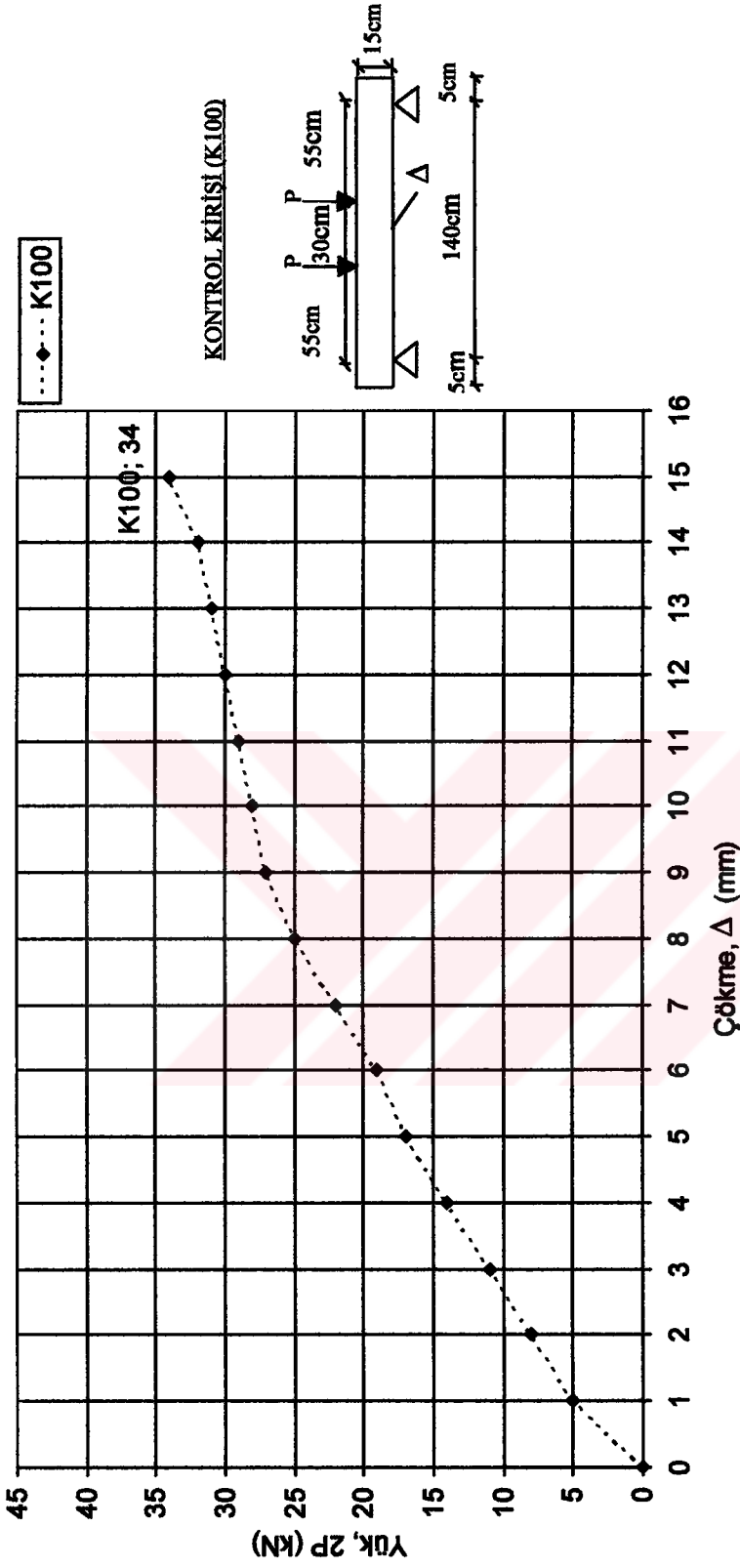
Şekil 3.2. Kontrol kirişi

K100 kirişinden elde edilen yük-çökme diyagramı (Şekil 3.3), bütün kiriş gruplarının yük-çökme diyagramlarında karşılaştırma yapmak amacıyla baz alınmıştır. Kontrol kiriş modeline uygulanan göçme yüklemeinden elde edilen veriler ve belirlenen göçme mekanizmasının oluşum adımları aşağıda sıralanmıştır;

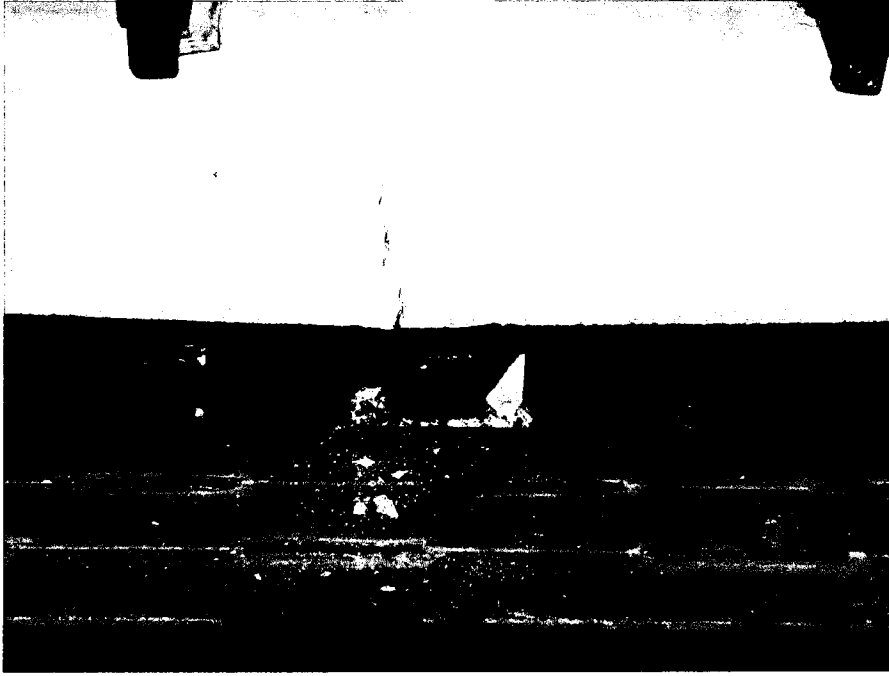
- Genel davranış: K100 kodlu kiriş diğer bütün C16 kalitesindeki kiriş modellerine göre en fazla göçme yükünü almış ve en yüksek süneklik değeri ile diğer bütün kiriş modellerine göre sünek bir davranış göstermiştir. Göçme hareketi, betonarme kiriş elemanının çekme bölgesine yığılan gerilmelerden dolayı oluşan çatlaklar sebebiyle oluşmuştur (Şekil 3.4).
- K100 betonarme kirişinin hesaplanan servis yükü $2P=20$ kN'dur ve bu yük altında orta noktasındaki çökme değeri 6,2 mm civarındadır. Bu veriler, diğer kiriş modellerinin (göçme deplasmanı/servis deplasmanı) ve (göçme yükü/servis yükü) oranlarının bulunmasında baz olarak alınmıştır.

$$\frac{\text{Göçme deplasmanı}}{\text{Servis deplasmanı}} = \frac{15}{6,2} = 2,42$$

$$\frac{\text{Göçme yükü}}{\text{Servis yükü}} = \frac{34}{20} = 1,7$$



Şekil 3.3. Kontrol kirişi (K100) yük-çökme diyagramı



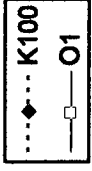
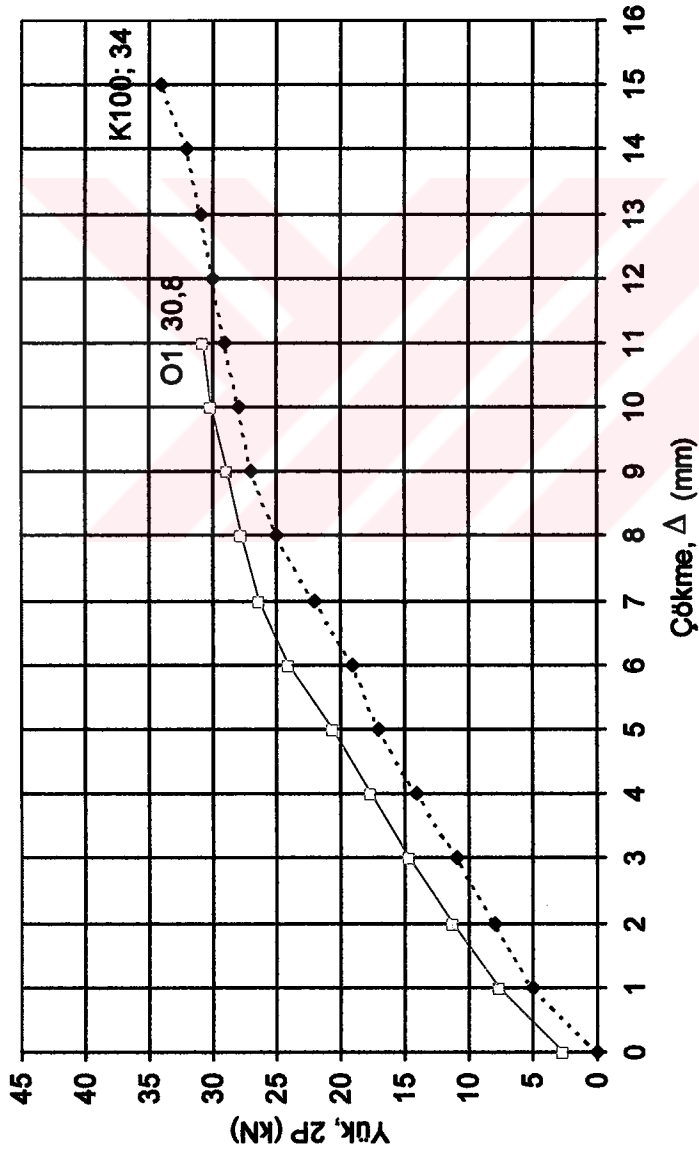
Şekil 3.4. Eğilme çatlağı

3.2.3. Bohçalı Beton Yapıştırıcılı Kirişler (C16)

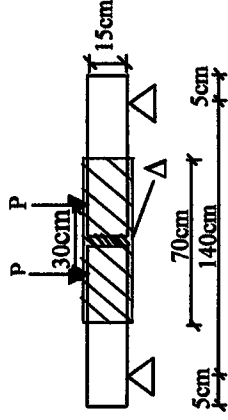
Kiriş modeli oluşturmak üzere 2 adet C16 kalitesindeki 100x150x750 mm.lik eleman birimi beton yapıştırıcısı ile uç uca eklenerek , bohçalama sistemi ile yapıştırılmıştır (Şekil 3.5). Bu gruptaki kirişlerden (K201, K202, K203) elde edilen sonuçlar kontrol kiriş modeli ile karşılaştırılmıştır. Bohçalı beton yapıştırıcılı kiriş modellerinin göçme yükleri ortalama $2P=31,9$ kN'dur. Orta noktada tespit edilen çökme hareketi ortalama 11,3 mm.dir (Şekil 3.6).



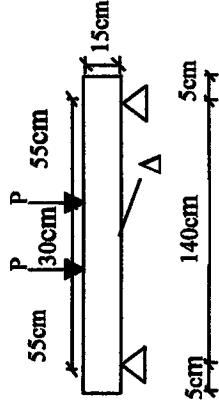
Şekil 3.5. K201 kirişi



BOHCALI BETON YAPISTIRICILI
KIRIŞ MODELİ (O1)



KONTROL KIRIŞI (K100)



Şekil 3.6. Birinci grup kiriş modellerinin yük-çökme değerleri ortalamalarının (O1), kontrol modeli (K100) ile karşılaştırılması

Birinci grup deney kiriş modellerine uygulanan göçme yüklemesinden elde edilen veriler ve belirlenen göçme mekanizmasının oluşan adımları aşağıda sıralanmıştır.

- Genel Davranış: Bu kirişler kontrol modeline göre yük altında daha düşük bir süneklik değerine sahip olmakla beraber diğer kiriş modellerine göre daha sünek bir davranış göstermişlerdir. Göçme esnasında karbon elyaf betonun yüzeyini pas payından alarak betonu koparmıştır(Şekil 3.7).
- Bohçalı beton yapıştırıcılı kirişlerin, kontrol kirişinin $2P=20$ kN'luk servis yükü altındaki çökme değeri ortalama 4,9 mm.dir.

$$\frac{\text{Göçme deplasmanı}}{\text{Servis deplasmanı}} = \frac{11,3}{4,9} = 2,3$$

$$\frac{\text{Göçme yükü}}{\text{Servis yükü}} = \frac{31,9}{20} = 1,6$$

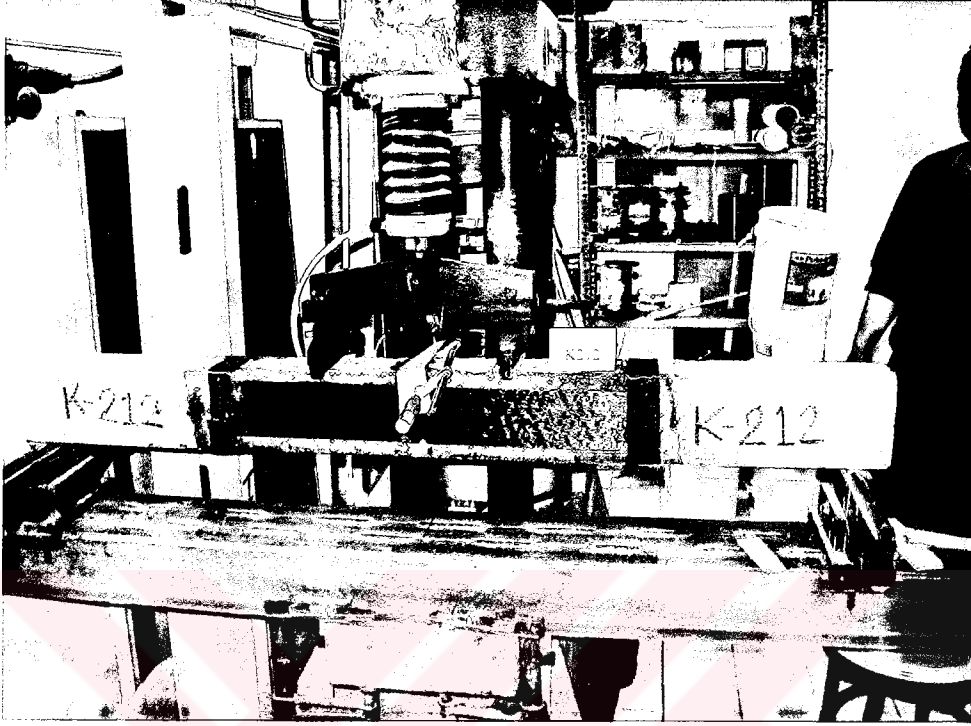


Şekil 3.7. Bohçalı beton yapıştırıcılı kiriş modellerinin tipik göçme şekli

3.2.4. Bantlı Beton Yapıştırıcılı Kirişler (C16)

Kiriş modeli oluşturmak üzere 2 adet C16 kalitesindeki 100x150x750mm.lik eleman birimi beton yapıştırıcısı ile uç uca eklenerek , bant sistemi ile yapıştırılmıştır (Şekil

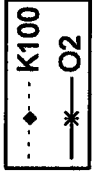
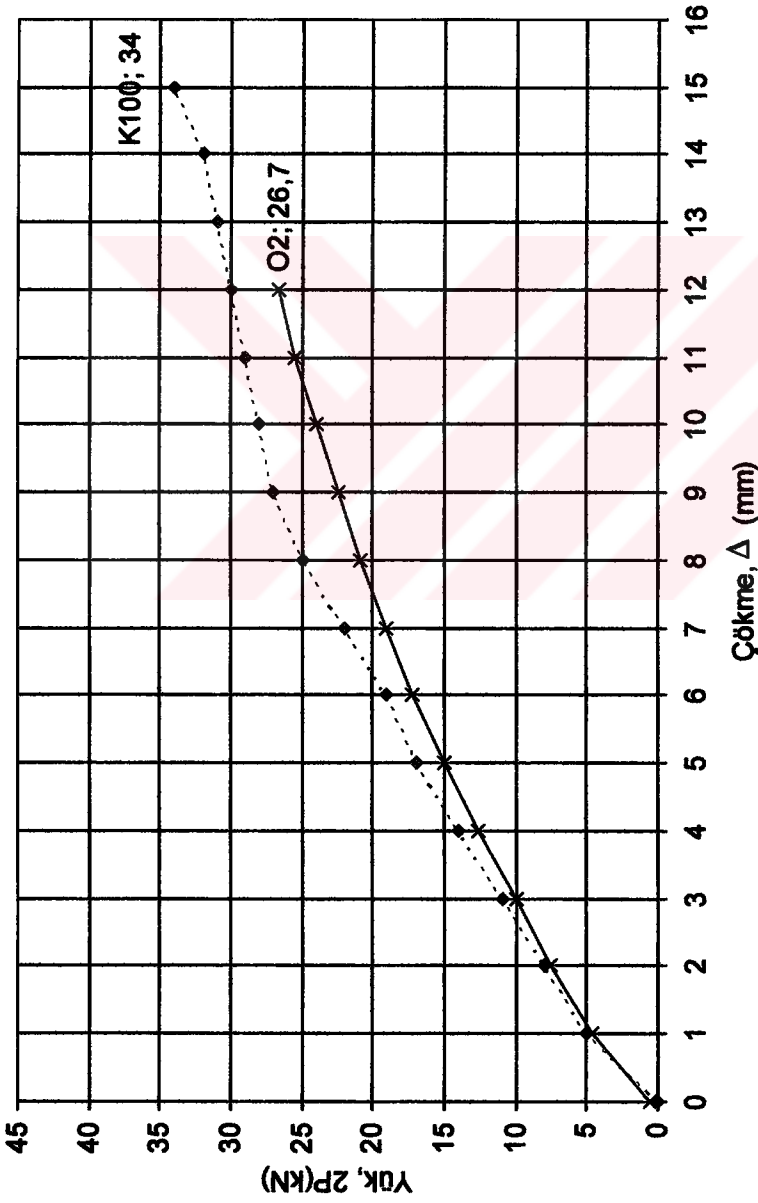
3.8). Bu gruptaki kirişlerden (K211, K212, K213) elde edilen sonuçlar kontrol kiriş modeli ile karşılaştırılmıştır. İkinci grup kiriş modellerinin göçme yükleri ortalama $2P=26,6 \text{ kN}$ 'dur. Orta noktada tespit edilen çökme miktarı ortalama 12,3 mm.dir.



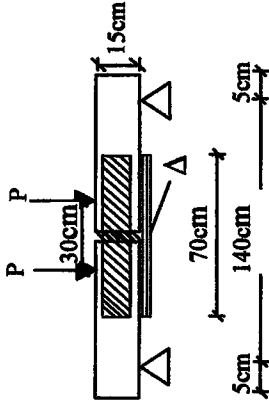
Şekil 3.8. K212 kirişi

Bantlı beton yapıştırıcılı kiriş modellerine uygulanan göçme yüklemeinden elde edilen veriler ve belirlenen göçme mekanizmasının oluşan adımları aşağıda sıralanmıştır.

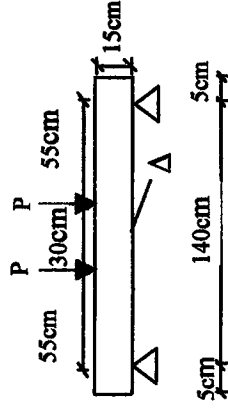
- Genel Davranış: Bu kirişlerin göçme yükü diğer kiriş modellerine göre düşük bir değere sahip olmakla birlikte gösterdiği sünük davranış kontrol modeli ile karşılaştırıldığında düşüktür. (Şekil 3.9). Bu modellerde gözleme dayalı olarak elde edilen diğer bir veri, karbon elyaf ile beraber ayrılan pas payı kısmının sistemin ani olarak çökmesine sebep olmasıdır. Çökme hareketi önce eğilme gerilmesine en fazla maruz kalan kirişin alt bölgesindeki karbon elyafı meydana gelmiş daha sonra da yan yüzeylerdeki elyafın kopmasıyla tamamlanmıştır. Karbon elyaf, betonun yüzeyini pas payından alarak betonu koparmıştır (Şekil 3.10). Bu esnada kiriş modelinin kırılması $100 \times 150 \times 750$



**BANTLI BETON YAPISTIRICILI
KIRIŞ MODELİ (O2)**



KONTROL KIRIŞI (K100)



Şekil 3.9. İkinci grup kiriş modellerinin yük-çökme değerleri ortalamalarının (O2), kontrol modeli (K100) ile karşılaştırılması

milimetrelık iki adet elemanın yapıştırıldıkları orta noktalarında değil, başka bir noktadan pas payıyla beraber betonun kopması sonucu meydana gelmiştir (şekil 3.11).

- Bantlı beton yapıştırıcılı kirişlerin, kontrol kirişinin 2P=20 kN'luk servis y¼k¼ altındaki ¼¼kmesi ortalama 7,6 mm.dir.

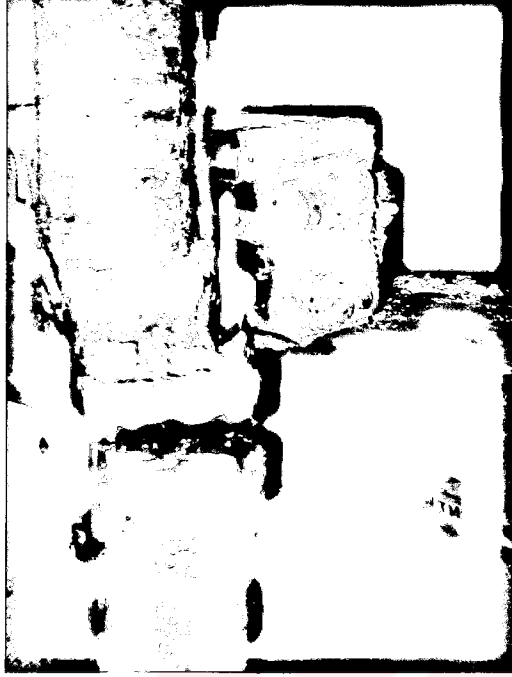
$$\frac{\text{G¼¼me deplasmanı}}{\text{Servis deplasmanı}} = \frac{12,3}{7,6} = 1,62$$

$$\frac{\text{G¼¼me y¼k¼}}{\text{Servis y¼k¼}} = \frac{26,6}{20} = 1,33$$



şekil 3.10. Bantlı beton yapıştırıcılı kiriş modellerinin tipik g¼¼me şekli

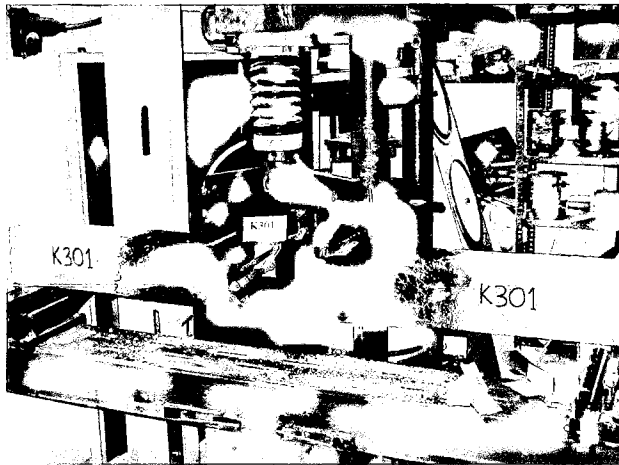
İkinci grup kiriş modellerinde ¼¼ekmeye karşı b¼y¼k bir mukavemete sahip olan karbon elyaf bant, kirişin basın¼ bölgesine konulmamıştır. Bu grup kirişlerin basın¼ b¼lgelerinde eğilmeye bağlı olarak ezilmeler g¼zlemlenmiřtir.



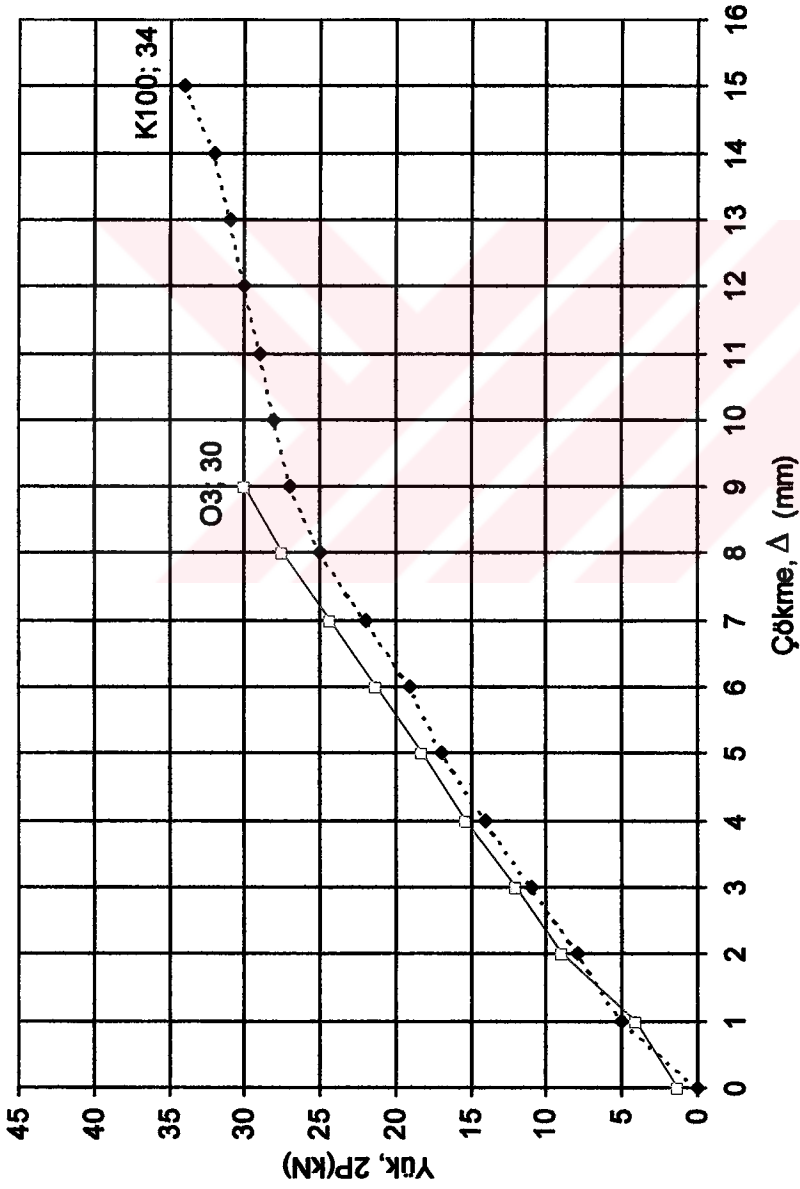
Şekil 3.11. Kırılma bölgesi

3.2.5. Bohçalı Beton Yapıştırıcısız Kirişler (C16)

Kiriş modeli oluşturmak üzere 2 adet C16 kalitesindeki 100x150x750mm lik eleman birimi beton yapıştırıcısı kullanılmadan uç uca eklenerek , bohçalama sistemi ile yapıştırılmıştır (Şekil 3.12). Bu gruptaki kirişlerden (K301, K302, K303) elde edilen sonuçlar kontrol kiriş modeli ile karşılaştırılmıştır. Bohçalı beton yapıştırıcısız kiriş modellerinin göçme yükleri ortalama $2P=30$ kN'dur. Orta noktada tespit edilen çökme hareketi ortalama 9 mm.dir (Şekil 3.13).

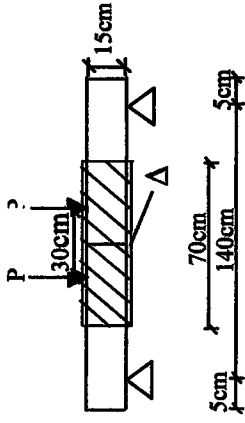


Şekil 3.12. K301 kirişi

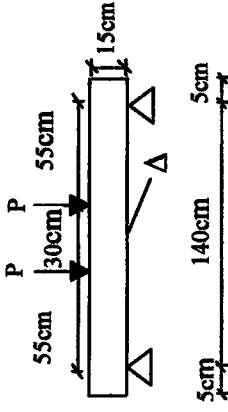


---◆--- K100
—□— O3

BOHÇALI BETON YAPISTIRICISIZ
KİRİŞ MODELİ (O3)



KONTROL KİRİŞİ (K100)



Şekil 3.13. Üçüncü grup kiriş modellerinin yük-çökme değerleri ortalamalarının (O3), kontrol modeli (K100) ile karşılaştırılması

Üçüncü grup deney kiriş modellerine uygulanan göçme yüklemesinden elde edilen veriler ve belirlenen göçme mekanizmasının oluşan adımları aşağıda sıralanmıştır.

- Genel Davranış: Üçüncü grup kirişler kontrol modeline göre yük altında en gevrek davranışı gösteren kiriş modellerinden biridir. Bu grup göçme yükü açısından oldukça iyi bir performans göstermekle birlikte yaptığı çökme diğer kiriş grupları içinde en az olandır. Yük-çökme diyagramında elde edilen grafik hemen hemen lineer bir doğruya yakındır. Göçme hareketi kontrol modeli hariç diğer bütün modellerde olduğu gibi ani ve gevrek bir şekilde olmuştur. Bu esnada kirişte kırılma, karbon elyafın betonu pas payından koparmasıyla meydana gelmiştir (Şekil 3.14).
- Bohçalı beton yapıstırıcısız kirişlerin, kontrol kirişinin 2P=20 kN’luk servis yükü altındaki çökmesi ortalama 5,6 mm.dir.

$$\frac{\text{Göçme deplasmanı}}{\text{Servis deplasmanı}} = \frac{9}{5,6} = 1,61$$

$$\frac{\text{Göçme yükü}}{\text{Servis yükü}} = \frac{30}{20} = 1,5$$



Şekil 3.14. Bohçalı beton yapıstırıcısız kiriş modellerinin tipik göçme şekli

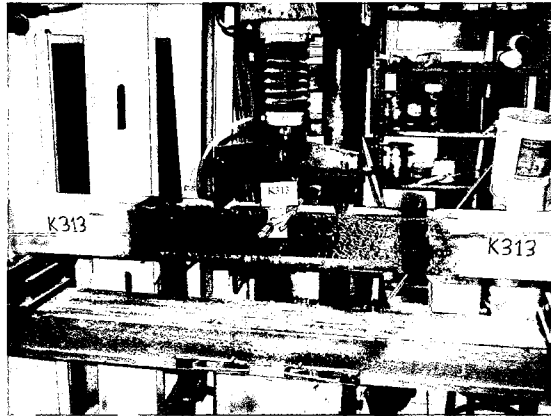
Ayrıca üçüncü grup kirişlerde kayma çatlağı da gözlemlenmiştir (Şekil 3.15).



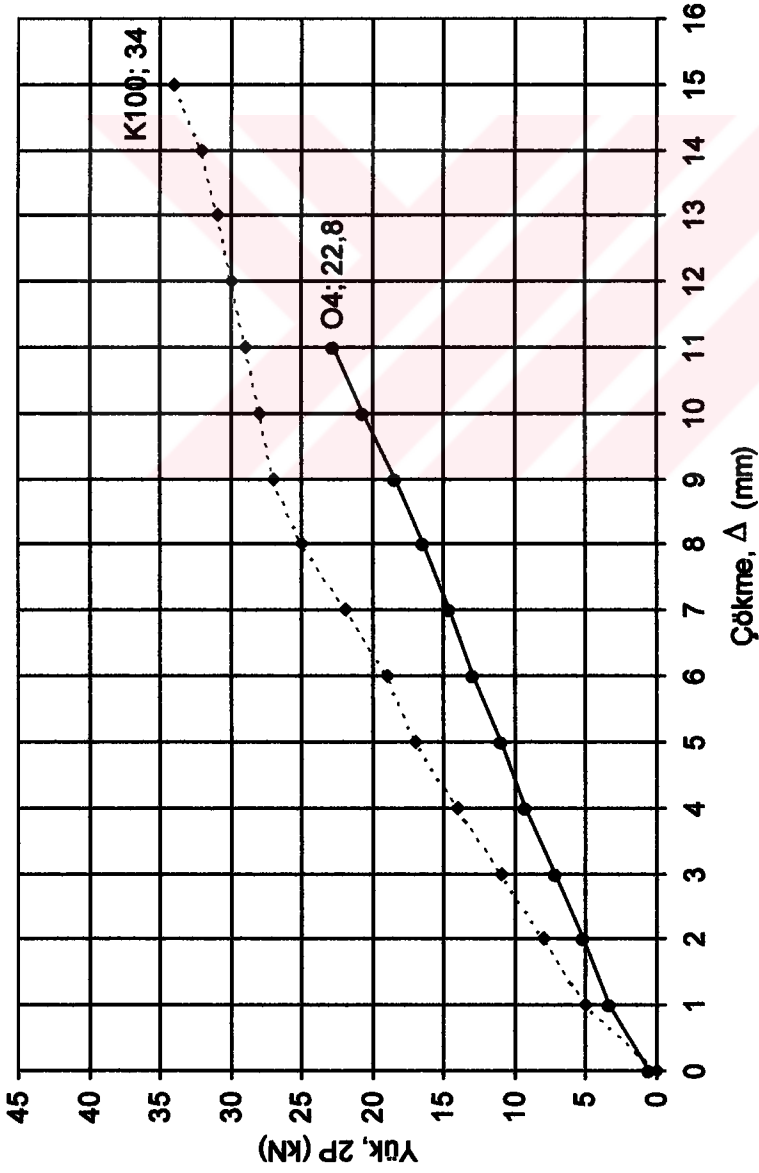
Şekil 3.15. Kayma çatlağı

3.2.6 Bantlı Beton Yapıştırıcısız Kirişler (C16)

Kiriş modeli oluşturmak üzere 2 adet C16 kalitesindeki 100x150x750mm.lik eleman birimi beton yapıştırıcısı kullanılmadan uç uca eklenerek, bant sistemi ile yapıştırılmıştır (Şekil 3.16). Bu gruptaki kirişlerden (K311, K312, K313) elde edilen sonuçlar kontrol kiriş modeli ile karşılaştırılmıştır. Bantlı beton yapıştırıcısız kiriş modellerinin göçme yükleri ortalama $2P=22,8$ kN'dur. Orta noktada tespit edilen çökme hareketi ortalama 11 mm.dir (Şekil 3.17).

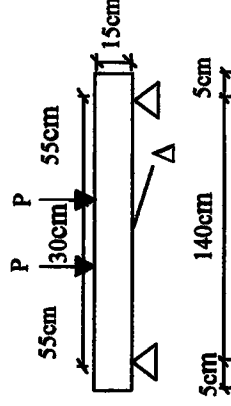
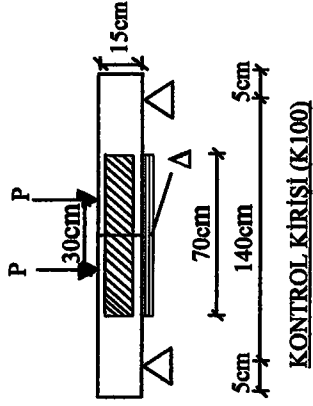


Şekil 3.16. K313 kirişi



---◆--- K100
 —●— O4

BANTLI BETON YAPISTIRICISIZ
KIRIŞ MODELİ (O4)



Şekil 3.17. Dördüncü grup kiriş modellerinin yük-çökme değerleri ortalamalarının (O4), kontrol modeli (K100) ile karşılaştırılması

Dördüncü grup deney kiriş modellerine uygulanan göçme yüklemesinden elde edilen veriler ve belirlenen göçme mekanizmasının oluşan adımları aşağıda sıralanmıştır.

- Genel Davranış: Dördüncü grup kirişler diğer kiriş gruplarına göre en düşük göçme yükü değerine sahip olan kirişlerdir. Bununla birlikte göçme yüküne kadar yaptığı çökme değeri diğer kiriş gruplarıyla karşılaştırıldığında ortalama bir değerdir. Gözleme dayalı olarak elde edilen diğer bir veri de iki adet elemandan oluşturulmuş kiriş modelinin kırılma bölgesinin kirişin tam orta noktasında oluşmasıdır (Şekil 3.18). Karbon elyafın kirişlerden kopması yine betonun elyafla beraber pas payı mesafesinden ayrılması sonucu meydana gelmiştir (şekil 3.19).
- Bantlı beton yapıştırıcısız kirişlerin, kontrol kirişinin 2P=20 kN'luk servis yükü altındaki çökmesi ortalama 9,6 mm.dir.

$$\frac{\text{Göçme deplasmanı}}{\text{Servis deplasmanı}} = \frac{11}{9,6} = 1,15$$

$$\frac{\text{Göçme yükü}}{\text{Servis yükü}} = \frac{22,8}{20} = 1,14$$



Şekil 3.18. Orta noktadaki kırılma



Şekil 3.19. Bantlı beton yapıştırıcısız kirişlerin tipik göçme şekli

3.2.7 Bohçalı Beton Yapıştırıcısız Kirişler (C30)

Kiriş modeli oluşturmak üzere 2 adet C30 beton kalitesindeki 100x150x750 mm.lik eleman birimi beton yapıştırıcısı kullanılmadan uç uca eklenerek , bohçalama sistemi ile yapıştırılmıştır. Bu gruptaki kirişlerden (K401, K402, K403) elde edilen sonuçlar C16 beton kalitesindeki kontrol kiriş modeli ile karşılaştırılmıştır. Beşinci grup kiriş modellerinin göçme yükleri ortalama $2P=40$ kN'dur. Orta noktada tespit edilen düşey yer değiştirme hareketi ortalama 11 mm.dir.

Beşinci grup deney kiriş modellerine uygulanan göçme yüklemeinden elde edilen veriler ve belirlenen göçme mekanizmasının oluşan adımları aşağıda sıralanmıştır.

- Genel Davranış: C30 kalitesindeki bohçalı beton yapıştırıcısız kirişler göçme yükü açısından en yüksek değere sahip olan kiriş grubudur. Beton kalitesi ilk dört kiriş grubuna göre yüksek olan bu grupta, oldukça sünek bir davranıştan bahsedilebilir. Yük-çökme eğrisi C16 beton kalitesindeki kontrol kirişinin üstünde olmasına rağmen, iki eğri arasında paralel bir gidişat vardır. Yüksek beton kaliteli bu kiriş grubunda da göçme değerine çok yakın bir değere kadar herhangi bir hasar gözlemlenmemiş, fakat yük göçme değerine ulaşınca

karbon elyafın yapıştığı beton yüzeyle birlikte kirişten koparak ani ve gevrek bir kırılmaya sebep olduğu görülmüştür (Şekil 3.20).

- Beşinci grup kirişlerin, kontrol kirişinin $2P=20$ kN'luk servis yükü altındaki çökmesi ortalama 3,8 mm.dir.

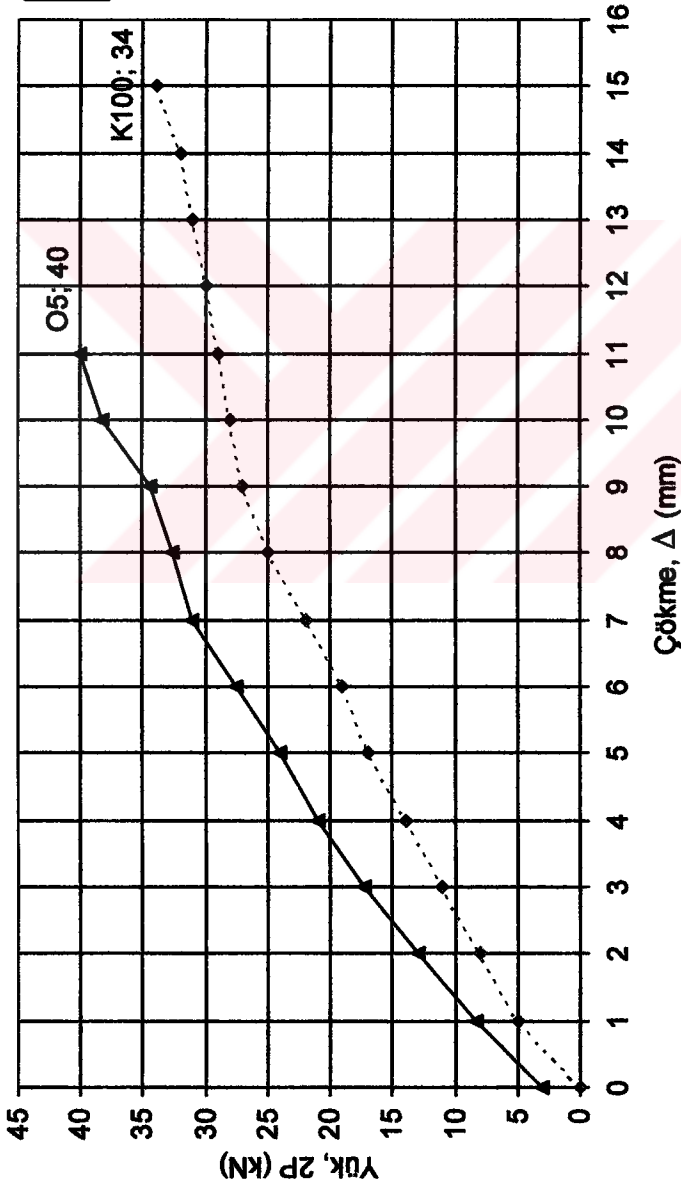
$$\frac{\text{Göçme deplasmanı}}{\text{Servis deplasmanı}} = \frac{11}{3,8} = 2,89$$

$$\frac{\text{Göçme yükü}}{\text{Servis yükü}} = \frac{40}{20} = 2$$



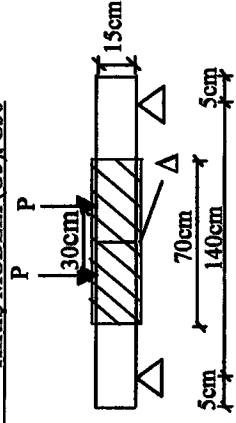
Şekil 3.20. K402 kirişi

Aşağıdaki şekilde beşinci grup kiriş modellerinin yük-çökme diyagramı verilmiştir (Şekil 3.21).

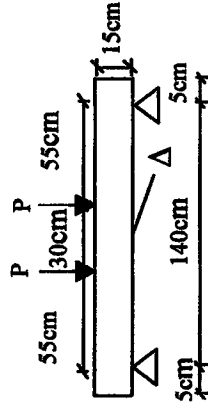


◆ K100
— O5

BOHÇALI BETON YAPISTIRICISIZ
KIRIŞ MODELİ (O5), C30



KONTROL KIRIŞI (K100), C16



Şekil 3.21. Beşinci grup kiriş modellerinin yük-çökme değerleri ortalamalarının (O5), kontrol modeli (K100) ile karşılaştırılması

3.2.8 Bantlı Beton Yapıştırıcısız Kirişler (C30)

Kiriş modeli oluşturmak üzere 2 adet C30 kalitesindeki 100x150x750 mm.lik eleman birimi beton yapıştırıcısı kullanılmadan uç uca eklenerek, bant sistemi ile yapıştırılmıştır. Bu gruptaki kirişlerden (K411, K412, K413) elde edilen sonuçlar C16 beton kalitesindeki kontrol kiriş modeli ile karşılaştırılmıştır. Altıncı grup kiriş modellerinin göçme yükleri ortalama $2P=26,5$ kN'dur. Orta noktada tespit edilen düşey yer değiştirme hareketi ortalama 11,3 mm.dir.

Altıncı grup deney kiriş modellerine uygulanan göçme yüklemesinden elde edilen veriler ve belirlenen göçme mekanizmasının oluşan adımları aşağıda sıralanmıştır.

- Genel Davranış: C30 kalitesindeki bantlı beton yapıştırıcısız kirişlerin yük-çökme eğrisi göçme yüküne kadar, kontrol modelinin aynı eğrisi ile neredeyse çakışmaktadır. Göçme yükü ortalamanın altında olan bu modelin kontrol modeli baz alındığında düşük bir süneklilik gösterdiği söylenebilir. Beton kalitesi ilk dört kiriş grubundan yüksek olan bu kirişlerin bir numunesinde karbon elyaf-epoksi yapışmasının yetersizliğinden dolayı betonarme yüzey ile arasında sıyrılma olayı gözlemlenmiştir (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. Sıyrılma

Karbon elyaf ile betonarme yüzey arasındaki yetersiz yapışmadan dolayı meydana gelen bu harekette, çekme bölgesindeki elyafın, uç bölgesi üzerinde sarılı bulunan karbon elyaf etriyeden kurtularak sıyrılma hareketinin başlangıcını oluşturduğu görülmüştür. Bu grup kirişlerde de göçme hareketi

ilk olarak çekme bölgesindeki elyafın betonarme yüzeyden ayrılmasıyla daha sonra da kirişin yan yüzeylerindeki elyaf bantların kopmasıyla meydana gelmiştir (Şekil 3.23).



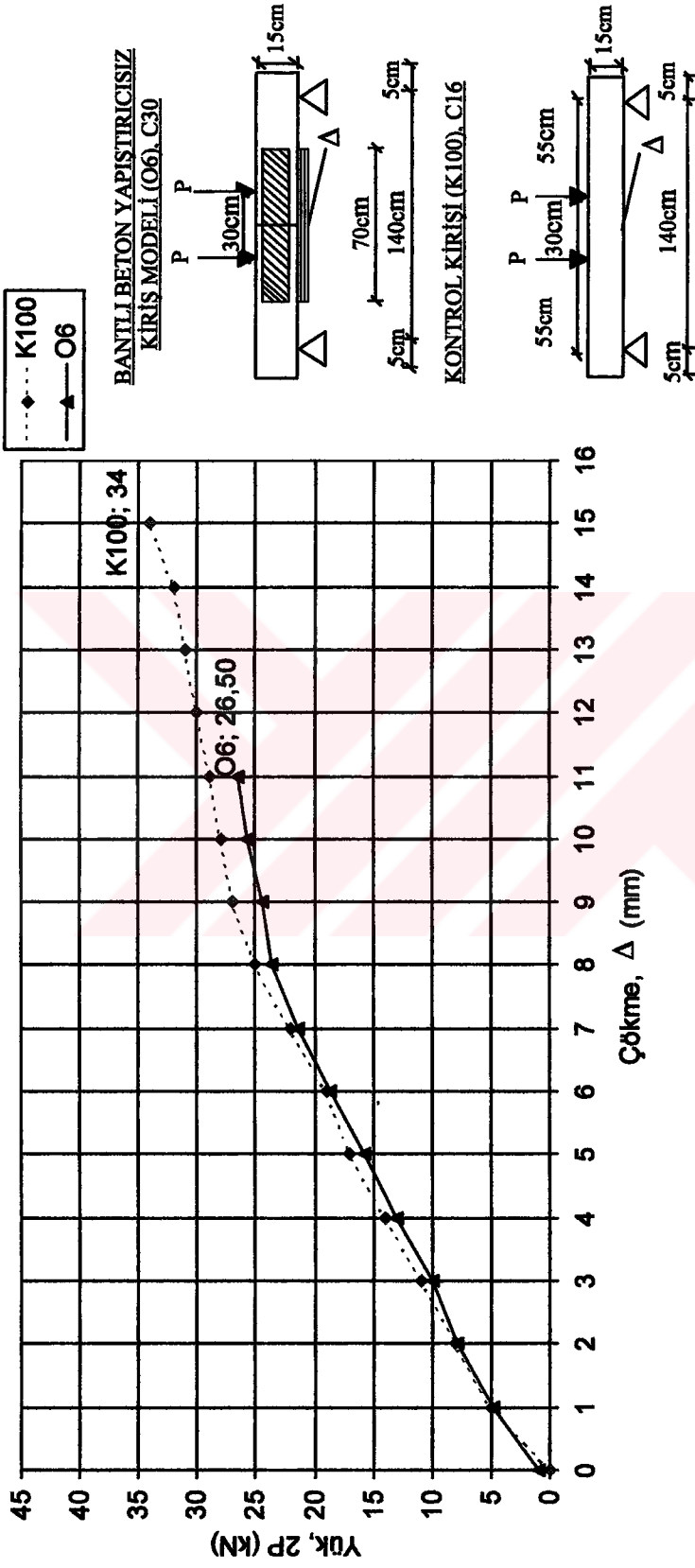
Şekil 3.23. C30 kalitesindeki bantlı beton yapıstırıcısız kirişlerin tipik göçme şekli

- Altıncı grup kirişlerin kontrol kirişinin 2P=20 kN'luk servis yükü altındaki çökmesi ortalama 6,5 mm.dir.

$$\frac{\text{Göçme deplasmanı}}{\text{Servis deplasmanı}} = \frac{11,3}{6,5} = 1,74$$

$$\frac{\text{Göçme yükü}}{\text{Servis yükü}} = \frac{26,5}{20} = 1,33$$

Şekil 3.24'de altıncı grup kiriş modellerinin yük-çökme diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.24. Altıncı grup kiriş modellerinin yük-çökme değerleri ortalamalarının (O6), kontrol modeli (K100) ile karşılaştırılması

3.3. Aderans Deneyi Sonuçları

Deneyisel çalışmalarda, yapıştırma birleşim kapsamındaki, beton, karbon elyaf, epoksi reçinesinin ve beton yapıştırıcısının birbirleri ile olan aderans değerlerini tespit etmek ve bu değerlere, yüzey pürüzlerinin olumlu veya olumsuz katkılarını saptamak amacıyla bir dizi deney yapılmıştır. 10cmx10cm ebatlarında kesilen karbon elyaf ilk önce 5cm çapındaki standart alüminyum başlığa sadece başlığın taban alanından epoksi ile yapıştırılmış, sonra yine aynı alan sınırları içinde betonarme yüzeye yapıştırılmıştır (Şekil 3.25). Epoksi tabakasının ve beton yapıştırıcısının ara yüzey yapışkan tabaka olarak yer aldığı, beton-karbon elyaf, beton-standart alüminyum başlık, çelik-standart alüminyum başlık (Şekil 3.26) ve bu elemanların birbirleriyle oluşturdukları birleşimlerin aderans değerleri, TS EN 12188 [23]'e uygun olarak çekme deneyi (Pull off test) ile belirlenmiştir.



Şekil 3.25. Aynı beton yüzeye epoksi ve beton yapıştırıcısı uygulanması

Yüzey temizlik ve pürüzlülüğünün aderansa etkisini tespit etmek için ise, betonarme yüzey; hazırlanmamış, basınçlı hava+tel fırça ile hazırlanmış ve pürüzlendirilmiş yüzey olmak üzere üç şekilde hazırlanmıştır.



Şekil 3.26. Epoksi ve beton yapıştırıcısı ile çelik-standart alüminyum başlık birleşimi

Tablo 3.2' de çelik-standart alüminyum başlık arasında uygulanan epoksi ve beton yapıştırıcısının kopma değerleri verilmiştir. Bu işlemden sonra beton yapıştırıcısının yüzeye düzgün olarak yayıldığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.27).

Tablo 3.2. Epoksi ve beton yapıştırıcısının çelik yüzey ile oluşturdıkları aderans değerleri

Yapıştırılan Yüzey	Yapıştırılan Malzeme	Ort. Kopma Değeri (N/mm ²)
Çelik	Epoksi	10,03
Çelik	Beton Yapıştırıcısı	2,59



Şekil 3.27. Beton yapıştırıcısının dağılım yüzeyi

Tablo 3.3'de epoksinin betonarme yüzey ile oluşturduğu aderans değerleri verilmiştir.

Tablo 3.3. Epoksinin betonarme yüzey ile oluşturduğu aderans değerleri

Yapıştırılan yüzey	Yapıştırılan yüzeyin koşulları	Ort. Kopma Değeri (N/mm ²)
Beton(1)	Hazırlanmamış betonarme yüzey	3,88
Beton(2)	Basıncılı hava ve tel fırça ile hazırlanmış yüzey	3,57
Beton(3)	Yüzey hazırlığı+pürüzlendirme	3,13

Bu deneyde standart alüminyum başlığın çekme işlemi sırasında betonu kopardığı gözlemlenmiştir (Şekil 3.28).



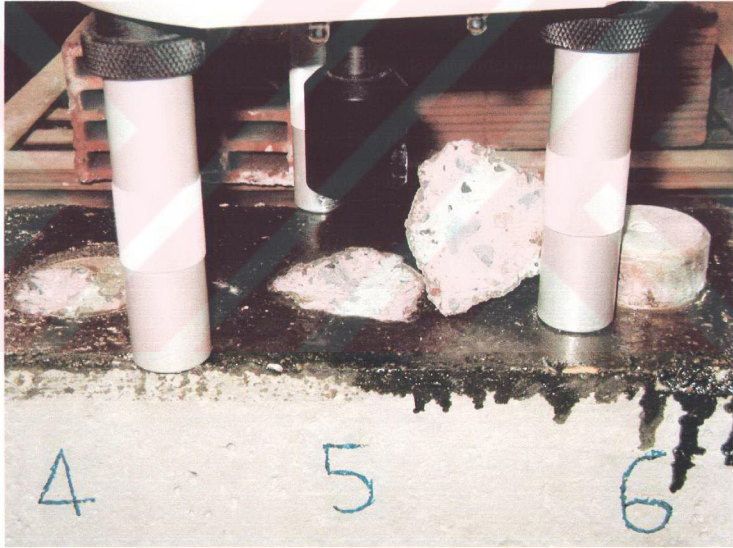
Şekil 3.28. Epoksi ile yapıştırılmış yüzey

Tablo 3.4'de beton yapıştırıcısının betonarme yüzey ile oluşturduğu aderans değerleri verilmiştir. Bu deney sonucunda da beton yapıştırıcısının aynı epoksi gibi yapıştırıldığı betonarme yüzeyden, betonu kopararak aldığı gözlemlenmiştir

(Şekil 3.29). Bu deneylerde görüldüğü üzere yüzey pürüzlendirildikçe aderans değerlerinde bir düşme görülmüştür.

Tablo 3.4. Beton yapıştırıcısının betonarme yüzey ile oluşturduğu aderans değerleri

Yapıştırılan yüzey	Yapıştırılan yüzeyin koşulları	Ort. Kopma Değeri (N/mm ²)
Beton(4)	Hazırlanmamış betonarme yüzey	3,09
Beton(5)	Basınçlı hava ve tel fırça ile hazırlanmış yüzey	2,76
Beton(6)	Yüzey hazırlığı+pürüzlendirme	2,57



Şekil 3.29. Beton yapıştırıcısı ile yapıştırılmış yüzey

SONUÇLAR

4.1. Genel

Bu tez çalışmasında karbon elyaf kullanılarak betonarme kirişlerde güçlendirmeye yönelik çalışmaların esasları ve özellikleri incelenmiş, konuya yönelik geniş bir kaynak taraması yapılmıştır. Beton yapıştırıcılı veya yapıştırıcısız eklenmiş 100x150x750 mm.lik betonarme elemanların, farklı sarım teknikleri ve beton kaliteleriyle altı grup modeli içerisinde karşılaştırmalı olarak ve 100x150x1500 mm.lik kontrol modeli baz alınarak, ek yerinin eğilme davranışı incelenmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen verilere göre karbon elyaf ile takviyeli kirişler üzerinde sarım tekniğinin, beton yapıştırıcısının, beton kalitesinin ve yapışma yüzeyinin kirişin yük altındaki davranışına ait etkileri çıkarılmıştır. Bütün kiriş gruplarının kontrol modeli baz alındığında elde edilen süneklik (μ) ve taşıma gücü oranları (f) (4.1) bağıntısından hesaplanmıştır.

$$\mu = \frac{\text{Göçme deplasmanı}}{\text{Servis deplasmanı}} \quad f = \frac{\text{Göçme yükü}}{\text{Servis yükü}} \quad (4.1)$$

Hesaplanan μ ve f değerleri aşağıdaki tabloda verilmiştir (Tablo 4.1).

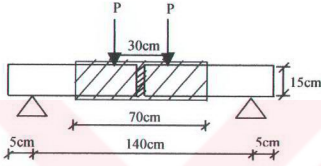
Tablo 4.1. Bütün grupların süneklik ve taşıma gücü oranları

	μ	f
Kontrol Modeli(C16)	2,42	1,7
Birinci Grup(C16)	2,3	1,6
İkinci Grup(C16)	1,62	1,33
Üçüncü Grup(C16)	1,61	1,5
Dördüncü Grup(C16)	1,15	1,14
Beşinci Grup(C30)	2,89	2
Altıncı Grup(C30)	1,74	1,33

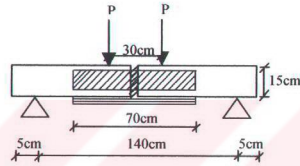
Elde edilen verilere göre C16 beton kalitesine sahip gruplar içinde kontrol modeline en yakın davranışı, ek yerlerinden beton yapıştırıcısı ile birleştirilen ve bohçalı sistem ile sarılan, birinci grup kirişler göstermiştir.

4.2. Sarım Tekniğinin Etkisi

Bu bölümde ek yerlerinden beton yapıştırıcılı veya yapıştırıcısız birleştirilen kirişlerin bohçalı ve bant sistemindeki performansları karşılaştırılmıştır. Beton yapıştırıcısı uygulanarak birleştirilen aynı beton kalitesi olan C16'ya sahip birinci ve ikinci grup kiriş modellerinin tek farkı sarım teknikleridir (Şekil 4.1, 4.2).

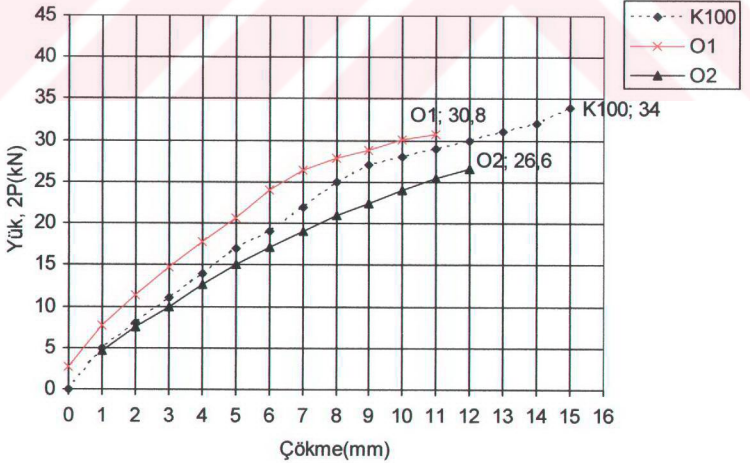


Şekil 4.1. Bohçalı sistem birinci grup



Şekil 4.2. Bantlı sistem ikinci grup

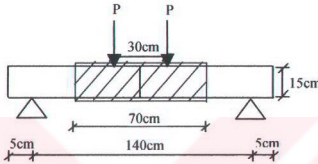
Birinci grup kirişler bohça sistemi ile, ikinci grup kirişlerde bant sistemi ile sarılmışlardır. Şekil 4.3'de iki sistemin yük altındaki çökme değerleri karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



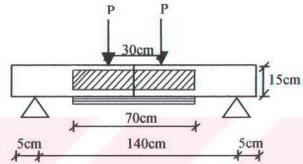
Şekil 4.3. Birinci ve ikinci grup kirişlerin karşılaştırılması

Yukarıdaki grafikte O1 ile gösterilen eğri bohçalı sistemli birinci grubu, O2 ile gösterilen eğri de bant sistemli ikinci grubu temsil etmektedir. K100 ise kontrol modelidir. Bohçalı sistemle sarılan kirişlerin, bantlılara göre göçme yükleri yaklaşık olarak %14 daha fazladır. Bununla beraber bantlı sistemli kirişler göçme yükü altında bohçalı sisteme göre %8 daha fazla çökme yapmıştır.

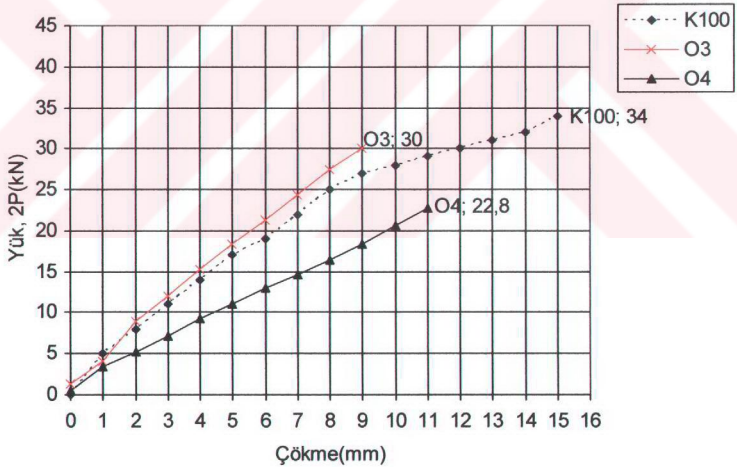
Beton yapıştırıcısı uygulanmadan eklenen bohçalı üçüncü grup kirişler ile bantlı dördüncü grup kirişlerde (Şekil 4.4, 4.5) elde edilen karşılaştırmalı diyagram Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.4. Bohçalı sistem üçüncü grup



Şekil 4.5. Bantlı sistem dördüncü grup



Şekil 4.6. Üçüncü ve dördüncü grup kirişlerin karşılaştırılması

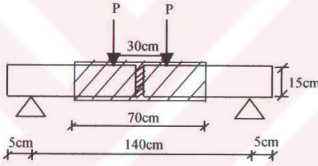
Yukarıdaki grafikte O3 ile gösterilen eğri bohçalı sistemli üçüncü grubu, O4 ile gösterilen eğri de bant sistemli dördüncü grubu temsil etmektedir. K100 ise kontrol modelidir. Bohçalı sistemle sarılan kirişlerin, bantlılara göre göçme yükleri yaklaşık

olarak %24 daha fazladır. Bununla beraber bantlı sistemli kirişler göçme yükü altında boğçalı sisteme göre %18 daha fazla çökme yapmıştır.

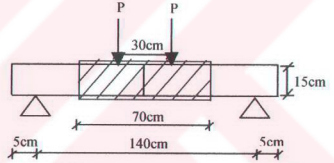
Sonuç olarak kirişin eğilmeye karşı mukavemetini arttırması açısından boğçalı sistem bantlı sisteme göre daha iyi bir performans göstermiştir. Ancak bantlı sisteme göre fazla elyaf kullanılarak rijit bir sarım tekniğinin uygulandığı boğçalı sistemde, kirişler göçme yükü altında daha az çökme yapmışlardır. Dolayısıyla kirişlerde karbon elyaf miktarı ve kalınlığı arttıkça esnek davranış azalmaktadır.

4.3. Beton Yapıştırıcısının Etkisi

Bu bölümde kirişlerin ek yerlerinde kullanılan beton yapıştırıcısının, yük altındaki kirişlerin taşıma gücü performanslarına etkisi incelenmiştir. Aynı beton kalitesine sahip (C16), boğçalı sistem uygulanan birinci ve üçüncü grup kirişlerin tek farkı ek yerlerinde beton yapıştırıcısı kullanılıp kullanılmamasıdır (Şekil 4.7, 4.8).

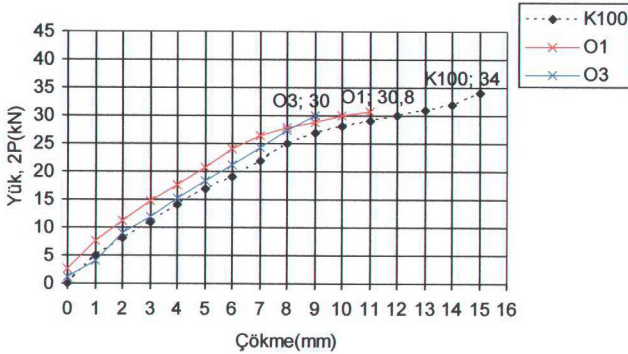


Şekil 4.7. Beton yapıştırıcılı birinci grup



Şekil 4.8. Beton yapıştırıcısız üçüncü grup

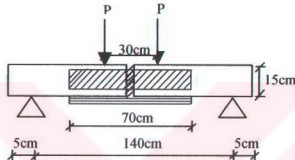
İki grubun yük altındaki çökme diyagramları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.9'da verilmiştir.



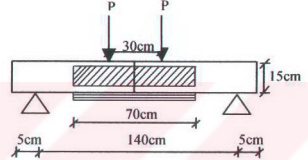
Şekil 4.9. Birinci ve üçüncü grup kirişlerin karşılaştırılması

Şekil 4.9'da O1 ile gösterilen eğri beton yapıştırıcısı kullanılan birinci grubu, O3 ile gösterilen eğri de beton yapıştırıcısı kullanılmayan üçüncü grubu temsil etmektedir. K100 ise kontrol modelidir. Beton yapıştırıcısı kullanılan birinci grup kirişler, yapıştırıcı kullanılmayan üçüncü grup kirişlere göre yaklaşık %2,5 daha fazla göçme yüküne sahiptir. Ayrıca yine birinci grup kirişlerin üçüncü gruba göre göçme yükü altında %25 daha fazla çökme yaptıkları gözlenmiştir.

Aynı beton kalitesine sahip (C16), bantlı sistem uygulanan ikinci ve dördüncü grup kirişlerin de tek farkı ek yerlerinde beton yapıştırıcısı kullanılıp kullanılmamasıdır (Şekil 4.10, 4.11).

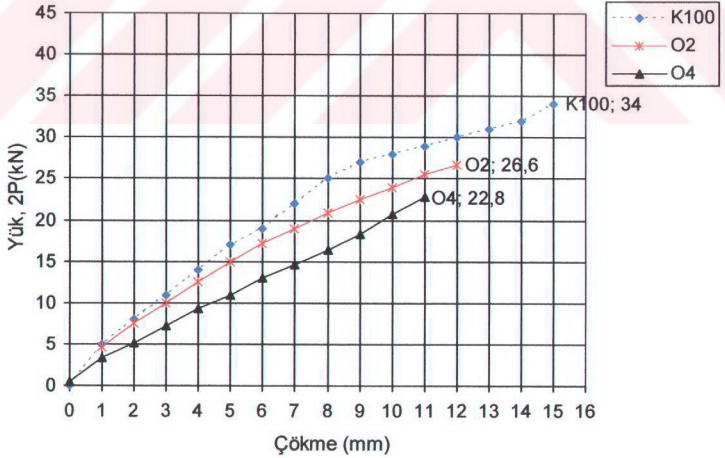


Şekil 4.10. Beton yapıştırıcılı ikinci grup



Şekil 4.11. Beton yapıştırıcısız dördüncü grup

İki grubun yük altındaki çökme diyagramları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.12'de verilmiştir.



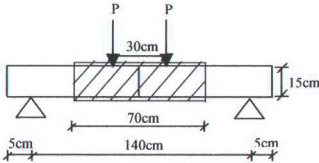
Şekil 4.12. İkinci ve dördüncü grup kirişlerin karşılaştırılması

Şekil 4.12’de O2 ile gösterilen eğri beton yapıştırıcısı kullanılan ikinci grubu, O3 ile gösterilen eğri de beton yapıştırıcısı kullanılmayan dördüncü grubu temsil etmektedir. K100 ise kontrol modelidir. Beton yapıştırıcısı kullanılan ikinci grup kirişler, yapıştırıcı kullanılmayan dördüncü grup kirişlere göre yaklaşık %14 daha fazla göçme yüküne sahiptir. Ayrıca yine ikinci grup kirişlerin dördüncü gruba göre göçme yükü altında %11 daha fazla çökme yaptıkları gözlenmiştir.

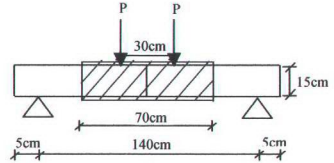
Sonuç olarak aynı beton kalitesine ve sarım tekniğine sahip, sadece ek yerlerinde beton yapıştırıcısı kullanılıp kullanılmama değişkenine bağlı olan kirişlerde yapıştırıcının olumlu etkisi gözlemlenmiştir. Beton yapıştırıcılı bohçalı kirişlerde yapıştırıcısız olana göre, göçme yükü değerinde az bir artış (%2,5) olmasına rağmen çökme değerinde büyük bir artış (%25) olmuştur. Bu sistemde göçme yükü değerinin artmasının az olması, bohçalı sistemin oldukça rijit bir sarım tekniği olmasından ve göçme yükü altında oluşan gerilmelerin çoğunun bu sistem tarafından karşılanmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla rijit bir karbon elyaf sarımına sahip kirişlerde beton yapıştırıcısının göçme yüküne fazla bir etkisi olmamakla birlikte, elemanlar arasındaki gerilmeleri beton yüzeyine ve oradan da donatılara yayarak kirişin tek parça halinde sünek davranışına büyük bir katkısı vardır. Yine bantlı sistemlerde de beton yapıştırıcısı uygulanan kirişlerde hem göçme yükü hem de çökme değeri açısından yaklaşık olarak eşdeğer oranlarda artmalar gözlemlenmiştir (%14, %11). Bantlı sistemde beton yapıştırıcılı kirişlerde göçme yükü ve çökme değerlerinin eşdeğer olarak artması bu sistemin bohçalı sisteme göre daha zayıf olmasından kaynaklanmaktadır. Bu sistemde beton yapıştırıcısı da göçme yükü altında bir miktar direnç göstermekte ve elemanlar arasındaki gerilmeleri kirişe yayarak kirişin bir bütün olarak çalışmasının sağlamaktadır.

4.4. Beton Kalitesinin Etkisi

Bu bölümde beton kalitesinin, kiriş ek yerlerinde ve sarım tekniklerinde aynı özelliklere sahip kirişlerde, yük altında taşıma gücü performanslarına etkisi incelenmiştir. Ek yerlerinde aynı özelliklere sahip, bohçalı sistem uygulanan üçüncü ve beşinci grup kirişlerin tek farkı beton kalitelerinin farklı olmasıdır. Üçüncü grup kirişler C16 beton kalitesinde, beşinci grup kirişler de C30 beton kalitesindedir. (Şekil 4.13, 4.14).

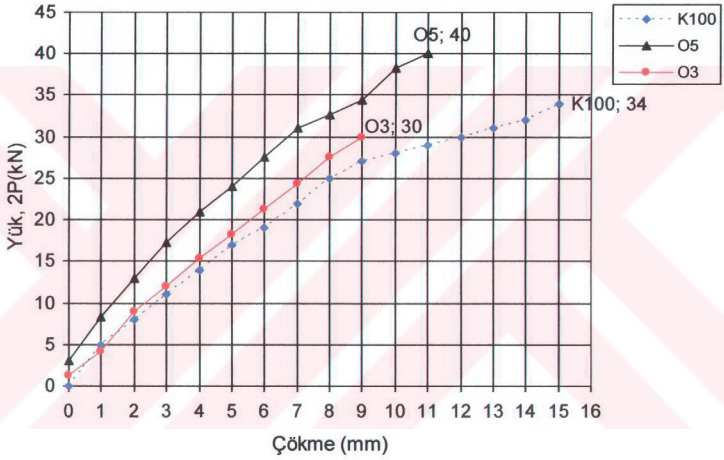


Şekil 4.13. Üçüncü grup, C16



Şekil 4.14. Dördüncü grup, C30

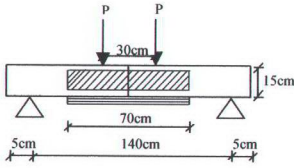
İki grubun yük altındaki çökme diyagramları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.15’de verilmiştir.



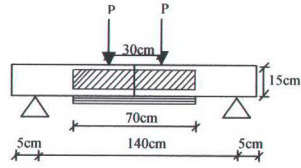
Şekil 4.15. Üçüncü ve beşinci grup kirişlerin karşılaştırılması

Şekil 4.15’de O3 ile gösterilen eğri beton kalitesi C16 olan bohçalı sistemli üçüncü grubu, O5 ile gösterilen eğri de beton kalitesi C30 olan bohçalı sistemli beşinci grubu temsil etmektedir. K100 ise beton kalitesi C16 olan kontrol modelidir. Beton kalitesi C30 olan beşinci grup kirişler, beton kalitesi C16 olan üçüncü grup kirişlere göre yaklaşık %25 daha fazla göçme yüküne sahiptir. Ayrıca yine beşinci grup kirişlerin üçüncü gruba göre göçme yükü altında %20 daha fazla çökme yaptıkları gözlenmiştir.

Ek yerlerinde aynı özelliklere sahip, bantlı sistem uygulanan dördüncü ve altıncı grup kirişlerin de tek farkı beton kaliteleridir (Şekil 4.16, 4.17).

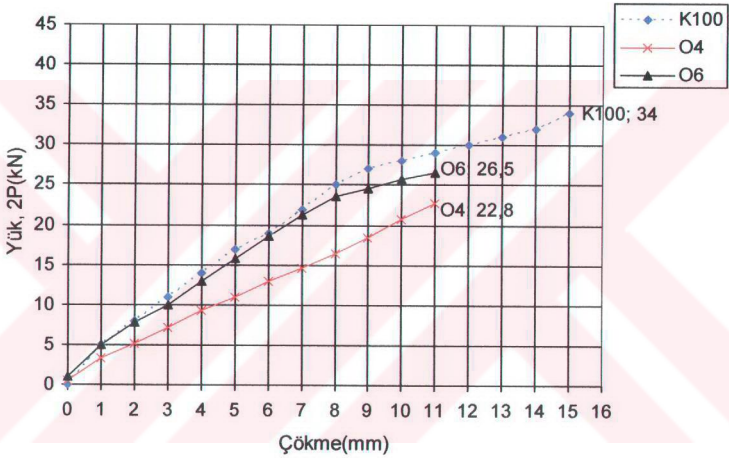


Şekil 4.16. Dördüncü grup, C16



Şekil 4.17. Altıncı grup, C30

İki grubun yük altındaki çökme diyagramları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18. Dördüncü ve altıncı grup kirişlerin karşılaştırılması

Şekil 4.18’de O4 ile gösterilen eğri beton kalitesi C16 olan bantlı sistemli dördüncü grubu, O6 ile gösterilen eğri de beton kalitesi C30 olan bantlı sistemli altıncı grubu temsil etmektedir. K100 ise beton kalitesi C16 olan kontrol modelidir. Beton kalitesi C30 olan altıncı grup kirişler, beton kalitesi C16 olan dördüncü grup kirişlere göre yaklaşık %14 daha fazla göçme yüküne sahiptir. Altıncı grup kirişlerin ile dördüncü grup kirişler arasında göçme yükü altında herhangi bir çökme farkı gözlenmemiştir.

Sonuç olarak beton kalitesinin artmasının karbon elyaf kullanımına olumlu bir etkisi olduğu görülmüştür. Kiriş modellerinde göçme yükü altında kırılmalar, karbon elyafın betonu pas payından koparmasıyla oluşmuştur. Beton kalitesi ne kadar fazla

olursa betonun kopması da o nispette zor olacağı için beton sınıfının yüksek olması kirişlerin göçme yükünü ve performansını arttırmıştır.

4.5. Sonuçların değerlendirilmesi

Deneyisel çalışmalar kapsamında bölüm sonlarında verilen ara değerlendirmelere ek olarak bu yöntem ile gerçekleştirilen birleşimlerden elde edilen veriler aşağıda özetlenmiştir:

- Karbon elyaf kullanılarak betonarme elemanlarda güçlendirmeye yönelik çalışmaların esasları ve özellikleri incelenmiş, konuya yönelik geniş bir kaynak taraması yapılmıştır.
- Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerdeki bağlantılar, karbon elyafla oluşturulacak güçlendirmelerin, bu tür durumlarda verimli bir şekilde kullanılabileceğini doğrulamaktadır.
- Bantlı sistemlerde deney düzeneği gereği seçilen yükleme durumlarına bağlı olarak oluşan çekme bölgeleri karbon elyaf bantlarla güçlendirilmiştir. Deprem etkisi benzeri tersinir yük durumlarında seçilen yapıştırma bölgelerinin karşılarına/karşı taraflarına da karbon elyaf bant yapıştırılması gereği açıktır.
- Karbon elyaf ile takviye edilmiş kirişlerin esnek davranışları elyaf kalınlığı ile ters orantılıdır.
- Esnek epoksi sistemi sayesinde yapışkan tabaka, göçme mekanizmasının son adımı kadar çatlamamaktadır. Bu özelliği, hem beton ile çelik arasında gerilme transferi sağlayarak sistemin göçmesini geciktirmekte, hem de kompozit sistemin yapısal direncine katkı sağlamaktadır.
- Uygun epoksi sistemi kullanılarak ve önerilen işlem kriterlerine bağlı kalarak yapılan her uygulamada potansiyel göçme davranışı kesinlikle beton yapıştırıcısı ile yapıştırılan tabakadan başlamamaktadır. Göçme mekanizması yüksek oranda pas payı bölgesinin mukavemetine ve donatı çeliği ile var olan aderans seviyesine bağlıdır.
- Göçme mekanizmasının pas payı bölgesinden başladığı düşünülerek bu tür sistemlerde pas payı mesafesinin düşük tutulması önerilebilir.
- İki tür betonarme deney örneğinin, epoksi reçinesi ile yapıştırılmış karbon elyafla birleştirilmesi ile üretilen ideal kiriş modelleri, yük altında kompozit

davranış göstermişler, eğilme ve çekme taşıma gücü değerlerinde artış kaydedilmiştir.

- Yüzey hazırlamanın aderans değerine etkisi; her türlü yapıştırma işleminde olduğu gibi, bu uygulama şeklinde de yüzey temizliği (yüzeyi toz, nem ve zayıf parçalardan arındırma işlemi) yapmanın aderansa olumlu etkisi tespit edilmiştir.
- Karbon elyaf yüzey özelliklerinin etkisi; yüzeyine epoksi boyası ile astar uygulanan karbon elyaf parçalar, standart alüminyum başlıklardan elde edilen aderans değerlerinin en fazla %35'ine ulaşmışlardır. Kopma şekillerinin tümü pas payı kısmının kopması şeklinde oluşmuştur.
- Pürüzlendirmenin aderansa etkisi; bu tür yapıştırma şeklinde mekanik yapışma teorisi geçerli olmamıştır. Bunun nedeni epoksi reçinesinin pürüzlü yüzeyin her noktasını tam olarak ıslatamamasıdır. Bu sonucun belirtisi, düz yüzeyden elde edilen aderans değerlerinin yüksek olmasıdır.
- Yapılan güçlendirmenin performansı kullanılan malzeme ve yapıştırıcılara da doğrudan bağlıdır.
- Elyaf bantların çeşitli düzenlemeleriyle kullanılan malzemenin optimizasyonunun araştırılması mümkün ve gerekli görülmektedir.
- Bu çalışmada elde edilen veriler varılan temel sonuçlardan; doğru şekilde uygulanan bağlama-yapıştırma sisteminin, normal şartlarda güvenilir ve dengeli sonuç sağlaması, taşıyıcılık bütünlüğünü kontrol altında tutabilmesi, diğer bir deyişle, aynı malzemelerle aynı mukavemet ve boyuttaki betonarme elemanları, aynı işlem dizisi uygulanan bu teknik ile aynı performans ve sonuç elde edilebildiğini göstermektedir. Bu durum her yükleme seviyesinde basit mühendislik kuralları için veri oluşturabilir.

Sonuç olarak bu yöntem, uygulama kriterlerine bağlı kalındığında, betonarme taşıyıcı sistem güçlendirme ve birleştirme uygulamaları için malzeme, işlem ve ekipmanlar ile uygulanabilen yeterli ve etkili bir seçenektir.

KAYNAKLAR

- [1] **Faza, S.S. and Gangarao, H.V.S.,** 1994. Fiber Composite Wrap for Rehabilitation of Concrete Structures, Infrastructures: New Materials Engineering Conference, San Diego, CA, USA, September 1994.
- [2] **Faza, S.S. and Gangarao, H.V.S.,** 1994. Experimental and Theoretical Behavior of Hybrid Concrete-Carbon Rectangular Beams, CFC Report to Tonen Corporation, San Diego, CA, USA.
- [3] <http://www.new-technologies.org/ECT/Civil/frp.htm>
- [4] http://www.psrc.usm.edu/org/presentations/fiberplastics_files/frame.htm
- [5] **Malek, A.M., Saadatmanesh, H. and Ehsani, M.R.,** 1998. ACI Structural Journal, **95**.
- [6] **Ritchie, P.A., Thomas, D.A., Lu, L. and Connelly, G.M.,** 1992. ACI Structural Journal of Structural Engineering, **88**, 490-499.
- [7] **Sharif, A., Al-Sulaimani, G.J., Basunbul, A., Baluch, M.H. and Ghaleb, B.N.,** 1994. ACI Structural Journal of Structural Engineering, **91**, 160-167.
- [8] **Quantrill, R.J., Hollaway, L.C. and Thorne, A.M.,** 1996. Magazine of Concrete Research, **48**, 331-341.
- [9] **Saadatmanesh, H., Ehsani, M.R. and Jin, L.,** 1996. ACI Structural Journal, **93**.
- [10] **Ehsani, M.R., Saadatmanesh, H. and Al-Saidy, A.,** 1997. Journal of Composites for Construction, **1**, 17-25.
- [11] **Saadatmanesh, H., Ehsani, M.R. and Jin, L.,** 1997. ACI Structural Journal, **94**.
- [12] **Saadatmanesh, H., Ehsani, M.R. and Jin, L.,** 1997. Earthquake Spectra, **13**, 281-304.
- [13] **Norris, T., Saadatmanesh, H. and Ehsani, M.R.,** 1997. Journal of Structural Engineering, **123**, 903-911.
- [14] **Toutanji, H.A. and Gomez, W.,** 1997. Cement and Concrete Composites, **19**, 351-358.

- [15] Ehsani, M.R., Saadatmanesh, H. and Velazquez-Dimas, J.I., 1999. Journal of Composites for Construction, 3, 134-142.
- [16] Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H., 2003. Journal of Structural Engineering, 129, 30-40.
- [17] Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H., 2003. Journal of Structural Engineering, 129, 186-196.
- [18] Köse, M., 2002. Betonarme Yapı Elemanlarının Çelik Lamalarla Güçlendirilmesi ve Birleştirilmesi; Deneysel İnceleme, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] TS 3530, 1980. Beton Agregalarının Tane Büyüklüğü Dağılımının Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [20] TS 3526, 1980. Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [21] TS 3529, 1980. Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [22] TS 706, 1980. Beton Agregaları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [23] TS 708, 1996. Beton Çelik Çubukları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [24] TS EN 12188, 1999. Beton Yapılar - Koruma ve Tamir İçin Mamul ve Sistemler - Deney Metotları - Yapıda Kullanılan Yapıştırma Maddelerinin Özelliklerinin, Çeliğin Çeliğe Yapıştırılması Metoduyla Tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [25] TS 3068, 1978. Laboratuarda Beton Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Bakımı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Selim ÖKTEN 1978 yılında İstanbul'da doğdu. 1996 yılında Özel Tercüman Lisesi'nden mezun oldu. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı. 2000 yılında bu bölümden mezun olarak İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına başladı. 2000'de lisans üstü öğrenimine devam ederken, Mimar Sinan Üniversitesi Mimarlık fakültesi Yapı Mühendisliği Bilim Dalı'nın açmış olduğu araştırma görevlisi sınavını kazandı.

Halen aynı fakültenin Yapı Mühendisliği Bilim Dalı'nda araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.