

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

**BETON DAYANIMI DÜŞÜK BETONARME YAPI
ELEMANLARININ LİFLİ KOMPOZİTLERLE
GÜÇLENDİRİLMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Ali SARIBIYIK

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : YAPI MALZEMESİ
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Naci ÇAĞLAR

Eylül 2013

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

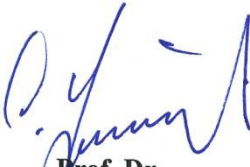
BETON DAYANIMI DÜŞÜK BETONARME YAPI
ELEMENLARININ LİFLİ KOMPOZİTLERLE
GÜÇLENDİRİLMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

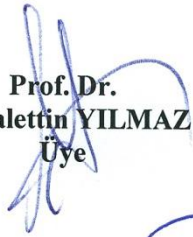
DOKTORA TEZİ

Ali SARIBIYIK

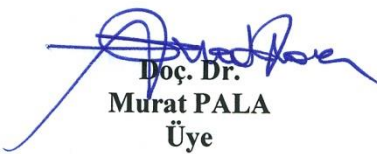
Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ


Bu tez 27/09/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Salih YAZICIOĞLU
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Kemalettin YILMAZ
Üye


Doç. Dr.
Naci ÇAĞLAR
Üye


Doç. Dr.
Murat PALA
Üye


Doç. Dr.
Metin İPEK
Üye

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca bana her türlü desteği veren danışman hocam sayın Doç. Dr. Naci ÇAĞLAR'a, doktora çalışmamın ilk yıllarında danışmanlığımı yürüten Yrd. Doç. Dr. Mansur SÜMER'e ve tez izleme komitesinde görev alan sayın Prof. Dr. Kemalettin YILMAZ'a, Doç. Dr. Metin İPEK'e, Doç. Dr. Ömer ÖZKAN'a, benden bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen Prof. Dr. Mehmet SARIBIYIK'a, tezin hazırlanmasında manevi desteklerini esirgemeyen bölüm hocalarıma ve mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu çalışmada sunulan araştırma sonuçlarının bir kısmı, BABK tarafından desteklenen "Betonarme Kirişlerin Güçlendirilmesinde Cam Elyaf ile Karbon Elyaf Malzemelerin Karşılaştırılması" başlıklı ve 2010-01-04-012 nolu proje kapsamında gerçekleşmiştir. BABK'a vermiş olduğu destek için şükranlarımı sunarım.

Hayatım boyunca bana desteğini esirgemeyen aileme ve tez döneminde bana en yakın desteği veren sevgili eşime teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LISTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xviii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. FRP Kompozitler	2
1.2. Betonarme Yapı Elemanlarının Güçlendirilmesinde FRP Uygulamaları	4
1.2.1. Kolonların güçlendirilmesinde FRP uygulamaları.....	6
1.2.2. Kolon-kiriş birleşim bölgelerinin güçlendirilmesinde FRP uygulamaları	7
1.2.3. Kirişlerin güçlendirilmesinde FRP uygulamaları.....	8
1.2.4. Döşemelerin güçlendirilmesinde FRP uygulamaları	9
1.2.5. Dolgu duvarların güçlendirilmesinde FRP uygulamaları.....	11
1.3. Literatür Taraması.....	12
1.3.1. FRP ile betonarme kolonların güçlendirilmesi.....	13
1.3.2. FRP ile betonarme kirişlerin güçlendirilmesi.....	17
1.4. Amaç ve Kapsam	27
1.5. Tezin İçeriği.....	28

BÖLÜM 2.

DENEY MALZEMELERİ.....	30
------------------------	----

2.1. Silindir Beton Malzemeleri.....	30
2.1.1. Agrega	30
2.1.2. Çimento	32
2.1.3. Su	32
2.2. Betonarme Kiriş Malzemeleri.....	33
2.2.1. Kiriş betonu	33
2.2.2. Kiriş donatısı	34
2.3. Onarım ve Güçlendirme Malzemeleri	35
2.3.1. Epoksi	36
2.3.2. Cam elyaf	37
2.3.3. Karbon elyaf	43
2.3.4. Tamir harcı	44
2.3.5. Enjeksiyon reçinesi	46

BÖLÜM 3.

DENEY DÜZENEKLERİ VE YÖNTEM	47
3.1. Silindir Betonların Üretimi	47
3.1.1. FRP kumaşlarla betonların güçlendirilmesi	48
3.2. Basınç Deney Düzeneği	50
3.3. Betonarme Kirişlerin Üretimi	52
3.3.1. FRP kumaşlarla kirişlerin güçlendirilmesi	56
3.4. Betonarme Kirişlerin Onarım ve Güçlendirilmesi.....	58
3.4.1. Çatlakların kapatılması.....	58
3.4.2. Kirişlerin epoksi enjeksiyonu ile onarımı	59
3.4.3. Onarılan kirişlerin GFRP ile güçlendirilmesi.....	60
3.5. Eğilme Deney Düzeneği	61
3.5.1. Eğilme deney takımları	61
3.5.2. Eğilme deney düzeneğinin hazırlanması.....	62

BÖLÜM 4.

DÜŞÜK DAYANIMLI BETONLARIN DAYANIM VE ŞEKİL DEĞİŞTİRME DAVRANIŞLARININ CFRP VE GFRP İLE GÜÇLENDİRİLEREK İYİLEŞTİRİLMESİ	65
---	----

4.1. Deneysel Çalışma	65
4.2. Basınç Deneyleri.....	66
4.2.1. Şahit betonların basınç deneyi.....	67
4.2.2. CFRP ve GFRP ile güçlendirilmiş betonların basınç deneyi	70
4.2.2.1. S1-CFRP1 betonların basınç deneyi	72
4.2.2.2. S1-GFRP1 betonların basınç deneyi.....	74
4.2.2.3. S1-GFRP2 betonların basınç deneyi.....	76
4.2.2.4. Seri 1 betonların karşılaştırılması	78
4.2.2.5. S2-CFRP1 betonların basınç deneyi	80
4.2.2.6. S2-GFRP1 betonların basınç deneyi.....	82
4.2.2.7. S2-GFRP2 betonların basınç deneyi.....	84
4.2.2.8. Seri 2 betonların karşılaştırılması	86
4.2.2.9. S3-CFRP1 betonların basınç deneyi	88
4.2.2.10. S3-GFRP1 betonların basınç deneyi.....	90
4.2.2.11. S3-GFRP2 betonların basınç deneyi.....	92
4.2.2.12. Seri 3 betonlarının karşılaştırılması	94
4.3. FRP Kompozitlerle Betonarme Kolonların Güçlendirilmesi.....	96

BÖLÜM 5.

EĞİLME YÜKÜ ETKİSİNDEKİ BETONARME YAPI ELEMANLARININ CFRP VE GFRP KULLANILARAK GÜÇLENDİRİLMESİ	99
5.1. Deneysel Çalışma	99
5.2. Eğilme Deneyleri	100
5.2.1. Şahit kiriş eğilme deneyi	101
5.2.1.1. Şahit kirişlerin süneklik oranları.....	103
5.2.1.2. Şahit kirişlerin enerji yutma kapasiteleri	104
5.2.2. CFRP11 kiriş eğilme deneyi	105
5.2.2.1. CFRP11 kirişlerinin süneklik oranları	107
5.2.2.2. CFRP11 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri.....	108
5.2.3. GFRP11 kiriş eğilme deneyi	108
5.2.3.1. GFRP11 kirişlerinin süneklik oranları.....	111
5.2.3.2. GFRP11 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri	111
5.2.4. GFRP21 kiriş eğilme deneyi	112

5.2.4.1. GFRP21 kirişlerinin süneklik oranları	114
5.2.4.2. GFRP21 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri	115
5.2.5. CFRP22 kirişi eğilme deneyi	115
5.2.5.1. CFRP22 kirişlerinin süneklik oranları	117
5.2.3.1. CFRP22 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri.....	118
5.2.6. GFRP22 kirişi eğilme deneyi	118
5.2.6.1. GFRP22 kirişlerinin süneklik oranları.....	121
5.2.6.2. GFRP22 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri	121
5.2.7. CFRP21-1 kirişi eğilme deneyi	122
5.2.7.1. CFRP21-1 kirişlerinin süneklik oranları.....	124
5.2.7.2. CFRP21-1 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri	125
5.2.8. GFRP21-1 kirişi eğilme deneyi.....	125
5.2.8.1. GFRP21-1 kirişlerinin süneklik oranları.....	127
5.2.3.1. GFRP21-1 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri	128
5.3. Sonuçların Karşılaştırılması.....	128
5.3.1. FRP11 ve GFRP21 kiriş deneylerinin karşılaştırılması	129
5.3.1.1. FRP11 ve GFRP21 kirişlerinin yük-sehim grafiklerinin karşılaştırılması.....	129
5.3.1.2. FRP11 ve GFRP21 kirişlerinin süneklik oranlarının karşılaştırılması.....	131
5.3.1.3. FRP11 ve GFRP21 kirişlerinin enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması.....	131
5.3.2. FRP22 kiriş deneylerinin karşılaştırılması	132
5.3.2.1. FRP22 kirişlerinin yük-sehim grafiklerinin karşılaştırılması.....	132
5.3.1.2. FRP22 kirişlerinin süneklik oranlarının karşılaştırılması.....	133
5.3.2.3. FRP22 kirişlerinin enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması.....	134
5.3.3. FRP21-1 kiriş deneylerinin karşılaştırılması.....	134
5.3.3.1. FRP21-1 kirişlerinin yük-sehim değerlerinin karşılaştırılması.....	135

5.3.3.2. FRP21-1 kirişlerinin süneklik oranlarının karşılaştırılması.....	136
5.3.3.3. FRP21-1 kirişlerinin enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması.....	136
5.3.4. CFRP ile kiriş güçlendirmede sargı etkileri	137
5.3.5. GFRP ile kiriş güçlendirmede sargı etkileri.....	138

BÖLÜM 6.

EĞİLME YÜKÜ ETKİSİNDEKİ HASARLI BETONARME YAPI ELEMANLARININ GFRP KULLANILARAK GÜÇLENDİRİLMESİ.....	140
6.1. GFRP22-O/G Kirişi Eğilme Deneyi.....	140
6.1.1. GFRP22-O/G kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri.....	143
6.1.2. GFRP22-O/G kirişlerinin süneklik oranları	143
6.2. GFRP22-O/G, FRP11 ve GFRP21 Kiriş Deneylerinin Karşılaştırılması.....	144
6.2.1. GFRP22-O/G, FRP11 ve FRP21 kirişlerinin yük-sehim grafiklerinin karşılaştırılması.....	144
6.2.2. GFRP22-O/G, FRP11 ve FRP21 kirişlerinin süneklik oranlarının karşılaştırılması.....	145
6.2.3. GFRP22-O/G, FRP11 ve FRP21 kirişlerinin enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması	146
6.3. GFRP22-O/G ile FRP22 Kiriş Deneylerinin Karşılaştırılması.....	147
6.3.1. GFRP22-O/G ile FRP22 kirişlerinin yük-sehim grafiklerinin karşılaştırılması.....	147
6.3.2. GFRP22-O/G ile FRP22 kirişlerinin süneklik oranlarının karşılaştırılması.....	148
6.3.3. GFRP22-O/G ile FRP22 kirişlerinin enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması.....	148
6.4. GFRP22-O/G ile FRP21-1 Kiriş Deneylerinin Karşılaştırılması	149
6.4.1. GFRP22-O/G ile FRP21-1 kirişlerinin yük-sehim değerlerinin karşılaştırılması.....	149
6.4.2. GFRP22-O/G ile FRP21-1 kirişlerinin süneklik oranlarının karşılaştırılması.....	150

6.4.3. GFRP22-O/G ile FRP21-1 kirişlerinin enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması	151
BÖLÜM 7.	
SONUÇ VE ÖNERİLER	152
7.1. Basınç Elemanlarının Güçlendirilmesi	152
7.2. Eğilme Elemanlarının Güçlendirilmesi	156
7.3. Eğilme Elemanlarının Onarım ve Güçlendirilmesi	158
KAYNAKLAR	161
ÖZGEÇMİŞ	165

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ε	: Birim şekil değiştirme
σ	: Eksenel basınç gerilmesi
Δu	: Kopma anındaki şekil değiştirme
Δy	: Akma anındaki şekil değiştirme
$\mu\Delta$: Süneklik
CFRP	: Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (Glass Fiber Reinforced Polymer-GFRP)
F_c	: Beton basınç dayanımı
FRP	: Elyaf Takviyeli Polimer (Fiber Reinforced Polymer-FRP)
F_{su}	: Çelik donatının kopma dayanımı
F_{sy}	: Çelik donatının akma dayanımı
GFRP	: Cam Elyaf Takviyeli Polimer (Carbon Fiber Reinforced Polymer-CFRP)
\emptyset	: Donatı çapı
TDY	: Türkiye Deprem Yönetmeliği
δ	: Orta nokta sehim

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Farklı elyafların gerilme-şekil değiştirmeleri	3
Şekil 1.2. Ibach Köprüsü CFRP plaka uygulaması	5
Şekil 1.3. Göksu Köprüsü güçlendirme çalışması	6
Şekil 1.4. FRP malzemenin kolonlarda uygulanması	7
Şekil 1.5. Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde FRP uygulaması	8
Şekil 1.6. FRP malzemenin kirişlerde uygulanması	9
Şekil 1.7. FRP malzemenin kiriş birleşim bölgesinde uygulanması	9
Şekil 1.8. FRP malzemenin döşemelerde uygulanması	10
Şekil 1.9. FRP malzemenin döşemelerde uygulanması	11
Şekil 1.10. FRP malzemenin dolgu duvarlara uygulanması	12
Şekil 2.1. Beton üretiminde kullanılan agregalar	31
Şekil 2.2. Agrega karışımının granülometri eğrisi	31
Şekil 2.3. Silindir betonların gerilme-şekil değiştirme grafikleri	34
Şekil 2.4. S420 çeliklerin gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	35
Şekil 2.5. Cam elyaf ham maddelerinin yüksek sıcaklıkta sıvı hale geçmesi.....	38
Şekil 2.6. Cam liflerin bobinlere sarılması işlemi.....	38
Şekil 2.7. Cam liflerin bobinlere sarıldıktan sonraki işlemleri	39
Şekil 2.8. Değişik amaçlar için üretilen cam elyaflar	41
Şekil 2.9. Tek yönlü fitil kumaş çeşitleri	41
Şekil 2.10. Karbon elyafı	43
Şekil 3.1. Betonlara başlık yapılması ve yüzey hazırlığı	49
Şekil 3.2. Beton yüzeylerine epoksi reçinenin sürülmesi	49
Şekil 3.3. Beton yüzeylerine sarılan kumaşların rulo ile doyurulması	50
Şekil 3.4. Basınç deneyi düzeneği.....	51
Şekil 3.5. Numune üretiminde kullanılan plywood kiriş kalıbı	52
Şekil 3.6. Enine donatıların hazırlanması	53
Şekil 3.7. Kiriş üretiminde kullanılan donatı şeması	53

Şekil 3.8. Çelik donatısı yerleştirilen kiriş kalıbı	54
Şekil 3.9. Betonarme kiriş betonu dökümü (Devamı).....	55
Şekil 3.10. Numunelerin kurutulması ve yüzey hazırlığı.....	56
Şekil 3.11. Kiriş yüzeylerine epoksi reçinenin sürülme işlemi	57
Şekil 3.12. Cam kumaşların kiriş yüzeyine yapıştırma işlemi	57
Şekil 3.13. Karbon kumaşların kiriş yüzeylerine yapıştırma işlemi	57
Şekil 3.14. Kiriş çatlaklarına enjeksiyon dübellerinin yerleştirilmesi	58
Şekil 3.15. Kiriş çatlaklarının tamir harcı ile kapatılması.....	59
Şekil 3.16. Kiriş çatlaklarının enjeksiyon reçinesi ile onarılması	60
Şekil 3.17. Onarım ve güçlendirilmesi tamamlanan GFRP2-O/G kirişleri	61
Şekil 3.18. Deney cihazları	62
Şekil 3.19. Eğilme çerçevesi deney düzeneği	63
Şekil 3.20. Enerji yutma kapasite hesabının şematik olarak gösterimi	64
Şekil 4. 1. Şahit numunelerin beton preste kırılması ve veri aktarımı	67
Şekil 4.2. S1 betonların gerilme-şekil değiştirme grafikleri	68
Şekil 4.3. S2 betonların gerilme-şekil değiştirme grafikleri	69
Şekil 4.4. S3 betonların gerilme-şekil değiştirme grafikleri	70
Şekil 4.5. Seri 1-2-3 betonlarından hazırlanan CFRP ve GFRP sargılı betonlar	71
Şekil 4.6. Basınç testine tabi tutulan CFRP ve GFRP sargılı beton numuneler.....	71
Şekil 4.7. CFRP ve GFRP sargılı beton numunelerin kırılma durumu	72
Şekil 4.8. S1-CFRP1 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri	73
Şekil 4.9. S1-GFRP1 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri	75
Şekil 4.10. S1-GFRP2 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri	77
Şekil 4.11. Seri 1 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri	79
Şekil 4.12. S2-CFRP1 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri	81
Şekil 4.13. S2-GFRP1 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri	83
Şekil 4.14. S2-GFRP2 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri	85
Şekil 4.15. Seri 2 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri	88
Şekil 4.16. S3-CFRP1 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri	89
Şekil 4.17. S3-GFRP1 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri	91
Şekil 4.18. S3-GFRP2 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri	93
Şekil 4.19. Seri 3 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri	96
Şekil 4.20. Üç eksenli gerilme etkisinde betonun davranışı	97

Şekil 4.21. Büyük sargı adımları nedeniyle betonarme kolonlarda oluşan hasarlar	98
Şekil 5.1. Şahit kiriş deney öncesi	102
Şekil 5.2. Şahit kiriş deney sonrası deformasyonları	102
Şekil 5.3. Şahit kirişlere ait yük-sehim grafikleri	103
Şekil 5.4. Yükleme öncesi CFRP11 kirişi.....	105
Şekil 5.5. Yükleme sonrası kiriş deformasyonları	106
Şekil 5.6. CFRP11 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri.....	107
Şekil 5.7. Yükleme öncesi GFRP11 kirişi	109
Şekil 5.8. Yükleme sonrası GFRP11 kirişi deformasyonu	109
Şekil 5.9. GFRP11 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri.....	110
Şekil 5.10. Yükleme öncesi GFRP21 kirişi	112
Şekil 5.11. Yükleme sonrası GFRP21 kirişi deformasyonlar	113
Şekil 5.12. GFRP21 kirişine ait yük-sehim grafikleri.....	114
Şekil 5.13. Yükleme öncesi CFRP22 kirişi.....	116
Şekil 5.14. Yükleme sonrası CFRP22 kirişi deformasyonu.....	116
Şekil 5.15. CFRP22 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri.....	117
Şekil 5.16. Yükleme öncesi GFRP22 kirişi	119
Şekil 5.17. Yükleme sonrası GFRP22 kirişi deformasyonlar	119
Şekil 5.18. GFRP22 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri.....	121
Şekil 5.19. Yükleme öncesi CFRP21-1 kirişi	123
Şekil 5.20. Yükleme sonrası CFRP21-1 kirişi deformasyonlar	123
Şekil 5.21. CFRP21-1 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri	124
Şekil 5.22. Yükleme öncesi GFRP21-1 kirişi	126
Şekil 5.23. Yükleme sonrası GFRP21-1 kirişi deformasyonlar	126
Şekil 5.24. GFRP21-1 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri	127
Şekil 5.25. FRP11 ve GFRP21 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri.....	130
Şekil 5.26. Şahit kiriş, FRP22 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri	133
Şekil 5.27. Şahit kiriş ve FRP21-1 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri	136
Şekil 5.28. Şahit kiriş ve CFRP ile güçlendirilen kirişlerin yük-sehim grafikleri ...	138
Şekil 5.29. Şahit kiriş ve GFRP ile güçlendirilen kirişlerin yük-sehim grafikleri ...	139
Şekil 6.1. Yükleme öncesi GFRP22-O/G kirişi	141
Şekil 6.2. Yükleme sonrası kiriş deformasyonu.....	141
Şekil 6.3. GFRP22-O/G kirişlerine ait yük-sehim grafikleri	142

Şekil 6.4. GFRP22-O/G, ŞK, FRP11 ve GFRP21 kirişlerine ait örnek yük-sehim grafikleri	145
Şekil 6.5. GFRP22-O/G, ŞK ve FRP22 kirişlerine ait örnek yük-sehim grafikleri .	148
Şekil 6.6. Şahit kiriş, GFRP22-O/G ve FRP21-1 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri	150

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Farklı türdeki elyafların özellikleri	2
Tablo 2.1. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri	32
Tablo 2.2. Sakarya Büyükşehir Belediyesi, SASKİ Genel Müdürlüğü'nce Maltepe İçme Suyu Raporu.....	33
Tablo 2.3. Silindir numunelerin 28 günlük basınç deneyi sonuçları.....	34
Tablo 2.4. S420 çeliğinin çekme deneyi sonuçları	35
Tablo 2.5. Sikadur 330 epoksi yapıştırıcısının özellikleri.....	37
Tablo 2.6. Cam elyafların mekanik ve fiziksel özellikleri ve katkı madde yüzdeleri	40
Tablo 2.7. Güçlendirmede kullanılan SikaWrap 430 G/25 malzemesinin özellikleri.....	42
Tablo 2.8. Güçlendirmede kullanılan SikaWrap 300 C/60malzemesinin özellikleri.....	44
Tablo 2.9. Sikadur 31 iki bileşenli tiksotropik epoksi yapıştırıcının özellikleri	45
Tablo 2.10. Sikadur 52 düşük viskoziteli enjeksiyon reçinesi	46
Tablo 3.1. 1 m ³ beton içerisindeki malzemelerin kg cinsinden miktarları.....	48
Tablo 4.1. Güçlendirme numunelerinin kısaltmaları	66
Tablo 4.2. S1 betonların basınç dayanımları ve şekil değiştirme kapasiteleri	68
Tablo 4.3. S2 betonların basınç dayanımları ve şekil değiştirme kapasiteleri	69
Tablo 4.4. S3 betonlarının basınç dayanımları ve şekil değiştirme kapasiteleri	70
Tablo 4.5. S1-CFRP1 betonların basınç gerilmesi ve şekil değiştirme kapasiteleri ..	74
Tablo 4.6. S1-GFRP1 betonların basınç gerilmesi ve şekil değiştirme kapasiteleri ..	76
Tablo 4.7. S1-GFRP2 betonların basınç gerilmesi ve şekil değiştirme kapasiteleri ..	78
Tablo 4.8. Seri 1 betonların ortalama gerilme-şekil değiştirme artış oranları.....	80
Tablo 4.9. S2-CFRP1 betonların basınç gerilmesi ve şekil değiştirme kapasiteleri ..	82
Tablo 4.10. S2-GFRP1 betonların basınç gerilmesi ve şekil değiştirme kapasiteleri	84

Tablo 4.11. S2-GFRP2 betonların basınç gerilmesi ve şekil değiştirme kapasiteleri	86
Tablo 4.12. Seri 2 betonların gerilme-şekil değiştirme artış oranları	87
Tablo 4.13. S3-CFRP1 betonların basınç gerilmesi ve şekil değiştirme kapasiteleri	90
Tablo 4.14. S3-GFRP1 betonların basınç gerilmesi ve şekil değiştirme kapasiteleri	92
Tablo 4.15. S3-GFRP2 betonların basınç gerilmesi ve şekil değiştirme kapasiteleri	94
Tablo 4.16. Seri 3 betonlarının gerilme-şekil değiştirme artış oranları	95
Tablo 5.1. Kiriş numune kodlama ve açıklamaları	100
Tablo 5.2. Şahit kirişlerine ait yük ve sehim değerleri	103
Tablo 5.3. Şahit kirişlerin süneklik oranları	104
Tablo 5.4. Şahit kirişlerin enerji yutma kapasiteleri	104
Tablo 5.5. CFRP11 kirişlerine ait yük ve sehim değerleri	106
Tablo 5.6. CFRP11 kirişlerin süneklik oranları	108
Tablo 5.7. CFRP11kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri.....	108
Tablo 5.8. GFRP11 kirişlerine ait yük ve sehim değerleri.....	110
Tablo 5.9. GFRP11 kirişlerin süneklik oranları	111
Tablo 5.10. GFRP11kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri	111
Tablo 5.11. GFRP21 kirişine ait yük ve sehim değerleri	113
Tablo 5.12. CFRP21 kirişlerin süneklik oranları	115
Tablo 5.13. GFRP21kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri	115
Tablo 5.14. CFRP22 kirişlerine ait yük ve sehim değerleri.....	117
Tablo 5.15. CFRP2 kirişlerin süneklik oranları	118
Tablo 5.16. CFRP22 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri.....	118
Tablo 5.17. GFRP22 kirişlerine ait yük ve sehim değerleri.....	120
Tablo 5.18. GFRP22 kirişlerin süneklik oranları	121
Tablo 5.19. GFRP22kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri	122
Tablo 5.20. CFRP21-1 kirişlerine ait yük ve sehim değerleri.....	124
Tablo 5.21. CFRP21-1 kirişlerin süneklik oranları	125
Tablo 5.22. CFRP21-1 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri	125
Tablo 5.23. GFRP21-1 kirişlerine ait yük ve sehim değerleri	127

Tablo 5.24. GFRP21-1 kirişlerin süneklik oranları.....	128
Tablo 5.25. GFRP21-1 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri	128
Tablo 5.26. Şahit kiriş, FRP11 ve GFRP21 kirişlerinin yük-sehim artışları.....	130
Tablo 5.27. FRP11 ve GFRP21 kirişlerinin karşılaştırmalı süneklik yüzdeleri.....	131
Tablo 5.28. FRP11 ve GFRP21 kirişlerinin karşılaştırmalı enerji yutma kapasite yüzdeleri	132
Tablo 5.29. FRP22 kirişlerinin yük-sehim artışları.....	133
Tablo 5.30. FRP22 kirişlerinin karşılaştırmalı süneklik yüzdeleri	134
Tablo 5.31. FRP22 kirişlerinin karşılaştırmalı enerji yutma kapasite yüzdeleri.....	134
Tablo 5.32. FRP21-1 kirişlerinin yük-sehim artışları	135
Tablo 5.33. FRP21-1 kirişlerinin karşılaştırmalı süneklik yüzdeleri	136
Tablo 5.34. FRP21-1 kirişlerinin karşılaştırmalı enerji yutma kapasite yüzdeleri...	137
Tablo 6.1. GFRP22-O/G kirişlerine ait yük ve sehim değerleri	142
Tablo 6.2. GFRP22 O/G kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri	143
Tablo 6.3. GFRP22 O/G kirişlerin süneklik oranları	143
Tablo 6.4. GFRP22-O/G kirişinin, ŞK, FRP11 ve GFRP21 kirişlerine göre yük- sehim artışları	145
Tablo 6.5. GFRP22-O/G kirişinin, ŞK, FRP11 ve FRP21 kirişlerine göre karşılaştırmalı süneklik yüzdeleri.....	146
Tablo 6.6. GFRP22-O/G, FRP11 ve GFRP21 kirişlerinin karşılaştırmalı enerji yutma kapasite yüzdeleri	146
Tablo 6.7. GFRP22-O/G kirişinin FRP22 kirişlerine göre yük-sehim artışları	147
Tablo 6.8. GFRP22-O/G ve FRP22 kirişlerinin karşılaştırmalı süneklik yüzdeleri	148
Tablo 6.9. FRP22 kirişlerinin karşılaştırmalı enerji yutma kapasite yüzdeleri.....	149
Tablo 6.10. FRP21-1 kirişlerinin yük-sehim artışları	150
Tablo 6.11. GFRP22-O/G ile FRP21-1 kirişlerinin karşılaştırmalı süneklik yüzdeleri	151
Tablo 6.12. GFRP22-O/G ile FRP21-1 kirişlerinin karşılaştırmalı enerji yutma kapasite yüzdeleri	151

ÖZET

Anahtar kelimeler: Düşük Dayanımlı Beton, Silindir Beton Numune, Betonarme Kiriş, CFRP, GFRP, Güçlendirme, Süneklik.

Son yıllarda yaşanan depremlerde oluşan can kayıpları ve hasarlar, mevcut yapı stokunun olası depremlere karşı yeterli güvenliğe sahip olmadığını ve güçlendirmeye gereksinim duyabileceklerini ortaya çıkarmıştır. Bu güçlendirme ihtiyacı, yapıların kullanım amacı ve servis yüklerinin değişmesi, projelendirme ve uygulama hataları, donatı yetersizliği, düşük dayanımlı beton kullanımı, depremlerin vermiş olduğu zararlar, yapının zamanla dayanıklılığını kaybetmesi ve mevcut standartlar ve yönetmeliklerdeki değişiklikler gibi nedenlerle oluşabilmektedir.

Bu çalışmada; Türkiye'deki mevcut yapılarda yaygın olarak karşılaşılan ve güçlendirilmeye ihtiyaç duyulan betonarme elemanlardaki düşük dayanımlı betonlar dikkate alınmış ve bu tür elemanların güçlendirilmesinde CFRP kompozitler yerine GFRP kompozitlerin etkin bir şekilde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, deneyler üç farklı modelde kurgulanmıştır. İlk deney modelinde, üç farklı basınç dayanımında üretilen deney numuneleri, ikinci deney modelinde C16/20 kalitesinde üretilen betonarme kirişler ve üçüncü deney modelinde ise laboratuvar ortamında eğilme ve kesme hasarına uğratılmış betonarme kirişler CFRP ve GFRP ile güçlendirilerek test edilmiştir. Deney elemanlarının taşıma gücü, süneklikleri, deformasyon yapma ve enerji yutma kapasiteleri incelenmiştir. FRP'lerle güçlendirilen numunelerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve elemanların güçlendirilmesinde CFRP yerine daha ekonomik olan GFRP kompozitlerin kullanılabilirliği araştırılmıştır.

FRP kompozitlerle güçlendirilen düşük dayanımlı beton numunelerin yük taşıma ve şekil değiştirme kapasitelerinde önemli artışlar olduğu belirlenmiştir. Betonarme kirişler üzerinde yapılan çalışmada ise, GFRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin CFRP ile güçlendirilen betonarme kirişlere göre eğilme ve kesme dayanımları kısmen düşük olmasına rağmen süneklik ve enerji yutma kapasiteleri oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Epoksi enjeksiyonu ile onarılan hasarlı betonarme kirişlerin de GFRP ile etkili bir şekilde güçlendirilebileceği tespit edilmiştir. Cam elyafın daha ekonomik olması, yerli olarak üretilebiliyor olması, şekil değiştirme kapasitesinin daha yüksek olması gibi avantajlar da dikkate alındığında düşük dayanımlı beton kullanılarak üretilen betonarme elemanların güçlendirilmesinde GFRP kompozitlerin çok daha etkin bir şekilde kullanılabileceği açıktır.

COMPARISON OF STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS WITH LOW CONCRETE STRENGTH USING FIBER COMPOSITES

SUMMARY

Keywords: Low Strength, Cylinder Concrete Specimens, Reinforced Beam, CFRP, GFRP, Reinforcement, Ductility

The loss of lives and damages caused by the recent years earthquakes revealed the fact that the existing building stock did not have sufficient safety against earthquakes, hence, may need to be strengthened. The need to strengthen emerges due to changes in the intended use of structures and service charges, design and implementation errors, lack of reinforcement, the use of low-strength concrete, damages caused by earthquakes, loss of strength of the structure in time, changes to the current standards and regulations.

In this study, low-strength concretes commonly encountered in existing reinforced concrete buildings in Turkey were taken into account and the effective use of GFRP composites instead of CFRP were investigated for the strengthening of these structures. For this purpose, the experiments were carried out through three different models. While test specimens produced under three different compressive strength were tested by the first experimental model, reinforced beams produced with the quality of C16/20 concrete were tested in the second model. In the third experiment, damaged reinforced concrete beams formed under laboratory conditions by using bending - shearing forces and strengthened with CFRP and GFRP materials were tested. The test specimens were investigated in terms of their bearing capacity, ductility, energy absorption and deformation capacity. The results obtained from the samples strengthened with FRP were compared and the utility of GFRP composites more economical than CFRP composites were investigated with regard to strengthening elements.

The results obtained from the samples strengthened with FRP were compared and the utility of GFRP composites more economical than CFRP composites were investigated with regard to strengthening elements. Although concrete beams reinforced with GFRP had relatively low flexural and shear strength compare to reinforced concrete beams strengthened with CFRP, their ductility and energy absorption capacity were higher. It was also found that the damaged reinforced concrete beams repaired with epoxy injection could be effectively strengthened with GFRP. As the Glass Fiber is more economic, produced locally and has higher capacity of strain, the GFRP composites should be used much more efficiently in the strengthening of reinforced concrete structures constructed with low-strength concrete.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Ülkemizin en etkin deprem kuşaklarından birinin üzerinde bulunduğu bilinmektedir. Deprem bölgeleri haritası incelendiğinde, ülkemizin %92'sinin deprem bölgeleri içerisinde olduğu görülmektedir. Ayrıca, nüfusumuzun %95'inin deprem tehlikesi altında yaşadığı ve ayrıca büyük sanayi merkezlerinin %98'i ve barajlarımızın %93'ünün deprem bölgesinde bulunduğu bilinmektedir. Son yıllarda yaşanan depremlerde oluşan can kayıpları ve hasarlar, mevcut yapıların çoğunun olası depremlere karşı yeterli güvenliğe sahip olmadığını ve güçlendirmeye gereksinim duyabileceklerini ortaya çıkarmıştır. Bu güçlendirme ihtiyacı, yapıların kullanım amacı ve servis yüklerinin değişmesi, projelendirme ve uygulama hataları, donatı yetersizliği, düşük dayanımlı beton kullanımı, depremlerin vermiş olduğu zararlar ve yapının zamanla dayanıklılığını kaybetmesi vb. gibi nedenlerle oluşabilmektedir. Bununla birlikte, mevcut standartlardaki ve yönetmeliklerdeki değişiklikler nedeniyle de mevcut yapıların güçlendirilmesi ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

Meydana gelen son depremlerden sonra yapılan araştırmalar ve edinilen bilgiler doğrultusunda ülkemizdeki betonarme yapıların önemli bir kısmının mevcut 2007 deprem yönetmeliğine (TDY-2007) göre güçlendirme ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Deprem dayanımı düşük bina sayısının fazlalığı, bu tip binaların halen kullanımda olmaları ve yapım yöntemlerinin farklılığı gibi sebeplerle, her yapı için uygun onarım ve güçlendirme yöntemlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir. Bu durumlar dikkate alındığında yapılar ya yenilenmeli ya da güçlendirilerek depreme dayanıklı hale getirilmelidir.

Betonarme yapı elemanlarının onarım ve güçlendirmesinde değişik yöntemler kullanılmakta olup, yaygın olarak zayıf taşıyıcı elemanları sisteme yeni ilave edilecek betonarme elemanlar ile güçlendirmek veya mevcut betonarme yapısal elemanların mantolanması, kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Ancak bu

yöntemler ile yapılan güçlendirme yapı ağırlığını önemli ölçüde artırdığı, temel sisteminde ilave düzenlemelere ihtiyaç duyulduğu ve ekstra maliyet artışlarına neden olduğu bilinmektedir. Ayrıca güçlendirme sırasında yapının kullanımı mümkün olmamaktadır. Bu nedenlerden dolayı yapı ağırlığını arttırmayan, kolay ve hızlı uygulanabilen, elemanların taşıma kapasitelerini önemli ölçüde arttıran, güçlendirme sırasında yapının kullanımına olanak sağlayan Elyaf Takviyeli Polimer (Fiber Reinforced Polymer, FRP) kompozitler, alternatif güçlendirme elemanları olarak öne çıkmaktadır.

1.1. FRP Kompozitler

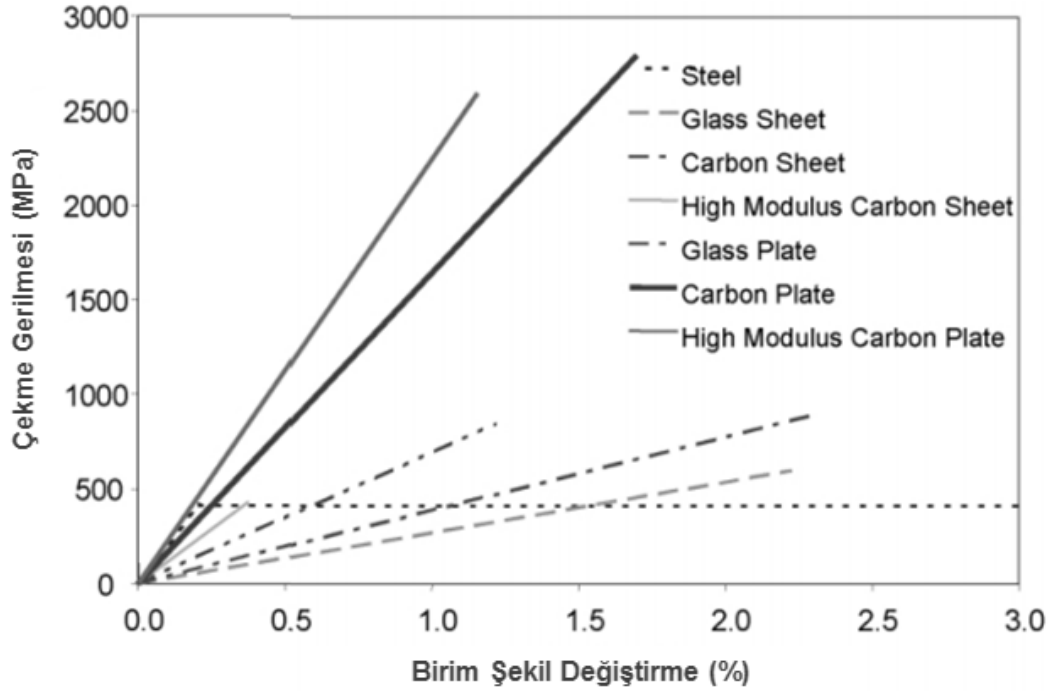
Polimer matris malzemenin elyaflarla takviye edilmesi sonucunda elde edilen FRP kompozitler üretildikleri malzemeye bağlı olarak farklı dayanım ve şekil değiştirme özelliklerine sahip olabilmektedir (Tablo 1.1). Karbon Elyaf Takviyeli Polimer (CFRP), Cam Elyaf Takviyeli Polimer (GFRP) ve Aramid Elyaf Takviyeli Polimer (AFRP) kompozitler son yıllarda en çok kullanılan ve üzerlerinde en çok araştırma yapılan FRP kompozitlerdendir.

Tablo 1.1. Farklı türdeki elyafların özellikleri

Elyaf tipi	Çekme dayanımı (N/mm ²)	Elastisite modülü (kN/mm ²)	Uzama (%)	Yoğunluk (g/cm ³)
Yüksek dayanımlı karbon	4300-4900	230-240	1.9-2.1	1.8
Yüksek modüllü karbon	2740-5490	294-324	0.7-1.9	1.78-1.81
Ultra yüksek modüllü karbon	2600-4020	540-640	0.4-0.8	1.91-2.12
Yüksek dayanım ve yüksek modüllü aramid	3200-3600	124-130	2.4	1.44
Cam	2400-3500	70-80	3.5-4.7	2.6

Yüksek dayanım ve dayanıklılık, düşük özgül ağırlık ve kolay uygulanabilirlik gibi avantajlara sahip olan FRP kompozitlerin kullanımı, özellikle güçlendirme çalışmalarının kısa sürede tamamlanmasının ve/veya taşıyıcı eleman boyutlarının sabit kalmasının gerekli olduğu durumlarda uygun bir güçlendirme yöntemi

olabilmektedir. Betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesinde değişik tür ve özellikte elyaflar kullanılmaktadır. Farklı türdeki elyafların gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 1.1’de verilmiştir (Büyüköztürk vd., 2004).



Şekil 1.1. Farklı elyafların gerilme-şekil değiştirmeleri

FRP kompozitler son yıllarda yapıların onarım ve güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Betonarme yapıların kolon, kiriş, perde ve kat döşemeleri gibi güçlendirilmeye ihtiyaç duyulan taşıyıcı elemanlarının FRP kompozitlerle hızlı ve etkili bir şekilde güçlendirilebileceği ortaya konmuş ve bu malzemelerin alternatif güçlendirme elemanı olarak kullanımını giderek artmaktadır.

Bu tez kapsamında bulunan literatür çalışmaları iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada bu çalışma kapsamı dışında tutulan betonarme kolon, kiriş, kolon-kiriş birleşim bölgeleri, döşeme ve dolgu duvarların FRP kompozitlerle güçlendirilmesi üzerine yapılan uygulama çalışmaları özetlenmiştir. İkinci aşamada ise bu çalışmanın kapsamında bulunan beton basınç elemanları, betonarme kolon ve betonarme kirişlerin güçlendirilmesi üzerine yapılan bilimsel çalışmalar konusunda detaylı bilgiler verilmiştir.

1.2. Betonarme Yapı Elemanlarının Güçlendirilmesinde FRP Uygulamaları

FRP kompozitler; 1980'ler den beri, çok sayıda tanıtımda, deneysel ve saha projelerinde yapı elemanlarının onarım ve kuvvetlendirilmesinde kullanılmıştır. Bu alandaki ilk araştırma ve uygulamalar İsviçre, Almanya ve Japonya'da yoğunlaşmıştır. 1990'ların başından itibaren, ABD, Kanada ve Suudi Arabistan'ı da kapsayan birçok ülkeden araştırmacılar bu alandaki çabalarını bir araya getirmişler ve kompozit malzemelerle yeniden donatımın değişik analiz, tasarım, uygulama ve dayanıklılık özelliklerini incelemişlerdir (Büyüköztürk, 1999). Sıkça depreme maruz kalan Japonya, FRP kompozitlerin yapılarda kullanımı konusuna büyük önem vermiştir. Yapılarda FRP kompozitlerin kullanımı ve araştırmaları Japonya' da 1980'lerin başında başlamış; ancak bu dönemde esas ağırlık, çelik ve beton mantolama yöntemine verilmiştir.

Kompozit kullanılan ilk onarım uygulaması demiryolu köprü ayaklarındaki çatlakların karbon elyaf levhalarla onarımı olmuştur (Büyüköztürk, 1999). Avrupa'da yapısal güçlendirme amacıyla FRP kompozitlerin kullanımı ve araştırmaları seksenlerin ortalarında başlamış; İsviçre ve Almanya' da, özellikle kirişler ve döşemelerin eğilme güçlendirmesi üzerinde yoğunlaşarak devam etmiştir. İsviçre'de İsviçre Federal Malzeme Test ve Araştırma Laboratuvarları'nda (EMPA) yapılan araştırmalar, kirişlerin kuvvetlendirilmesi için CFRP kullanımı üzerinde yoğunlaşmış, yapılan araştırmalarda monotonik ve periyodik yükleme altında değişik kırılma şekilleri tanımlanmıştır. Almanya'da Braunschweig Teknik Üniversitesi'ndeki araştırmalar, GFRP kompozitler üzerinde yoğunlaşmıştır. GFRP'nin değişik yapışma ve dayanıklılık özelliklerini; basit çekme numuneleri, kirişler ve tek yönlü döşemeler üzerinde yapılan deneylerle araştırmışlardır. Avrupa'da FRP ile güçlendirmede ilk saha uygulamalarından birisi, 1991 yılında İsviçre' de, kutu kesitli bir beton köprü olan Ibach Köprüsü üzerinde yapılmıştır (Şekil 1.2). Köprüde hasar görmüş 39 metrelik bir açıklık, 2 mm kalınlığında ve 150 mm genişliğinde CFRP plakalar kullanılarak kuvvetlendirilmiştir.



Şekil 1.2. Ibach Köprüsü CFRP plaka uygulaması

Ülkemizde de Batman'daki baraj inşaatı sırasında hidrolik güç üniteleri için gerekli ağır mekanik ekipmanların taşınması sırasında yapılan incelemede, Gaziantep ve Kahramanmaraş arasında bağlantıyı sağlayan anayol üzerindeki Karababa ve Göksu Köprüleri'nin 270 tonluk bu malzemeleri taşıyamayacakları anlaşılmıştır. Bu iki köprü'nün kolon ve kirişlerinde toplam 6250 m CFRP plaka ve 3765 m² CFRP dokuma ile güçlendirme yapılmıştır (Şekil 1.3). 1991 yılından beri Avrupa'da, çoğu kiriş, döşeme ve duvarların eğilme ve kesme kuvvetlendirilmesi olmak üzere yüzlerce onarım ve güçlendirme uygulaması tamamlanmıştır.



Şekil 1.3. Göksu Köprüsü güçlendirme çalışması

1.2.1. Kolonların güçlendirilmesinde FRP uygulamaları

Kolonlar, düşey taşıyıcı olmaları nedeniyle binaların ayakta durmasını sağlayan en önemli yapı elemanlarıdır. Düşey taşıyıcı olmaları yanında binaların maruz kaldığı dinamik yükleri, temellerden alıp binanın tümüne rijitliği nispetinde dağıtan ilk sıradaki elemanlardır. Kolonlara zarar veren kuvvetler; kesme, eğilme, burkulma ve basınç olarak sıralanabilir. Eğilme donatılarındaki yetersizlik binanın rijitliğini azaltarak daha fazla deplasman yapmasına sebep olmakta ve burkulmaya yol açabilmektedir. Eğilme donatısındaki fazlalık ise kolonun rijitleşmesine, çekme donatısı akmadan basınç kırılmasına ve yapının toptan göçmesine sebep olmaktadır. Eğer sargı donatıları olan etriyeler eksik olursa; kolon, kesme kuvvetlerine mukavemet gösterememekte ve ani bir kırılmaya maruz kalmaktadır. Aynı zamanda etriyeler, kolonun dağılıp parçalanmasını engellemekte ve binanın yıkılmasını geciktirmektedir.

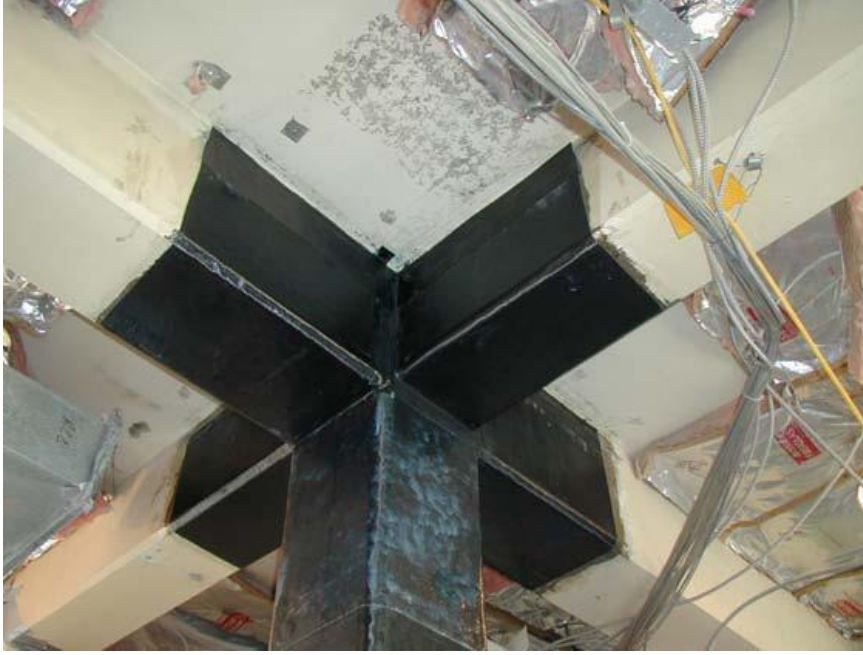
Kolonların güçlendirilmesi, FRP kompozitler kolonların çevresine elyaf yönü enine donatılara paralel olacak şekilde sarılarak ve yapıştırılarak tamamlanır. FRP'ler betonarme kolonların süneklik kapasitelerini, kesme ve basınç dayanımları ile boyuna donatı bindirme boyunun yetersiz olduğu durumlarda donatı kenetlenme dayanımını arttırmaktadır. Şekil 1.4'te FRP malzemelerin kolonlardaki uygulama şekilleri görülmektedir.



Şekil 1.4. FRP malzemenin kolonlarda uygulanması

1.2.2. Kolon-kiriş birleşim bölgelerinin güçlendirilmesinde FRP uygulamaları

Etriye sıklaştırmasına dikkat edilmeyen eski yapılardaki kolon-kiriş birleşim bölgelerine FRP sarılmak suretiyle etriye eksikliği giderilebilmektedir. Şekil 1.5'te kolon-kiriş birleşim bölgelerindeki uygulamaya bir örnek görülmektedir.



Şekil 1.5. Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde FRP uygulaması

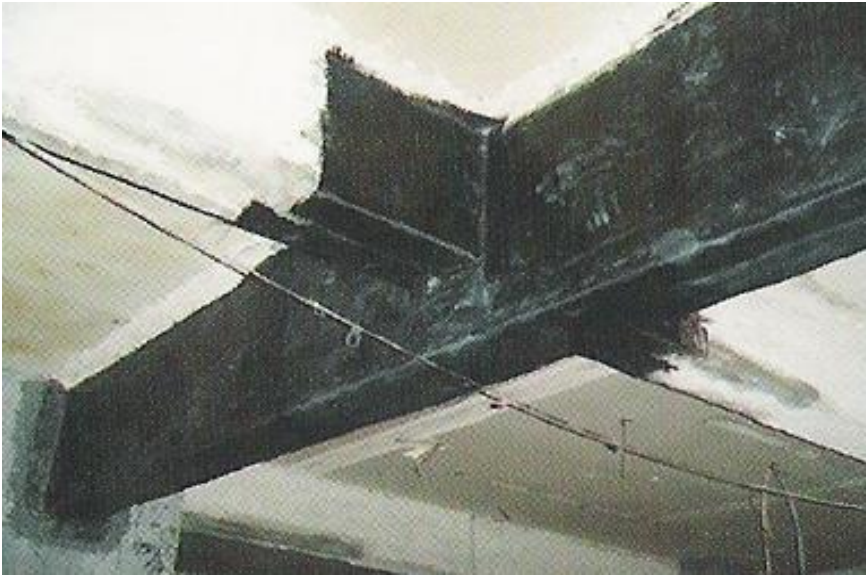
1.2.3. Kirişlerin güçlendirilmesinde FRP uygulamaları

Kirişler, yapılar için kolonlardan sonra en önemli taşıyıcı elemanlardır. Döşemelerden aldıkları düşey yükleri kolonlara aktarırlar. Deprem esnasında kolonların beraber hareket etmesini sağlar ve deprem yüklerini kolonların birinden diğerine aktarırlar. Süneklik düzeyi yüksek çerçeve sistemlerde kirişlerin kolonlara göre daha zayıf olması istenir. Gerekirse mafsallaşmasına bile izin verilir. Önemli olan kolonların stabilitesini kaybetmemesidir. Bu sebeple, genelde kirişlerin açıklık bölgesinde eğilme, mesnet bölgelerinde ise kesme kuvvetine karşı güçlendirme yapılır. Eğilme (orta açıklık) bölgesinde yapılacak gereğinden fazla güçlendirme, eğilme donatısı kopmadan basınç bölgesindeki betonun ezilmesine yol açar. Bu kırılma ani, gevrek ve istenmeyen bir kırılma şeklidir. Eğilme bölgesinde meydana gelebilecek bir hasarda, önce kullanılan FRP malzemenin kopması, ondan sonra çelik donatının akması, daha sonra betonun ezilmesi istenir.

Betonarme kirişlerin çekme bölgelerine ve düşey yüzeylerine FRP, epoksi ile yapıştırılarak kirişler güçlendirilmektedir. Böylece kirişlerin eğilme ve kesme mukavemeti arttırılmaktadır. Şekil 1.6 ve Şekil 1.7’de kirişlerdeki uygulamaya ait örnekler görülmektedir.



Şekil 1.6. FRP malzemenin kirişlerde uygulanması



Şekil 1.7. FRP malzemenin kiriş birleşim bölgesinde uygulanması

1.2.4. Döşemelerin güçlendirilmesinde FRP uygulamaları

Döşemeler, katların konumunu belirleyen, devamlı üzerinde dolaştığımız, sonsuz rijit kabul edilen, düşey taşıyıcı elemanlardır. Döşemelerde en sık görülen hasar aşırı yüklemelerden meydana gelen sehimlerdir. Bu, döşeme altındaki donatıların akması sonucu meydana gelir. Döşemelerde genelde eğilmeye karşı güçlendirme yapılır. Depremlerde döşemelerde kesme kuvvetinden meydana gelen hasarlara fazlaca rastlanmaz. Döşemeler plak elemanlar olduğu için kesitin tamamının çekmeye

çalıştığı elemanlar olarak kabul edilir. Döşemelerde yapılacak güçlendirmede FRP lamine şeritler veya kumaşlar açıklık bölgesine alttan, mesnet bölgesine üstten yapıştırılarak yük taşıma kapasiteleri ve eğilme mukavemetleri artırılır.

Depremlerde, döşemelerde kesme kuvvetinden meydana gelen hasarlara fazlaca rastlanmadığı için genelde eğilmeye karşı güçlendirme yapılır. Döşemeler, plak elemanlar olduğu için kesitin tamamının çekmeye çalıştığı kabul edilir. Döşemelerde yapılacak güçlendirmede FRP kompozitler eğilme bölgesinde alttan (x ve y doğrultusunda) , mesnet bölgesinde üstten yapıştırılarak yük taşıma kapasitesi ve eğilme mukavemeti artırılır. Şekil 1.8 ve Şekil 1.9'da FRP malzemelerin döşemelerde uygulanmasına ait örnekler görülmektedir.



Şekil 1.8. FRP malzemenin döşemelerde uygulanması



Şekil 1.9. FRP malzemenin döşemelerde uygulanması

1.2.5. Dolgu duvarların güçlendirilmesinde FRP uygulamaları

Dolgu duvarlar, yapılarda çerçeve aralarında dolgu malzemesi olarak kullanılan, taşıyıcı özelliği olmayan; fakat son depremlerde binanın rijitliğine katkıda bulunduğu ve çevrelediği kolonların deplasmanını kısıtlayarak burkulmasını önlediği anlaşılan elemanlardır. Dolgu duvarlar, depremde çerçeve sistemini aşırı deplasman yaparak enerji sönümlemesi yerine bu enerjiyi kendi bünyelerinde parçalanmak ve çatlak suretiyle yok etmişler, binaların yıkılmasını zorlaştırmışlar, bir nevi betonarme perde görevi yapmışlardır. Dolgu duvarları kolon ve kirişlerden ayırarak ve kütle halinde tutarak en iyi güçlendirme sağlanmış olacaktır. Bu yüzden 00/90° açıda dokunmuş FRP kumaşlar birleşim yerlerine yapıştırılır (Şekil 1.10). Eğer binanın betonarme sisteminin güçlü olduğu tespit edilmiş ve muhtemel bir depremde duvarlarda çatlama ve kırılma olması istenmiyorsa, duvarlarda eğilmeye karşı boyuna, kesmeye karşı enine doğrultuda FRP uygulanabilir.

Yığma ve dolgu duvarlarında duvar yüzeyleri çift doğrultulu FRP dokuma ve levhalar ile kaplanarak yanal yüklere karşı çerçeve sisteminin mukavemeti arttırılmaktadır. Yapılan bu uygulamalar sonucunda sistem bir bütün olarak çalışmakta, yapının rijitliği ve taşıyıcı elemanların yük taşıma kapasiteleri artmaktadır.



Şekil 1.10. FRP malzemenin dolgu duvarlara uygulanması

1.3. Literatür Taraması

FRP kompozitler; 1980'lerden bu yana, betonarme yapı elemanlarının onarımında ve güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. FRP kompozitlerle güçlendirme üzerine ilk araştırma ve uygulamalar İsviçre, Almanya ve Japonya'da yoğunlaşmıştır. 1990 yılından itibaren, ABD, Kanada vb. birçok ülkeden araştırmacılar bu alandaki çabalarını bir araya getirmişler ve FRP kompozitler ile onarım ve güçlendirmenin betonarme elemanların mekanik özelliklerine etkilerini tartışmışlardır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesine başlanmış ve 1990'ların başından itibaren bütün dünyada birçok yapı FRP kompozitler kullanılarak onarılmış ya da güçlendirilmiştir. Güçlendirmede edinilen bilgi ve tecrübeler, gelişen teknoloji ile birlikte tekrar değerlendirilerek değişik türde FRP kompozitler üretilmekte ve yapı elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılabilirliği araştırılmaktadır.

1.3.1. FRP ile betonarme kolonların güçlendirilmesi

Yoshimura ve arkadaşları (2000), 8 adet 150×150 mm kesitinde ve 1000 mm uzunluğunda betonarme kısa kolon numunesi üretmişlerdir. Numuneleri çeşitli kat ve tipte FRP kompozitler ile güçlendirmişlerdir. Numuneleri enine donatı kullanılmadan üreterek sabit eksenel yük ve yön değiştiren tekrarlı yatay yükler altında test etmişlerdir. Boyuna donatı oranı, beton basınç dayanımı ve kullanılan karbon FRP (CFRP) oranı incelenen başlıca değişkenlerdir. Deneyler sonucunda, CFRP kompozitlerle güçlendirilen numunelerde, gevrek kesme göçmesi gözlenmemiştir. Aynı zamanda, küçük ölçekli numunelerden elde edilen deney sonuçlarının gerçeğe uygun bir şekilde yorumlanmasının güç olduğu vurgulanmıştır.

Cole ve Belarbi (2001), dikdörtgen kesitli kolonlar üzerinde yapmış oldukları çalışmada FRP kompozitlerin sargı etkinliğini araştırmışlardır. Gerçeğe kıyasla 13 kat küçültülmüş kısa kolonlar basınç dayanımlarını kaybedinceye kadar test edilmiştir. Kolonları Aramid FRP (AFRP), CFRP ve GFRP ile sararak güçlendirmişler ve test etmişlerdir. Deney sonucundan elde edilen verilere göre; kolon köşelerindeki keskinliklerin boy oranlarının artması CFRP ile sarılmış kolonlarının daha düşük bir dayanımlarında kırılmasına neden olmuştur. Kare kesitli kolonlar için GFRP sargılama basınç dayanımlarını ve süneklik kapasitelerini AFRP ve CFRP ile yapılan sargılamaya göre daha çok artırdığı tespit edilmiştir.

Ye ve arkadaşları (2002), 7 adet betonarme kolon üretmiş, 6 adedini CFRP kompozitleri şerit halinde uygulayarak güçlendirmişlerdir. Kolon enine kesiti 200×200 mm ve enine donatı oranı 0.0014'tür. Bu çalışmada, kayma açıklığı, uygulanan güçlendirme malzemesi miktarı ve eksenel yük incelenen başlıca değişkenlerdir. Enine donatı oranı yetersiz olan numunelerde, CFRP kompozit kullanılarak genel davranışın olumlu şekilde iyileştirilebileceği sonucuna varılmıştır. CFRP kompozitin, diyagonal kesme çatlaklarının oluşmasından hemen sonra etkin hale geldiği görülmüştür. Basınç bölgesindeki betonun kesme ve basınç gerilmeleri altında ezilmesi sonucunda güçlendirilen numunenin referans kolon numunesi ile hemen hemen aynı performansı gösterdiği görülmüştür.

Machida ve Maruyama (2002), ilgili yönetmelikleri (JSCE, ACI ve FIB) geliştirmek amacıyla yönetmelik kabullerini karşılaştırmışlardır. Bu çalışmada, söz konusu 3 yönetmeliğe göre kesme ve eğilme kapasitelerini arttırmak için ekstra FRP kompozit takviyesi gerektiği ve eleman dayanımlarını hesap eden modellerin temelde aynı konseptte dayandığı vurgulanmıştır. FRP kompozitlerin uzun süreli özellikleri ve betona aderansı gibi durabilite açısından çok önemli olan faktörler üzerine daha fazla araştırma yapılması gerektiği söylenmiştir.

Ghobarah ve Galal (2003), 914 mm uzunluğunda, 305×305 mm enkesit alanına sahip 3 adet kısa kolon numunesi (SC1, SC2 ve SC3) üretmişlerdir. Tüm numuneler için boyuna donatı olarak, 8 adet 20 mm çaplı nervürlü donatı kullanılmıştır, $p = 0.026$. SC1 ve SC2 numunelerinde 0.0024 ve SC3 adlı numunede 0.005 oranında enine donatı kullanılmıştır. SC2 ve SC3 numuneleri 3 kat CFRP kompozit kullanılarak güçlendirilmiştir. Güçlendirilen numunelerde, ezilecek beton sebebiyle kolon yüzlerinde oluşması muhtemel şişkinliklerin önüne geçmek ve FRP kompoziti etkin bir şekilde sargılamak amacıyla ankraj uygulaması yapılmıştır. Bu amaçla SC2 numunesinde, kolon 4 noktadan delinerek 12 mm çaplı çelik çubuklar yerleştirilmiştir. Bu çelik çubuk uçlarına ise 8 adet 75×150×6 mm boyutlarında çelik plaka her iki yüzden bulonlar yardımıyla sabitlenmiştir. SC3 numunesinde ise kolon yüzlerine açılan 75 mm derinliğe sahip deliklere CFRP kompozitleri çiçek şeklinde açılarak yapıştırılmıştır. 3 adet numune sabit eksenel yük ve yön değiştiren tekrarlı yatay yükler altında test edilmiştir. Deneyler sonucunda; referans numunede gevrek kesme göçmesi gözlenmiştir. Enine donatı oranı yüksek olan (SC3) numunede gevrek kesme göçmesi gözlenmemiş, süneklik ve enerji yutma kapasitesinde ciddi bir artış sağlanmıştır. Enine donatı oranı düşük olan (SC2) numunede uygulanan ankraj detayı, sünekliği ve enerji yutma kapasitesini geliştirmiştir.

Furuta ve arkadaşları (2003), FRP kompozitler ile (Sürekli Sarım) güçlendirilen betonarme kolonların kesme kapasitesini hesap eden bir model önermişlerdir. Lif gerilmeleri, kafes-kiriş modeli kullanılarak hesaplanmış olup, daha önce yapılan deney sonuçlarından faydalanılmıştır. 43 adet CFRP ile güçlendirilmiş ve 22 adet aramid FRP ile güçlendirilmiş numuneye ait veri kullanılmıştır. Söz konusu bu numunelerin boyuna donatılarının akmadığı rapor edilmiştir. Bu çalışmada,

kullanılan FRP kompozit oranı ile şekil değiştirme enerjisi arasındaki ilişkiye bağlı olarak kesme kapasitesi tahmin edilmiştir. Tahmin edilen göçme modlarının deney sonuçlarına göre %70 oranında uyduğu gözlenmiştir.

İlki ve arkadaşları (2006), yapmış oldukları deneysel çalışmada, kesme açısından yetersiz düşük beton dayanımlı betonarme kısa kolonların, lifli polimer kompozitler ile güçlendirme öncesi ve sonrası sabit aksenal yük ve yön değişken tekrarlı yatay yükler altında davranışını incelemiştir. Numunelerin güçlendirilmesinde, Cam FRP (GFRP) kompozitler kullanılmıştır. 1 adet numune herhangi bir güçlendirme işlemine tabi tutulmadan, referans davranışı gözlemek amacıyla denenmiştir. 4 adet numuneden, S-LS-G-1-Strip 100 mm net aralıkla 100 mm'lik şeritler ile bir kat, S-LS-G-1-1 kayma açıklığı boyunca bir kat sürekli, S-LS-G-2-1 kayma açıklığı boyunca iki kat sürekli ve S-LS-G-3-1 kayma açıklığı boyunca üç kat sürekli olarak mantolanmıştır. Deneyler sonucunda, referans numunesinde kesme etkileri sebebiyle gevrek bir göçme modu gözlenmiştir. Ağırlıklı olarak diyagonal basınç gerilmelerinin etkileri sebebiyle, eğilme kapasitesine ulaşamayan güçlendirilmiş numuneler, referans numunelerine kıyasla, dayanım ve deformasyon kabiliyeti açısından daha iyi bir performans sergilemişlerdir.

LAM ve arkadaşları (2006), yapmış oldukları çalışmada farklı basınç dayanımına sahip 152 mm çapında 305 mm yüksekliğinde toplam 18 adet iki seri silindirik beton üretmişlerdir. Seri I betonların ortalama basınç dayanımları 41.1 MPa, Seri II ortalama basınç dayanımı 38.9 MPa olarak tespit etmişlerdir. Betonlar dışarıdan bir kat veya iki kat CFRP ile sarılmış sabit hızlı ve tekrarlı yüklemeler altında test ederek gerilme – şekil değiştirme kapasiteleri açısından karşılaştırılmıştır. Seri I betonları bir kat CFRP ile sarılarak güçlendirildiğinde ortalama basınç dayanımı yaklaşık 56 MPa, Seri II betonları iki kat CFRP ile sarılarak güçlendirildiğinde ortalama basınç dayanımı yaklaşık 78 MPa olarak bulunmuştur. CFRP ile sarılarak güçlendirilen betonların sabit hızlı ve tekrarlı yükleme altında test edilmesi sonucunda gerilme-şekil değiştirme eğrileri arasında çok az bir fark olduğu belirtilmiştir. Deney sonuçları mevcut sonlu elemanlar modelleri ile modellenmeye alınmıştır. Sonuçların küçük ölçekli standart numuneler üzerinde yapılarak elde edildiği

belirtilmiştir. Ebat etkisinin olabileceği ve gelecekte tam ölçekli numuneler üzerinde inceleme yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

Hua ve arkadaşları (2009), ortalama 41.1 MPa ve 57.5 MPa basınç dayanımına sahip iki seri kare kesitli kolonları CFRP ile kısmi sarma metodu kullanarak sarmışlardır. Birinci seri betonların içerisine donatı yerleştirilmeyip, ikinci seri betonlar içerisine donatı yerleştirilmiştir. Her serideki 15 adet numune 5 gruba ayrılmıştır. Birinci ve ikinci serideki numunelerden beşer adedinin orta bölgelerine denk gelen yüzeyleri tahrip edilerek CFRP ile sarılmış ve kolonların mekanik davranışlarına etkileri araştırılmıştır. Her numune iki farklı dayanıma sahiptir. Bunlar arasında dayanımı düşük kolonlarla yüzeyine hasar verilen kolonlar karşılaştırılmıştır. CFRP laminatlar kısmi sarımlardaki iyileşmeyi görmek maksadı ile düşük dayanımlı bölüm üzerine sarılmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen verilere göre; hasar verilmiş bölümler üzerinde yapılan güçlendirme, kolonların dayanım ve sünekliğini önemli ölçüde artırmıştır. Tüm güçlendirilen kolonların taşıma kapasiteleri, taşıma kapasitesi yeterli olan kolonlardan daha yüksek çıkmıştır. Var olan analitik model yardımı ile FRP ile yapılan güçlendirme teorik olarak doğrulanmıştır. Elemanların sadece zayıf bölgeleri güçlendirilerek aşırı maliyetten ve zaman israfından kazanç sağlanabileceği vurgulanmıştır.

Shin ve Bassem (2010), basınç dayanımları 47.3 MPa and 39.2 MPa arasında değişen standart silindir betonlar üretmişler, beton yan yüzeylerini çelik tel ve GFRP ile sararak betonların basınç yüklemesi altında test etmişlerdir. Üç farklı test numunesi üretmişlerdir. Silindir betonların yüzeylerine birinci grupta çelik tel sarmışlar, ikinci grupta GFRP sardıktan sonra üstüne çelik tel sarmışlar ve üçüncü grupta ise sadece GFRP sararak güçlendirmişlerdir. Yapılan güçlendirme çalışması ile 16-160 °C sıcaklık arasında betonların basınç dayanımlarına ve sünekliklerine etkilerini araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmada çelik tel sargı ve GFRP sargının birlikte kullanıldığı betonların dayanımlarında ve sünekliğinde önemli artışların olduğunu tespit etmişlerdir. GFRP ile güçlendirmenin yanında çelik tel sargı ile de betonların güçlendirilebileceği vurgulanmıştır.

1.3.2. FRP ile betonarme kirişlerin güçlendirilmesi

Saadatmanesh ve Ehsani (1991), 5 adet dikdörtgen kesitli ve bir adet T kesitli hasarsız betonarme kirişlerin GFRP plakalar ile güçlendirilmesi üzerine deneysel çalışma yapmışlardır. Kirişler çekme bölgesinden 3 farklı donatı oranıyla donatılmış, kirişlerden biri kesme kırılması etkisini gözlemlemek üzere düşük kesme donatısıyla donatılırken, diğer kiriş ise öngermeli olarak donatılmış ve 152 mm genişliğinde ve 6 mm kalınlığında GFRP plakayla güçlendirilmiştir. Deney sonuçlarından güçlendirilen kirişlerin eğilme dayanımında artış gözlenirken çatlak aralığında ise azalma tespit edilmiştir. Eğilme çatlaklarının oluşumu gecikirken kiriş sünekliğinin de azaldığı belirtilmiştir. Kirişlerin yük taşıma kapasitesinde % 65 artış olduğu deney sonuçlarında belirtilmiştir. Deneysel çalışmada ortalama 35 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanılmış düşük dayanımlı betonların güçlendirilmeye etkisi incelenmemiştir. Çalışma az sayıda kiriş üzerinde gerçekleşmiştir.

Chajes ve arkadaşları (1995), betonarme kirişin kesme kapasitesini arttırmaya yönelik bir yöntem olan dıştan uygulamalı kompozit dokumaların kullanımının etkilerini incelemek için 12 adet yetersiz donatılı betonarme T-kiriş üretmişlerdir. Aramid, E-cam ve Grafit liflerinden yapılmış kompozit dokumalar, iki bileşenli epoksi ile T-kirişin iki yanına boydan boya yapıştırılmıştır. Kompozit malzemelerin seçilmesindeki amaç; bu tür malzemelerin paslanmaz, yalıtkan ve genelde kimyasal maddelere dayanıklı olup manyetik olmamalarıdır. Bu deneysel çalışma Delaware Üniversitesi beton laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Beton T-kirişler ACI Yönetmeliği'ne uygun tasarlanmış ve eğilme donatısı olarak ACI süneklik şartlarını sağlayan bir adet No.5 Grade 60 çelik donatı kullanılmıştır. Deneyin amacına yönelik olarak istenilen gevrek kırılma modu için kesmeye göre yetersiz tasarım yapılmıştır. Kompozit dokumalar, liflerin her iki yönde eşit miktarda olmak üzere 0° ve 90°'hk açılarla yerleştirilmesiyle yapılmıştır. Dokumaların kirişlere iyi yapışması için beton yüzey mekanik yoldan aşındırılarak temizlenmiş ve parçacıklar hava püskürtülerek giderilmiştir. İki bileşenli epoksi dokumalara 1.5 mm kalınlığında sürülmüş ve dokumalar kirişlere yapıştırılarak vakum uygulanmıştır. Kirişler eğilmede test edilmiş ve dıştan kesme donatılı sekiz kirişin performansı, dıştan donatısı olmayan dört adet kontrol kirişinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bütün kirişler kesmeden

kırılmışlar ve bunlardan kompozit donatılı olanları başarılı bağ özellikleri göstermişlerdir. Dıştan donatılı kirişler için dayanımda % 60 ila % 150 oranında artış sağlanmıştır. Dokuma liflerinin yerleşim şekli kesme dayanımını etkilediği ortaya çıkmış ve testlerin hiçbirinde dokumalar betondan ayrılmamıştır. Sonuçta, kompozit dokumaların kesme taşıma kapasitesinin yaklaşık olarak hesaplanmasında kullanılacak analitik yöntemler sunulmuştur.

Norris ve arkadaşları (1997), dikdörtgen kesitli 36.5 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanarak 19 adet betonarme kiriş üretmişlerdir. Bunlardan altısı diğer elemanlardan kısa ve yetersiz kesme donatılı olarak üretilmiş, beş tanesi $\pm 45^\circ$ ve $0^\circ/90^\circ$ geometrideki CFRP şeritlerle güçlendirilmiş ve bir elemanda kontrol elemanı olarak kullanılmıştır. Diğer 13 eleman kesme dayanımı daha sık etriye kullanılarak artırılmıştır. Yüklemeler sabit moment ve kirişin ortasında kesme kuvveti yaratmayacak şekilde $l/4$ ve $3l/4$ uzaklıktan yapılmıştır. Bu elemanlardan 12'si 0° , 90° ve $\pm 45^\circ$ 'lik CFRP şeritlerle kesmeye karşı güçlendirilmiştir. CFRP şeritlerin elemanlara yapıştırılmasında iki farklı epoksi kullanılmıştır. Epoksilerden biri inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılan epoksi diğeri de kauçuk bazlı bir epoksi olarak seçilmiştir. Deney sonuçlarına göre CFRP şeritler kirişlerin dayanımlarını ve rijitliklerini arttırmışlardır. Kirişlerin göçme modu ve dayanımındaki artışlar CFRP şeritlerin yerleştirilme şekline bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir.

Triantafillou (1998), $1000 \times 100 \times 70$ mm (Uzunluk \times Yükseklik \times Genişlik) boyutlarında 11 adet numune üretmiş, 9 adet numuneyi CFRP kompozitlerle güçlendirmiş ve dört nokta yükleme tekniği ile test etmiştir. Deney sonuçlarından yararlanarak, FRP kompozitin, kesme kapasitesine katkısının elde edilebileceği bir model oluşturmuştur. Eurocode yönetmeliğinde yer alan model bu çalışmaya dayanmaktadır. Deney sonucunda; güçlendirme tekniğinin etkinliğinin, FRP eksenel rijitliği ile doğrusal artış gösterdiği görülmüştür.

Khalifa ve arkadaşları (1998), kompozitler ile güçlendirilen betonarme kirişlerin kesme kapasitesini hesap eden 2 adet model önermişlerdir. Etkin birim şekil değiştirme modeli, çekme gerilmeleri sebebiyle FRP kompozitin koptuğu gerilme

seviyesini tahmine, aderans kuvveti modeli ise beton yüzeyinden FRP kompozitin sıyrıldığı yük seviyesini tahmine dayanmaktadır.

Garden ve Hollaway (1998), farklı kesit ve uzunluk oranlara sahip 12 adet betonarme kirişin CFRP kompozit plakalar ile güçlendirilmesi üzerine deneysel çalışma yapmışlardır. Deneysel kirişlerini, CFRP şeritlerle kirişlerin alt bölgelerine boyuna yapıştırarak güçlendirmeye çalışmışlardır. Kirişlerin bir metrelik olanı ankastre olarak, diğerleri dört nokta yüklemesi ile yüklenmiştir. Kirişler kesme açıklığı/derinlik oranı 3-3,7 arasında değiştirilerek, bu oranın CFRP plakla güçlendirilmiş kirişlerin kırılma şekline ve maksimum yük kapasitesine etkilerini araştırmışlardır. Değişen kesme açıklığı/derinlik uzunluğu parametrelerine karşı kirişlerde kırılma şeklinin benzer olduğunu, bu oranın artmasıyla maksimum moment kapasitesinin arttığını, fakat maksimum yük değerinin yakın değerler olduğunu tespit etmişlerdir.

Triantafillou (1998), 11 adet basit mesnetli yetersiz kesme donatılı betonarme kiriş üreterek CFRP şeritlerle güçlendirmiştir. Yüklemeler iki noktadan yapılmıştır. Kirişlerin boyutları 70 mm × 110 mm × 1000 mm ve kesme açıklığı da 320 mm'dir. Deneysel iki elemanı kontrol elemanı olarak kullanmıştır. Diğer dokuz elemanda CFRP şeritleri farklı genişlik ve açıda betonarme kirişler üzerine yapıştırmıştır. Deneysel sonuçlarına göre betonarme kirişlerin kesme dayanımlarının artımında epoksi ile yapıştırılan CFRP şeritlerin çok etkili olduğu görülmüştür. Kesme dayanımında kontrol kirişlerine göre %45 ile %95 arasında artış sağlanmıştır.

Khalifa ve Nanni (2000), yapmış oldukları çalışmada ortalama 35 MPa basınç dayanımına sahip 6 adet tam ölçekli, basit mesnetli T-kirişlerin yüzeylerine CFRP şeritler epoksi ile yapıştırarak kesmeye karşı güçlendirme çalışmaları yapmışlardır. Kirişlerden birini kontrol kirişi olarak kullanmışlar ve diğer beş kirişi değişik şekillerde CFRP şeritlerle güçlendirmişlerdir. Deneysel 0° ve 0°\90°'lik iki çeşit CFRP şerit kullanmışlar ve bu şeritleri kirişlere U sargı ve sadece yan yüzeylerine yapıştırmışlardır. Deneysel sonuçlar CFRP şeritlerin, kirişlerin kesme dayanım kapasitesini %35-%145 oranında arttırdığını göstermiştir. Yapılan güçlendirme şekillerinden en etkili yerleşim düzeninin uçtan kiriş tablasına ankre edilen U-sargı

şeritlerin olduğu ortaya çıkmıştır. Kiriş kenarlarına uygulanan CFRP şeritler U-sargılara göre daha az kesme katkısı sağlamışlardır.

Täljsten ve Elfgren (2000), yaklaşık 50 MPa beton basınç dayanımına sahip olan betonlar ile 8 adet betonarme kiriş üretmişlerdir. CFRP levhaların ve şeritlerin değişik yöntemlerle beton kirişlerin yan yüzeylerine epoksi ile yapıştırma uygulamasını denemişlerdir. Çalışmanın amacı kirişlerin güçlendirilmeden önce ve sonra kesme kapasitelerinin incelenmesi ve uygulamada kullanılan üç değişik tekniğin araştırılmasıdır. Bu doğrultuda kirişler 4 nokta yüklemesi ile test edilmiştir. Kiriş orta noktasından ve mesnetlerden sehim ölçüleri alınmıştır. Güçlendirilmiş kirişler; lifteki çekme kırılması, betondaki basınç kırılması ve CFRP kompoziti ve beton arasındaki bağ kırılması olmak üzere 3 şekilde kırılmıştır. Test sonuçlarına göre beton kirişlerin yan yüzeylerine yapıştırılan CFRP levhalarda çok iyi bir kesme güçlendirmesi sağlanmıştır. Dayanımda maksimum %300'lük bir artış olmuştur.

Li ve arkadaşları (2001), 14 adet kesmeye karşı yetersiz dikdörtgen kesitli kirişleri CFRP şeritlerle güçlendirme çalışmaları yapmışlardır. Kiriş üretiminde ortalama 38 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanmışlardır. Deneyde etriye aralıklarını ve CFRP şeritlerin yapıştırılma miktarını değiştirerek çeşitli uyarlamalar yapmışlardır. Yapılan güçlendirmede CFRP şeritler, kirişin sadece 1/3 lük kısmına uygulanmıştır. Yükleme, kirişin 1/3 mesafesinden monotonik olarak etki ettirilmiştir. Deneyler sonucunda CFRP şeritlerin elemanın kesme dayanımına yaptığı katkının kirişte kullanılan boyuna donatı ve etriye miktarından etkilendiği görülmüştür. CFRP şeritlerin yapıştırılma yüzeyi arttıkça CFRP'nin kesme dayanımına katkısı artmıştır. Kirişte kullanılan etriye miktarı azaltıldığında CFRP şeritlerin kesme kapasitesine katkısının arttığı tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışma teorik olarak doğrulanmaya çalışılmış ancak kirişlerin davranışı ve kırılma dayanımlarının belirlenmesinde beton, çelik ve CFRP arasında kesme açısından karmaşık bir etkileşim olduğu belirtilmiştir. Deney ve teorik sonuçlar karşılaştırıldığında kesme kapasitesinde CFRP ile güçlendirmenin kabul edilebilir olduğu belirtilmiş ve güvenli bölgede kaldığı teorik olarak doğrulanmıştır.

Rahimi ve Hutchinson (2001), 2300 mm boyunda 200×150mm kesitinde 31 adet kirişi üretmişlerdir. Kirişlerde kalitesi 54-69 MPa arasında değişen beton kullanmışlardır. Kirişleri, CFRP ve GFRP plakaları kirişlerin alt yüzeyine tabakalı olarak yapıştırarak güçlendirmişlerdir. Kirişlerde başlıca değişkenler boyuna donatı, FRP ve FRP tabaka miktarıdır. CFRP plakaların kiriş rijitlik ve dayanımını artırdığını, maksimum yük kapasitesinde %230 artış olduğunu tespit etmişlerdir. Kiriş kırılma şekilleri, paspayı kopması ve plaka deformasyonu şeklinde olmuştur. Güçlendirilen kirişlerde plak kalınlığı arttıkça kırılma bölgesinin plak uç noktasına doğru ilerlediğini, artan plak elastik modülüyle plak uç noktasında normal ve kesme gerilmelerinin arttığını belirtmişlerdir. Deneysel sonuçlarını teorik olarak yaptıkları iki boyutlu sonlu elemanlar modeli sonuçları ile karşılaştırmış ve deneysel sonuçlarına yakın sonuçlar elde etmişlerdir.

Khalifa ve Nanni (2002), yaptıkları deneysel çalışmada 12 adet kesmeye karşı yetersiz dikdörtgen kesitli kirişleri CFRP şeritlerle güçlendirmişlerdir. Deneysel elemanlarını etriyeli ve etriyesiz olmak üzere iki ana gruba ayırmışlardır. Etriyelessi kirişlerin üretiminde ortalama 19.3 MPa, etriyeli kirişlerin üretiminde ortalama 27.5 MPa basınç dayanımına sahip betonlar kullanmışlardır. Her grubu farklı şekillerde CFRP şeritlerle güçlendirmişlerdir. Deneysel sonuçlarında dıştan yapıştırılan CFRP şeritlerin kirişin kesme kapasitesini %40 ile %138 oranında artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. CFRP şeritlerle güçlendirilen kirişlerin kesme kapasitesinin, güçlendirilmemiş kirişlerden daha büyük olduğu tespit edilmiş ve kesme kapasitesinin artırılmasında CFRP şeritlerin kesme açıklığı ve etkili derinliğin etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

Diagana ve arkadaşları (2003), yaptıkları deneysel çalışmada kesme açısından yetersiz 10 adet basit mesnetli dikdörtgen kesitli betonarme kirişi CFRP kumaşlarla güçlendirmişlerdir. Kirişlerde ortalama 40 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanmışlardır. Kirişler üç nokta eğilme deneyi ile yüklenmiştir. Betonarme kirişlerin kesme kuvvetlerinden dolayı göçmesi için eğilme kapasitesi yüksek olarak tasarlanmıştır. İki adet kiriş kontrol elemanı olarak kullanılmış sekiz eleman U ve kirişin tam olarak sarılması şeklinde iki gruba ayrılmıştır. Karbon elyaf kumaşlar 45° ve 90° derecelik şeritler şeklinde aralıkları değiştirilerek kirişler yüzeylerine

yapıştırılmıştır. Yapılan güçlendirme betonarme kirişlerin kesme kapasitesini önemli ölçüde artırdığı deneyler ile tespit edilmiştir. Betonarme kirişi tam olarak saran dikey CFRP şeritlerin kesme dayanımına katkısı U şeklindeki sarılan şeritlere göre iki kat daha fazla olmuştur. Bununla birlikte 45°'lik şeritler halinde yapıştırılan kirişlerdeki kesme dayanımındaki artış tam olarak sarılan kiriş ile U şeklinde sarılan kirişlerin kesme dayanımına katkısı yaklaşık olarak aynı düzeyde kalmıştır. Deney sonuçları analitik sonuçlarla karşılaştırıldığında aralarında %-14 ile %93 oranında değişim olduğu görülmüştür

Taijsten (2003), yapmış olduğu çalışmada karbon elyaf takviyeli plastik şeritlerle güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme dayanımlarının belirlenmesine yönelik bir analitik çalışma sunmuş ve bu yöntemi test edilmiş dikdörtgen kesitli betonarme kiriş sonuçları ile karşılaştırmıştır. Yapılan deneysel ve teorik çalışmada basınç dayanımı 50 MPa'ın üzerinde beton kullanmıştır. İlk olarak CFRP şeritlerin kesme dayanımını hesaplamak için bir formül oluşturulmuştur. Daha sonra kirişin nominal kesme dayanımı hesaplanmıştır. Analitik yöntem ile test sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Laboratuvar sonuçlarına göre betonarme kirişlerin kesme dayanımını arttırmak için elyaf takviyeli plastik şeritlerin mümkün olduğunca kesme çatlağına dik şekilde yerleştirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Adhikary ve Mutsuyoshi (2004), yapmış oldukları çalışmada 2600 mm boyunda, 150×200 mm kesitinde 8 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş üretmişlerdir. Deney elemanları sabit hızlı yükleme altında dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deney elemanlarında kesme açıklığı boyunca etriye bulunmamaktadır. Deney elemanlarının kesme dayanımları; 100 mm genişliğinde kiriş eksenine paralel, 150 mm genişliğinde kiriş eksenine paralel iki kat, 150 mm genişliğinde kiriş eksenine dik, 150 mm genişliğinde birinci katı kiriş eksenine paralel ikinci katı kiriş eksenine dik, 200 mm genişliğinde birinci katı kiriş eksenine paralel ikinci katı kiriş eksenine dik, 150 mm genişliğinde kiriş eksenine dik U biçimli levha ve 200 mm genişliğinde kiriş eksenine dik levha kullanılarak artırılmıştır. Tüm deney elemanları kesmeden göçmüştür. Deney sonuçlarına göre, CFRP levhaların kiriş eksenine paralel ve dik uygulandığı deney elemanının dayanımı, CFRP levhaların kiriş eksenine paralel uygulandığı deney elemanından %11 fazladır. U biçimli levha uygulanan deney

elemanının kesme dayanımı, CFRP levhaların sadece kirişin yan yüzlerine yapıştırıldığı deney elemanından %17 fazladır. Kesme açıklığı boyunca U biçimli levha yapıştırılan deney elemanının kesme dayanımında referans elemanına göre %119 oranında artış sağlanmıştır.

Teng ve arkadaşları (2004), FRP kompozitlerin kesme kapasitesine katkısını veren bir model oluşturmuş ve mevcut yönetmeliklerdeki modeller ile karşılaştırmışlardır. Geleneksel güçlendirme metotlarının yanında, öngerilmeli FRP şerit ve NSM (Yüzeye yapıştırılan) FRP çubuk kullanarak yeni iki teknik denemişlerdir. Tamamen ya da üç tarafından sarılarak güçlendirilen numunelerde göçme FRP kompozitlerin yırtılması ile gerçekleşirken, iki yüze yapıştırılarak güçlendirilen numunelerde göçme FRP kompozitlerin sıyrılması ile oluşmuştur. Önerilen modelden elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla uyduğu görülmüştür.

Wegian ve Abdalla (2005) çalışmalarında, FRP, GFRP ve CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kesme kapasitelerini değerlendirmişlerdir. Deneysel çalışmada 7 kirişi test etmişler, 3 kiriş GFRP, 2 kiriş FRP, 2 kirişte CFRP ile güçlendirilmiştir. Kesmeye karşı deneylerin sonucunda; FRP ile yapılan güçlendirmelerin başarılı olduğu ve bu güçlendirme tekniğinin uygulanabilir olduğu görülmüştür. Deneysel ve teorik verilerin birbiriyle uyum sağladığı görülmüştür. FRP ile güçlendirilen kirişlerde gerilme ve deplasmanlar normal etriyeli kirişlere göre daha fazla olmuştur. FRP ile güçlendirilen kirişlerde çatlaklar normal etriyeli kirişlere göre daha az oluşmuştur. FRP çubuklarla güçlendirilen betonarme kirişlerin sağladığı çekme kapasitesi standartlardaki etriyeli elemanların çekme kapasitelerinden daha fazla çıkmıştır. FRP ile güçlendirilen kirişler ACI 440'ta belirtilen değerlere göre daha yüksek kesme dayanımı göstermişlerdir.

Zhang ve Hsu (2005), 11 adet betonarme kiriş üretmişlerdir. 152.4×228.6 mm (genişlik×yükseklik) en kesit alanına sahip numunelerden 5 adedi 1220 mm, 6 adedi ise 1830 mm uzunluğa sahiptirler. 3 adet numune hiçbir güçlendirme işlemine tabi tutulmadan referans davranışı görmek amacıyla test edilmiştir. 8 adet numune kiriş eksenine göre sırasıyla 0, 45 ve 90 açıyla uygulanan CFRP kompozit şeritler ile güçlendirilmiştir. Ayrıca, her iki gruptan birer numune her iki yüze ağ şeklinde

CFRP kompozitler yapıştırılarak güçlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, uygun güçlendirme detayı seçildiği takdirde süneklik ve maksimum kesme dayanımı açısından önemli ölçüde artış sağlanabileceği vurgulanmıştır. Şeritler ile güçlendirilen numunelerde göçme, beton yüzünden şeritlerin sıyrılması ile gerçekleşirken, her iki yüze ağ şeklinde CFRP uygulanan numunelerde ise göçme, CFRP kompozit liflerinin kopması ile gerçekleşmiştir. Sonuç olarak, şerit uygulamasının kesme dayanımını daha fazla arttırdığı ve diyagonal şerit uygulaması ile (enine şerit uygulamasına kıyasla) kesme çatlaklarının daha az dağılım gösterdiği gözlenmiştir.

Almusallam (2006), GFRP plakalarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin dayanıklılığını incelemek için bir araştırma gerçekleştirmiştir. 15×15 cm kesitinde ve mesnet açıklığı 120 cm olan toplamda 84 adet kiriş hazırlamıştır. Kirişlerde basınç dayanımı 36.4 MPa olan beton kullanmıştır. Kirişin alt bölgesine 2Ø10 ve üst bölgesine ise 1 Ø6'lık donatı kullanmıştır. Numuneleri sıcak-kuru ortam şartlarında, laboratuvar ortamında, ıslak kuru normal sulu ortamda, ıslak-kuru tuzlu ortamda ve ıslak-kuru alkali ortamda olmak üzere beş kategoriye ayırmıştır. Her kategori güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş numune gruplarından oluşmaktadır. Ayrıca sıcak-kuru ortama maruz kalan bazı numuneler ultra viyola ışınlarına karşı koruyucu boya ile boyanmıştır. Farklı çevre koşullarında 6-24 ay bekletildikten sonra gerçekleştirilen test sonuçları belirtilen çevre koşullarının hiç birisi kirişlerin eğilme dayanımı üzerinde gözle görülür bir etkiye sahip olmadığını göstermiştir. Ancak GFRP plakalar uzun süre güneş ışınlarına maruz kaldığı takdirde güneş ışınlarının azaltıcı etkisini inkar edilemez olduğu belirtilmiştir. Yapılan deney sonuçları betonarme kirişlerin dayanımlarının artırılmasında GFRP plakaların etkinliğini kanıtlamıştır. GFRP ile güçlendirilen numuneler genellikle GFRP plakalar kirişlerin eğilme dayanımlarını ve sünekliğini büyük ölçüde artırdığını göstermiştir.

Esfahani ve arkadaşları (2007), yapmış oldukları çalışmada ortalama 25 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanarak 12 adet betonarme kiriş üretmişlerdir. $15 \times 20 \times 200$ cm boyutlarda üretilmiş kirişlerden 9 tanesini eğilmeye karşı CFRP dokumayla güçlendirmişler kalan 3 tanesini de kontrol kirişi olarak kullanmışlardır. Kirişlerde 3 farklı çekme donatısı oranı kullanmışlar ayrıca CFRP dokumaların genişlik, uzunluk

ve katman sayılarını değiştirerek kirişleri test etmişlerdir. Yaptıkları deneylerde güçlendirilen kirişlerin kontrol kirişlerine göre eğilme kapasitelerinin ve rijitliklerinin arttığını belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada Amerikan yönetmeliği (ACI 440.2R-02) ve Kanada yönetmeliklerindeki dizayn kılavuzlarının CFRP dokumayla güçlendirilmiş kirişlerde donatı artışıyla kapasite artışını fazla gösterdiğini belirlemişlerdir. Bu yönetmeliklerde önerilen denklemlerin yüksek çekme donatısına sahip kirişler için daha uygun olduğunu vurgulamışlardır.

Sundarraja ve Rajamohan (2009), yapmış oldukları deneysel çalışmada 10×15 cm kesitinde 100 cm uzunluğuna sahip, 20 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanılarak 13 adet betonarme kiriş üretmişler ve kesmeye karşı GFRP şeritlerle güçlendirmişlerdir. Kirişlerden biri kesme dayanımı yüksek olarak üretilmiş, diğer 12 kiriş ise kesmeye karşı zayıf olarak üretilmiştir. Zayıf olarak üretilen kirişler, kesme donatısı yetersiz veya boyuna donatısı yetersiz olarak üretilmiştir. Kirişler U şeklinde veya sadece kiriş yan yüzeylerine kesme açısına dik olacak şekilde GFRP şeritler ile güçlendirilerek dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları değerlendirildiğinde güçlendirilen kirişlerin yük taşıma kapasitelerinde önemli artışlar olmuştur. Güçlendirilen tüm kirişlerin yük taşıma kapasitesi kesmeye karşı güçlü olarak üretilen kontrol kirişinin üzerinde çıkarak GFRP kompozitlerin güçlendirmede çok etkin olduğu sonucuna varılmıştır.

Akbarzadeh ve Maghsoudi (2010), yapmış oldukları çalışmada altı adet 15×25 cm dikdörtgen kesitli 600 cm uzunluğunda iki açıklıklı betonarme kirişleri CFRP, GFRP ve hibrit olarak güçlendirme çalışmaları yapmışlardır. Kirişlerde 74 MPa ve daha yüksek basınç dayanımına sahip beton kullanmışlar ve kirişlerin alt ve üst bölgelerine $2\text{Ø}16$ 'boyuna donatı yerleştirmişlerdir. FRP kompozitleri kirişlerin pozitif ve negatif moment bölgelerine yerleştirmişler ve kirişleri her bir açıklığın ortasından yükleyerek test etmişlerdir. FRP tiplerinin kiriş güçlendirmeye etkileri yük-sehim, kırılma modu, moment ve yük kapasitesi, moment yeniden dağılım ve süneklik açısından araştırılmıştır. CFRP veya GFRP ile güçlendirilen kirişler hibrit ile karşılaştırıldığında yük taşıma kapasitesinde önemli artışlar elde edilmiştir. GFRP ve CFRP ile yapılan güçlendirmeye göre karbon ve cam elyafın bir kombinasyonundan oluşan Hibrid FRP laminatlar, kirişlerin doğrusal olmayan

davranış sergilemelerine katkıda bulunmuştur. Sürekli kirişlerde minimum moment dağılımlarını yeniden düzenlemede hibrit kullanımının gerekli olduğu belirtilmiştir. Betonarme sürekli kirişlerin güçlendirilmesinde CFRP ve GFRP ile yapılan güçlendirmeye yerine hibrit kullanımı taşıma gücü, süneklik ve moment tekrar dağılım oranında önemli bir şekilde artırdığı belirtilmiştir.

Attari ve arkadaşları (2012), eğilmeye karşı güçlendirilmiş 7 adet betonarme kirişi dört nokta eğilme deneyi test edilmiştir. Kirişler 150×16×10 cm boyutlarında olup kirişlerin alt bölgelerine iki adet Ø10'luk üst bölgesine ise iki adet Ø8'lik donatılar konulmuş, kirişler basınç dayanımı 39 MPa olan beton kullanılarak üretilmiştir. Kirişlerin bir adeti kontrol elemanı olarak üç adeti cam veya karbon kumaşla enine ve boyuna sarılarak güçlendirilmiş, diğer üç adedi ise karbon ve cam kumaşlarla enine ve/veya boyuna sarılarak hibrit olarak güçlendirilmiştir. Yapılan bu güçlendirilme çözümleri dayanım, sertlik, süneklik ve kırılma modları açısından ele alınarak incelenmiştir. Cam ve karbon kumaşların beraber kullanılması betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde etkili bir sonuç vermiştir. Kontrol kirişine kıyasla %114 dayanım artışı elde edilmiştir. Aynı zamanda bu artış aşırı süneklik kaybına sebep olmamıştır. Aksine, Hibrit güçlendirme şeklinin kontrol kirişine göre 0.9 oranında daha süneklik olduğu gözlemlenmiştir. U-ankrajlı güçlendirilmesi eğilme mukavemetini, kirişlerin daha fazla deformasyonlar yapma kapasitesini artırarak ve iç kuvvetlerin yeniden dağıtılmasına katkıda bulunarak en iyi sonucu vermiştir. Yapılan diğer güçlendirmeler karşılaştırıldığında yalnız cam elyaf malzemenin güçlendirilmede kullanımı veya iyi bir kopma uzamasına sahip tek katlı hibrit kompozitin kullanımı kirişlerin sünekliğini artırdığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar genellikle FRP ile güçlendirilmiş kirişlerin kırılma modları, ani olarak göçtüğü ve sünekliğinde düşüş olduğu gibi kabul edilen görüşleri çürütmektedir. Güçlendirilmesi yapılan betonarme elemanın eğilme dayanımını tespit etmek için bir analitik model geliştirilmiştir. Model sonuçları güçlendirilen betonarme kirişlerin davranışını tam olarak tahmin ettiğini göstermiştir. Mevcut testler aynı zamanda betonarme yapılar için çift kat cam-karbon FRP kumaşın maliyet etkinliğini bir güçlendirme şekli olarak ortaya koymaktadır. Yapılan çalışmada deney sayısının oldukça az olduğu kirişlerin üretiminde kullanılan beton basınç dayanımının oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Çalışmada tek bir kiriş parametresi üzerinde çalışma yapılmıştır.

Yapılan literatür çalışmasında CFRP malzemelerin onarım ve güçlendirmede yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Ancak onarım ve güçlendirmede GFRP malzemelerin kullanımı oldukça sınırlı bir seviyededir. Güçlendirilmeye çalışılan yapı elemanlarında kullanılan beton kalitesi oldukça yüksek tutulmuştur. Ancak Türkiye’de meydana gelen bazı büyük depremlerde (13 Mart 1992 – Erzincan, 17 Ağustos 1999 gölcük depremi, 27 Haziran 1998 – Ceyhan, 12 Kasım 1999 Düzce, 3 Şubat 2002’de Afyon-Sultandağı, 1 Mayıs 2003’te Bingöl, 23 Ekim 2011’de Van) yapılan incelemeler neticesinde yapı elemanlarının imalinde kullanılan beton kalitesinin oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kolon ve kirişlerin sarılma bölgesinde kullanılan etriye adımlarının fazla olması bu bölgelerde deformasyonlara sebep olduğu görülmüştür Bu bilgiler ışığında yapılan deneysel çalışmada kullanılan beton kalitesi 20 MPa’ın altında tutulmuştur. Deneysel çalışmada üretilen kirişler eğilme ve kesme kapasitesi zayıf olarak enine ve boyuna donatısı yetersiz tutularak üretilmiştir. Ayrıca sadece FRP kompozitlerin etkinliğini görmek için basınç elemanlarında enine ve boyuna donatı kullanılmamıştır.

1.4. Amaç ve Kapsam

Bu çalışmada; alternatif güçlendirme elemanı olarak kullanılan FRP kompozitlerin karşılaştırılması amaçlanmış ve mevcut betonarme yapı elemanları hem CFRP ile hem de GFRP ile güçlendirilerek karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, taşıyıcı sistemin basınç ve eğilme elemanları aynı şartlar altında CFRP ve GFRP ile güçlendirilmiştir. Ayrıca bu çalışmanın sonunda, FRP’lerle yapılan güçlendirmeler değerlendirilerek, betonarme elemanların güçlendirilmesinde CFRP yerine GFRP’nin kullanımı araştırılacaktır.

Bu çalışma kapsamında, düşük dayanımlı betonlarla üretilen betonarme yapı elemanlarının FRP’lerle güçlendirilmesinde aksel basınç dayanımı düşük olan kolonlar, çeşitli nedenlerle beton basınç dayanımını kaybetmiş olan kolonlar, etriye sıkılaştırılmasına yeterli özen gösterilmeyerek üretilen kolonlar, eğilme ve kesme taşıma gücü yetersiz olan hasar görüş veya görmemiş dikdörtgen kesitli kirişler dikkate alınmıştır. Beton basınç dayanımı 25 MPa ve üzerinde olan betonarme kolon ve kirişler çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır.

1.5. Tezin İÇeriği

Bu tez çalışması yedi bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, kolon, kiriş gibi betonarme yapı elemanların FRP kompozitler ile güçlendirilmesi üzerine yapılan deneysel çalışmaların literatür taraması yapılmış ve literatüre ait zet bilgiler verilmiştir. Yapılan çalışmanın amaç ve kapsamı açıklanmıştır. Ayrıca FRP malzemelerin genel özellikleri, dünyadaki uygulama örnekleri bu bölümde yapılmıştır.

İkinci bölümde, deneysel çalışmada kullanılan malzemeler tanıtılmış, malzemelere ait bilgiler verilmiştir.

nc bölümde, aksel basınc elemanı olarak üretilen silindir betonların üretimi ve basınc yüküne karşı CFRP ve GFRP ile güçlendirme çalışması yapılmıştır. Betonarme kirişler üretilmiş, eğilme ve kesme yüküne karşı CFRP ve CFRP ile güçlendirilmiştir. Silindir betonların ve betonarme kirişlerin deney düzeneği tanıtılmış ve deneysel çalışmaya ait verilerin değerlendirilmesi anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde, karbon ve cam elyaf ile sargılamanın betonun basınc dayanımına ve sünekliğine etkilerini araştırmak için farklı basınc dayanımlarına sahip 150 mm çapında 300 mm yüksekliğinde üç farklı basınc dayanım sınıfına sahip silindir betonlar üretilmiştir. Aynı şartlar altında üretilmiş silindir betonlar tek doğrultulu CFRP ve GFRP ile tek veya çift kat sarılarak beton basınc dayanımlarına ve snekliklerine etkileri araştırılmıştır. Alınan sonuçlarla cam ve karbon elyaf kumaşla sarılan betonlar kendi aralarında ve şahit numunelerin ortalama basınc dayanımları ile karşılaştırılmış karbon kumaş yerine çok daha ekonomik olan cam kumaşın kullanımı araştırılmıştır.

Beşinci bölümde, depremde hasar görmemiş ancak güçlendirilmeye ihtiyaç duyulan betonarme yapılardaki kirişler dikkate alınarak ½ ölçeğinde betonarme kirişler üretilmiştir. EĞilme ve kesme taşıma gücü düşük olarak üretilen kirişler CFRP ve GFRP ile güçlendirilerek kirişlerin, eğilme ve kesme taşıma gücüne, enerji yutma kapasitelerine ve süneklik oranlarına etkileri araştırılmıştır. FRP Kompozitlerle

yapılan güçlendirmeler değerlendirilerek cam ve karbon kumaşlar ile güçlendirilmesi karşılaştırılmış ve betonarme elemanların güçlendirilmesinde ülkemizde üretilen ve karbon kumaşa göre oldukça ekonomik olan cam kumaşın kullanımı araştırılmıştır.

Altıncı bölümde, çeşitli sebeplerle eğilme ve kesme hasarına uğramış olan betonarme kirişlerin onarımı ve güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Laboratuvar ortamında eğilme ve kesme kuvveti hasarına uğratılan iki adet kiriş epoksi enjeksiyonu ile onarılmış ve GFRP ile sarılarak güçlendirilmeye çalışılmıştır. Hasar görmüş kirişler beşinci bölümdeki deneyler ışığında GFRP ile güçlendirilerek kirişin eğilme ve kesme taşıma gücüne, enerji yutma kabiliyetlerine, süneklik düzeylerine etkileri araştırılmıştır. GFRP sarılarak güçlendirilen betonarme kiriş numunelerinden elde edilen sonuçlar şahit kirişlerle, CFRP ile yapılan güçlendirmelerle ve GFRP ile yapılan güçlendirmelerle karşılaştırılarak hasar görmüş kirişlerin GFRP ile güçlendirilebilirliği araştırılmıştır.

Yedinci bölümde, Yapılan deneysel çalışmalar özetlenmiş ve değerlendirmeler yapılmıştır.

BÖLÜM 2. DENEY MALZEMELERİ

Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler; beton, çelik donatı, karbon elyaf, cam elyaf, epoksi reçine, enjeksiyon reçinesi ve tamir harcından oluşmaktadır. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilerin değerlendirilebilmesi ve tutarlı olması için kullanılan malzemeler aynı yerlerden ve tek seferde temin edilmiştir.

2.1. Silindir Beton Malzemeleri

Beton üretiminde kullanılan başlıca malzemeler; çimento, su, agregadan oluşmaktadır. Bu çalışmada üretilen silindir beton numuneleri için iki çeşit agrega ve CEM IV/B 32.5 R çimento kullanılmıştır.

2.1.1. Agregalar

Silindir beton üretiminde hazır beton firmalarından temin edilen 0-4 mm doğal kum ve 4-16 mm kırma taş kullanılmıştır (Şekil 2.1). Beton üretiminde kullanılan agregalar üzerinde TS 3526'ya göre özgül ağırlık deneyi, TS 3529'a göre de birim ağırlık deneyi yapılmıştır. Beton üretiminde kullanılan agregaların granülometri analizi TS 3530'a göre yapılarak agrega karışım oranları belirlenmiştir.

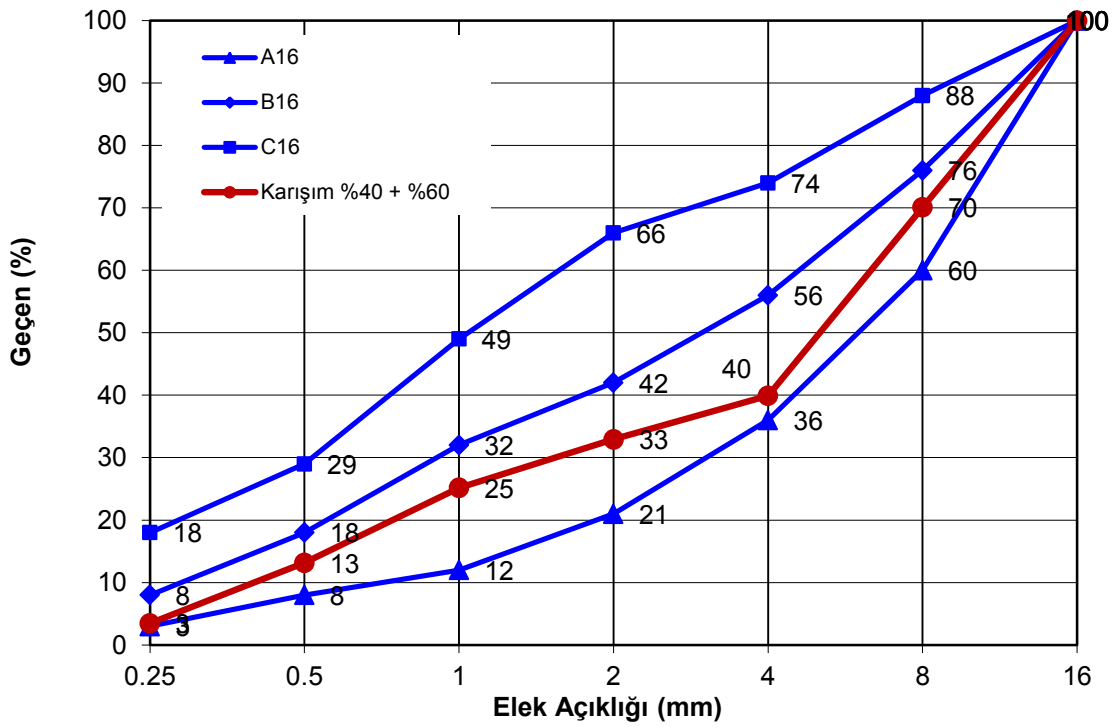


a) Doğal kum

b) Mıçır

Şekil 2.1. Beton üretiminde kullanılan agregalar

Agrega kümelerinden alınan malzemeler üzerinde elek analizleri yapılarak uygun karışım oranları bulunmuştur (Şekil 2.2). Elek analizleri sonucunda doğal kum %40, mıçır %60 oranında karıştırılarak uygun karışım oranları bulunmuştur.



Şekil 2.2. Agregalar karışımının granülometri eğrisi

2.1.2. Çimento

Beton karışımında CEM IV/B 32.5 R Puzolanik Çimento kullanılmıştır. Puzolanik Çimento, Portland Çimento ve Portland Puzolanlı Çimento'ya göre daha geç dayanım kazanmakta, su/çimento oranları da göreceli olarak daha yüksektir. Aynı zamanda alkali-agrega reaksiyonuna ve kimyasal dış etkilere karşı daha dayanıklıdır. Çimentonun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Kullanılan çimento TS EN 197-1'e uygundur.

Tablo 2.1. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Fiziksel özellikler			
	Nuh Çimento	Standart	Birim
Priz başlangıcı	170	min. 75	dakika
Priz sonu	217	-	dakika
Hacim genleşmesi	1.00	maks. 10	cm
Özgül yüzey	5537	-	cm ² /g
Litre ağırlığı	827	-	g/l
2 günlük dayanım	16.9	min. 10	MPa
28 günlük dayanım	40.8	min./maks. 32.5/52.5	MPa
Kimyasal özellikler			
SO ₃	2.40	maks. 3.5	%
Cl ⁻	0.01>	maks. 0.1	%
Puzolanlık testi	Olumlu	Deneyi sağlar	

2.1.3. Su

Beton karışımında Adapazarı'nda mevcut şebeke suyu kullanılmıştır. Kullanılan suyun özellikleri SASKİ'den alınmıştır (Tablo 2.2). Kullanılan su TS EN 1008'e uygundur.

Tablo 2.2. Sakarya Büyükşehir Belediyesi, SASKİ Genel M d rl g 'nce Maltepe İçme Suyu Raporu

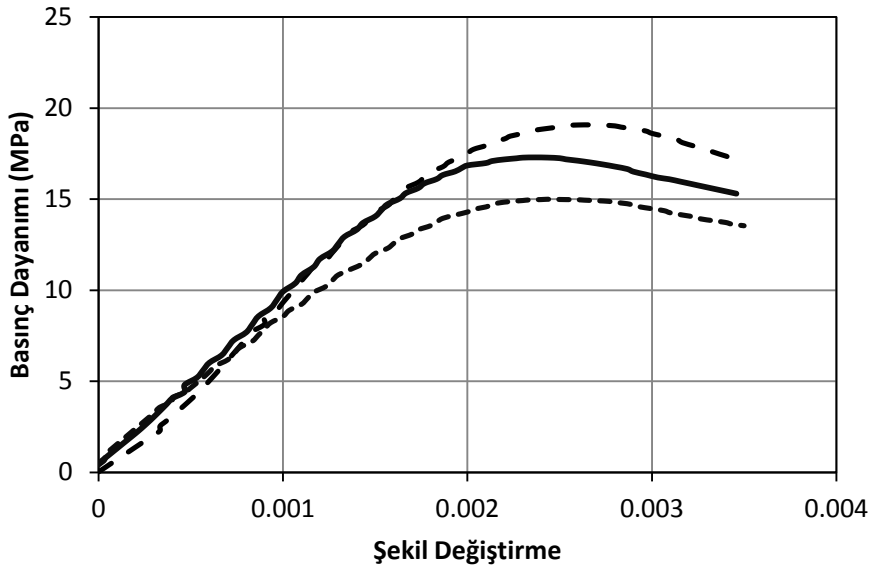
Parametreler	Sonuçlar	Parametreler	Sonuçlar
pH	6.5- 9.5	Sertlik (Fs �)	-
Bulanıklık (NTU)	5.00	Nitrit (mg/l)	0.500
Koku ve tat	Normal	Nitrat (mg/l)	50.0
Amonyum (mg/l)	0.500	Florür (mg/l)	1.500
Demir (mg/l)	0.200	Bakır (mg/l)	2.000
Mangan (mg/l)	0.050	Siyanür (mg/l)	0.050
Alüminyum (mg/l)	0.200	Kurşun (mg/l)	0.010
Sülfat (mg/l)	250.0	Kadmiyum (mg/l)	0.005
Klorür (mg/l)	250.00	Krom (mg/l)	0.050
Sodyum (mg/l)	200.00	Nikel (mg/l)	0.020

2.2. Betonarme Kiriş Malzemeleri

Betonarme kiriş üretiminde kullanılmak üzere C16/20 betonu hazır beton firmasından temin edilmiştir. Kirişlerin  retiminde boyuna donatı olarak  10'luk, enine donatı olarak  8'lik S420 elik donatı kullanılmıştır.

2.2.1. Kiriş betonu

Betonarme kiriş betonu Adapazarı'nda bulunan hazır beton firmasından temin edilmiştir. Temin edilen C16/20 betonu kalıplara dökülmüŐ ve dalıcı el vibratörü ile sıkıŐtırılmıŐtır. Kiriş betonun kalıplara dökümü yapılırken   adet standart silindir numune alınmış ve 28 günlük dayanım sürecini tamamlamasının ardından betonların basınç dayanımı tespit edilmiştir. Yapılan basınç testi sonucunda betonların ortalama basınç dayanımı 17.13 MPa, ortalama Şekil değiştirme kapasiteleri 0.0025, elastisite modülü ise 27451 MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 2.3).



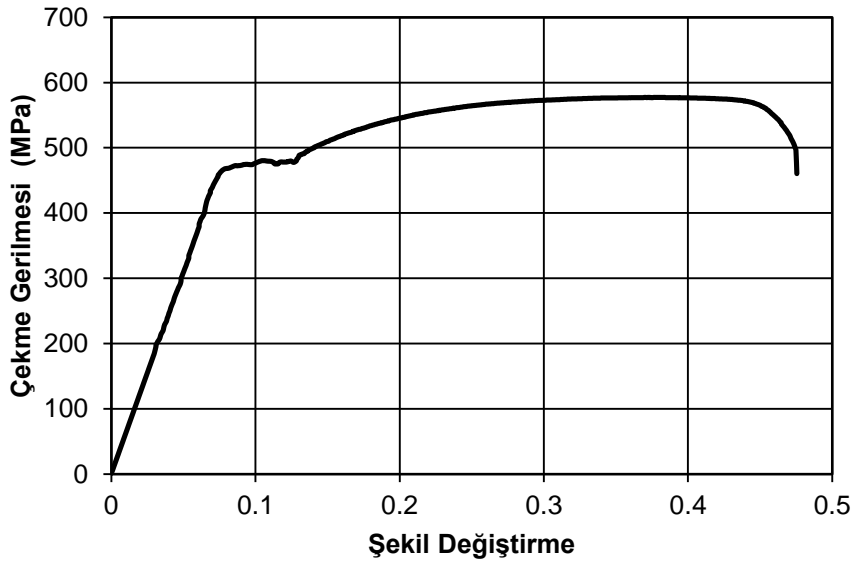
Şekil 2.3. Silindir betonların gerilme-şekil değiştirme grafikleri

Tablo 2.3. Silindir numunelerin 28 günlük basınç deneyi sonuçları

Numune	Basınç dayanımı F_c (MPa)	Şekil değiştirme (ϵ)
1	19.08	0.0027
2	17.30	0.0024
3	15.00	0.0024
Ortalama	17.13	0.0025

2.2.2. Kiriş donatısı

Betonarme kiriş üretiminde kullanılmak üzere temin edilen donatılardan üçer adet numune alınmış ve çekme deneyi ile donatıların çekme dayanımları hesaplanmıştır. Donatılara ait gerilme-şekil değiştirme grafik örneği Şekil 2.4'te, donatıların ortalama akma ve kopma dayanımları Tablo 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. S420 çeliklerin gerilme-şekil değiştirme grafiği

Tablo 2.4. S420 çeliğinin çekme deneyi sonuçları

Donatı türü	Akma dayanımı	Kopma dayanımı
	F_{sy} (MPa)	F_{su} (MPa)
Ø8	359.3	510.5
	378.8	545.7
	367.2	519
Ortalama	368.4	525.1
Ø10	478.5	577.2
	482.1	626.7
	475.4	593.0
Ortalama	478.7	599.0

2.3. Onarım ve Güçlendirme Malzemeleri

Beton basınç elemanlarının güçlendirilmesinde ve betonarme kirişlerin onarım ve güçlendirilmesinde epoksi, tek doğrultulu cam ve karbon elyaf, enjeksiyon reçinesi ve tamir harcı kullanılmıştır. Onarım ve güçlendirme malzemeleri aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

2.3.1. Epoksi

Cam ve karbon elyafın silindir numunelerin yüzeylerine yapıştırılmasında çift bileşenli epoksi esaslı doyumra reçinesi olan Sikadur 330 kullanılmıştır (Şekil 2.5). Uygulaması kolay olan Sikadur 330; beton, taş, metal, ağaç ve yapı malzemeleri için uygun bir yapıştırıcı malzemedir. 4 kg A bileşeni (reçine), 1 kg B bileşeninden (sertleştirici) oluşan ve hazır setler halinde ambalajlanan Sikadur 330 epoksi reçinesi 4/1 oranında karıştırılarak beton yüzeylerine uygulama yüzeyi sıcaklığı +10°C ile +35°C arasında mala, fırça, rulo yardımı ile kolaylıkla uygulanabilmektedir. Sikadur 330 epoksi reçinesi yüksek mukavemete sahip ve devamlı yükler altında yüksek bir sünme dayanımı göstermektedir. Sikadur epoksi reçine; kolay karıştırılır olması, mala ve doyumra rulosu ile uygulanabilmesi, elle doyumra işlemi için uygun olması, birçok yüzeye iyi aderans sağlaması, emsallerine göre yüksek dayanımlı olması, astar uygulaması gerektirmemesi, uygulama öncesi ve sonrası neme dayanıklı olması ve solventsiz olması gibi birçok avantaja sahiptir.

Epoksi reçinenin etkili olabilmesi için beton yüzeylerinin temiz olması, kuru ve kir, yağ, kaplama, yüzey kür malzemeleri gibi yabancı maddelerden arındırılmış olması, sağlam ve en az 1.0 N/mm² veya tasarımın gerektirdiği minimum yüzey çekme dayanımına sahip olması, yüzeydeki çıkıntılar aşındırılarak uzaklaştırılmış olması gerekmektedir. Sarılacak köşeler en az 20 mm çapında yuvarlatılmalıdır. Sikadur 330 uygulanmadan önce, beton yüzeyinde bulunan tüm toz, gevşek ve oynak parçacıklar temizlenmelidir. Ayrışmaya uğramış yerler, kuşgözü boşluklar ve delikler gibi yüzey hasarları tamamen açık hale getirilmelidir.

Sikadur 330 üzerine SikaWrap'ı istenilen doğrultuda yerleştirerek dokuma üzerinden plastik doyumra rulosu ile lif doğrultusuna paralel yönde hareket ederek tüm dokuma yüzeyi boyunca reçinenin yayılması sağlanmalıdır. SikaWrap dokumasının ilave kat uygulamaları için Sikadur 330 bir önceki kat üzerine 60 dakika içerisinde, henüz alttaki reçine katı ıslak durumdayken uygulanmalıdır. SikaWrap dokumasının bindirme boyu, güçlendirme projesinde belirtildiği şekilde veya en az 100 mm olmalıdır. Güçlendirmede kullanılan epoksinin karakteristik diğer özellikleri Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5. Sikadur 330 epoksi yapıştırıcısının özellikleri

Kimyasal yapı	Epoksi reçine	
Birim ağırlık	Reçine karışımı: 1.31 kg/l (+23°C'de)	
Viskozite	Kayma hızı: 50 /s	
	Sıcaklık	Viskozite
	+10°C	~ 10'000 mPas
	+23°C	~ 6'000 mPas
	+35°C	~ 5'000 mPas
Termal genleşme katsayısı	45 × 10 ⁻⁶ / °C (-10°C ile +40°C arasında)	
Servis sıcaklığı	-40°C ile +50°C arası	
Mekanik/ fiziksel özellikler		
Çekme dayanımı	30 N/mm ² (+23°C'de 7 günlük) (DIN 53455)	
Yapışma dayanımı	Kumlanmış yüzeyde beton kırılması: > 1 gün (EN 24624)	
E-modülü	Eğilme: 3800 N/mm ² (+23°C'de 7 günlük) (DIN 53452) Çekme: 4500 N/mm ² (+23°C'de 7 günlük) (DIN 53455)	
Kopma uzaması	%0.9 (+23°C'de 7 günlük) (DIN 53455)	
Kimyasal dayanım	Ürün kimyasal dayanım amaçlı değildir.	
Kür detayları		
Uygulanan ürünün kullanıma hazır olma süresi	Sıcaklık	
	+10°C	Tam kürünü alma
	+23°C	7 gün
	+35°C	5 gün
	Not: Yukarıdaki süreler yaklaşıktır ve değişen ortam koşullarından etkilenebilir.	2 gün

2.3.2. Cam elyaf

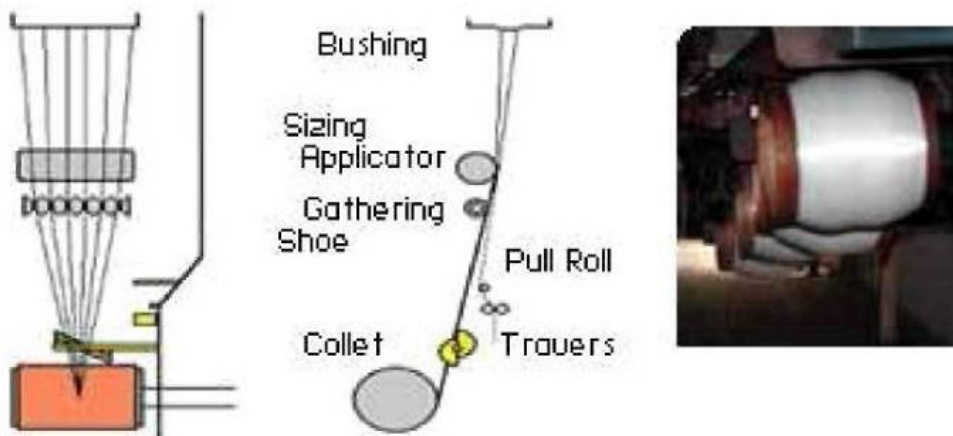
Cam elyaf, kolemanit, silika, alüminyum gibi cam üretim maddelerinden üretilmektedir. Ham madde bileşimi çok ince öğütülerek karıştırılıp, homojen bir karışım elde edilmektedir. Yaklaşık 1600 °C sıcaklıkta çalışan bir ergitme fırınında beslenerek fırın içinde karışım yavaşça sıvı hale geçmektedir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Cam elyaf ham maddelerinin yüksek sıcaklıkta sıvı hale geçmesi

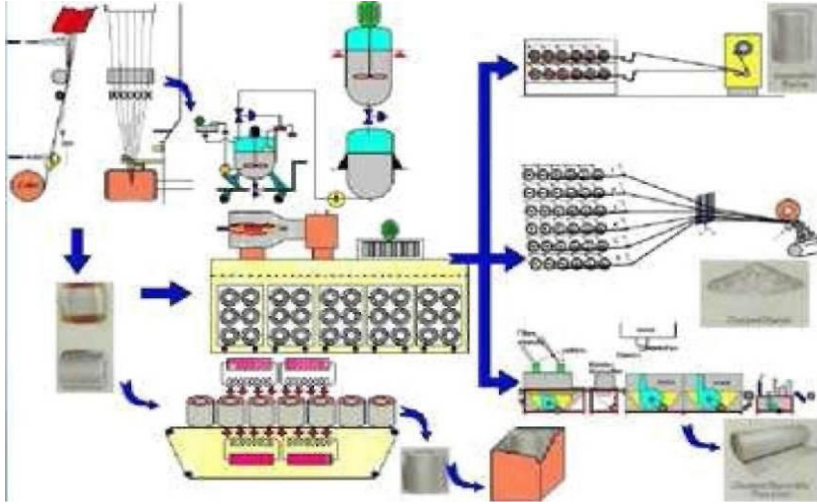
İşleme uygun olarak yerleştirilmiş bir sarma sistemi ile 50 m/sn gibi yüksek bir hızla uygulama türüne bağlı olarak 5 ile 20 mikron çapında çekilen cam elyaf, bir mandal üzerine sarılarak “kek” adı verilen bir bobin üzerinde toplanmaktadır (Şekil 2.6).

Cam lifleri, demet haline getirilmeden önce, bağlayıcı adı verilen bir kimyasal bileşim ile kaplanmaktadır. Bağlayıcı cinsi, kompozit malzeme içinde cam elyafın performansını etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Kompozit mukavemeti, reçine-cam bağının kuvveti ile doğru orantılıdır. Bu bağın kuvveti, kullanılan bağlayıcı içindeki bağlama gruplarının cinsine bağlıdır. Bağlayıcı; “film oluşturucu”, “bağlama grupları”, “antistatik katkı”, “plastifiyan”, “lübrikant” adı verilen malzemelerin karışımından oluşmaktadır.



Şekil 2.6. Cam liflerin bobinlere sarılması işlemi

Bobin üzerine sarılan cam lifleri kurutulduktan sonra, kırılmış demetten keçe, çok uçlu fitil, kırılmış demetler gibi cam elyaf ürünlerinin elde edilmesi amacıyla işleme tabi tutulmaktadır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Cam liflerin bobinlere sarıldıktan sonraki işlemleri

Biçimlendirme işleminin ardından yıpranmaya dayanımın artması için cam elyaf üzerine kimyasallarla bir kaplama işlemi yapılır. Cam elyaf ile matris arasında yapışma gücünü arttıran “silan” bazlı ve elyaf üzerinde ince film oluşturan kimyasalların kullanımından sonra cam elyafın kullanım alanları artmıştır.

Günümüzde cam elyafın üretim amaçlarına bağlı olarak, değişik cam elyaf çeşitleri vardır:

A camı, yüksek oranda alkali içeren bir camdır. Bu nedenle elektriksel yalıtkanlık özelliği kötüdür. Kimyasal direnci yüksektir. Pencere ve şişelerde en çok kullanılan cam olmasına rağmen kompozitlerde çok fazla kullanılmamaktadır.

C camının, kimyasal çözeltilere direnci çok yüksektir. Depolama tankları gibi yerlerde kullanılır.

E camının, düşük alkali oranına sahip olması nedeniyle elektriksel yalıtkanlığı diğer cam tiplerine göre çok iyidir. Mukavemeti oldukça yüksektir. Suya karşı direnci de oldukça iyidir. Nemli ortamlar için geliştirilen kompozitlerde genellikle E camı

kullanılmaktadır. Ayrıca bu cam tipi, alkali dayanımının ve mukavemetinin yüksek olması nedeni ile yapı elemanlarının onarım ve güçlendirilmesinde diğer cam tiplerine göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

S + R camı yüksek mukavemetli ve yüksek maliyetli bir camdır. Çekme mukavemeti E camına oranla %33 daha yüksektir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda oldukça iyi bir yorulma direncine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle havacılıkta ve uzay endüstrisinde tercih edilir.

Cam elyaflar genellikle plastik veya epoksi reçinelerle kullanılmaktadır. Cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6. Cam elyafların mekanik ve fiziksel özellikleri ve katkı madde yüzdeleri

Özellikler	Cam tipi			
	A	C	E	S
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2.50	2.49	2.54	2.48
Elastisite modülü (GPa)	-	69.0	72.4	85.5
Çekme mukavemeti (MPa)	3033.0	3033.0	3448.0	4585.0
Isıl genleşme katsayısı (m/m/C×106)	8.6	7.2	5.0	5.6
Yumuşama sıcaklığı (°C)	727.0	749.0	841.0	970.0
Katkı malzemeleri (%)				
SiO ₂	72.0	64.4	52.4	64.4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	0.6	4.1	14.4	25.0
CaO	10.0	13.4	17.2	-
MgO	2.5	3.3	4.6	10.3
Na ₂ O, K ₂ O	14.2	9.6	0.8	0.3
B ₂ O ₃	-	4.7	10.6	-

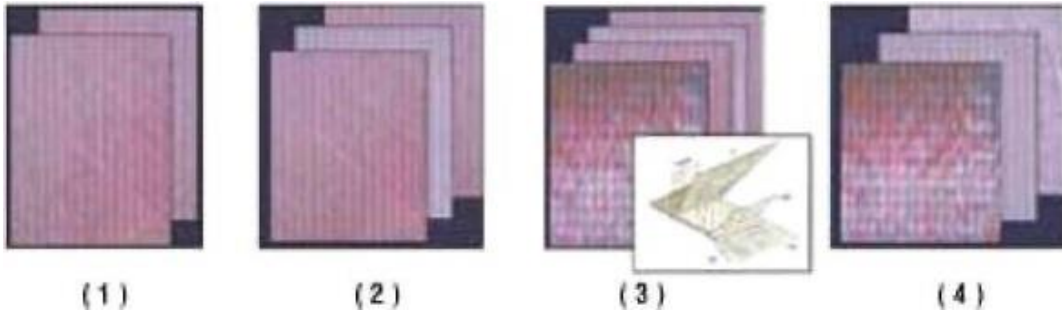
Çekme mukavemeti yüksek olan cam elyafların birim ağırlık başına mukavemeti çelikten yüksektir. Isıl dirençleri düşük olmasına nispeten yanmaz özelliğe

sahiptirler; ancak yüksek sıcaklıkta yumuşarlar. Kimyasal malzemelere karşı dirençli olan cam elyafın nem absorbe etme özelliği bulunmamaktadır. Cam elyafı kompozitlerde matris ile cam elyaf arasında nem sebebiyle bir çözülme olabilmektedir. Özel elyaf kaplama işlemleri bu etkiyi ortadan kaldıracaktır. Elektrikli iletmemesi sayesinde elektriksel yalıtımın önem kazandığı durumlarda cam elyafı kompozitlerin kullanılmasına imkan tanınmaktadır. Cam lifi, kullanım amacına uygun ticari ürünler halinde, sürekli cam lifi demeti ve kırılmış cam lifi demeti olarak üretilmektedir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Değişik amaçlar için üretilen cam elyaflar

Dokunmamış fitiller ile devamlı fitillerin iki veya üç katlı olarak birleştirilmesi ve bu katların polyester iplik ile dikilmesiyle çok yönlü mukavemet sağlanmaktadır. Bu kumaşlarda, 45 veya 90 derecelik açılarda bir arada kullanılmasının yanı sıra keçe ile de dikilmesi mümkündür (Şekil 2.9)



1- İki açılı 2- Üç açılı 3- Dört açılı 4- İkili açılı ve keçe

Şekil 2.9. Tek yönlü fitil kumaş çeşitleri

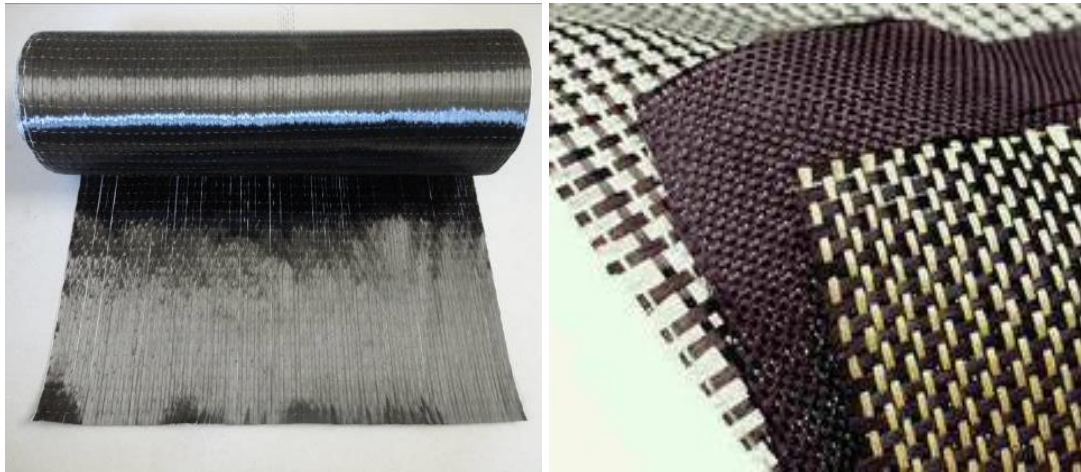
Betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesinde, sürekli cam lifi demetlerinin tek ve çift yönlü dokunmasıyla üretilen kumaşlar kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında da silindir beton ve kirişlerin güçlendirilmesinde tek doğrultulu alkali dayanıklı E tipi Sika Wrap-430 G/25 türü cam kumaş kullanılmıştır. Cam elyafın; kolay temin edilebilir olması, karbon elyafa göre çok daha ucuz olması, deformasyon yapma kabiliyetinin yüksek olması, üretiminin karbon elyafa göre daha kolay ve yaygın olması, karbon elyafın kullanıldığı alanlarda kolaylıkla kullanılabilmesi gibi birçok avantajı vardır. Bu çalışmada kullanılan cam kumaşın karakteristik özellikleri Tablo 2.7’de verilmiştir.

Tablo 2.7. Güçlendirmede kullanılan SikaWrap 430 G/25 malzemesinin özellikleri

Ürün	SikaWrap 430 G/25 kuru uygulama yöntemiyle uygulama için tek doğrultulu cam lifli dokumadır.
Birim ağırlık	445 g/m ² + 22 g/m ²
Dokuma tasarım kalınlığı	0.17 mm (cam liflerin toplam alanına göre).
Lif yoğunluğu	2.56 g/cm ³
Kuru lif özellikleri	Çekme dayanımı: 3400 N/mm ² (measured on virgin filament). 2300 N/mm ² (measured on roving). Çekme E-modülü: 76000 N/mm ² (nominal). Kopma uzaması:%2.8 (bükülmüş lif ölçümü).
Laminat özellikleri	Laminat kalınlığı: 1.0 mm kat başına (Sikadur 330 ile doyurulduğunda) Nihai yük taşıma: 230 kN/m kat başına Çekme E-modülü:14.0 kN/mm ² (1.0 mm tipik laminat kalınlığı için).
Uygulama detayları ve Sarfiyat	Yüzeyin pürüzlülüğüne bağlı olarak; - Astar dahil ilk katın uygulanması için: ~ 0.8 - 1.4 kg/m ² - Takip eden katların uygulanması için: ~ 0.6 kg/m ² (Sikadur 330).
Yüzey kalitesi	Minimum yüzey çekme dayanımı: 1.0 N/ mm ²

2.3.3. Karbon elyaf

Karbon lifler, dünyada bilinen en sağlam malzemelerdendir. Bu olağanüstü sağlamlıkları nedeni ile karbon lifler ve karbon liflerinden dokunmuş kumaşlar endüstrinin çeşitli kademelerinde kullanılmaktadır. Normalde iplik yumuşaklığında olan lifler, kolayca istenilen şekle getirilmekte ve özel epoksi reçinesi ile muamele edilince sertleşmektedir. Kullanımındaki pratiklik, binaya ekstra yük getirmemesi ve çelikten daha güçlü olmasının verdiği olağanüstü sağlamlık, bu malzemenin en belirgin üstünlüklerindedir. Karbon lif takviyeli kumaşlar, son zamanlarda inşaat mühendisliği alanında yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. İnşaat sektörünün yüksek miktarda ve ekonomik maliyetli malzeme gereksinimi varsa da, karbon liflerin kullanımının yaygınlaşmasıyla maliyetler azalmış ve bu sektörde kullanılabilir hale gelmiştir. Özellikle deprem ve korozyon hasarlı binaların ekonomik ve hızlı onarımlarında iyi sonuçlar vermiştir. Silindir betonların ve betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde tek doğrultulu karbon lifli dokuma olarak Sika Wrap -300 C/60 ürünü kullanılmıştır (Şekil 2.10). Karbon kumaşın karakteristik özellikleri Tablo 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.10. Karbon elyafı

Tablo 2.8. Güçlendirmede kullanılan SikaWrap 300 C/60malzemesinin özellikleri

Birim ağırlık	300 g/m ² + 15 g/m ²
Dokuma tasarım kalınlığı	0.17 mm (karbon elyafların toplam alanına göre).
Lif yoğunluğu	1.79 g/cm ³
Mekanik / Fiziksel özellikler	
Kuru lif özellikleri	Çekme dayanımı: 3900 N/mm ²
	Çekme E-modülü: 230000 N/mm ²
	Kopma uzaması: %1.5 (nominal)
Laminat özellikleri	Sikadur -330 ile uygulamada; Laminat kalınlığı: 1.0 mm kat başına. Nihai Yük Taşıma: 420 kN/m kat başına E-modülü: 33.0 kN/mm ² (1.0 mm tipik laminat kalınlığı için).
Uygulama detayları Ve sarfiyat	Kuru uygulama: -Astar dahil ilk katın uygulanması için: ~ 1.0-1.5 kg/m ² -Takip eden katların uygulanması için: ~ 0.8 kg/m ² .
Yüzey kalitesi	Minimum yüzey çekme dayanımı: 1.0 N/ mm ²

2.3.4. Tamir harcı

Hasar görmüş kirişlerin çatlak yüzeylerinin kapatılmasında Sikadur 31, solvent içermeyen, neme toleranslı, tiksotropik, 2 bileşenli, epoksi reçineler ve özel dolgular içeren, +10 °C ile + 30 °C arasındaki sıcaklıklarda kullanılmak üzere tasarlanmış yapısal yapıştırma ve tamir harcı kullanılmıştır. Uygulaması kolay olan Sikadur 31, A bileşeni / B bileşeni 3/1 oranında, ağırlıkça veya hacimce karıştırılarak hazırlanmaktadır. Sikadur 31 tamir harcının kolay karıştırılabilir ve uygulanabilir olması, yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip olması, kuru ve nemli beton yüzeyler için uygun olması, solvent içermemesi, rötresiz sertleşmesi, astar gerektirmemesi, yüksek başlangıç ve nihai dayanım sağlaması, iyi aşınma dayanımı ve iyi kimyasal dayanıma sahip olması gibi birçok avantajı vardır. Beton elemanlar, sert doğal taş, seramik, prefabrik hafif beton yapı elemanları vb. yapı elemanları için uygun bir yapıştırıcı malzemedir. Sikadur 31'e ait diğer özellikler Tablo 2.9'da verilmiştir.

Tablo 2.9. Sikadur 31 iki bileşenli tiksotropik epoksi yapıştırıcının özellikleri

Yoğunluk	~1.65 kg/l (A+B bileşenlerinin karışımı) (+20°C 'de)			
Hacim değişimi	Rötre/Sünme: Rötresiz kür alır.			
Basınç dayanımı	(DIN EN 196' ya göre)			
		Kür sıcaklığı		
	Kür süresi	+20°C	+10°C	
	1 gün	40 - 45 N/mm ²	35 - 40 N/mm ²	
	10 gün	60 - 70 N/mm ²	50 - 60 N/mm ²	
Eğilmede çekme dayanımı	(DIN EN 196' ya göre)			
		Kür sıcaklığı		
	Kür süresi	+10°C ile +20°C		
	10 gün	30 - 40 N/mm ²		
Çekme dayanımı	(ISO 527' ye göre)			
		Kür sıcaklığı		
	Kür süresi	0°C ile +20°C		
	10 gün	15 - 20 N/mm ²		
Yapışma dayanımı	(EN ISO 4624, EN 1542 ve EN 12188' ve göre)			
	Kür süresi	Sıcaklık	Yüzey	Yapışma
	10 gün	+10°C ile +20°C	Kuru beton	> 4 N/mm ²
	10 gün	+10°C ile	Çelik	15 N/mm ²
	100% betonda göçme			
E-Modülü	~ 4300 N/mm ²			
Uygulama koşulları / sınırlamalar				
Yüzey	En az +10°C / En fazla +30°C			
Ortam sıcaklığı	En az +10°C / En fazla +30°C			
Malzeme sıcaklığı	Sikadur 31, +10°C ile +30°C arasında olmalıdır.			

2.3.5. Enjeksiyon reçinesi

Hasar görmüş kirişlerin çatlaklarının onarılmasında, Sikadur 52 yüksek dayanımlı epoksi reçinelerden oluşan iki bileşenli, solvensiz, düşük viskoziteli enjeksiyon reçinesi kullanılmıştır. Sikadur 52; köprüler ve diğer mühendislik yapılarında, kolon, kiriş, temel, duvar, zemin ve su tutucu yapılardaki boşluk ve çatlakları doldurmak için kullanılmaktadır. Su geçişine karşı etkili bir bariyer olmanın, korozyona sebep olabilecek maddelerin yapıya işlemesine engel olmanın yanı sıra beton elemanlarını yapısal olarak birbirine yapıştırmayı sağlamaktadır. Sikadur 52'nin; solventsiz ve düşük viskoziteli olması, kuru ve rutubetli ortamlarda uygulanabilmesi, düşük sıcaklıklarda kullanılabilmesi, yüksek mekanik ve yapışma dayanımlarına sahip olması ve tek bileşenli pompalarla enjekte edilebiliyor olması gibi birçok avantajları vardır. Sikadur52'e ait teknik özellikler Tablo 2.10'da verilmiştir.

Tablo 2.10. Sikadur 52 düşük viskoziteli enjeksiyon reçinesi

Kimyasal yapı	Modifiye edilmiş solventsiz iki bileşenli epoksi reçine.
Yoğunluk	A bileşeni: 1.13 kg/l (+20°C'de) B bileşeni: 1.01 kg/l (+20°C'de) A+B bileşenleri karışımı(2/1): 1.0850 kg/l (+20°C'de)
Viskozite	450 cp (+20°C'de)
Termal genleşme katsayısı	89×10^{-6} per °C (-20°C -- +40°C) (EN ISO 1770'e göre)
Basınç dayanımı	53 N/mm ² (10 gün sonunda +20°C, %65r.r'de)
Çekme dayanımı	25 N/mm ² (10 gün sonunda +20°C, %65r.r'de)
Yapışma dayanımı	Betona: > 4 N/mm ² (beton kırılması) Çeliğe: ~10 N/mm ² (DIN 53232)
Yüzey sıcaklığı	En az +5°C / en fazla +30°C
Karıştırma	Karışım oranı A /B = 2 /1 ağırlıkça ve hacimce

BÖLÜM 3. DENEY DÜZENEKLERİ VE YÖNTEM

Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar, basınç ve eğilme deneylerinden oluşmaktadır. Basınç deneylerinde kullanılan standart boyutlardaki silindir betonlar, Türkiye'deki mevcut yapılarda yaygın olarak karşılaşılan ve güçlendirilmeye ihtiyaç duyulan betonarme kolonlardaki düşük dayanımlı betonlar dikkate alınarak üç farklı basınç dayanımında üretilmiştir. Üretilen standart boyutlardaki silindir betonlar, CFRP ve GFRP ile güçlendirilerek basınç deney düzeneğinde test edilmiştir. Eğilme deneyinde kullanılan betonarme kirişler, Türkiye'deki mevcut yapılarda yaygın olarak karşılaşılan ve taşıma gücü yetersiz kirişler dikkate alınarak ½ ölçeğinde üretilmiştir. Üretilen betonarme kirişler, CFRP ve GFRP ile güçlendirilerek eğilme deney düzeneğinde test edilmiştir (Doğangün (2004), Sezen (2003), Arslan (2006), Celebi (2012)).

Bu bölümün ilk aşamasında beton basınç deneyi elemanlarının üretimi ve güçlendirilme çalışmaları verilmiş, ardından basınç deney düzeneği ve sonuçların nasıl değerlendirileceği açıklanmıştır. İkinci aşamasında ise eğilme deney elemanlarının üretimi ve güçlendirilmesi, eğilme deney düzeneği ve sonuçların değerlendirilmesi ile ilgili bilgiler verilmiştir.

3.1. Silindir Betonların Üretimi

Deneysel çalışmada kullanılmak üzere üretilen silindir betonlar, Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği'nin laboratuvarında hazırlanmıştır. TS 802 yardımı ile üç farklı basınç dayanımına sahip betonların hesabı yapılmıştır. Her bir seriden 30 adet, 15 cm çapında ve 30 cm yüksekliğinde silindir numuneler üretilmiştir. Hazırlanan seriler arasında yaklaşık 5 MPa basınç dayanım farkı olması hedeflenmiştir.

Beton karışım hesabı yapılmasının ardından, 60 dm³ hacimli beton mikseri kullanılarak beton numunelerin karıştırma işlemi yapılmıştır. Taze betonun karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra slump deneyi ile çökme miktarı tespit edilmiştir. Slump hunisinin içerisi ıslatılmış, taze beton, huniye üç tabaka halinde ve her tabaka yaklaşık huninin hacim olarak üçte birini dolduracak şekilde yerleştirilmiş ve her tabaka 25 defa kenarlarından ortaya doğru dairesel olarak şişlenmiştir. Huni, kontrollü olarak dikey yönde kaldırılmış ve çökme miktarı ölçülmüştür. Seri 1-2-3 betonları için çökme miktarları 15, 12 ve 6 cm olarak ölçülmüştür (Tablo 3.1).

Karışımı tamamlanan taze beton, yüzeyi temizlenen ve kalıp yağı ile yağlanan silindirik kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıp tabanı ve yüzeyi temizlendikten sonra kalıp ayırıcı yağ ile yağlanmıştır. Taze beton, kalıplara homojen yerleşmesi için üç tabaka halinde doldurulmuş ve her tabaka 25 vuruşla şişlenmiştir. Betonların 24 saat kalıp içerisinde bekletilmesinin ardından Seri 1 ve Seri 2 betonları düşük dayanım elde etmek için açık havada, Seri 3 betonları kür havuzunda 28 gün bekletilmiştir.

Tablo 3.1. 1 m³ beton içerisindeki malzemelerin kg cinsinden miktarları

Malzemeler	Seri 1	Seri 2	Seri 3
Çimento (kg)	257	269	283
Kum (kg)	783	784	785
1 Nolu mıcır (kg)	1174	1176	1177
Su (kg)	180	175	170
Toplam (kg)	2394	2404	2415
Çökme miktarı (cm)	15	12	6
Su/çimento oranları	0.7	0.65	0.6

3.1.1. FRP kumaşlarla betonların güçlendirilmesi

Dayanım kazanma süreçlerini tamamlayan Seri 1, Seri 2 ve Seri 3 beton numunelerinin kurutulmasının ardından üniform yükleme için numunelere başlık yapılmıştır. Başlık işleminden sonra kenarlardaki çapaklar alınmış, sarım yüzeyleri tel tarakla taranmış ve numune yüzeyleri gevşek ve oynak parçacıklardan arındırılmıştır (Şekil 3.1).

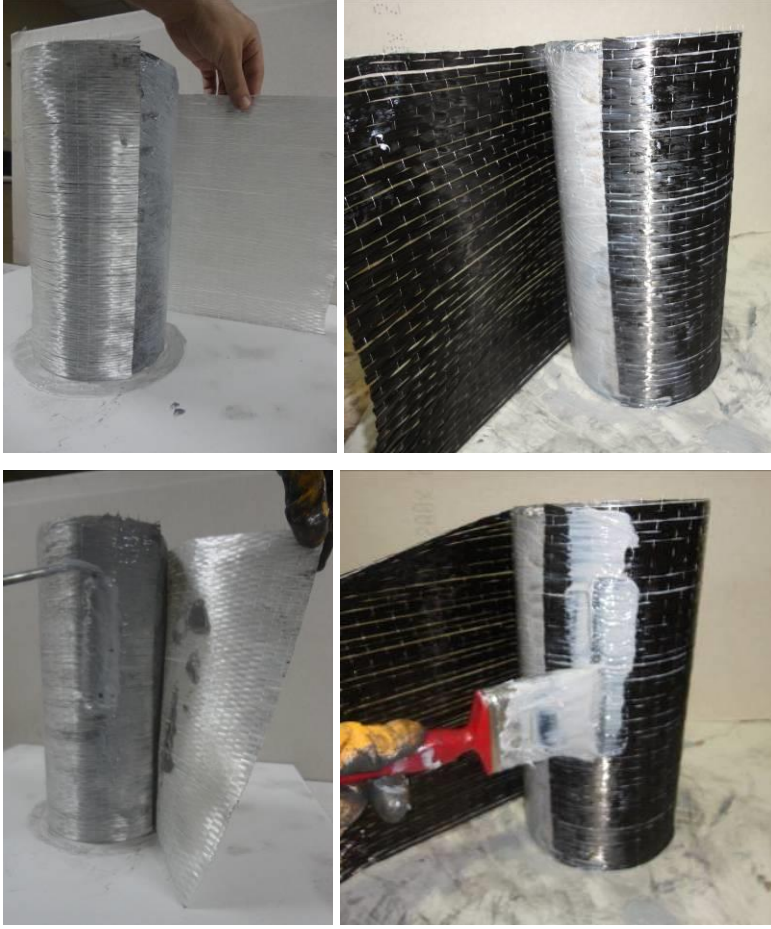


Şekil 3.1. Betonlara başlık yapılması ve yüzey hazırlığı

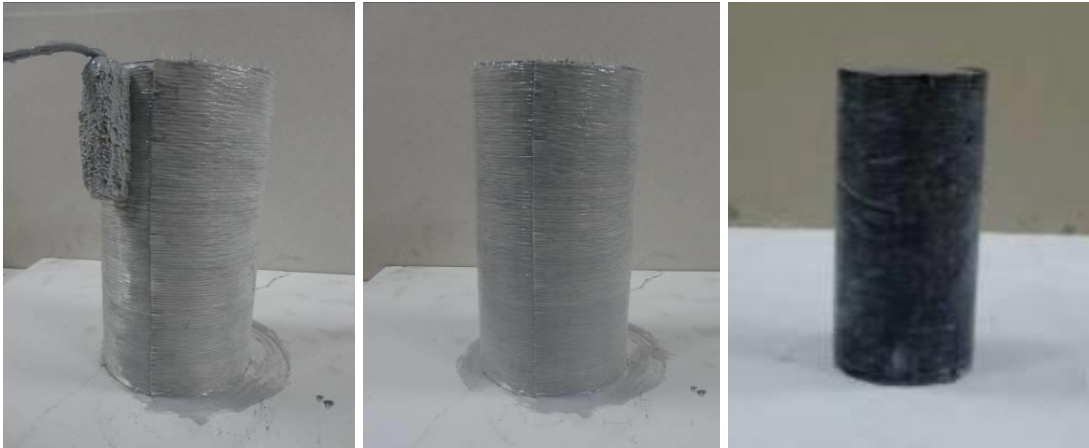
Beton ve lifler arasında aderansı iyi olan çift komponentli Sikadur 330 epoksi reçine (reçine / sertleştirici) 4/1 oranında karıştırılarak rulo ve fırça ile beton yan yüzeylerini tamamen kapatacak şekilde bir kat sürülmüştür (Şekil 3.2). Tek yönlü karbon ve cam kumaşlar; 60 cm uzunluğunda ve 30 cm yüksekliğinde hazırlanarak test sırasında sıyrılma olmaması için en az 10 cm bindirme boyu olacak şekilde tek yönlü olarak beton yüzeylerine enine sarılmıştır. Sarılan kumaşlar lifler doğrultusunda baskı uygulanarak rulo yardımı ile epoksiye doyurulmuştur (Şekil 3.3). Kumaşların daha iyi yapışması ve dış etkilerden korunması için üzerlerine tekrar bir kat reçine sürülerek kumaşlar tamamen reçine içerisinde bırakılmıştır. Yapıştırma işlemi tamamlanan numuneler, yaklaşık 20 °C'de dayanım kazanma sürecini tamamlamak üzere yedi gün bekletilmiştir.



Şekil 3.2. Beton yüzeylerine epoksi reçinenin sürülmesi



a) Beton yüzeylerine cam ve karbon kumaşların sarılma işlemi



b) Cam ve karbon kumaşların epoksi reçine ile doyurulması

Şekil 3.3. Beton yüzeylerine sarılan kumaşların rulo ile doyurulması

3.2. Basınç Deney Düzeneği

Üretilen betonlar, Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi laboratuvarında, 2000 kN kapasiteli basınç deney setinde test edilmiştir. Basınç test cihazının yükleme hızı

ayarlanmış ve bu cihazın düşey doğrultuda hareket eden düzlemine yerleştirilen uzunluk ölçüm cihazı yardımı ile zamana bağlı olarak yüke karşılık gelen boy değişimleri ve deney cihazından alınan yük değerleri aynı anda data loggerler yardımı ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Basınç deneyi düzeneği

Deneylelerden elde edilen verilerin değerlendirilmesinde; formül 3.1 kullanılarak numunelerin basınç gerilmeleri, formül 3.2 kullanılarak şekil değiştirme kapasiteleri hesaplanmıştır. Bilgisayar ortamında numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafikleri çizilmiş, ortalama basınç dayanımları ve şekil değiştirme kabiliyetleri hesaplanmıştır.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

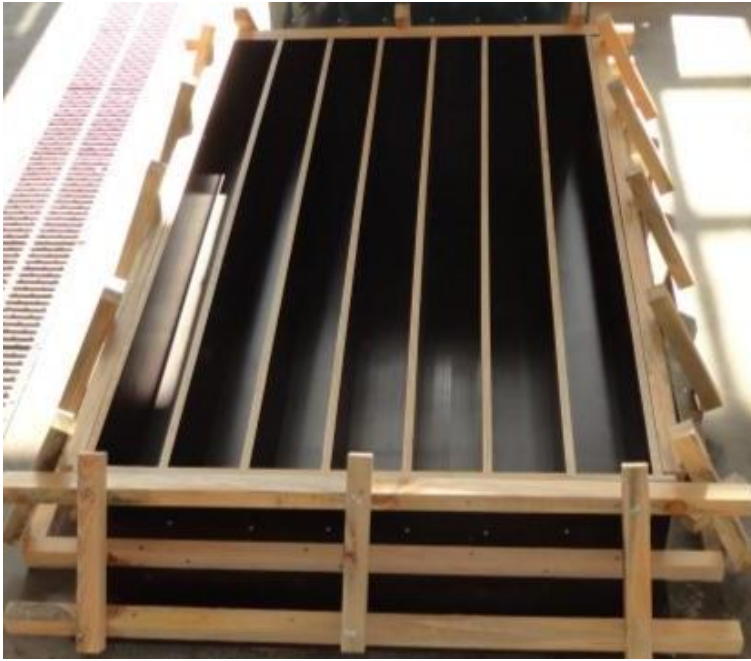
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (3.2)$$

Burada;

- σ : Basınç gerilmesini (N/mm^2),
- ε = Şekil değiştirme oranını,
- P : Basınç yükünü (N),
- A : Kesit alanını (mm^2),
- Δl : Boy değişimini (mm),
- l : İlk boyu (mm) ifade etmektedir

3.3. Betonarme Kirişlerin Üretimi

Toplam 21 adet kiriş kalıbı Sakarya üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarında hazırlanmıştır. 15×25 cm kesitinde ve 200 cm uzunluğunda üretilecek kiriş numunelerinin yüzeyinin düzgün çıkması için yüzeyleri film kaplı plywood kullanılmıştır. Plywood kalıbın birleştirilmesinde vida kullanılmıştır. Kalıp altı ve kalıp yanları ahşap keresteler ile desteklenmiştir (Şekil 3.5).



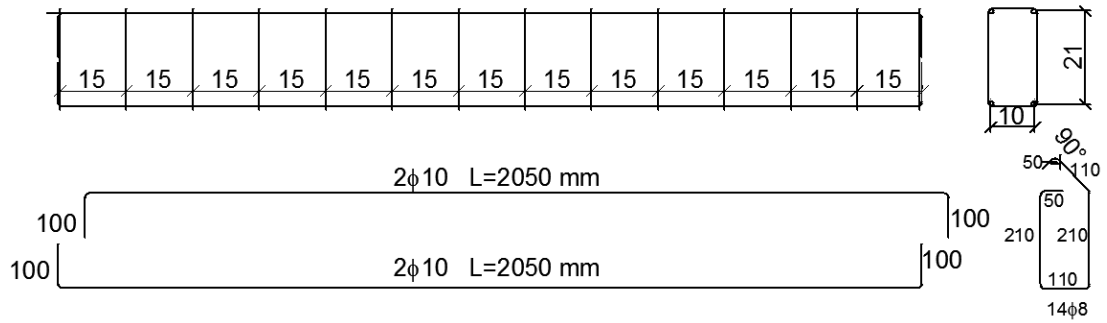
Şekil 3.5. Numune üretiminde kullanılan plywood kiriş kalıbı

Kirişlerinde boyuna ve enine donatı olarak S420 sınıfı nervürlü çelik kullanılmıştır. Kesme donatısı olarak Ø8/15, çekme donatısı olarak kiriş alt ve üst bölgesine 2Ø10 donatı kullanılmıştır. Deprem yönetmeliği öncesi yapılan yapılarda benzerlik göstermesi için etriye sıkılaştırması yapılmamıştır. Enine ve boyuna donatılarının uçları sıyrılmamanın kiriş mukavemetine etkilerini de görmek için 90° kıvrılmıştır. 2.5 cm paspayı bırakılacak şekilde etriyeler hazırlanmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Enine donatıların hazırlanması

Etriyeler ve boyuna donatılar hazırlanarak donatı bağlama işlemine geçilmiştir. Kiriş alt ve üst bölümüne ikişer adet $\text{Ø}10$ çelik donatı yerleştirilmiş etriyeler 15 cm aralıklarla boyuna donatıya bağlanmıştır (Şekil 3.7). Hazırlanan kiriş donatısı 2.5 cm paspayı aparatları boyuna donatılara takılarak kalıba yerleştirilmiştir (Şekil 3.8).



Şekil 3.7. Kiriş üretiminde kullanılan donatı şeması



Şekil 3.8. Çelik donatısı yerleştirilen kiriş kalıbı

Hazırlanan kalıp içerisine donatı yerleştirilip paspayı aparatlarının takılmasının ardından Adapazarı'nda bulunan hazır beton firmasından C16/20 betonu temin edilmiştir. Kalıba dökülen beton dalıcı el vibratörü ile sıkıştırılmış ve açıkta kalan kiriş yüzeylerine perdah yapılmıştır (Şekil 3.9). Beton basınç dayanımlarını tespit etmek için standartlara uygun silindir numuneler alınmıştır.



a) Betonun dökümü ve yerleştirilmesi



b) Betonun tesviye edilmiş hali

Şekil 3.9. Betonarme kiriş betonu dökümü (Devamı)

Kiriş numuneler 21 gün boyunca kalıpta bekletilmiştir. 21 gün sonunda kalıptan çıkarılarak FRP kumaşların yapıştırılacağı yüzeyler tel tarak ile taranmış böylece gözenekler açığa çıkarılmıştır. Yapışmanın daha iyi olması için yüzeyler zımparalanarak pürüzlendirilmiş, yapışma yüzeylerine denk gelen kiriş köşeleri 2 cm çapında pahlama yapılarak ovalleştirilmiştir. Zımparalama ve pahlama sonucunda yüzeylerde oluşan toz ve oynak parçacıklar kompresör ve bez ile temizlenerek yapıştırmaya hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Numunelerin kurutulması ve yüzey hazırlığı

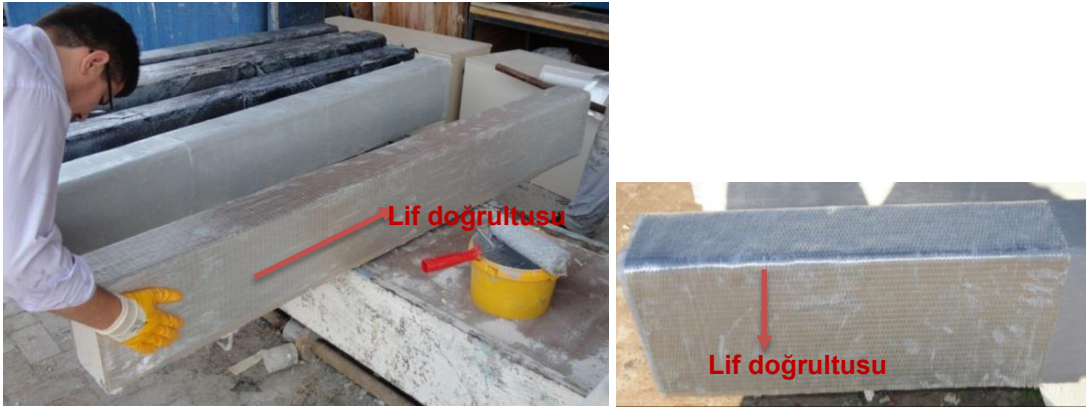
3.3.1. FRP kumaşlarla kirişlerin güçlendirilmesi

Numunelerin yüzeyi yapıştırmaya hazır hale getirilmesinin ardından karbon ve cam kumaşların uygun boyutlarda kesilme işlemine geçilmiştir. Tek doğrultulu karbon lifli dokuma olarak Sika Wrap -300 C/60 ürünü ve tek doğrultulu alkali dayanıklı Cam lifli dokuma olarak Sika Wrap-430 G/25 ürünü uygun boyutlarda kesilerek hazırlanmıştır. 60 cm genişliğinde olan FRP kumaşlar 200 cm boyunda kesilerek boyuna sarım için, 65 cm uzunluğunda kesilerek 90° açıyla enine sarım için hazırlanmıştır. FRP kumaşlar lif doğrultusuna 45° açıyla kesilerek kesme kırılmasına dik gelecek şekilde yapıştırmaya hazırlanmıştır.

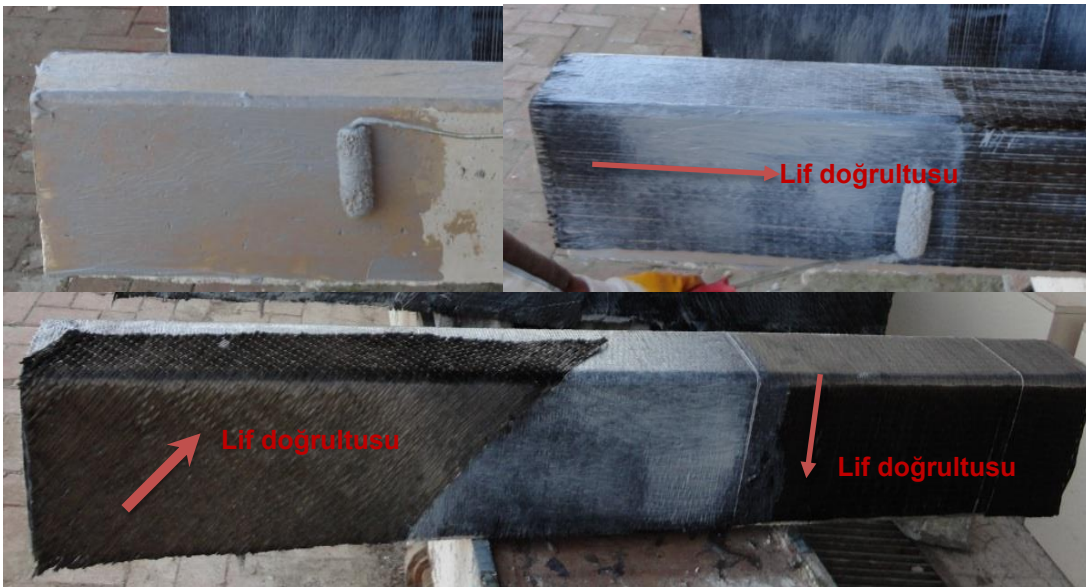
Beton ve lifler arasında aderansı iyi olan çift komponentli Sikadur 330 epoksi reçine (reçine ve sertleştirici) 4/1 oranında karıştırılarak rulo ve fırça ile beton yan yüzeylerine boşluk kalmayacak şekilde bir kat sürülmüştür (Şekil 3.11). Hazırlanan tek yönlü CFRP ve GFRP kumaşlar kiriş yüzeylerine yapıştırılmıştır (Şekil 3.12). Sarılan kumaşlar lifler doğrultusunda baskı uygulayarak rulo yardımı ile epoksiye doyurulmuştur. Kumaşların daha iyi yapışması ve dış etkilerden korunması için üzerine bir kat reçine tekrar sürülecek kumaşlar tamamen reçine içerisinde bırakılmıştır. Yapıştırma işlemi tamamlanan numuneler uygun şartlarda yedi gün kür edilmiştir (Şekil 3.11,12,13).



Şekil 3.11. Kiriş yüzeylerine epoksi reçinenin sürülme işlemi



Şekil 3.12. Cam kumaşların kiriş yüzeyine yapıştırma işlemi



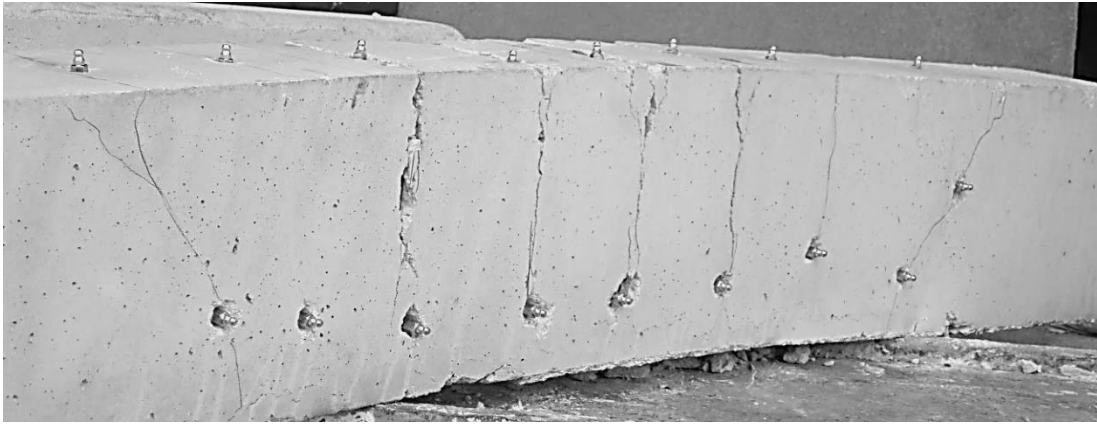
Şekil 3.13. Karbon kumaşların kiriş yüzeylerine yapıştırma işlemi

3.4. Betonarme Kirişlerin Onarım ve Güçlendirilmesi

Laboratuvar ortamında şahit kiriş olarak test edilen kirişlerden iki tanesi üzerinde onarım ve güçlendirme işlemine tabi tutulmuştur. İki adet kiriş epoksi enjeksiyonu ile onarılmış ve GFRP ile sarılarak kesme ve eğilmeye karşı güçlendirilmiştir.

3.4.1. Çatlakların kapatılması

Yükleme sonrası eğilme ve kesme çatlakları tespit edilmiş ve çatlakların devam ettiği kiriş alt ve yan yüzeylerine numuneye hasar vermeyecek şekilde düşük hızlı bir matkap yardımıyla delikler açılmıştır. Açılan deliklere Ø10'luk enjeksiyon dübelleri yerleştirilmiştir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Kiriş çatlaklarına enjeksiyon dübellerinin yerleştirilmesi

Enjeksiyon dübelleri yerleştirildikten sonra çatlakların onarımına geçilmiştir. Çatlakların onarılmasında Sikadur 31, solvent içermeyen, neme toleranslı, tiksotropik, iki bileşenli, epoksi reçineler ve özel dolgular içeren, +10 °C ile + 30 °C arasındaki sıcaklıklarda kullanılmak üzere tasarlanmış tamir harcı kullanılmıştır. A+B bileşenlerini en az üç dakika boyunca spiral uçlu elektrikli karıştırıcı ile düşük hızda (en fazla 600 dev/dak) malzeme düzgün kıvamlı ve homojen gri renkte olana kadar karıştırılmıştır. Hazırlanan harç çatlakların üzerine açık yer kalmayacak şekilde spatula ve mala yardımı ile sürülmüştür (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Kiriş çatlaklarının tamir harcı ile kapatılması

3.4.2. Kirişlerin epoksi enjeksiyonu ile onarımı

Kirişlerde oluşan kesme ve eğilme çatlaklarının tamir harcı ile onarılmasının ardından numuneler uygun şartlarda 10 gün süre ile kür edilmiştir. 10 günlük kür süresini tamamlayan numunelerin yüzeyleri FRP'nin yapışmasına engel teşkil etmemesi için zımpara makinesi ile zımparalanarak bozukluklardan arındırılmıştır. Kiriş çatlaklarının onarılmasında Sikadur-52 yüksek dayanımlı epoksi reçinelerden oluşan iki bileşenli, solvensiz, düşük viskoziteli enjeksiyon reçinesi kullanılmıştır. Enjeksiyon reçinesi uygun enjeksiyon pompası yardımı ile kirişlere yerleştirilen enjeksiyon dubellerinden çatlaklar içerisine pompalanmıştır. Kiriş gövdesinde bulunan dübelden basılan reçine bir üst dübelden gelinceye kadar basma işlemine devam edilerek çatlaklar arasında boşluk bırakılmamıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Kiriş çatlaklarının enjeksiyon reçinesi ile onarılması

3.4.3. Onarılan kirişlerin GFRP ile güçlendirilmesi

Numunelerin yüzeyi yapıştırmaya hazır hale getirildikten sonra cam kumaşların uygun boyutlarda kesilme işlemine geçilmiştir. Onarılan kirişlerin güçlendirilmesinde Tek doğrultulu Cam lifli dokuma olarak Sika Wrap-430 G/25 ürünü uygun boyutlarda kesilerek hazırlanmıştır. 60 cm genişliğinde olan FRP kumaşlar 200 cm boyunda kesilerek boyuna sarım için, 65 cm uzunluğunda kesilerek 90° açıyla enine sarım için hazırlanmıştır.

Beton ve lifler arasında aderansı iyi olan çift komponentli Sikadur 330 epoksi reçine (reçine ve sertleştirici) 4/1 oranında karıştırılarak rulo ve fırça ile beton yan yüzeylerine kuru yer kalmayacak şekilde bir kat sürülmüştür. Hazırlanan Cam kumaş kiriş yüzeylerine yapıştırılmıştır. Yapıştırılan kumaşlar lifler doğrultusunda baskı uygulayarak rulo yardımı ile epoksiye doyurulmuştur. Kumaşların daha iyi yapışması ve dış etkilerden korunması için üzerine bir kat reçine tekrar sürülecek kumaşlar tamamen reçine içerisinde bırakılmıştır. Yapıştırma işlemi tamamlanan numuneler uygun şartlarda yedi gün kür edilmiştir (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Onarım ve güçlendirilmesi tamamlanan GFRP2-O/G kirişleri

3.5. Eğilme Deney Düzenegi

Kiriş deneyleri Sakarya üniversitesi, İnşaat Mühendisliği malzeme laboratuvarında bulunan 400 kN kapasiteli HI-TECH MAGNUS marka yükleme çerçevesi ile yapılmıştır.

3.5.1. Eğilme deney takımları

Deney sırasındaki verileri okumak için Di4b 4 kanallı ve Ai8b 8 kanallı veri toplama sistemi (data logger) kullanılmıştır. Düşey yer değiştirmeleri ölçmek için Opkon Linfar Resistive Position Transducer marka, LPS 100-B-5K model potansiyometrik cetvellerden faydalanılmıştır. Yatay yer değiştirmeleri ölçmek için Mitutoyo Absolute Digital Indicator marka, ID-C 1050B model dijital cetveller kullanılmıştır. Yük değişimlerini ölçmek için yük verici piston ucuna takılan yük ölçer kullanılmıştır (Şekil 3.18).



a) Veri toplama cihazları

b) Potansiyometrik ve dijital cetveller

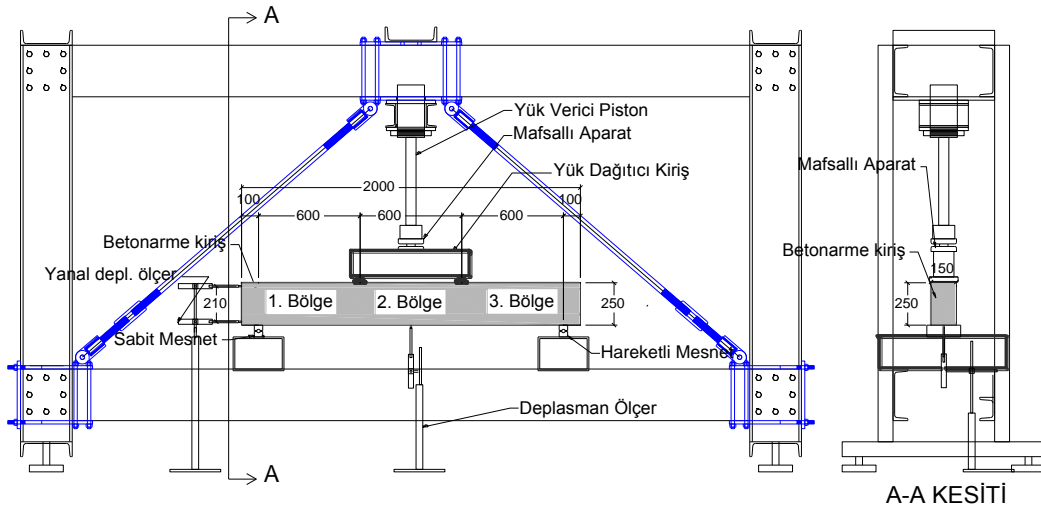


c) Yük ölçerler ve yük dağıtıcı mafsal aparat

Şekil 3.18. Deney cihazları

3.5.2. Eğilme deney düzeneğinin hazırlanması

Deney çerçevesinin alt başlığına sabitlenen rijit kutu kiriş üzerine bir tarafı sabit diğer tarafı hareketli olacak şekilde mesnetler kiriş kenarlarından 10 cm içeriye yerleştirilmiştir. Hazırlanan kiriş numuneler mesnetler üzerine konulduktan sonra, düşey yer değiştirmeleri ölçmek için kiriş alt orta bölgesine bir adet sehim ölçer yerleştirilmiştir. Yük verici piston ile dolu gövdeli yük dağıtıcı arasında sürtünmeden meydana gelebilecek ilave tesirleri önlemek için mafsalı aparat hazırlanarak yük verici ile piston arasına yerleştirilmiştir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Eğilme çerçevesi deney düzeneği

Deney sonucunda elde edilen veriler eğilme ve kesme dayanımı ve süneklik ve enerji yutma kapasiteleri açısından değerlendirilmiştir. Güçlendirilen kirişlerin eğilme ve kesme dayanımları şahit kirişe göre ayrıca güçlendirme şekilleri açısından değerlendirilmiştir. Kirişlerin süneklik kapasitelerinin hesabında formül 3.3 kullanılmıştır.

$$\mu\Delta = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (3.3)$$

Burada;

$\mu\Delta$: Süneklik

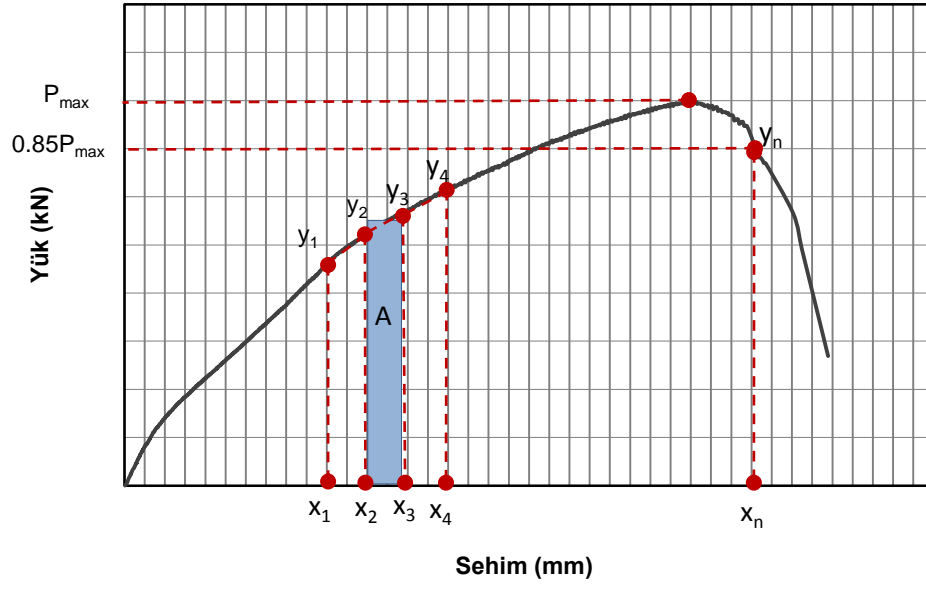
Δu :Kopma anındaki şekil değiştirme

Δy : Akma anındaki şekil değiştirmeyi ifade etmektedir.

Enerji yutma kapasitesi yük-sehim eğrilerinden yararlanılarak, maksimum eğilme kuvvetinin % 85'ine denk gelen orta nokta sehim değerleri dikkate alınarak yük-sehim eğrisinin altında kalan alan hesaplanarak bulunmuştur. Enerji yutma kapasitesinin hesabı şematik olarak Şekil 3.20'de gösterilmiştir. Şekilde 3.20'de belirtilen alanın hesabı 3.4 bağıntısı ile formüle edilmiştir. Bu formül kullanılarak, eğrinin altında kalan alan hesaplamaları yapılırken hassas sonuçlar yakalayabilmek için hesap adımları çok küçük seçilmiştir.

$$A = \left(\frac{y_2 + y_3}{2} \right) \times (x_2 - x_3)$$

(3.4)



Şekil 3.20. Enerji yutma kapasite hesabının şematik olarak gösterimi

BÖLÜM 4. DÜŞÜK DAYANIMLI BETONLARIN DAYANIM VE ŞEKİL DEĞİŞTİRME DAVRANIŞLARININ CFRP VE GFRP İLE GÜÇLENDİRİLEREK İYİLEŞTİRİLMESİ

Bu bölümde, standart boyutlarda üretilen silindir betonların CFRP ve GFRP ile güçlendirilmesi sonrasında dayanım ve şekil değiştirme davranışlarındaki iyileşmelerin belirlenmesi amacıyla basınç deneyleri yapılmıştır. Literatürde yer alan güçlendirme çalışmalarının geneli, yüksek dayanımlı betonların FRP kompozitlerle güçlendirilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu doktora çalışmasında ise, Türkiye'deki mevcut yapılarda yaygın olarak karşılaşılan ve güçlendirilmeye ihtiyaç duyulan betonarme kolonlardaki düşük dayanımlı betonlar dikkate alınarak silindir beton numuneler standart boyutlarda üretilmiş ve basınç deney düzeneğinde test edilmiştir.

Günümüzde FRP ile güçlendirilen yapılar dikkate alındığında bu yapıların çoğunluğunun CFRP ile güçlendirildiği bilinmektedir. Bu çalışmada, aynı şartlar altında üç farklı basınç dayanımında üretilen standart boyutlardaki silindir beton numuneleri, CFRP ve GFRP ile güçlendirilerek basınç deney düzeneğinde test edilmiştir. Bu elemanlar, yük taşıma kapasiteleri ve süneklik düzeyleri açısından karşılaştırılmış ve betonarme elemanların güçlendirilmesinde, CFRP kompozitlerin yerine GFRP kompozitlerin etkin olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ayrıca, CFRP'nin maliyetinin GFRP'ye göre oldukça yüksek olduğu bilinmektedir ve aynı zamanda CFRP ithal edilmektedir. Tüm bu etkenler ve yapılan güçlendirmeler karşılaştırılarak CFRP yerine GFRP kullanımı araştırılacaktır.

4.1. Deneysel Çalışma

Karbon ve cam elyaf ile sargılamının, betonların basınç dayanımlarına ve şekil değiştirme kapasitelerine etkilerini araştırmak için 150 mm çapında, 300 mm yüksekliğinde farklı basınç dayanımlarına sahip üç seri silindir beton üretilmiştir.

Aynı şartlar altında üretilmiş silindir betonlar, tek doğrultulu CFRP ve GFRP ile güçlendirilmiştir. Her seri beton sınıfı için hazırlanan numunelerin dördü şahit, altısı CFRP ile tek katlı ve tek doğrultulu, altısı GFRP ile tek katlı ve tek doğrultulu ve altısı ise GFRP ile iki katlı ve tek doğrultulu sarılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan test numunelerine ait kısaltmalar Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Güçlendirme numunelerinin kısaltmaları

Numune kodu	Numune özellikleri	Numune adedi
S1	Seri 1 şahit beton	4
S1-CFRP1	Seri 1-bir kat CFRP ile güçlendirilmiş silindir beton	6
S1-GFRP1	Seri 1-bir kat GFRP ile güçlendirilmiş silindir beton	6
S1-GFRP2	Seri 1-iki kat GFRP ile güçlendirilmiş silindir beton	6
S2	Seri 2 şahit beton	4
S2-CFRP1	Seri 2-bir kat CFRP ile güçlendirilmiş silindir beton	6
S2-GFRP1	Seri 2-bir kat GFRP ile güçlendirilmiş silindir beton	6
S2-GFRP2	Seri 2-iki kat GFRP ile güçlendirilmiş silindir beton	6
S3	Seri 3 şahit beton	4
S3-CFRP1	Seri 3-bir kat CFRP ile güçlendirilmiş silindir beton	6
S3-GFRP1	Seri 3-bir kat GFRP ile güçlendirilmiş silindir beton	6
S3-GFRP2	Seri 3-iki kat GFRP ile güçlendirilmiş silindir beton	6

4.2. Basınç Deneyleri

FRP ile güçlendirilen silindir beton numuneler, uygun şartlarda dayanım kazanma süreçlerini tamamlamalarının ardından sabit hızlı ve tekrarlı yüklemeler ile test edilmiştir. Cam ve karbon elyafın, silindir beton numune kesitine tek yönlü şekilde sarılarak, beton numunelerin basınç dayanımına ve şekil değiştirme kapasitelerine etkileri araştırılmıştır.

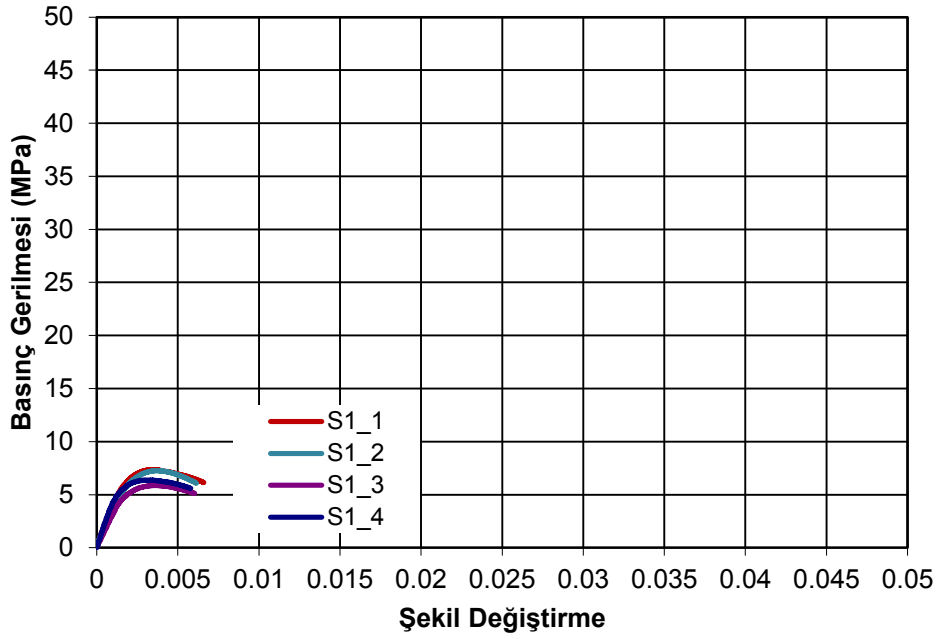
4.2.1. Şahit betonların basınç deneyi

Üretilen betonların, 28 günlük dayanım kazanma süreçlerini tamamlamasının ardından basınç dayanımları belirlenmiştir. Seri 1, Seri 2 ve Seri 3 betonların basınç dayanımlarını belirlemek ve FRP ile güçlendirilmesi yapılan diğer betonlarla kıyaslamak için her seriden seçilen dört adet şahit numune basınç testine tabi tutulmuştur. Beton preste ölçülen yük değerleri ve beton prese yerleştirilen uzunluk ölçüm cihazı yardımı ile zamana bağlı olarak yüke karşılık gelen uzamalar Data logger ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır (Şekil 4.1). Bilgisayar ortamında numunelerin gerilme deformasyon grafikleri çizilmiş ve ortalama basınç dayanımları hesaplanmıştır.



Şekil 4. 1. Şahit numunelerin beton preste kırılması ve veri aktarımı

Özellikle düşük dayanımlı beton elde etmeye yönelik olarak üretilen Seri 1 betonlarından test edilen dört adet şahit betonun (S1), ortalama basınç dayanımı 6.74 MPa, maksimum dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme kapasitesi ise 0.0036 olarak bulunmuştur. S1 şahit betonlara ait gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.2’de, basınç dayanımları ve şekil değiştirmeleri Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

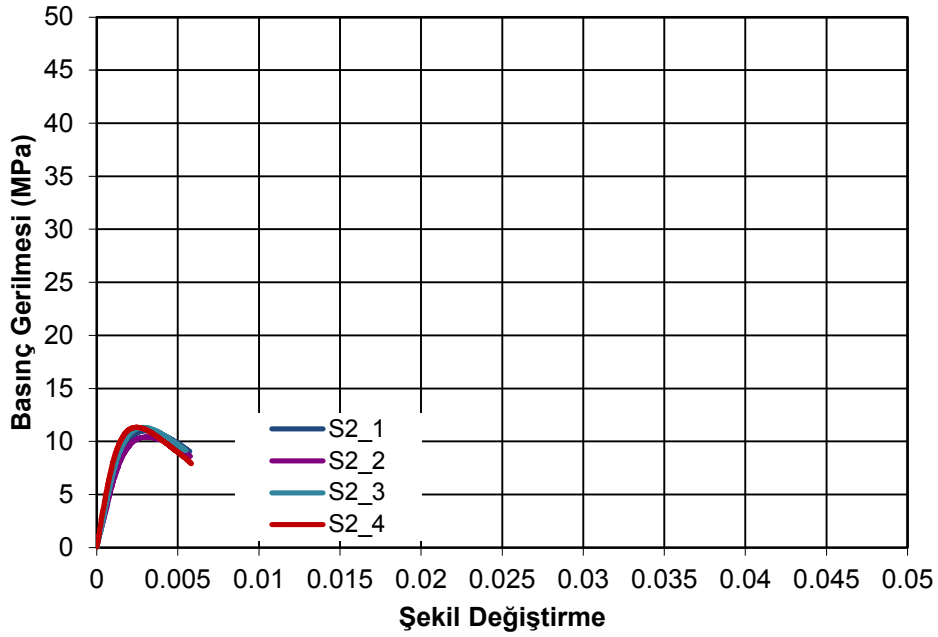


Şekil 4.2. S1 betonların gerilme-şekil değiştirme grafikleri

Tablo 4.2. S1 betonların basınç dayanımları ve şekil değiştirme kapasiteleri

Numune serisi	Basınç dayanımı (MPa)	Şekil değiştirme
S1	5.86	0.0036
	6.37	0.0033
	7.36	0.0036
	7.36	0.0038
Ortalama	6.74	0.0036

1999 Marmara depremi öncesi imal edilen yapıların, beton kalitesine yakın dayanımda beton elde etmeye yönelik olarak üretilen Seri 2 şahit betonların ortalama basınç dayanımı 11.02 MPa, maksimum dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme kapasitesi ise 0.0029 olarak bulunmuştur. S2 şahit numunelere ait özellikler Tablo 4.3'te, gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

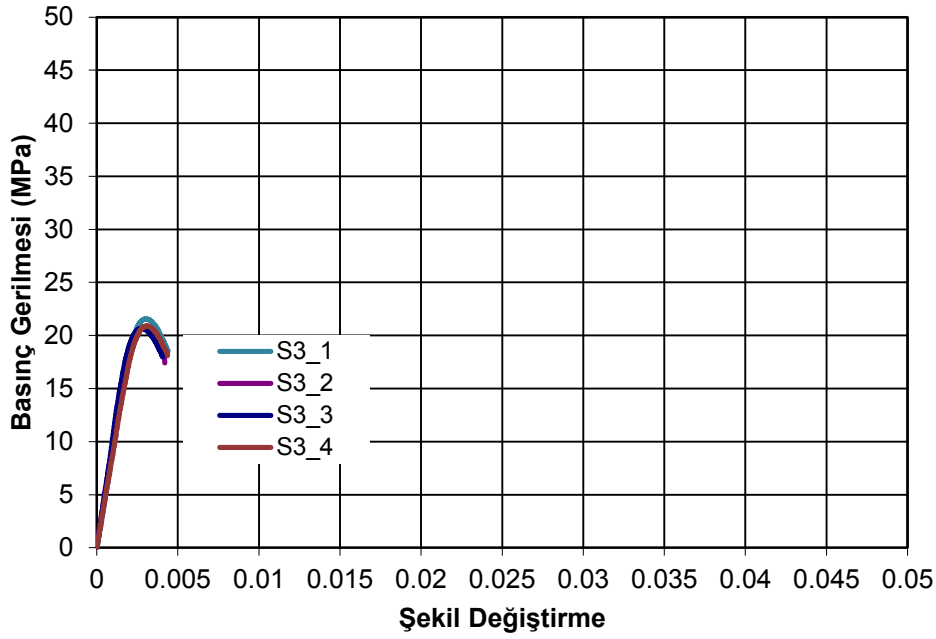


Şekil 4.3. S2 betonların gerilme-şekil değiştirme grafikleri

Tablo 4.3. S2 betonların basınç dayanımları ve şekil değiştirme kapasiteleri

Numune serisi	Basınç dayanımı (MPa)	Şekil değiştirme
S2	10.41	0.0031
	11.02	0.0031
	11.32	0.0029
	11.33	0.0024
Ortalama	11.02	0.0029

Günümüz şartlarındaki beton kalitesinde üretilen Seri 3 betonlarının, ortalama basınç dayanımı 20.82 MPa ve maksimum dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme kapasitesi ise 0.0029 olarak bulunmuştur. S3 şahit numunelere ait özellikler Tablo 4.4'te, gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. S3 betonların gerilme-şekil değiştirme grafikleri

Tablo 4.4. S3 betonlarının basınç dayanımları ve şekil değiştirme kapasiteleri

Numune serisi	Basınç dayanımı (MPa)	Şekil değiştirme
S3	20.67	0.0028
	20.73	0.0029
	20.89	0.0031
	20.98	0.0029
Ortalama	20.82	0.0029

4.2.2. CFRP ve GFRP ile güçlendirilmiş betonların basınç deneyi

CFRP ve GFRP ile güçlendirilen altışar adet numunenin dörder adedi sabit hızlı yüklemeye ve her numune serisinin iki adedi tekrarlı yüklemeye test edilmiştir (Şekil 4.5). Betonlar kırılma gerçekleşinceye kadar yüklenmiş, yüklenme neticesinde yüzeye sarılan CFRP ve CFRP kompozitlerin bindirme boylarında sıyrılma olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 4.5-7). Sıyrılmanın olmaması uygulanan bindirme boyunun yeterli olduğunu göstermektedir. CFRP ile güçlendirilen numunelerden ikişer adedi üzerinde yaklaşık 6 MPa artışlarla yüklenme-boşaltma yapılmıştır. Tüm serilerde tekrarlı yüklenme durumunda basınç gerilmesi-şekil değiştirme grafik değerinin bir

önceki eğrinin bittiği yerden devam ettiği görülmüştür. Numunelerin basınç dayanım değeri ve şekil değiştirme kapasiteleri, sabit hızlı ve tekrarlı yükleme durumunda birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Tekrarlı yükleme durumunda da kırılma anına kadar betonun bütünlüğünü koruduğu tespit edilmiştir. Basınç testine tabi tutulan basınç gerilmesi-şekil değiştirme grafikleri çizilmiş ve ortalama dayanımları hesaplanmıştır.



Şekil 4.5. Seri 1-2-3 betonlarından hazırlanan CFRP ve GFRP sargılı betonlar



Şekil 4.6. Basınç testine tabi tutulan CFRP ve GFRP sargılı beton numuneler



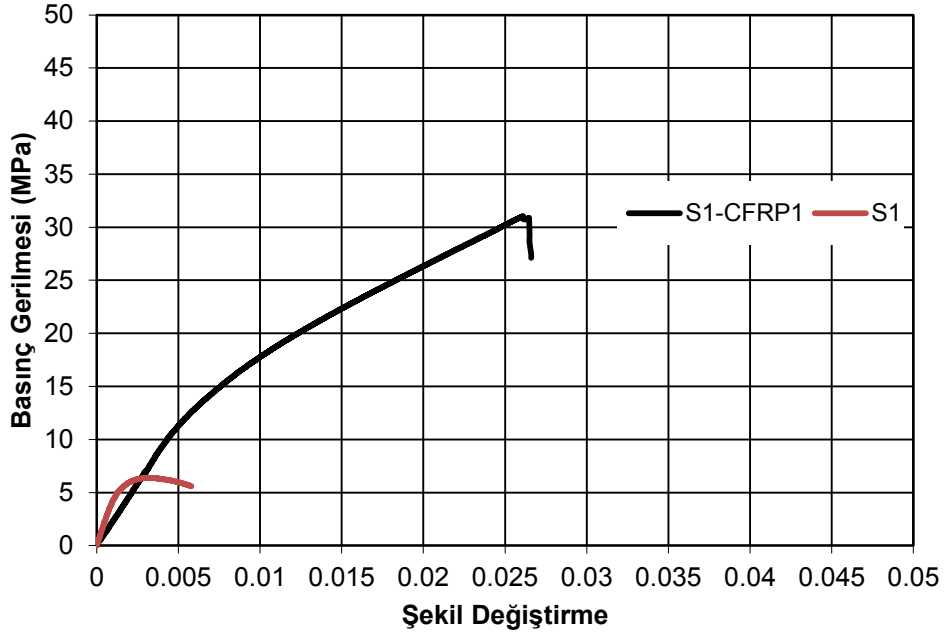
Şekil 4.7. CFRP ve GFRP sargılı beton numunelerin kırılma durumu

4.2.2.1. S1-CFRP1 betonların basınç deneyi

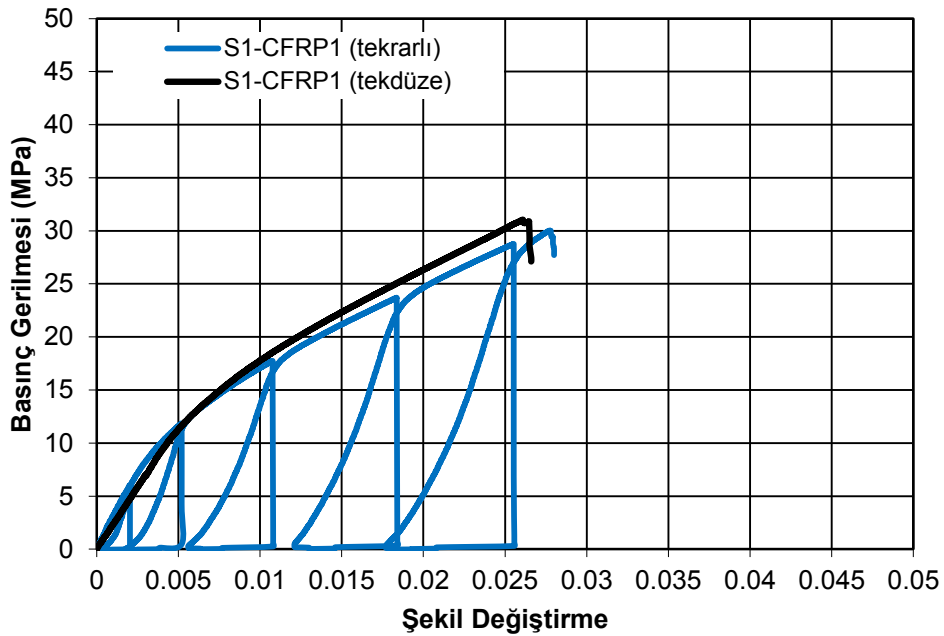
Bir kat CFRP ile güçlendirilmiş düşük dayanımlı Seri 1 betonların (S1-CFRP1) dayanımında şahit betonlara göre önemli artışlar olmuştur. S1-CFRP1 numunesinin ortalama basınç dayanımı 31.06 MPa, maksimum dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme kapasitesi ise 0.0262 olarak bulunmuştur. S1-CFRP1 şeklinde güçlendirilen betonların basınç dayanımı, ortalama 4.61 kat artmıştır. Ortalama 24.32 MPa'a tekamül eden artış neticesinde şekil değiştirme kapasitesi 7.28 kat artmıştır (Şekil 4.8a).

S1-CFRP1 şeklinde güçlendirilen numunelerden iki adedi üzerinde tekrarlı yüklemeler yapılmıştır. Sabit hızlı ve tekrarlı yükleme durumu karşılaştırıldığında gerilme deformasyon grafiğinin bir önceki eğrinin bittiği yerden devam ettiği tespit edilmiştir (Şekil 4.8b). Numunelerin basınç dayanım değeri ve şekil değiştirme

kapasiteleri sabit hızlı ve tekrarlı yükleme durumunda birbirine oldukça yakın çıkmıştır (Tablo 4.5). Tekrarlı yükleme durumunda da kırılma anına kadar betonun bütünlüğünü koruduğu tespit edilmiştir.



a) Sabit hızlı yükleme durumu



b) Sabit hızlı ve tekrarlı yükleme durumu

Şekil 4.8. S1-CFRP1 betonlarından gerilme-şekil değişirme grafik örnekleri

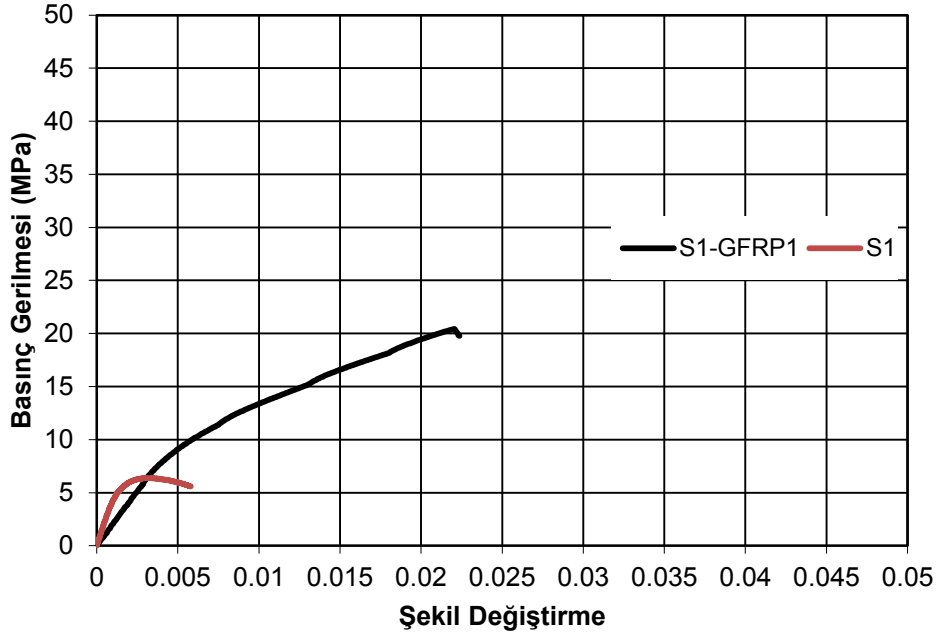
Tablo 4.5. S1-CFRP1 betonların basınç gerilmesi ve şekil değiştirme kapasiteleri

Numune	Basınç dayanımı (MPa)	Şekil değiştirme
1	31.55	0.0245
2	27.47	0.0242
3	32.81	0.0282
4	32.11	0.0262
5	31.05	0.0264
6	30.03	0.0277
Ortalama	31.06	0.0262

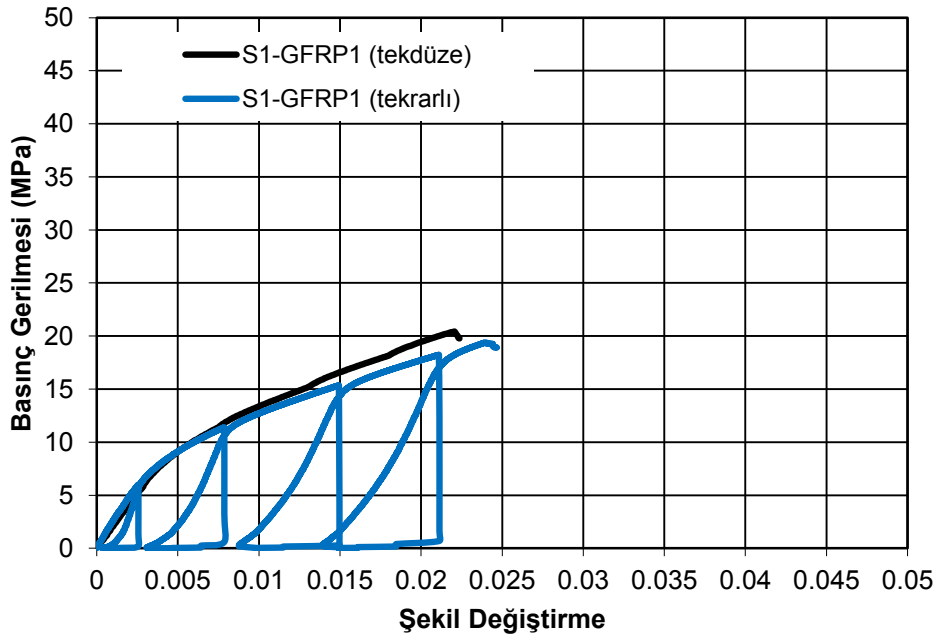
4.2.2.2. S1-GFRP1 betonların basınç deneyi

Seri 1 betonlarından bir kat GFRP ile güçlendirilmiş (S1-GFRP1) numunelerin ortalama basınç dayanımı 20.18 MPa, şekil değiştirme kapasitesi ise 0.0242 olarak bulunmuştur (Tablo 4.6). Kontrol betonuna kıyasla S1-GFRP1 betonlarının dayanımında ortalama 2.99 kat artış olduğu tespit edilmiştir. Yaklaşık 13.44 MPa'a tekamül eden artış neticesinde şekil değiştirme kapasitesi 6.72 kat artmıştır (Şekil 4.9a).

S1-GFRP1 şeklinde güçlendirilen numunelerden iki adedi üzerinde yapılan yükleme-boşaltma deneyinde, gerilme-deformasyon eğrisinin bir önceki eğrinin bittiği yerden devam ettiği görülmüştür (Şekil 4.9b). Numunelerin basınç dayanım değerleri ve şekil değiştirme kapasiteleri sabit hızlı ve tekrarlı yükleme durumunda birbirlerine oldukça yakın çıkmış; her iki durumda da güçlendirilen numuneler bütünlüğünü korumuştur. Bulunan değerler Tablo 4.6'da özetlenmiştir. Numunelere ait örnek grafik Şekil 4.9'da verilmiştir.



a) Sabit hızlı yükleme durumu



b) Sabit hızlı ve tekrarlı yükleme durumu

Şekil 4.9. S1-GFRP1 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri

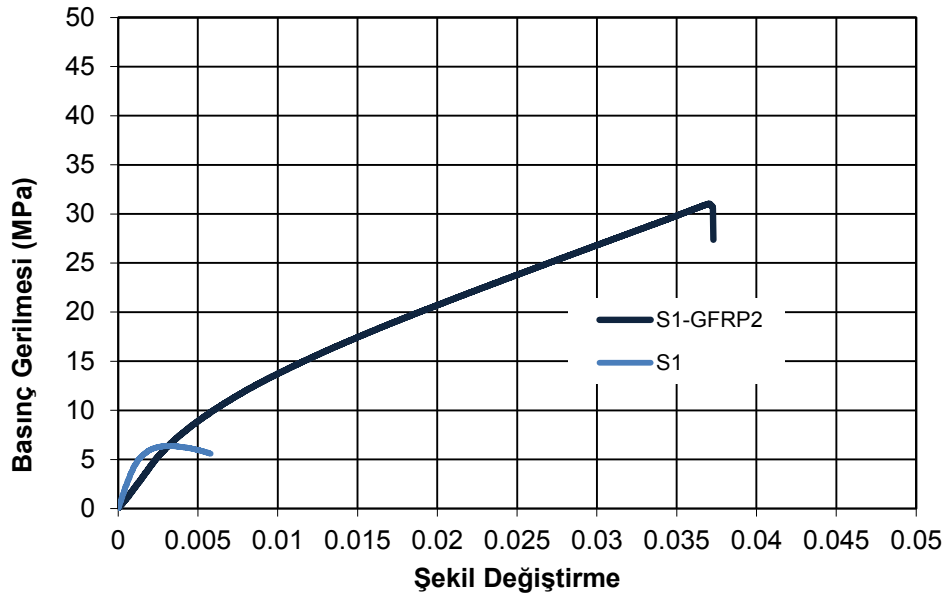
Tablo 4.6. S1-GFRP1 betonların basınç gerilmesi ve şekil değiştirme kapasiteleri

Numune	Basınç dayanımı (MPa)	Şekil değiştirme
1	21.25	0.0244
2	20.84	0.0249
3	20.43	0.0242
4	20.17	0.0240
5	18.98	0.0235
6	19.40	0.0239
Ortalama	20.18	0.0242

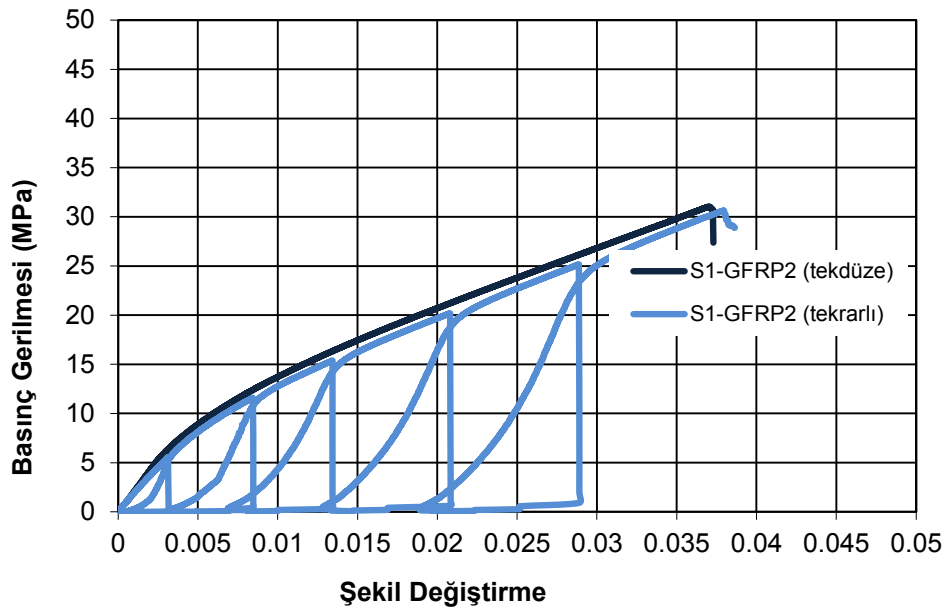
4.2.2.3. S1-GFRP2 betonların basınç deneyi

Tek kat cam ve karbon kumaş ile sarılmış silindirik beton numunelerin deney sonuçları değerlendirildikten sonra Seri 1 betonundan iki kat GFRP sargılı numuneler hazırlanmıştır. İki kat GFRP sargılı Seri 1 betonların (S1-GFRP2) altı adedi üzerinde yapılan basınç deneyinde ortalama basınç dayanımı 30.73 MPa, şekil değiştirme kapasitesi ise 0.0362 olarak bulunmuştur (Tablo 4.7). S1 betonuna kıyasla S1-GFRP2 betonun dayanımı ortalama 4.56 kat artmıştır. Ortalama 23.99 MPa'a karşılık gelen artış neticesinde şekil değiştirme kapasitesi ise 10.06 kat artmıştır (Şekil 4.10a).

Çift sarım ile güçlendirilen numunelerden iki adedi üzerinde yükleme-boşaltma deneyi sonuçları ile sabit hızlı yükleme durumundaki basınç dayanım sonuçları ve şekil değiştirme kapasiteleri birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Tekrarlı yükleme durumunda gerilme-şekil değiştirme grafik çizgisinin bir önceki eğrinin bittiği yerden devam ettiği ve kırılma anına kadar betonun bütünlüğünü koruduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.10b).



a) Sabit hızlı yükleme durumu



b) Sabit hızlı ve tekrarlı yükleme durumu

Şekil 4.10. S1-GFRP2 betonlarından gerilme-şekil değişirme grafik örnekleri

Tablo 4.7. S1-GFRP2 betonların basınç gerilmesi ve şekil değiştirme kapasiteleri

Numune	Basınç dayanımı (MPa)	Şekil değiştirme
1	31.48	0.0360
2	31.04	0.0370
3	31.61	0.0343
4	29.42	0.0345
5	30.21	0.0373
6	30.62	0.0380
Ortalama	30.73	0.0362

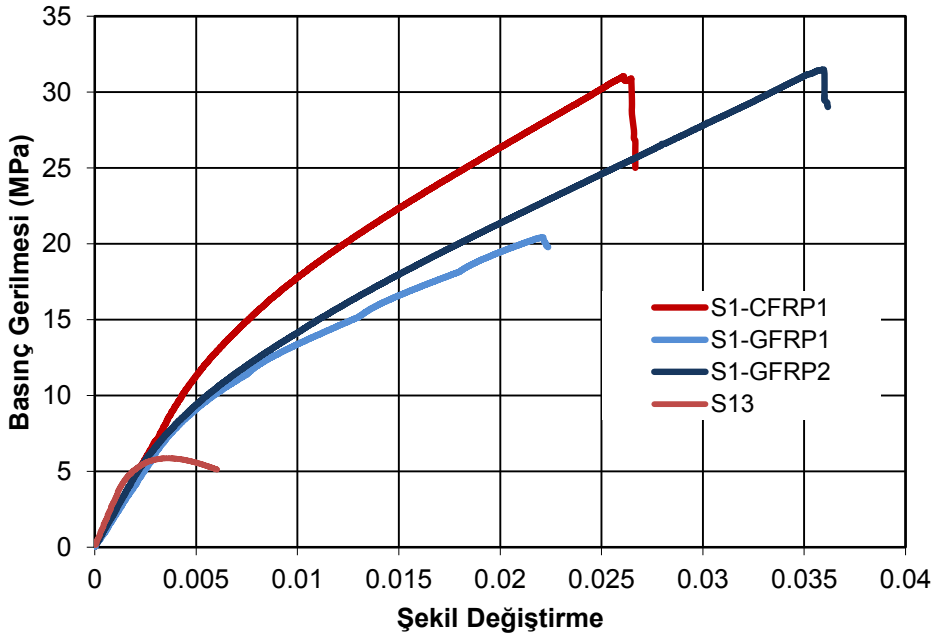
4.2.2.4. Seri 1 betonların karşılaştırılması

Düşük dayanımlı beton üretmeye yönelik olarak imal edilen Seri 1 betonlarının CFRP ve GFRP ile güçlendirilerek beton basınç dayanımına ve şekil değiştirme kapasitelerine etkileri araştırılmıştır. Yapılan güçlendirmelerin, beton basınç dayanımını önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. Seri 1 betonlarından; tek kat enine CFRP ile sarılan betonların (S1-CFRP1) basınç dayanımındaki artış 4.61 kat, şekil değiştirme kapasitesindeki artış 7.28 olarak, tek kat enine GFRP ile sarılan betonların (S1-GFRP1) basınç dayanımındaki artış 2.99 kat, şekil değiştirme kapasitesindeki artış 6.72 kat olarak ve iki kat enine GFRP ile sarılan betonların (S1-GFRP2) basınç dayanımındaki artış 4.56 kat, şekil değiştirme kapasitesindeki artış 10.06 kat olarak bulunmuştur (Tablo 4.8, Şekil 4.11).

S1-CRFP1 ve S1-GRFP1 betonları kıyaslandığında, S1-CRFP1 sargılı betonların dayanımı S1-GRFP1 sargılı betonlara göre ortalama % 35 daha yüksek çıkmıştır. Aynı şekilde S1-GRFP1 sargılı betonun şekil değiştirme kapasitesi ortalama %7.6 daha düşük çıkmıştır. Bu sonuçlardan hareketle, GFRP ile güçlendirilen numunelere iki kat cam elyaf sarılarak basınç dayanımlarının yükseltilmesi ve şekil değiştirme kabiliyetlerinin artırılması hedeflenmiştir (Şekil 4.11).

Aynı seri betondan iki kat enine GFRP ile sarılan betonların (S1-GFRP2), S1-GFRP1 betonlarına göre ortalama basınç dayanımında %52.3 artış olmuştur. Ortalama 10.55 MPa karşılık gelen bu artış ile şekil değiştirme kapasitesi % 49.6 artmıştır. S1-GFRP2 ile S1-CFRP1 betonları kıyaslandığında, basınç dayanımları birbirine oldukça yakın çıkmıştır. Diğer yandan GFRP ile güçlendirilen betonların şekil değiştirme kapasitesi ortalama % 38.2 daha yüksek çıkmıştır (Şekil 4.11). Bu sonuçlardan hareketle, Seri 1 betonların basınç dayanımlarının yakın olması ve şekil değiştirme kabiliyetlerinin daha fazla olması nedeni ile bir kat CFRP ile güçlendirme yerine iki kat GFRP ile güçlendirme sonucunda daha iyi performans elde edilecektir. Cam elyafın daha ekonomik olması, kolayca temin edilebilmesi ve yerli olarak üretiliyor olması nedeniyle betonarme yapıların güçlendirilmesinde, karbon elyaf yerine kullanılması avantaj sağlayacaktır.

S1-CFRP1, S1-GFRP1 ve S1-GFRP2 şeklinde güçlendirilen Seri 1 betonlarından ikişer adedi üzerinde yapılan yükleme-boşatma deneylerinde gerilme-şekil değiştirme eğrisinin bir önceki eğrinin bittiği yerden devam ettiği görülmüştür. Sabit hızlı yükleme durumundaki basınç dayanım değeri ve şekil değiştirme kapasitesi yakın çıkmıştır. Tekrarlı yükleme durumunda da kırılma anına kadar betonun bütünlüğünü koruduğu tespit edilmiştir. (Bkz. Şekil 4.8b,9b,10b).



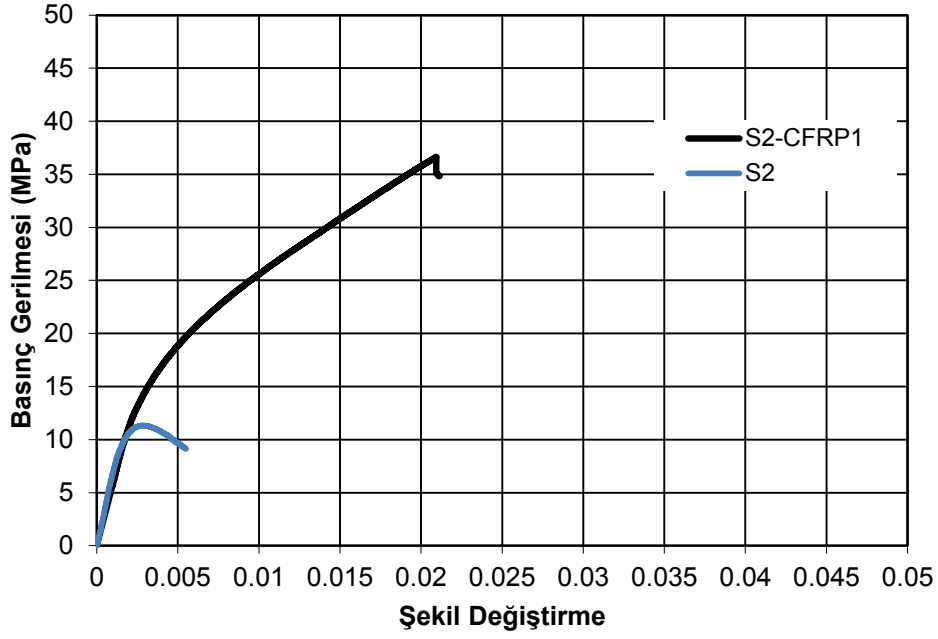
Şekil 4.11. Seri 1 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri

Tablo 4.8. Seri 1 betonların ortalama gerilme-şekil değiştirme artış oranları

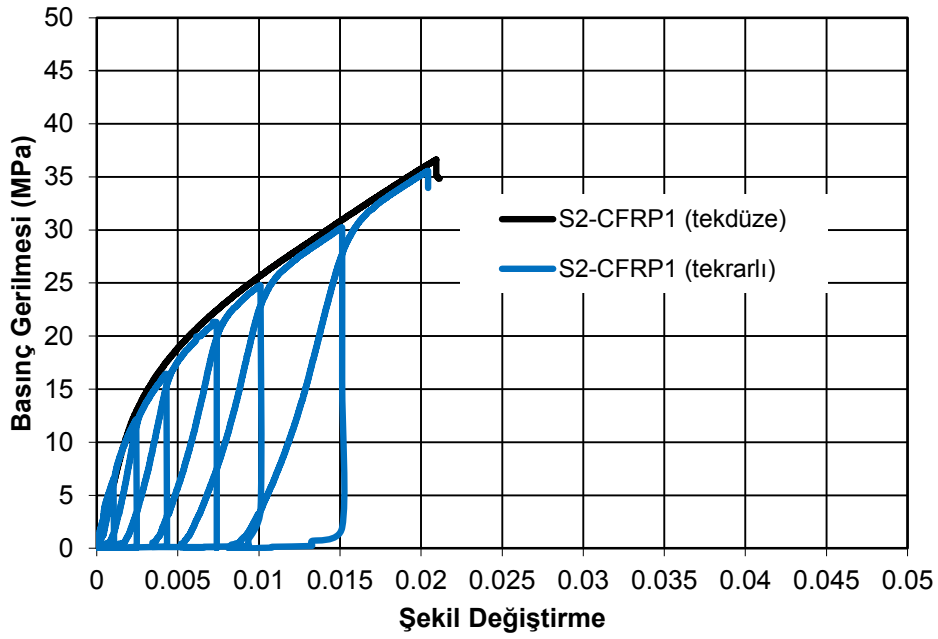
Numune ismi	Basınç dayanımı (MPa)	Artış oranı (Kat)	Şekil değiştirme	Artış oranı (Kat)
S1	6.74	-	0.0036	-
S1-CFRP1	31.06	4.61	0.0262	7.28
S1-GFRP1	20.18	2.99	0.0242	6.72
S1-GFRP2	30.73	4.56	0.0362	10.06

4.2.2.5. S2-CFRP1 betonların basınç deneyi

Seri 2 betonlarından bir kat CFRP ile enine sarılarak güçlendirilen altı adet numunenin (S2-CFRP1) ortalama basınç dayanımı 35.60 MPa, şekil değiştirme kapasitesi 0.0208 olarak bulunmuştur (Tablo 4.9). CFRP ile yapılan bir kat güçlendirmenin Seri 2 betonunun basınç dayanımını ortalama 3.23 kat artırdığı tespit edilmiştir. Ortalama 24.58 MPa'a tekamül eden artış neticesinde Seri 2 betonunun şekil değiştirme kapasitesi de 7.17 kat artmıştır (Şekil 4.12a). S2-CFRP1 betonlarından seçilen iki adet numune üzerinde yükleme-boşaltma yapılarak betonların tekrarlı yükleme altındaki davranışı incelenmiştir. Tekrarlı yükleme durumunda basınç gerilmesi-şekil değiştirme grafik çizgisinin bir önceki eğrinin bittiği yerden devam ettiği tespit edilmiştir. S2-CFRP1 numuneleri tekrarlı yükleme durumunda sabit hızlı yükleme durumundaki performansını korumuştur (Şekil 4.12b). Tekrarlı yükleme durumunda da kırılma anına kadar beton bütünlüğünü koruduğu tespit edilmiştir.



a) Sabit hızlı yükleme durumu



b) Sabit hızlı ve tekrarlı yükleme durumu

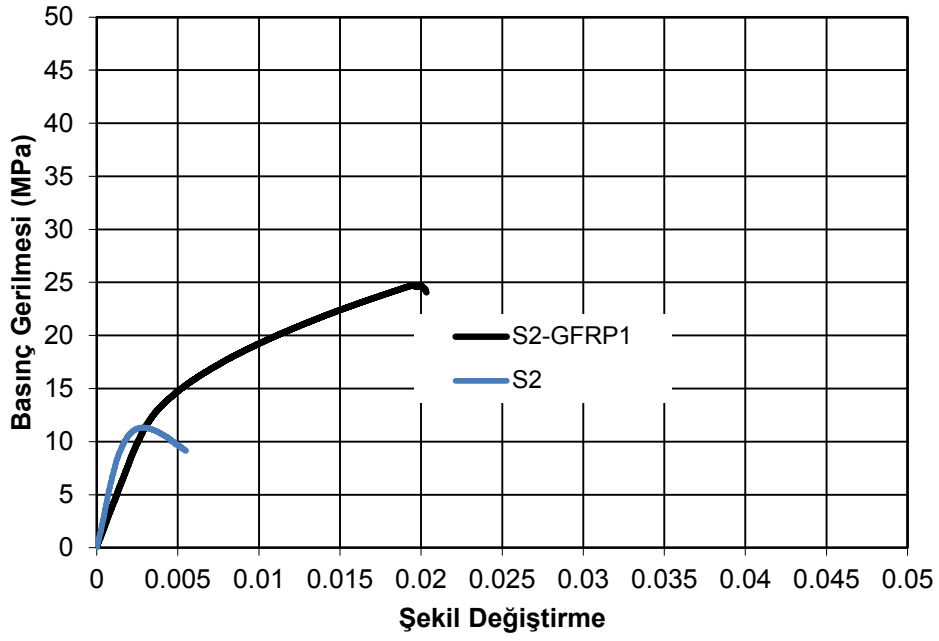
Şekil 4.12. S2-CFRP1 betonlarından gerilme-şekil değişirme grafik örnekleri

Tablo 4.9. S2-CFRP1 betonların basınç gerilmesi ve şekil değiştirme kapasiteleri

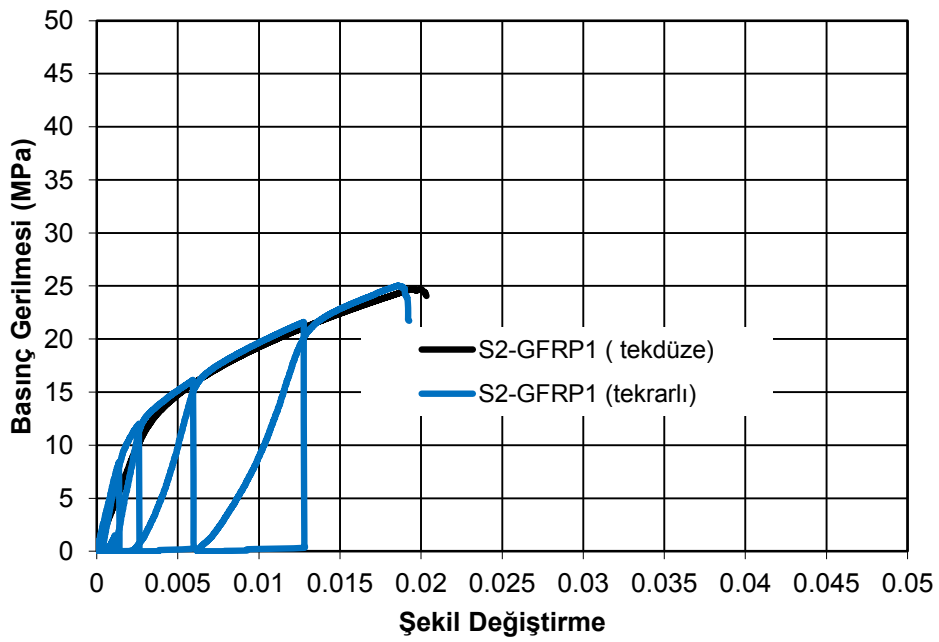
Numune	Basınç dayanımı (MPa)	Şekil değiştirme
1	36.64	0.0209
2	32.70	0.0184
3	36.91	0.0219
4	35.05	0.0226
5	35.57	0.0204
6	36.75	0.0203
Ortalama	35.60	0.0208

4.2.2.6. S2-GFRP1 betonların basınç deneyi

Bir kat GFRP ile enine sarılarak güçlendirilen Seri 2 betonlarından (S2-GFRP1) altı adedi üzerinde yapılan basınç testi sonucunda ortalama basınç dayanımı 24.67 MPa, şekil değiştirme kapasitesi ise 0.0187 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.10). Şahit betona kıyasla S2-GFRP1 betonun dayanımı ortalama 2.24 kat artmıştır. Ortalama 13.65 MPa'a tekamül eden artış neticesinde şekil değiştirme kapasitesi 6.45 kat artmıştır (Şekil 4.13a). Yapılan güçlendirmenin tekrarlı yükleme durumundaki etkilerini araştırmak için S2-GFRP1 betonlarından iki adedi üzerinde yükleme-boşatma deneyi yapılmıştır. Tekrarlı ve sabit hızlı yükleme durumunda gerilme-şekil değiştirme grafik değeri benzer çıkmıştır. Tekrarlı yükleme durumunda da kırılma anına kadar beton bütünlüğünü korumuştur. Deney sonuçları incelendiğinde sabit hızlı ve tekrarlı yükleme durumundaki basınç dayanım değeri ve şekil değiştirme kapasiteleri yakın çıkmıştır (Şekil 4.3b).



a) Sabit hızlı yükleme durumu



b) Sabit hızlı ve tekrarlı yükleme durumu

Şekil 4.13. S2-GFRP1 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri

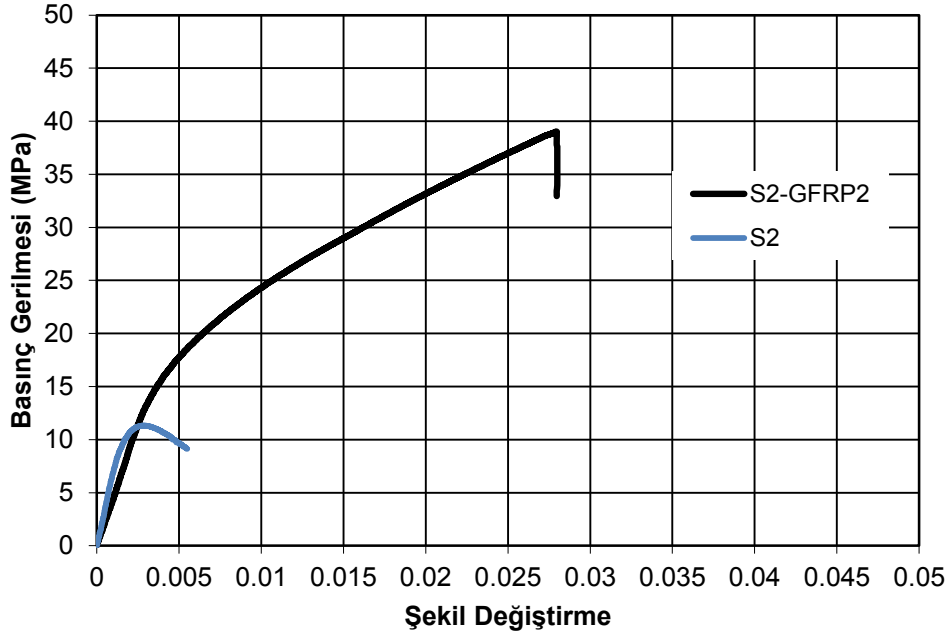
Tablo 4.10. S2-GFRP1 betonların basınç gerilmesi ve şekil değiştirme kapasiteleri

Numune	Basınç dayanımı (MPa)	Şekil değiştirme
1	23.66	0.0192
2	25.36	0.0175
3	24.52	0.0163
4	24.73	0.0196
5	24.74	0.0211
6	25.03	0.0186
Ortalama	24.67	0.01870

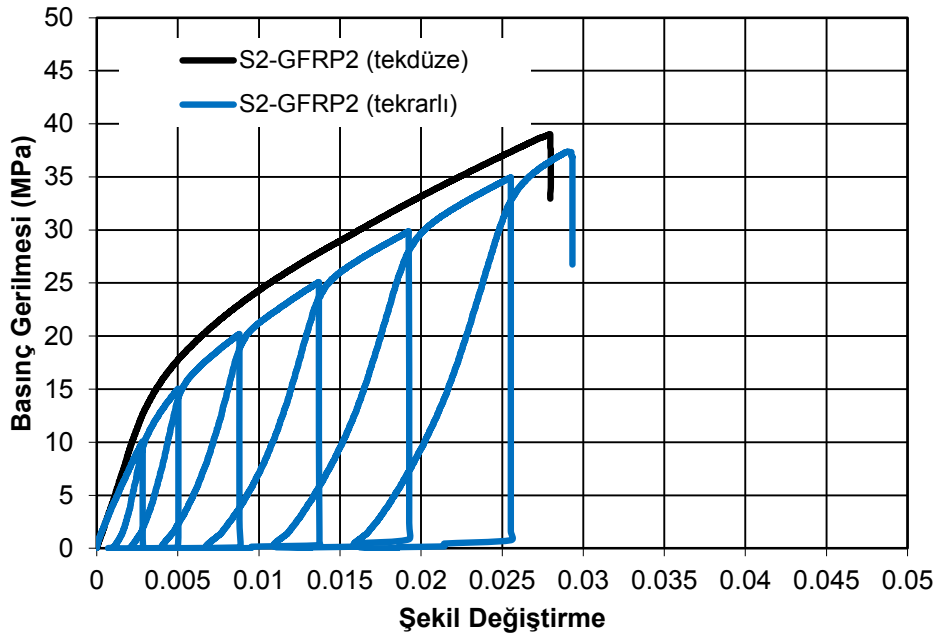
4.2.3.7. S2-GFRP2 betonların basınç deneyi

Bir kat GFRP ve CFRP sargılı silindir beton numunelerin deney sonuçları değerlendirildikten sonra Seri 2 betonundan hazırlanan iki kat GFRP sarılarak güçlendirilen numunelerin (S2-GFRP2) basınç testleri yapılmıştır. Altı adet Seri 2 beton numune çift katlı olarak sarılmış ve iki adedi tekrarlı, dört adedi de sabit hızlı yüklemeye tabi tutulmuştur (Şekil 4.14a). S2-GFRP2 betonlarının ortalama basınç dayanımı 39.80, şekil değiştirme kapasitesi ise 0.0305 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.11). Şahit kirişlere göre iki kat GFRP sarılarak güçlendirilen betonların basınç dayanımı ortalama 3.61 kat artmıştır. Ortalama 28.78 MPa'ya karşılık gelen bu artış neticesinde şekil değiştirme kapasitesi ortalama 10.52 kat artmıştır.

S2-GFRP2 betonlarından iki adedi üzerinde yapılan yükleme-boşaltma deneylerinde basınç gerilmesi-şekil değiştirme eğrisinin bir önceki eğrinin bittiği yerden devam ettiği görülmüştür (Şekil 4.17b). Sabit hızlı ve tekrarlı yükleme durumundaki basınç dayanım değeri ve şekil değiştirme kapasitesi benzer çıkmıştır. Basınç deneyinde kırılma anına kadar her iki durumda da betonun bütünlüğünü koruduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.14b).



a) Sabit hızlı yükleme durumu



b) Sabit hızlı ve tekrarlı yükleme durumu

Şekil 4.14. S2-GFRP2 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri

Tablo 4.11. S2-GFRP2 betonların basınç gerilmesi ve şekil değiştirme kapasiteleri

Numune	Basınç dayanımı MPa	Şekil değiştirme
1	39.55	0.0308
2	40.81	0.0310
3	39.41	0.0298
4	39.02	0.0280
5	37.38	0.0291
6	42.62	0.0344
Ortalama	39.80	0.0305

4.2.2.8. Seri 2 betonların karşılaştırılması

1999 Marmara depremi öncesinde inşa edilen; ancak güçlendirmeye ihtiyaç duyulan yapıların beton kalitesine yakın dayanımda üretilen Seri 2 betonlarının CFRP ve GFRP ile güçlendirilerek beton basınç dayanımlarına ve şekil değiştirme kapasitelerine etkileri araştırılmıştır. CFRP ve GFRP ile yapılan güçlendirmede kontrol betonuna kıyasla yük taşıma ve şekil değiştirme kapasitelerinde önemli artışlar elde edilmiştir (Şekil 4.15).

Seri 2 betonlarından bir kat karbon kumaşla enine sarılarak güçlendirilen betonların (S2-CFRP1) ortalama basınç dayanımı 3.23 kat artmıştır. Ortalama 24.58 MPa'a tekamül eden artış neticesinde şekil değiştirme kapasitesi 7.17 kat artmıştır. Bir kat cam kumaşla enine sarılarak güçlendirilen betonların (S2-GFRP1) basınç dayanımı ortalama 2.24 kat artmıştır. Ortalama 13.65 MPa'a tekamül eden artış neticesinde şekil değiştirme kapasitesi 6.45 kat artmıştır. İki kat cam kumaşla enine sarılarak güçlendirilen betonların (S2-GFRP2) basınç dayanımı şahit betona kıyasla 3.61 kat artmıştır. Ortalama 24.39 MPa'ya karşılık gelen bu artışla şekil değiştirme kapasitesi 10.52 kat artmıştır (Tablo 4.12, Şekil 4.15).

S2-GRFP1 ile S2-CRFP1 betonları kıyaslandığında, S2-CRFP1 betonuna göre S2-GRFP1 betonunun dayanımı ortalama %30.7 daha düşük çıkmıştır. S2-CRFP1 betonunun şekil değiştirme kapasitesi ortalama %10.1 daha düşük çıkmıştır (Şekil

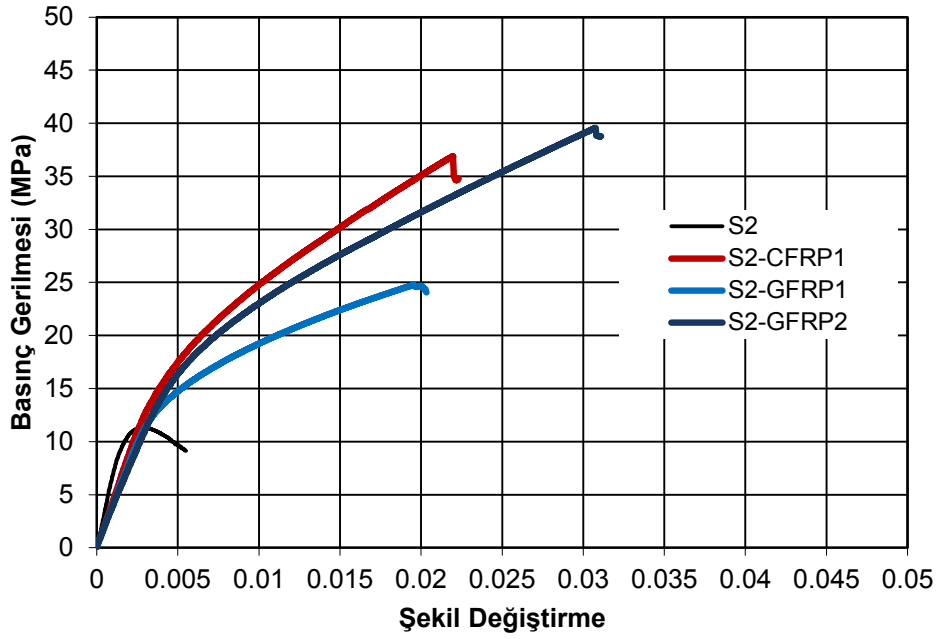
4.15). Bu sonuçlardan hareketle S2-CRFP1 betonunun dayanımına erişmek amacıyla Seri 2 betonları iki kat enine cam elyaf sarılarak güçlendirilmiştir.

S2-GRFP2 betonu S2-GRFP1 betonuna göre ortalama %61.3 daha yüksek basınç dayanımı göstermiş, Ortalama 15.13 MPa karşılık gelen bu değer ile şekil değiştirme kapasitesi %63.1 oranında yüksek çıkmıştır. S2-CRFP1 betonuna göre İki kat cam kumaş ile güçlendirilmesi yapılan Seri 2 betonlarının basınç dayanımı ortalama %11.8 daha yüksek çıkmıştır. Şekil değiştirme kapasitesi ise %46.6 oranında daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlardan hareketle Seri 2 betonlarının güçlendirilmesinde beton yüzeylerine bir kat karbon yerine iki kat cam sarıldığı takdirde daha yüksek dayanım ve şekil değiştirme kabiliyeti gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 4.15). Betonların basınca karşı güçlendirilmesinde ekonomiklik ve yerli üretim dikkate alınırca bir kat karbon elyaf yerine iki kat cam elyaf kullanımı daha iyi performans sergileyecektir.

S2-CFRP1, S2-GFRP1 ve S2-GFRP2, betonlarından iki adedi üzerinde yapılan yükleme-boşatma deneylerinde basınç gerilmesi-şekil değiştirme eğrisinin bir önceki eğrinin bittiği yerden devam ettiği görülmüştür. Basınç dayanım değeri ve şekil değiştirme kapasitesi sabit hızlı ve tekrarlı yükleme durumunda birbirine yakın çıkmıştır. Her iki durumunda da kırılma anına kadar betonun bütünlüğünü koruduğu tespit edilmiştir. (Bkz. Şekil 4.12b,13b,14b).

Tablo 4.12. Seri 2 betonların gerilme-şekil değiştirme artış oranları

Numune ismi	Basınç dayanımı (MPa)	Artış oranı (Kat)	Şekil değiştirme	Artış oranı (Kat)
S2	11.02	-	0.0029	-
S2-CFRP1	35.60	3.23	0.0208	7.17
S2-GFRP1	24.67	2.24	0.0187	6.45
S2-GFRP2	39.80	3.61	0.0305	10.52

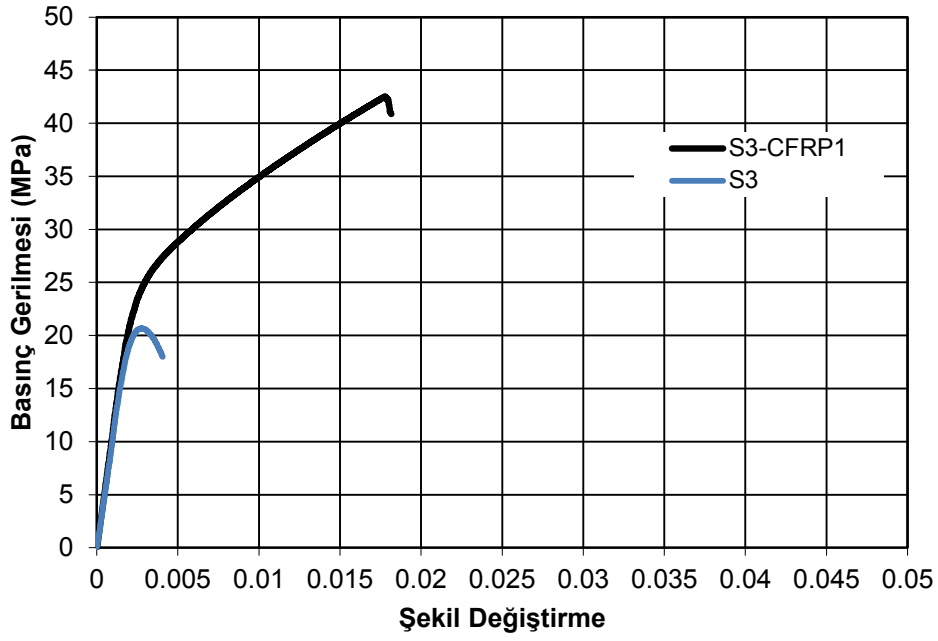


Şekil 4.15. Seri 2 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri

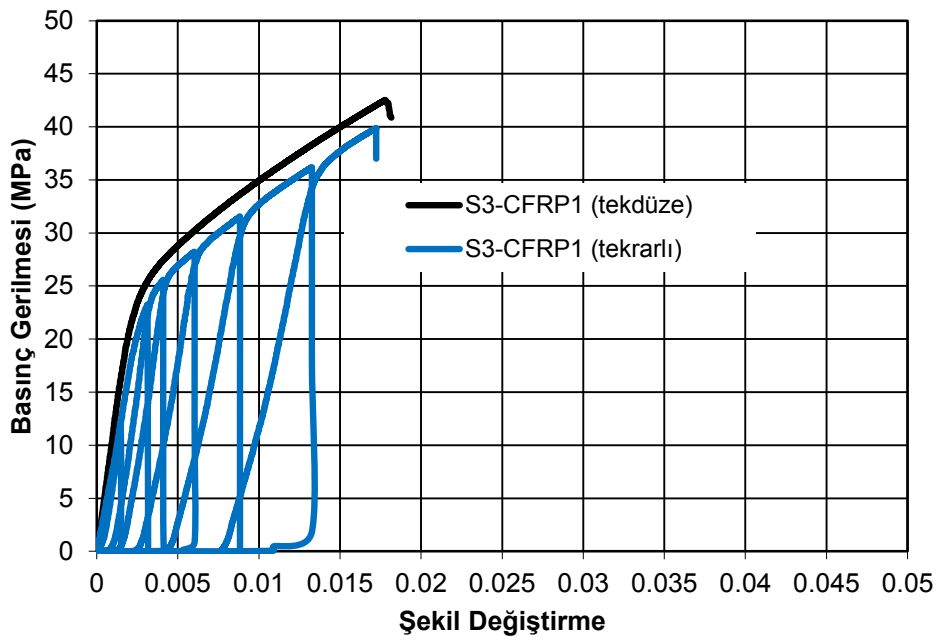
4.2.2.9. S3-CFRP1 betonların basınç deneyi

Günümüz yapılarında kullanılan beton kalitesine yakın olarak üretilen Seri 3 betonlarından seçilen altı adet silindir beton bir kat CFRP ile enine sarılarak güçlendirilmiştir (S3-CFRP1). Numunelerin üzerinde yapılan basınç deneyinde ortalama basınç dayanımı 41.30 MPa, şekil değiştirme kabiliyeti ise 0.0185 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.13). Şahit betona göre S3-CFRP1 şeklinde güçlendirilen betonun basınç dayanımı ortalama 1.98 kat artmıştır. Ortalama 20.48 MPa'a tekamül eden artış neticesinde şekil değiştirme kapasitesinin 6.38 kat arttığı tespit edilmiştir (Şekil 4.16a).

S3-CFRP1 betonlarından iki adedi üzerinde yapılan yükleme-boşatma deneylerinde basınç gerilmesi-şekil değiştirme grafik değerinden anlaşıldığı gibi beton dayanım kaybına uğramamış ve sürekli yükleme durumundaki gibi davranmıştır (Şekil 4.16b).



a) Sabit hızlı yükleme durumu



b) Sabit hızlı ve tekrarlı yükleme durumu

Şekil 4.16. S3-CFRP1 betonlarından gerilme-şekil değişirme grafik örnekleri

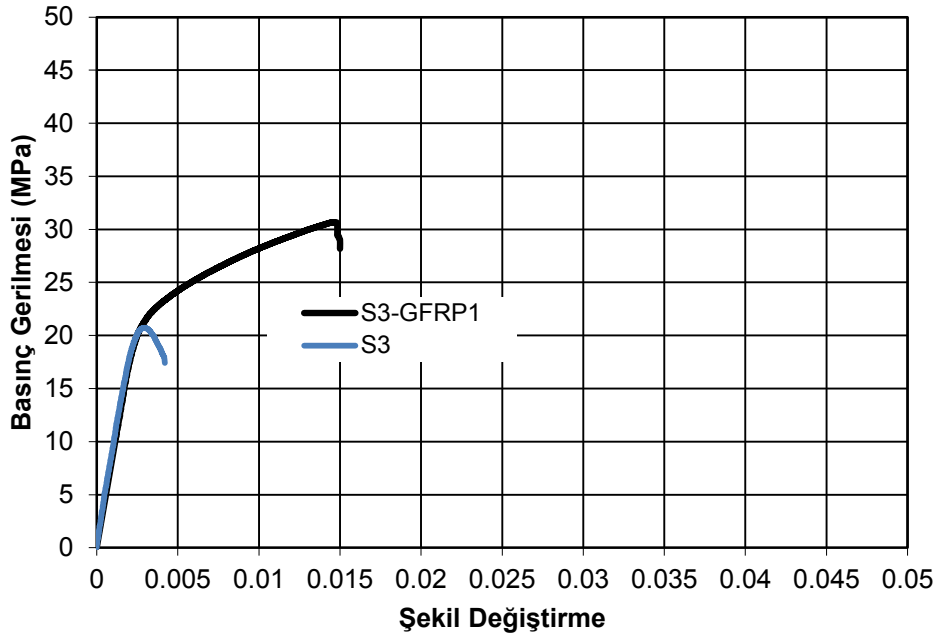
Tablo 4.13. S3-CFRP1 betonların basınç gerilmesi ve şekil değiştirme kapasiteleri

Numune	Basınç dayanımı (MPa)	Şekil değiştirme
1	44.11	0.0202
2	42.52	0.0179
3	40.11	0.0183
4	41.01	0.0196
5	40.17	0.0179
6	39.85	0.0172
Ortalama	41.30	0.0185

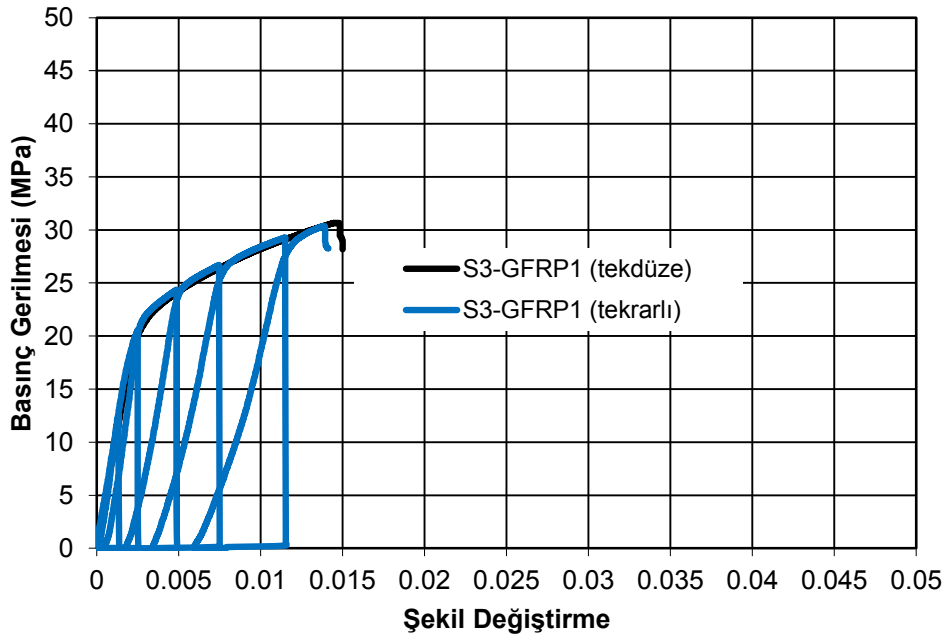
4.2.2.10. S3-GFRP1 betonların basınç deneyi

Seri 3 silindir betonlarından bir kat GFRP sarılarak güçlendirilen altı adet numune (S3-GFRP1) üzerinde yapılan basınç deneyinde ortalama basınç dayanımı 29.54 MPa, şekil değiştirmesi ise 0.0139 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.14). S3-GFRP1 şeklinde yapılan güçlendirmede Seri 2 betonunun basınç dayanımı ortalama 1.42 kat yükselmiş, ortalama 8.72 MPa'ya denk gelen bu artışla şekil değiştirme kapasitesini 4.79 kat artırdığı tespit edilmiştir (Şekil 4.17a).

S3-GFRP1 betonlarından iki adedi üzerinde yapılan yükleme-boşatma deneylerinde basınç dayanımı ve şekil değiştirme davranışları sabit hızlı yükleme durumundakine benzer çıkmıştır. Tekrarlı yüklemede sabit hızlı yükleme durumuna göre beton basınç dayanım kaybına uğramamış ve şekil değiştirme kapasitesini korumuştur (Şekil 4.17b).



a) Sabit hızlı yüklem durumu



b) Sabit hızlı ve tekrarlı yükleme durumu

Şekil 4.17. S3-GFRP1 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri

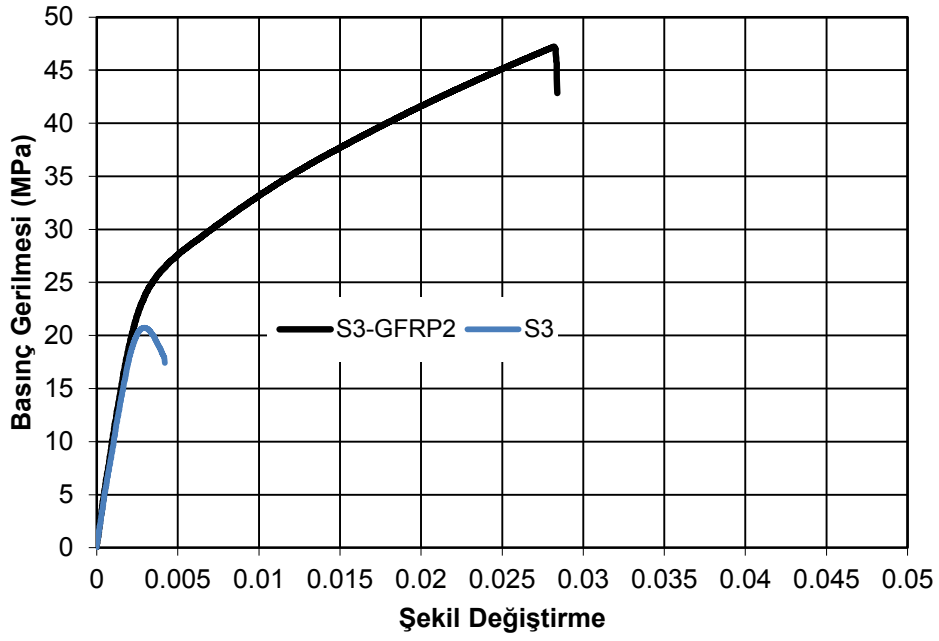
Tablo 4.14. S3-GFRP1 betonların basınç gerilmesi ve şekil değiştirme kapasiteleri

Numune	Basınç dayanımı MPa	Şekil değiştirme
1	30.66	0.0145
2	29.60	0.0149
3	28.66	0.0134
4	27.90	0.0109
5	30.07	0.0153
6	30.37	0.0139
Ortalama	29.54	0.0139

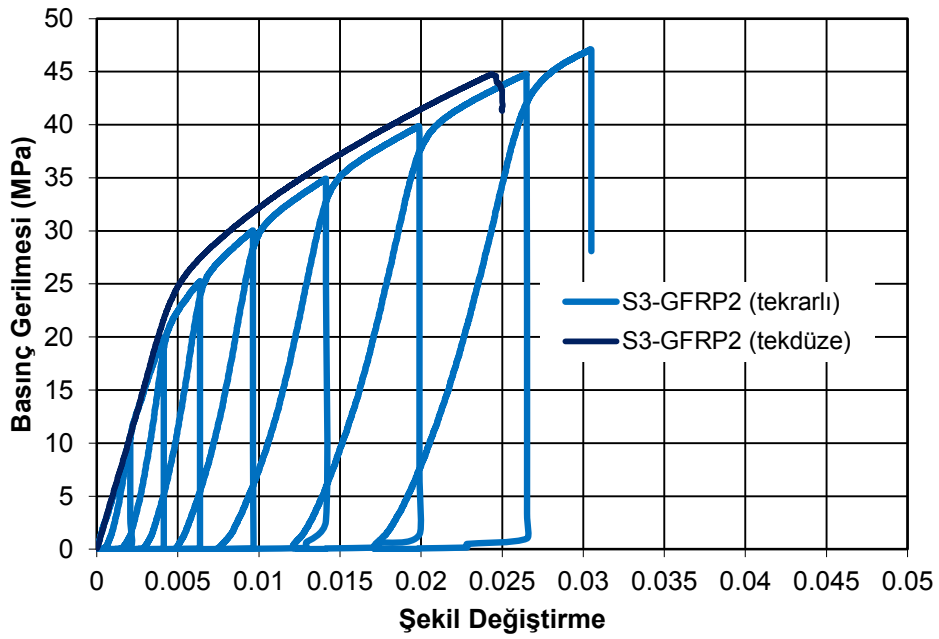
4.2.2.11. S3-GFRP2 betonların basınç deneyi

S3-CFRP1 ve S3-GFRP1 numunelerinin deney sonuçları değerlendirilmiş S3-CFRP1 betonunun dayanımını yakalamak amacıyla Seri 3 betonlarından seçilen altı adet numune enine iki kat cam elyaf ile sarılarak güçlendirilmiş (S3-GFRP2), iki adedi tekrarlı, dört adedi de sürekli yüklemeye basınç testine tabi tutulmuştur. S3-GFRP2 numunelerinin ortalama basınç dayanımı 45.21 MPa, şekil değiştirme kapasitesi ise 0.0251 olarak hesaplanmıştır (Tablo 4.15). S3-GFRP2 şeklinde yapılan güçlendirme ile şahit betona göre basınç dayanımı 2.17 kat ve şekil değiştirme kapasitesi ise 8.66 kat arttığı tespit edilmiştir (Şekil 4.18a).

S3-GFRP2 betonlarından iki adedi üzerinde yapılan yükleme-boşatma deneylerinde gerilme-şekil değiştirme grafik değeri bir önceki bir önceki eğrinin bittiği yerden devam ettiği tespit edilmiştir (Şekil 4.18b).



a) Sabit hızlı yüklem durumu



b) Sabit hızlı ve tekrarlı yükleme durumu

Şekil 4.18. S3-GFRP2 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri

Tablo 4.15. S3-GFRP2 betonların basınç gerilmesi ve şekil değiştirme kapasiteleri

Numune	Basınç dayanımı (MPa)	Şekil değiştirme
1	44.78	0.0243
2	44.11	0.0237
3	43.30	0.0233
4	47.22	0.0222
5	44.71	0.0265
6	47.11	0.0305
Ortalama	45.21	0.0251

4.2.2.12. Seri 3 betonlarının karşılaştırılması

Günümüz yapılarında kullanılan beton kalitesine yakın olarak üretilen ortalama 20.82 MPa basınç dayanımına sahip Seri 3 betonu tek doğrultulu CFRP ve GFRP ile güçlendirilerek eksenel yük taşıma gücü ve şekil değiştirme kabiliyetine etkileri araştırılmıştır. Bir kat veya iki kat CFRP ve GFRP ile sarılarak güçlendirilen betonların dayanımında önemli artışlar olmuştur (Şekil 4.19). Kırılma sırasında elyaflardan kopmalar olmuş beton yüzeylerinden sıyrılmaya rastlanmamıştır.

Seri 3 betonlarından bir kat karbon kumaşla enine sarılarak güçlendirilen numunelerin (S3-CFRP1) basınç dayanımında 1.98 kat artış olmuştur. Ortalama 20.48 MPa'ya karşılık gelen artışla şekil değiştirme kapasitesinde artış 6.38 kat olarak hesaplanmıştır. Bir kat cam kumaşla sarılarak güçlendirilen Seri 3 betonunun (S3-GFRP1) basınç dayanımı ortalama 1.42 kat, şekil değiştirme kabiliyetinde ise 4.79 kat artmıştır (Tablo 4.16). Bu sonuçlardan hareketle bir kat cam kumaşla bir kat karbon kumaşın dayanımına erişilemediği görülmüş karbon elyafın dayanımına erişmek amacıyla Seri 3 betonları iki kat cam kumaş sarılarak güçlendirilmiştir (S3-GFRP2). Yapılan basınç testi sonucunda elde edilen verilere göre Seri 3 betonuna kıyasla S3-GFRP2 betonunun dayanımı ortalama 2.17 kat artmıştır. Ortalama 24.39 MPa'a tekamül eden artış neticesinde şekil değiştirme kapasitesi 8.66 kat artmıştır (Tablo 4.16, Şekil 4.19).

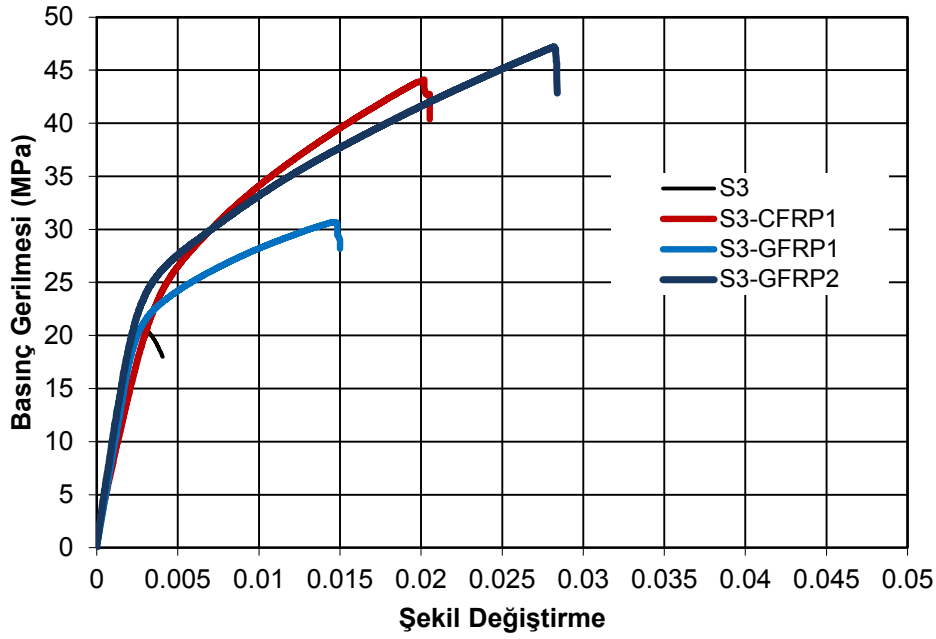
S3-GRFP1 betonunun dayanımı S3-CRFP1 betonuna göre ortalama %28.5 daha düşük çıkmıştır. GFRP betonunun şekil değiştirme kapasitesi ortalama %24.9 daha düşük çıkmıştır (Şekil 4.19). Bu sonuçlardan hareketle GFRP ile güçlendirilen numunelerde çift kat cam elyaf sarılarak basınç dayanımının yükseltilmesi ve şekil değiştirme kabiliyetinin artırılması hedeflenmiştir.

S3-GRFP2 ile S3-CRFP1 betonu kıyaslandığında GFRP betonunun dayanımı CFRP betonuna göre %9.5 daha yüksek çıkmıştır. GFRP betonunun şekil değiştirme kapasitesi ortalama %35.7 daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlardan hareketle Seri 3 betonu basınç dayanımlarının yakın olması ve şekil değiştirme kabiliyetlerinin daha fazla olması nedeniyle bir kat CFRP ile güçlendirmek yerine iki kat GFRP ile yapılan güçlendirmenin daha ekonomik olması ve kolaca temin edilebilmesi dolayısıyla karbon elyaf yerine kullanılması avantaj sağlayacaktır.

S3-CFRP1, S3-GFRP1 ve S3-GFRP2 betonların iki adedi yükleme-boşaltma yapılarak test edilmiştir. Tekrarlı yükleme durumunda sabit hızlı yükleme durumundaki gibi basınç gerilmesi-şekil değiştirme grafiği benzer davranış göstermiş, ayrıca beton dayanım ve şekil değiştirme performansını korumuştur. Tekrarlı yükleme durumunda da kırılma anına kadar beton bütünlüğünü koruduğu tespit edilmiştir.(Bkz. Şekil 4.16b,17b,18b)

Tablo 4.16. Seri 3 betonlarının gerilme-şekil değiştirme artış oranları

Numune ismi	Basınç dayanımı (MPa)	Artış oranı (Kat)	Şekil değiştirme	Artış oranı (Kat)
S3	20.82	-	0.0029	-
S3-CFRP1	41.3	1.98	0.0185	6.38
S3-GFRP1	29.54	1.42	0.0139	4.79
S3-GFRP2	45.21	2.17	0.0251	8.66

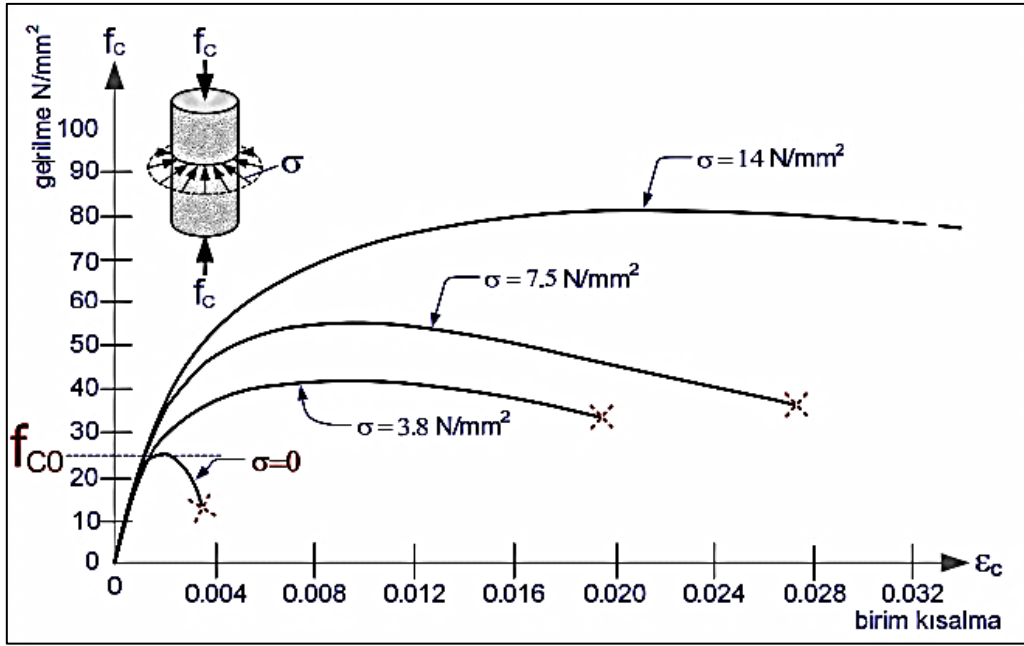


Şekil 4.19. Seri 3 betonlarından gerilme-şekil değiştirme grafik örnekleri

4.3. FRP Kompozitlerle Betonarme Kolonların Güçlendirilmesi

Bu bölümde, düşük dayanımlı silindirik beton numunelerin CFRP ve GFRP ile güçlendirilerek hem beton basınç dayanımları hem de şekil değiştirme performanslarının 3.6 katına varan oranlarda iyileştirilebildiği gösterilmiştir. Bu iyileştirmelerin yanı sıra FRP kompozitler betonun dağılmasını engelleyerek betona kuşatılmış beton özelliği kazandırmaktadırlar. Betonarme yapılarda enine donatılar (etriyeler) ile kazandırılan kuşatılmış beton özelliğinin FRP kompozitler ile de kazandırılabilceği yukarıda elde edilen sonuçlar ile açıkça gösterilmiştir.

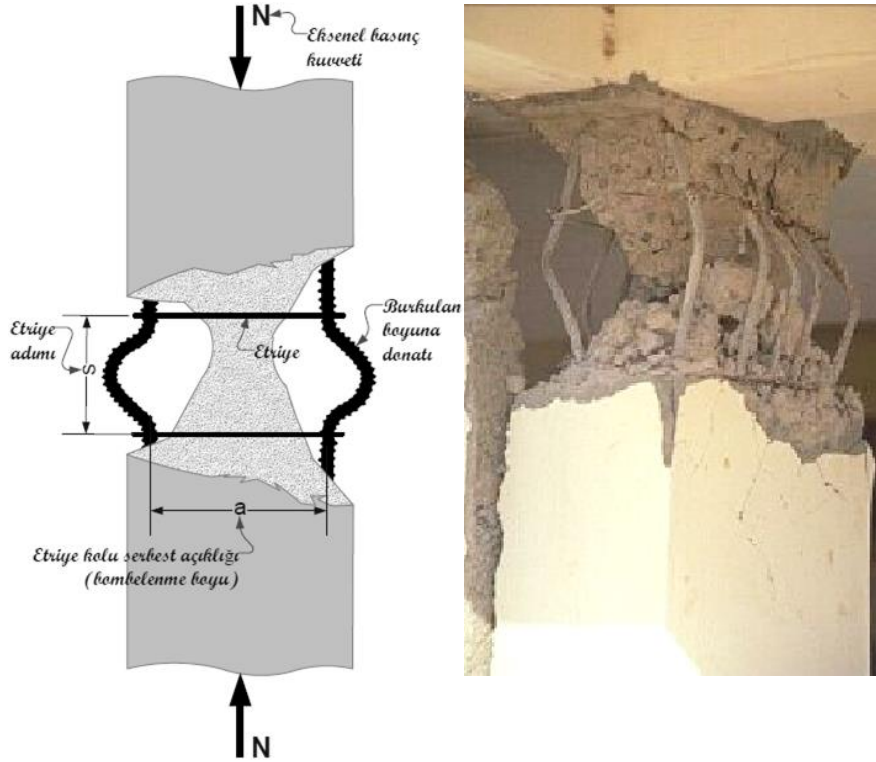
Yukarıda elde edilen sonuçları, Richart ve arkadaşlarının (1928) yanal sargılamının etkilerini araştırmak için yapmış oldukları çalışma da doğrulamaktadır. Richart ve arkadaşları bu çalışmada, hazırladıkları aynı dayanıma sahip beton numunelerin yanal yüzeylerine farklı oranlarda sabit basınç gerilmeleri uygulayarak aksel basınç deneyine tabi tutmuşlardır. Elde edilen sonuçlara göre betonların basınç dayanımlarının, yanal yüzeylerine uygulanan basınç gerilmelerinin 4 katı kadar arttığı ve süneklik kazandığı tespit edilmiştir (Şekil 4.20).



Şekil 4.20. Üç eksenli gerilme etkisinde betonun davranışı

Eksenel basınç altında beton eksenel doğrultuda kılalırken poisson oranı etkisiyle enine doğrultuda şişer ve çatlar. Betonarme kolonlarda kullanılan etriye betonun şişmesini engelleyerek betona yanıl basınç uygular. Uygulanan bu yanıl basınç etkisiyle kuşatılmış betonun dayanımı ve sünekliliği artar. FRP kompozitlerle sarılarak güçlendirilmiş betonarme kolonda ise bu kuşatma etkisi FRP kompozitler tarafından sağlanır. Dolayısıyla bu şekilde güçlendirilmiş olan betonarme kolonlar yüksekliğı boyunca sürekli olarak kuşatılmış beton davranışı gösterirler.

Ülkemizdeki mevcut yapı stokunun önemli bir oranında ve özellikle 1998 TDY öncesi inşa edilen betonarme binaların geneline yakınında etriye adım mesafeleri standartların çok üzerindedir. Bunun yanında, bu yapıların beton basınç dayanımlarının da standartların oldukça altında olması nedeni ile depremde oluşan hasarlar ciddi boyutlara ulaşmaktadır (Şekil 4.21).



Şekil 4.21. Büyük sargı adımları nedenle betonarme kolonlarda oluşan hasarlar

Etriye adım mesafesi yeterli olmayan kolonların güçlendirilmesinde dışarıdan etriye sarmanın oldukça zahmetli bir işlem olduğu bilinmektedir. Ülkemizde yaygın olarak karşılaşılan bu tür betonarme kolonlar, yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip ve uygulaması oldukça kolay olan FRP kompozitler kullanılarak etkin bir şekilde güçlendirilebilir.

Bu bölümde yapılan deneysel çalışmalar her ne kadar standart boyutlarda üretilen silindirik betonlarla sınırlı olsa da, elde edilen sonuçlar FRP kompozitlerin beton dayanımını düşük ve etriye adım mesafesi standartlara uygun olmayan betonarme kolonların güçlendirilmesinde etkin bir şekilde kullanılabileceğini açıkça ortaya koymuştur. Özellikle etriye mesafesi standartların çok üzerinde olan betonarme kolonların bu bölgedeki betonlarına kuşatma etkisi özelliği kazandırılarak betonun bütünlüğü korunmuş, boyuna donatıların burkulması engellenmiş, düşük dayanımlı betonun dayanımı ve sünekliği artırılmış olacaktır.

BÖLÜM 5. EĞİLME YÜKÜ ETKİSİNDEKİ BETONARME YAPI ELEMANLARININ CFRP VE GFRP KULLANILARAK GÜÇLENDİRİLMESİ

Bu bölümde; Türkiye'deki mevcut yapılarda yaygın olarak karşılaşılan kesme ve eğilme dayanımları düşük betonarme kirişler dikkate alınarak deney elemanları laboratuvar ortamında üretilmiştir. Üretilen kirişler; beton sınıfı C16/20, etriye sıkılaştırılması yapılmamış, boyuna donatısı yetersiz olan ve aynı zamanda Türkiye'de 2007 yılında yürürlüğe giren (TDY-2007) deprem yönetmeliğini sağlamayan kirişleri kapsamaktadır. Betonarme kirişler CFRP ve GFRP ile güçlendirilerek eğilme ve kesme dayanımları, süneklikleri ve enerji yutma kapasitelerindeki performans değişiklikleri araştırılmıştır. CFRP ve GFRP sarılarak güçlendirilen betonarme kiriş numunelerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak CFRP yerine daha ekonomik ve uzama kapasitesi daha yüksek olan GFRP'nin kullanımı araştırılmıştır.

5.1. Deneysel Çalışma

Betonarme kirişler C16/20 betonu, enine ve boyuna donatı olarak nervürlü S420 çeliği kullanılarak üretilmiştir. Üretilen kirişler ½ ölçeğinde, 15×25 cm kesitinde ve 200 cm boyutundadır. Kirişlerde kesme etkisini görmek için kiriş sarılma bölgesinde etriye sıkılaştırması yapılmamış, etriyeler Ø8'lik çelik donatıdan hazırlanmış 15 cm aralıklara düzenlenmiştir. Boyuna donatısı olarak kiriş alt ve üst bölgesine ikişer adet Ø10'luk çelik donatı kullanılmıştır.

Literatürde CFRP ve GFRP ile yapılmış deneysel çalışmalardan da yararlanılmış, aynı şartlar altında hazırlanmış kirişler, alt ve yan yüzeylerine kiriş boyunca tek yönlü karbon ve cam kumaşlar ile sarıp epoksi reçine ile yapıştırılarak güçlendirilmiştir. FRP ile güçlendirilen numuneler yedi gün uygun şartlarda

bekletilmiştir. Sarılan ve yeterli kürünü tamamlayan kirişler dört nokta eğilme deneyiyle yüklenmiş ve FRP kompozitlerle güçlendirilen kirişlerin yük taşıma kapasiteleri ve şekil değiştirme kapasiteleri incelenmiştir. Hazırlanan kiriş numunelerine ait kodlamalar ve güçlendirme şekilleri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1. Kiriş numune kodlama ve açıklamaları

Numune Kodu	Numune özellikleri	Adet
SK	Şahit Kiriş	3
CFRP11	CFRP ile 1 kat boyuna, 1 kat 90° enine sarılarak güçlendirilmiş kiriş	3
GFRP11	GFRP ile 1 kat boyuna, 1 kat 90° enine sarılarak güçlendirilmiş kiriş	3
GFRP21	GFRP ile 2 kat boyuna, 1 kat 90° enine sarılarak güçlendirilmiş kiriş	3
CFRP22	CFRP ile 2 kat boyuna, 2 kat 90° enine sarılarak güçlendirilmiş kiriş	2
GFRP22	GFRP ile 2 kat boyuna, 2 kat 90° enine sarılarak güçlendirilmiş kiriş	2
GFRP21-1	GFRP ile 2 kat boyuna, 1 kat 90° enine, 1 kat 45° enine sarılarak güçlendirilmiş kiriş	2
CFRP21-1	CFRP ile 2 kat boyuna, 1 kat 90° enine, 1 kat 45° enine sarılarak güçlendirilmiş kiriş	2

5.2. Eğilme Deneyleri

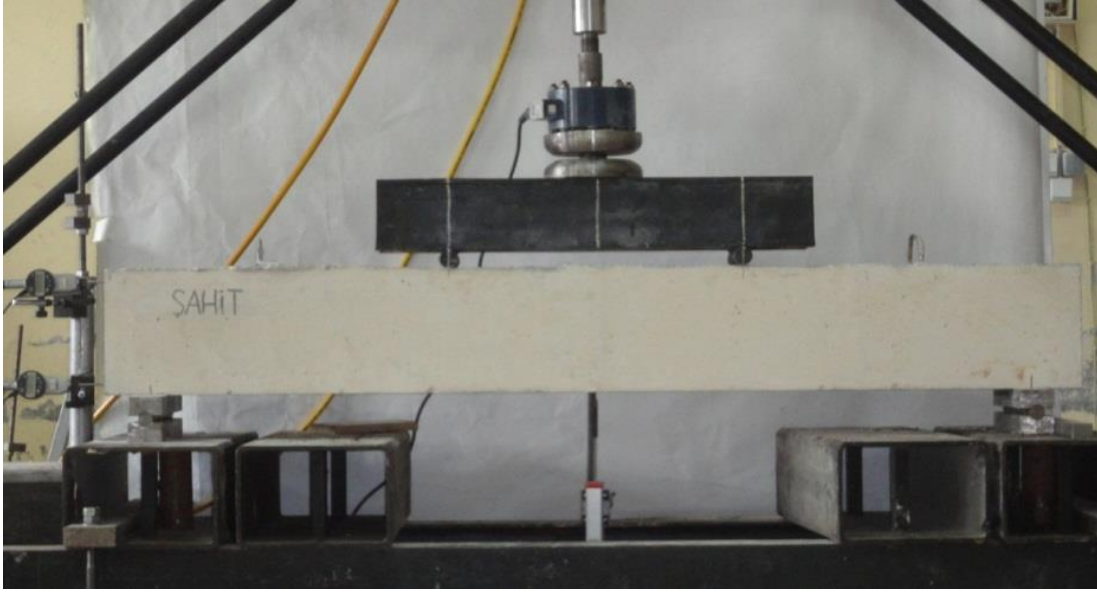
FRP’ler ile çeşitli şekillerde güçlendirilen 200 cm uzunluğunda üretilen kirişler dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Kirişin mesnet açıklığı 180 cm ve yükler arası mesafesi 60 cm’dir. 60 cm aralıklarla kiriş üç bölgeye ayrılmıştır. 1. ve 3. bölge eğilme momentinin düşük olduğu kesme yükünün yüksek olduğu bölge, 2. bölge ise sadece eğilme momentinin etkili olduğu bölgedir. Yükleri eşit dağıtmak için dolu gövdeli yük dağıtma kirişi kiriş üzerine yerleştirilmiştir. Yük verici piston ile dolu gövdeli yük dağıtıcı arasında sürtünmeden meydana gelebilecek ilave tesirleri

engellemek için aralarına mafsallı aparat yerleştirilmiştir. Betonarme kirişe zarar vermesini engellemek için iki noktadan çizgisel olarak yükleri kompozit kirişe aktaran 3 cm çapında çelik silindir çubuk altlarına kauçuk yerleştirilmiştir. (Bkz. Şekil 2.19)

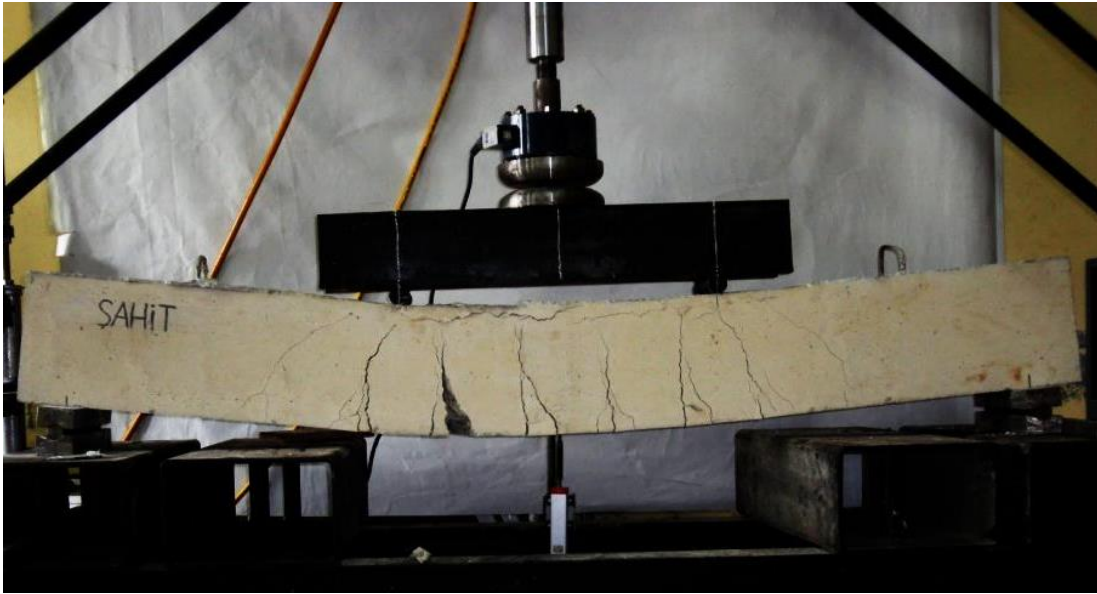
Eğilme çerçevesinin alt başlığı üzerine yerleştirilen ve sabitlenen kutu profiller üzerine sabit ve kayıcı mesnetler monte edilmiştir. Düşey yer değiştirmeler kompozit kirişin alt orta noktasına sehim ölçerler ile ölçülmüştür. Yükleme durumunda yük değişimleri yük verici piston ucuna takılan yük ölçer ile ölçülmüştür. Kiriş orta bölgesine yerleştirilen potansiyometrik cetveller yardımı ile yükleme sırasında oluşacak deplasmanlar ölçülmüştür. Kiriş ucuna yerleştirilen dijital cetvellerle kirişlerin moment eğrilik ilişkileri ölçülmüştür. Yük verici piston manuel olarak el ile kumanda edilerek sabit bir hızla yükleme yapılmıştır. Deney sırasında deplasman ölçerlerden ve yük vericiden gelen değerler, veri toplama sistemi (data logger) yardımı ile bilgisayara aktarılmıştır. Bilgisayar ortamında numunelerin yük-sehim grafikleri çizilmiştir. (Bkz Şekil 2.19)

5.2.1. Şahit kiriş eğilme deneyi

Üretilen kirişlerden seçilen üç adet şahit numune dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 5.1). Şahit kirişler göçme yükü oluşuncaya kadar yüklenmiş ve yük-sehim değerleri bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Şahit kirişlerde ilk çatlaklar eğilme bölgesinde kiriş alt bölgesinde oluşmuş ve yükleme devam ettikçe çatlaklar kiriş üst bölgesine doğru ilerlemiştir. Kiriş nihai dayanımına ulaştığında kesme bölgesinde kesme çatlaklarının oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.1. Şahit kiriş deney öncesi



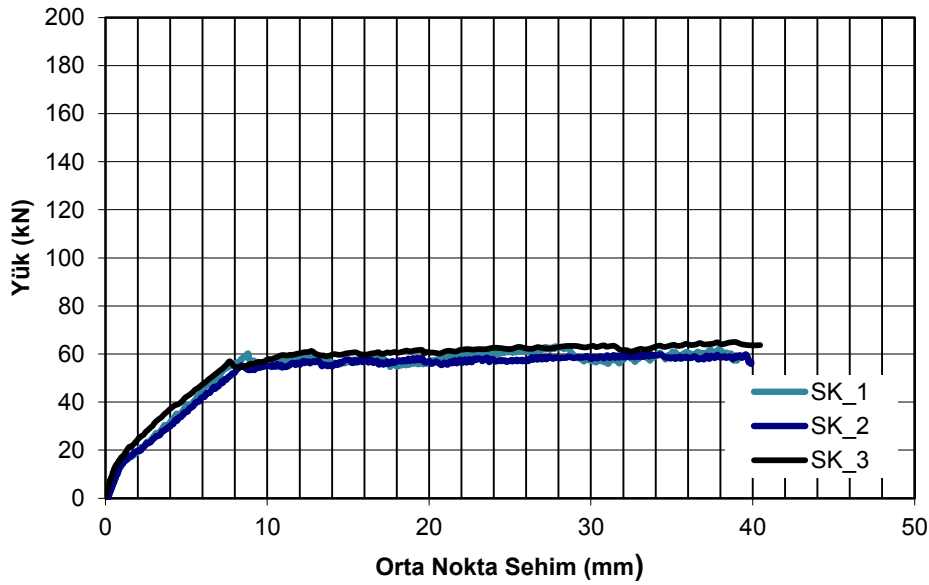
Şekil 5.2. Şahit kiriş deney sonrası deformasyonları

Manuel olarak sabit hızla yapılan yükleme sonucunda elde edilen yük-sehim grafiği karşılaştırıldığında kirişlerin davranışları birbirine benzer çıkmıştır (Şekil 5.3). Ortalama yük 14.20 kN olduğunda kiriş ortasında ortalama sehim 0.88 mm olarak ölçülmüş kiriş alt 2. bölgesinde ilk eğilme çatlakları oluşmuş yükleme devam ettikçe yük ve sehim artmaya devam etmiştir. Ortalama yük 57.43 kN'na çıktığında ortalama 8.31 mm sehim oluşmuş, yükleme devam ettikçe yük artışı sınırlı kalmış ancak sehim artmaya devam etmiştir. Ortalama yük 62.74 kN'na çıktığında kiriş numune

ortalama 33.66 mm sehim yapmıştır (Tablo 5.2, Şekil 5.3). Ortalama 33.66 sehim oluştuktan sonra yük değerleri düşmeye başlamıştır. Kirişin 2. bölgesinde oluşan moment çatlakları kiriş üstüne kadar çıkmıştır. Ayrıca 1. ve 3. bölgede kesme çatlaklarının oluştuğu tespit edilmiştir. Kısmen yük değerleri düşmeye başlaması ile yükleme sonlandırılmıştır.

Tablo 5.2. Şahit kirişlerine ait yük ve sehim değerleri

Numune	İlk Çatlak		Akma Başlangıcı		Kırılma	
	Yük (kN)	Sehim (mm)	Yük (kN)	Sehim (mm)	Yük (kN)	Sehim (mm)
1	14.02	0.93	60.12	8.83	63.21	28.50
2	14.24	1.00	55.23	8.42	60.07	33.50
3	14.35	0.71	56.95	7.69	64.93	38.97
Ortalama	14.20	0.88	57.43	8.31	62.74	33.66



Şekil 5.3. Şahit kirişlere ait yük-sehim grafikleri

5.2.1.1. Şahit kirişlerin süneklik oranları

Kirişlerin sünek davranış göstermesi için donatı yüzdesinin yönetmeliklerde verilen belirli sınırlar içinde olması gerektiğinden bütün kirişler süneklik koşulunu

sağlayacak şekilde donatılmıştır. Şahit kirişlerin yüklenmesi sonucunda elde edilen yük-sehim eğrisinden faydalanarak, her elamanın kopma durumundaki şekil değiştirmesi, akma durumundaki şekil değiştirmesine bölünerek elemanlara ait süneklik düzeyleri bulunmuştur. Deneye tabi tutulduklarında tüm şahit kirişler yeterli sünekliği sağlamıştır. Yükleme maruz kalan şahit kirişler FRP malzemelerle tekrar onarım ve güçlendirme yapılacağından enerji yutma kapasiteleri tamamen tüketilmemiş 40 mm sehim yapınca yükleme son verilmiştir. Şahit kirişlerde süneklik düzeyi ortalama 4.81 olarak hesaplanmıştır. (Tablo 5.3).

Tablo 5.3. Şahit kirişlerin süneklik oranları

Numune	Akma anındaki şekil değiştirme Δy (mm)	Kopma anındaki şekil değiştirme Δu (mm)	Süneklik $\mu\Delta = \Delta u / \Delta y$
1	8.83	40	4.53
2	8.42	40	4.75
3	7.69	40	5.2
Ortalama	8.31	40	4.81

5.2.1.2. Şahit kirişlerin enerji yutma kapasiteleri

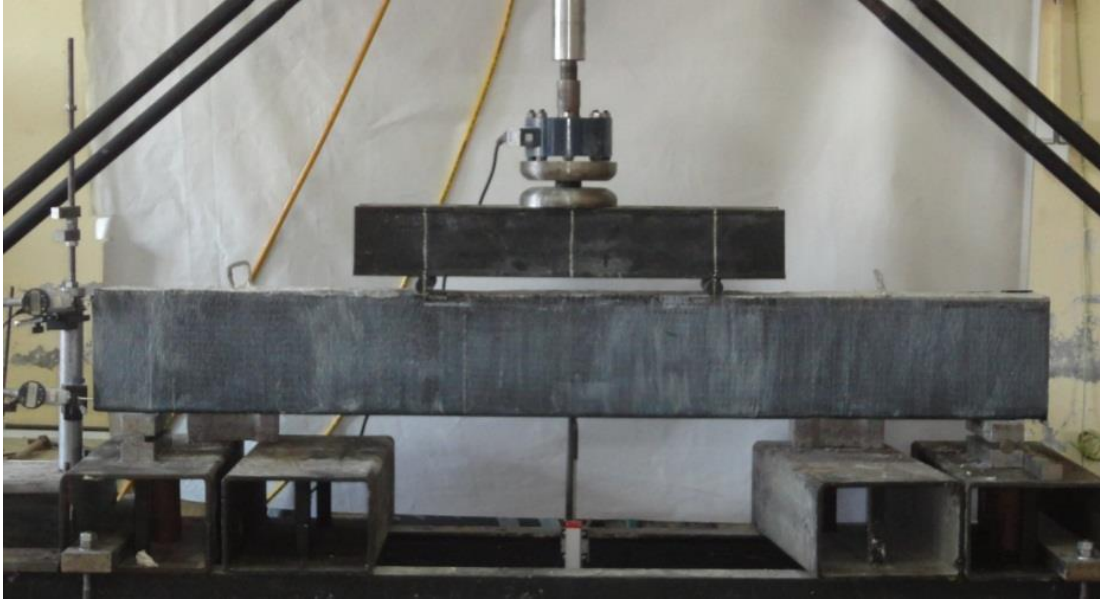
Enerji yutma kapasitesi yük-sehim eğrilerinden yararlanılarak, eğri altında kalan alanın hesaplanması ile bulunmaktadır. Şahit kirişler ortalama 2145.23 Joule enerji yutmuştur (Tablo 5.4).

Tablo 5.4. Şahit kirişlerin enerji yutma kapasiteleri

Numune	Maksimum yük (kN)	Orta nokta sehim (mm)	Yutulmuş enerji (Joule-kN.mm)
1	63.21	40	2071.88
2	60.07	40	2070.52
3	64.93	40	2293.30
Ortalama	62.74	40	2145.23

5.2.2. CFRP11 kirişi eğilme deneyi

Üretilen kirişlerden üç adedi alt ve yan yüzeyleri bir kat boyuna ve bir kat enine karbon kumaş ile sarılarak (CFRP11) güçlendirilmiş ve dört nokta eğilme deneyi ile test edilmiştir (şekil 5.5). CFRP11 kirişi göçme yükü oluşuncaya kadar yüklenmiş ve yük-sehim değerleri bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Kirişler nihai dayanıma erişince 1. veya 3. bölgeden kesme kırılması ile göçmüştür (şekil 5.6). Üç adet kiriş numunesinin ikisinde göçme ani olmuştur. Birinde ise kiriş yine kesme kırılması ile göçmüş ancak yük değeri 100 kN'a kadar düştükten sonra kiriş yük taşımaya devam etmiştir (şekil 5.7).



şekil 5.4. Yükleme öncesi CFRP11 kirişi



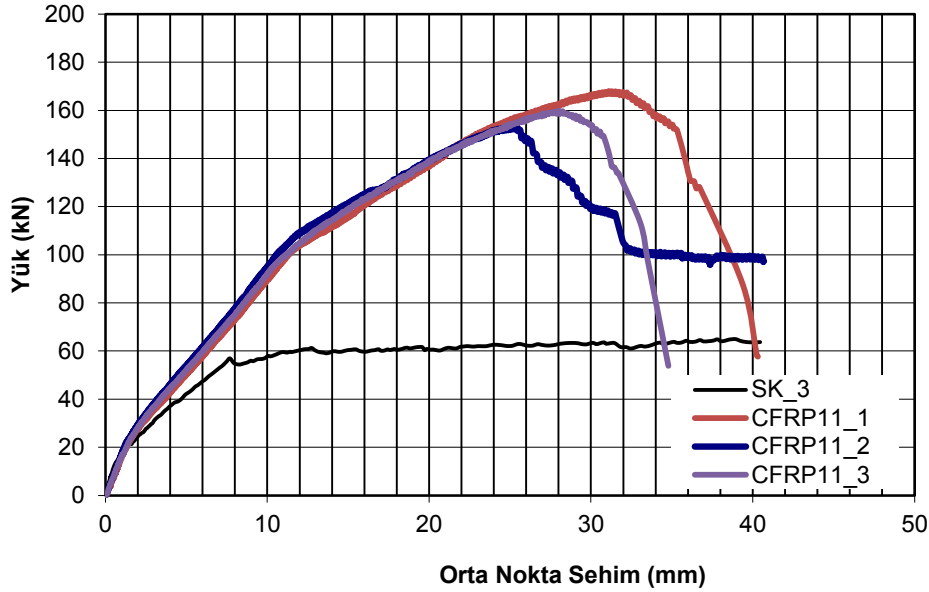
Şekil 5.5. Yükleme sonrası kiriş deformasyonları

Bilgisayar ortamına aktarılan deney sonuçları değerlendirilerek kirişlere ait yük-sehim grafikleri çizilmiş (Şekil 5.6) ve ortalama yük-sehim değerleri bulunmuştur (Tablo 5.5). CFRP11 kirişlerinde ortalama yük 24.99 kN'a ulaştığında kiriş ortasında ortalama 1.70 mm sehim oluşmuş kiriş alt 2. bölgesinde ilk eğilme çatlakları oluşmaya başlamış yük ve sehim artmaya devam etmiştir. Akma başlangıcı ortalama 106.02 kN'na ulaştığında meydana gelmiş ve sehim 11.73 mm olarak ölçülmüştür. Ortalama yük 160.56 kN'na çıktığında kiriş numune ortalama 28.27 mm sehim yapmış ve kiriş taşıma gücünü kaybetmeye başlamıştır (Tablo 5.5).

Tablo 5.5. CFRP11 kirişlerine ait yük ve sehim değerleri

Numune	İlk çatlak		Akma başlangıcı		Kırılma	
	Yük	Sehim	Yük	Sehim	Yük	Sehim
	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)	(kN)	(mm)
1	28.14	2.04	104.07	12.03	168.01	31.12
2	22.49	1.36	107.3	11.64	153.36	25.43
3	24.33	1.69	106.69	11.53	160.3	28.27
Ortalama	24.99	1.70	106.02	11.73	160.56	28.27

CFRP11 kirişlerinin, şahit kirişlerine kıyasla yük taşıma kapasitelerinde önemli artışlar olmuştur. CFRP11 kirişinin ilk çatlak yükü ortalama %75.9, yüke karşılık gelen sehim ise %92.8 artmıştır. Akma yükü %84.6 artmış akma yüküne karşılık gelen sehim ise %41.1 artmıştır. CFRP11 kirişi Maksimum yükü %155.9 artmış ancak maksimum yüke karşılık gelen sehim %16 daha düşük çıkmıştır (Şekil 5.7).



Şekil 5.6. CFRP11 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri

5.2.2.1. CFRP11 kirişlerinin süneklik oranları

CFRP11 kirişlerinin süneklik düzeyleri akma anındaki şekil değiştirmenin kopma anındaki şekil değiştirmeye oranı ile hesaplanmıştır. CFRP11 kirişinin ortalama süneklik oranı 2.73 olarak bulunmuştur (Tablo 5.6). Kirişinin yük taşıma kapasiteleri artmasına rağmen süneklik düzeylerinde azalma meydana gelmiştir (Şekil 5.7). CFRP11 kirişi şahit kirişe göre %43.2 oranında sünekliğini kaybettiği tespit edilmiştir.

Tablo 5.6. CFRP11 kirişlerin süneklik oranları

Numune	Akma anındaki şekil değiştirme Δy (mm)	Kopma anındaki şekil değiştirme Δu (mm)	Süneklik $\mu\Delta = \Delta u / \Delta y$
1	12.03	35.88	2.98
2	11.64	28.60	2.46
3	11.53	31.44	2.73
Ortalama	11.73	31.97	2.73

5.2.2.2. CFRP11 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri

CFRP11 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri maksimum eğilme kuvvetinin % 85'ine denk gelen orta nokta sehim değerleri ve akma anındaki sehim dikkate alınarak yük- sehim eğrisinin altında kalan alan hesaplanarak bulunmuştur. CFRP11 kirişi ortalama 3229.51 Joule enerji yutulmuş (Tablo 5.7). CFRP11 kirişinin enerji yutma kapasitesi ortalama %50.5 oranına daha yüksek çıkmıştır. CFRP11 kirişinin süneklik oranında azalma meydana gelmiş olsa da, yük taşıma kapasitesi ve enerji yutma kapasitesi artmıştır.

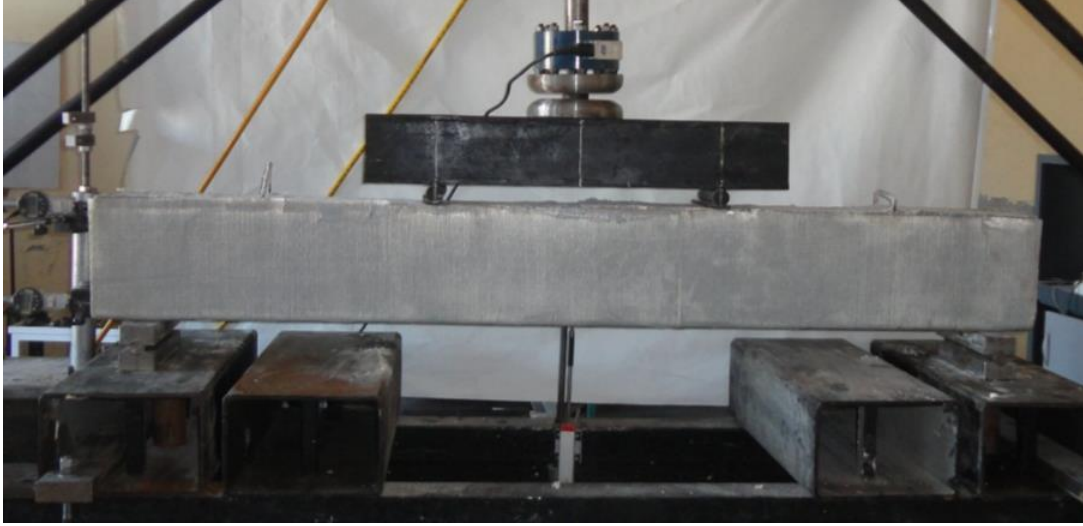
Tablo 5.7. CFRP11kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri

Numune	Yutulan enerji Joule-(kN.mm)
1	4140.84
2	2774.16
3	2773.53
Ortalama	3229.51

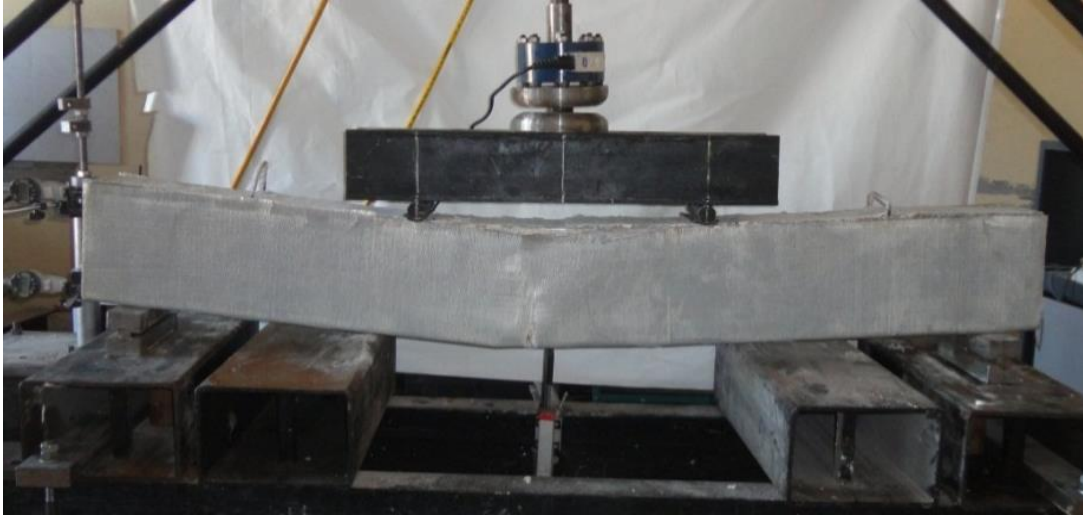
5.2.3. GFRP11 kirişi eğilme deneyi

Kiriş alt ve yan yüzeyleri bir kat boyuna ve bir kat enine cam kumaş ile sarılan üç adet betonarme kiriş (GFRP11) dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 5.8). GFRP11 kirişi göçme yükü oluşuncaya kadar yüklenmiş ve yük-sehim değerleri bilgisayar ortamında değerlendirilmiştir. Kiriş numunesi nihai dayanımına yaklaşıncaya

kiriş 2. bölgesinde (eğilme bölgesi) boyuna lifler kopmaya başlamış ve kiriş eğilme bölgesinden kırılmıştır (Şekil 5.9). GFRP11 kirişi taşıma gücü şahit kirişin taşıma gücü seviyesine kadar düşmüş yükleme devam ettiğinde yük değerleri 60-70 kN arasında kalarak sehim artmaya devam etmiştir (Şekil 5.10).



Şekil 5.7. Yükleme öncesi GFRP11 kirişi



Şekil 5.8. Yükleme sonrası GFRP11 kirişi deformasyonu

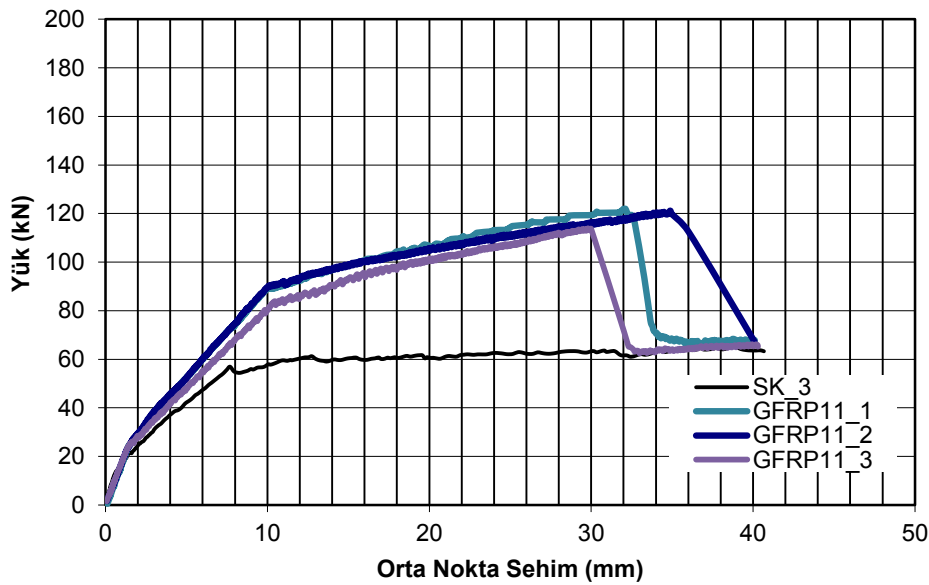
GFRP11 kirişlerinin deney sonuçları değerlendirilerek kirişlere ait yük-sehim grafikleri çizilmiş (Şekil 5.7) ve ortalama yük-sehim bulunmuştur (Tablo 5.5). GFRP11 kirişlerinde ortalama yük 24.86 kN'a geldiğinde kiriş ortasında ortalama 1.48 mm sehim oluşmuş kiriş alt 2. bölgesinde ilk eğilme çatlakları oluşmaya

başlamış yük ve sehim artışları devam etmiştir (Şekil 5.10). Ortalama yük 87.24 kN'na ulaştığında ortalama 10.20 mm sehim ile yük artışı ile birlikte sehim artmaya devam etmiştir. Ortalama yük 119.00 kN'na çıktığında kiriş numune ortalama 32.26 mm sehim yapmıştır (Tablo 5.8).

Tablo 5.8. GFRP11 kirişlerine ait yük ve sehim değerleri

Numune	İlk Çatlak		Akma Başlangıcı		Kırılma	
	Yük (kN)	Sehim (mm)	Yük (kN)	Sehim (mm)	Yük (kN)	Sehim (mm)
1	25.03	1.49	89.37	9.99	121.95	32.12
2	24.58	1.47	90.48	10.47	121.17	34.87
3	24.96	1.47	81.88	10.14	113.89	29.79
Ortalama	24.86	1.48	87.24	10.20	119.00	32.26

GFRP11 kirişlerin yük taşıma kapasitelerinde şahit kirişlere göre iyileşme olmuştur. GFRP11 kirişi şahit kiriş ile karşılaştırıldığında ilk çatlak yükü ortalama %75.0 artmış, yüke karşılık gelen sehim ise %67.8 artmıştır. Akma yükü %51.9 artmış akma yüküne karşılık gelen sehim ise %22.7 artmıştır. Maksimum yük %89.7 artmış ancak maksimum yüke karşılık gelen sehim %4.1 daha düşük çıkmıştır (Şekil 5.10).



Şekil 5.9. GFRP11 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri

5.2.3.1. GFRP11 kirişlerinin süneklik oranları

GFRP11 kirişlerinin süneklik düzeyleri akma anındaki şekil değiştirmenin kopma anındaki şekil değiştirmeye oranı ile hesaplanmıştır. GFRP11 kirişlerinin ortalama süneklik oranı 3.25 olarak bulunmuştur (Tablo 5.9). GFRP11 kirişlerinin yük taşıma kapasiteleri artmasına rağmen süneklik düzeylerinde şahit kirişe göre %32.4 oranında azalma meydana gelmiştir.

Tablo 5.9. GFRP11 kirişlerin süneklik oranları

Numune	Akma anındaki şekil değiştirme Δy (mm)	Kopma anındaki şekil değiştirme Δu (mm)	Süneklik $\mu\Delta = \Delta u / \Delta y$
1	9.99	32.68	3.27
2	10.47	36	3.44
3	10.14	30.8	3.04
Ortalama	10.20	33.16	3.25

5.2.3.2. GFRP11 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri

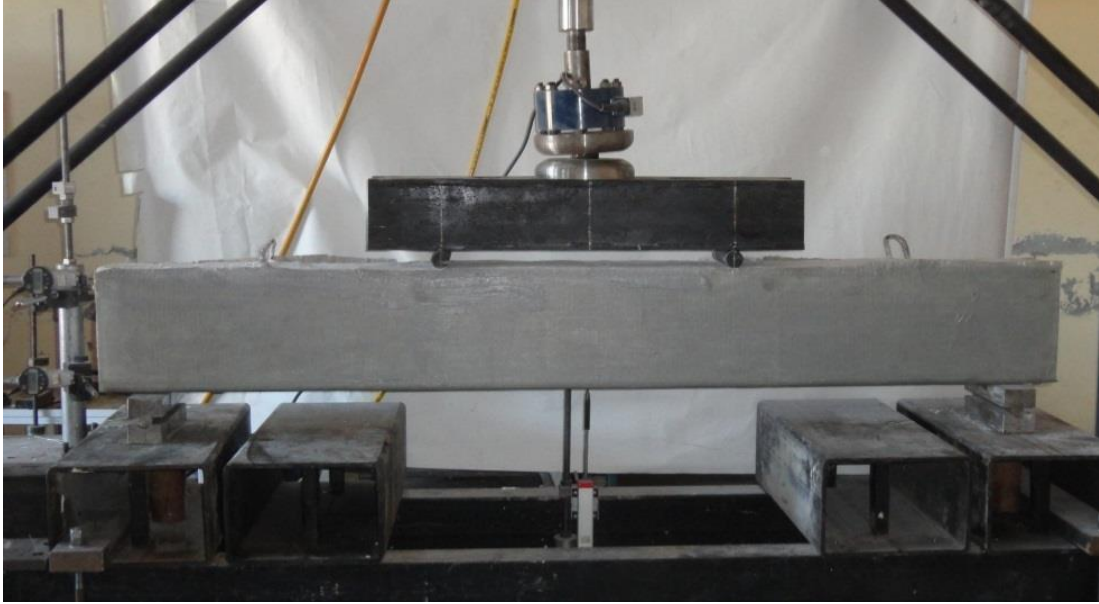
GFRP11 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri maksimum eğilme kuvvetinin % 85'ine denk gelen orta nokta sehimi değerleri ve akma anındaki sehimi dikkate alınarak yük- sehimi eğrisinin altında kalan alan hesaplanarak bulunmuştur. GFRP11 kirişleri ortalama 3032.54 Joule enerji yutmuştur. GFRP11 şeklindeki güçlendirme kirişlerin enerji yutma kapasitesinde %41.4 oranında artış sağlamıştır.

Tablo 5.10. GFRP11kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri

Numune	Yutulan enerji Joule (kN.mm)
1	2953.36
2	3678.60
3	2465.67
Ortalama	3032.54

5.2.4. GFRP21 kirişi eğilme deneyi

Bir kat enine ve bir kat boyuna cam kumaş ile sarılarak g¼çlendirilen kirişler (GFRP11) eğilme kırılması ile kırılmıştır. Kirişin eğilme dayanımını iyileştirmek için Üç adet betonarme kiriş alt ve yan y¼zeylerine iki kat boyuna ve bir kat enine cam kumaş sarılarak g¼çlendirilmiş (GFRP21) ve d¼rt nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur (şekil 5.11). GFRP21 kiriş numunesi nihai dayanımına yaklaşınca kiriş basınç b¼lgesinde betonda ezilmeler oluşmaya başlamış ve kirişte kesme kırılması ile g¼çme meydana gelmiştir (şekil 5.12). Deney sonlandırıldıktan sonra kiriş yan y¼zeyinden GFRP kompozit s¼k¼lm¼ř ve kirişte g¼zle g¼r¼l¼r eğilme ve kesme çatlaklarının oluştuğu tespit edilmiştir (şekil 5.13).



şekil 5.10. Y¼kleme ¼ncesi GFRP21 kirişi



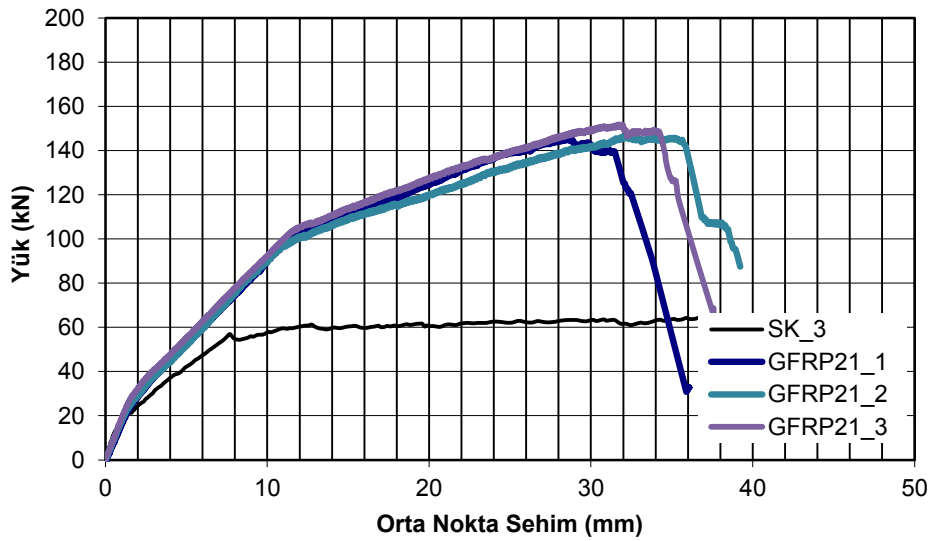
Şekil 5.11. Yükleme sonrası GFRP21 kirişi deformasyonları

GFRP21 kirişlerinin deney sonuçları incelenerek kirişlere ait yük-sehim grafikleri çizilmiş (Şekil 5.13) ve ortalama yük-sehim değerleri bulunmuştur (Tablo 5.5). Ortalama yük 24.24 kN'a geldiğinde kiriş ortasında ortalama 1.42 mm sehim oluşmuş kiriş alt 2. bölgesinde ilk eğilme çatlakları olmuştur. Ortalama yük 102.73 kN'na çıktığında ortalama 12.06 mm sehim oluşmuş, yük artışı ile birlikte sehim de artmaya devam etmiştir (Şekil 5.13). GFRP21 kiriş numunesi maksimum 148.12 kN yük taşımış bu yüke karşılık gelen sehim ise 30.92 mm olarak ölçülmüştür (Tablo 5.11).

Tablo 5.11. GFRP21 kirişine ait yük ve sehim değerleri

Numune	İlk çatlak		Akma başlangıcı		Kırılma	
	Yük (kN)	Sehim (mm)	Yük (kN)	Sehim (mm)	Yük (kN)	Sehim (mm)
1	23.69	1.51	100.64	11.59	145.62	28.57
2	23.38	1.38	100.53	11.91	146.89	32.25
3	25.65	1.37	107.02	12.69	151.85	31.94
Ortalama	24.24	1.42	102.73	12.06	148.12	30.92

Şahit kirişlerine kıyasla GFRP21 kirişlerinin yük taşıma kapasitelerinde önemli artışlar olmuştur. GFRP21 kirişinin ilk çatlak yükü ortalama %70.7, yüke karşılık gelen sehim ise %61.4 atmıştır. Akma yükü %78.9 artış olmuş akma yüküne karşılık gelen sehim ise %45.1 artmıştır. GFRP21 kirişinin nihai yük taşıma kapasitesi %136.1 artmış ancak maksimum yüke karşılık gelen sehim kısmen %8.1 daha düşük çıkmıştır (Şekil 5.13).



Şekil 5.12. GFRP21 kirişine ait yük-sehim grafikleri

5.2.4.1. GFRP21 kirişlerinin süneklik oranları

GFRP21 kirişlerinin süneklik düzeyleri akma anındaki şekil değiştirmenin kopma anındaki şekil değiştirmeye oranı ile hesaplanmıştır. Kirişlerin ortalama süneklik oranı 2.84 olarak bulunmuştur (Tablo 5.12). Kirişinin yük taşıma kapasiteleri artmasına rağmen süneklik düzeylerinde %41 oranında azalma meydana gelmiştir (Şekil 5.13).

Tablo 5.12. CFRP21 kirişlerin süneklik oranları

Numune	Akma anındaki şekil değiştirme Δy (mm)	Kopma anındaki şekil değiştirme Δu (mm)	Süneklik $\mu\Delta = \Delta u / \Delta y$
1	11.59	32.13	2.77
2	11.91	35.87	3.01
3	12.69	34.71	2.74
Ortalama	12.06	34.24	2.84

5.2.4.2. GFRP21 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri

GFRP21 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri maksimum eğilme kuvvetinin % 85'ine denk gelen orta nokta sehim değerleri ve akma anındaki sehim dikkate alınarak yük- sehim eğrisinin altında kalan alan hesaplanarak bulunmuştur. GFRP21 kirişleri ortalama 3598.14 Joule enerji yutmuştur (Tablo 5.13). GFRP21 kirişinin şahit kirişe göre enerji yutma kapasitesi %67.7 artmıştır.

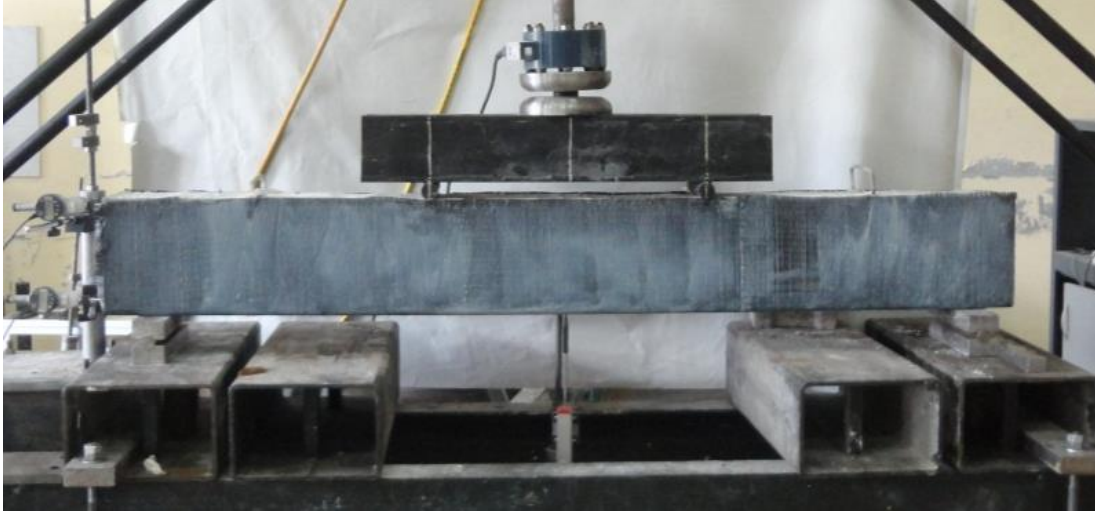
Tablo 5.13. GFRP21kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri

Numune	Yutulan enerji Joule (kN.mm)
1	3273.93
2	3759.83
3	3760.65
Ortalama	3598.14

5.2.5. CFRP22 kirişi eğilme deneyi

GFRP ile yapılan güçlendirmelerle kıyaslayabilmek ve karbon kumaş sargı miktarının yük taşıma kapasitelerine etkileri araştırmak ve için iki adet kiriş alt ve yan yüzeyleri iki kat boyuna ve iki kat enine karbon kumaş ile sarılarak güçlendirilerek (CFRP22) test edilmiştir (Şekil 5.14). Kiriş numunesi nihai dayanımına erişince kirişte kesme kırılması ile ani olarak göçme meydana gelmiştir

(Şekil 5.15). CFRP11 kirişine göre çok gevrek bir kırılma meydana gelmiştir (Şekil 5.16). Kırılma kırılması ile birlikte kırılma bölgesinde beton parçalanmıştır kırılma sonrası CFRP22 kirişleri yük taşımamıştır.



Şekil 5.13. Yükleme öncesi CFRP22 kirişi



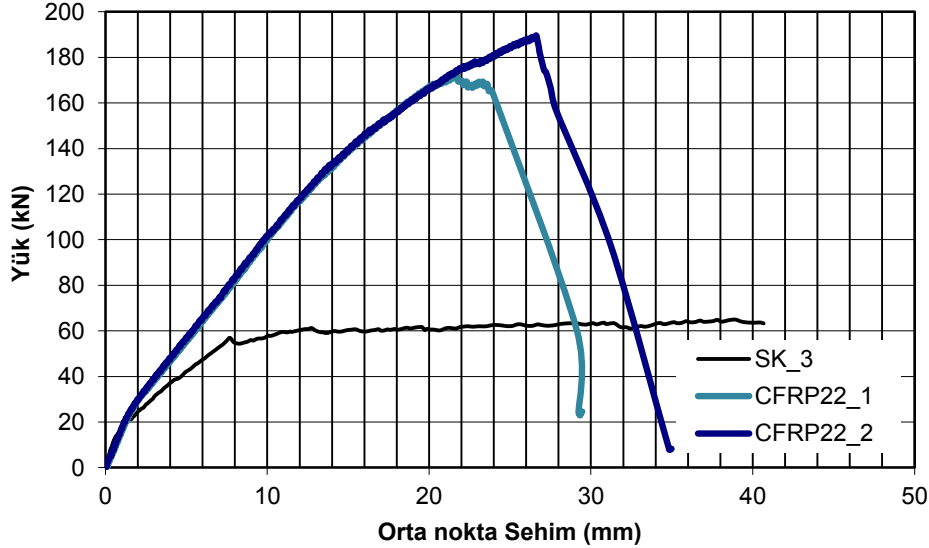
Şekil 5.14. Yükleme sonrası CFRP22 kirişi deformasyonu

Eğilme deney sonuçları incelendiğinde; kiriş alt 2. Bölgesinde ilk eğilme çatlakları ortalama yük 23.02 kN yük ve kiriş ortasında 1.42 mm sehimde meydana gelmiştir. Ortalama yük 130.33 kN'na çıktığında ortalama 13.80 mm sehim ile yük artışı ile birlikte sehim artmaya devam etmiştir. CFRP22 kiriş numunelerinde maksimum yük ortalama 180.73 kN, bu yüke karşılık sehim 24.04 mm sehim olarak çıkmıştır (Tablo 5.14). CFRP 22 kirişi Şekil 5.16'da da görüldüğü gibi maksimum dayanıma çıktıktan sonra çok gevrek bir kırılma ile göçmüştür.

Tablo 5.14. CFRP22 kirişlerine ait yük ve sehim değerleri

Numune	İlk çatlak		Akma başlangıcı		Kırılma	
	Yük (kN)	Sehim (mm)	Yük (kN)	Sehim (mm)	Yük (kN)	Sehim (mm)
1	22.23	1.39	130.52	13.87	171.81	21.46
2	23.8	1.44	130.13	13.73	189.65	26.61
Ortalama	23.02	1.42	130.33	13.80	180.73	24.04

Şahit kirişlerine kıyasla CFRP22 kirişlerinin yük taşıma kapasitelerinde önemli ölçüde artmıştır. CFRP22 kirişi şahit kiriş ile karşılaştırıldığında ilk çatlak yükü ortalama %62.0, yüke karşılık gelen sehim ise %60.8 artmıştır. Akma yükü %126.9, akma yüküne karşılık gelen sehim ise %66.0 artmıştır. CFRP22 kirişi maksimum yükü %188.1 artmış ancak maksimum yüke karşılık gelen sehim %28.6 daha düşük çıkmıştır (Şekil 5.16).



Şekil 5.15. CFRP22 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri

5.2.5.1. CFRP22 kirişlerinin süneklik oranları

CFRP22 kirişlerinin süneklik düzeyleri akma anındaki şekil değiştirmenin kopma anındaki şekil değiştirmeye oranı ile hesaplanmıştır. Kirişlerin ortalama süneklik

oranı 1.86 olarak bulunmuştur (Tablo 5.15). Kirişinin yük taşıma kapasiteleri artmasına rağmen %61.3 oranla sünekliğinin yarısından fazlasını kaybetmiştir (Şekil 5.16).

Tablo 5.15. CFRP2 kirişlerin süneklik oranları

Numune	Akma anındaki şekil değiştirme Δy (mm)	Kopma anındaki şekil değiştirme Δu (mm)	Süneklik $\mu\Delta = \Delta u / \Delta y$
1	13.87	23.89	1.72
2	13.73	27.52	2.00
Ortalama	13.80	25.71	1.86

5.2.3.1. CFRP22 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri

CFRP22 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri maksimum eğilme kuvvetinin % 85'ine denk gelen orta nokta sehim değerleri ve akma anındaki sehim dikkate alınarak yük- sehim eğrisinin altında kalan alan hesaplanarak bulunmuştur. CFRP22 kirişleri ortalama 2923.33 Joule enerji yutmuştur (Tablo 5.16). Şahit kirişlere göre CFRP22 kirişlerinin enerji yutma kapasitesi %36.3 oranında artmıştır.

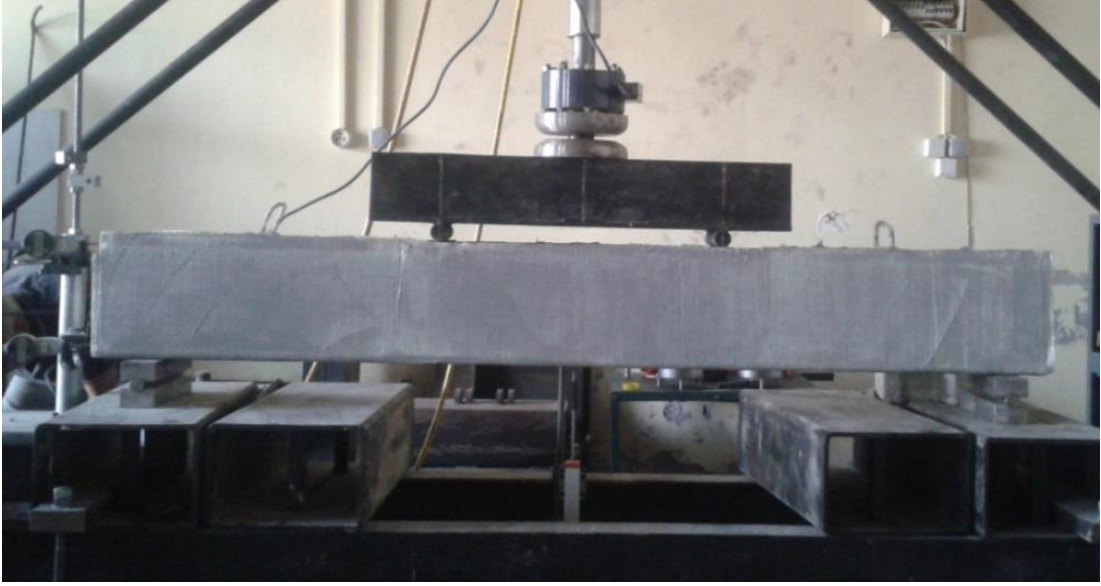
Tablo 5.16. CFRP22 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri

Numune	Yutulan enerji Joule (kN.mm)
1	2570.88
2	3275.78
Ortalama	2923.33

5.2.6. GFRP22 kirişi eğilme deneyi

GFRP21 kirişinin kesme kırılması ile göçmesi neticesinde GFRP ile güçlendirmede kesme yükü taşıma kapasitesini artırmak için iki adet betonarme kiriş alt ve yan yüzeylerine iki kat boyuna ve iki kat enine cam kumaş sarılarak güçlendirilmiş ve

dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 5.17). Kiriş numunesi nihai dayanımına erişinceye kadar yük-sehim davranışı benzer çıkmış ve kirişte kesme kırılması ile ani olarak göçme meydana gelmiştir (Şekil 5.18). GFRP22 kirişleri kesme kırılmasından sonra taşıma kapasitesi düşse de yük taşımaya devam etmiştir (Şekil 5.19). Deney sonrası kiriş numune incelendiğinde beton yüzeyine sarılan cam kumaş beton yüzeyinden sıyrılmadığı ve beton tabakasını kopardığı gözlenmiştir.



Şekil 5.16. Yükleme öncesi GFRP22 kirişi



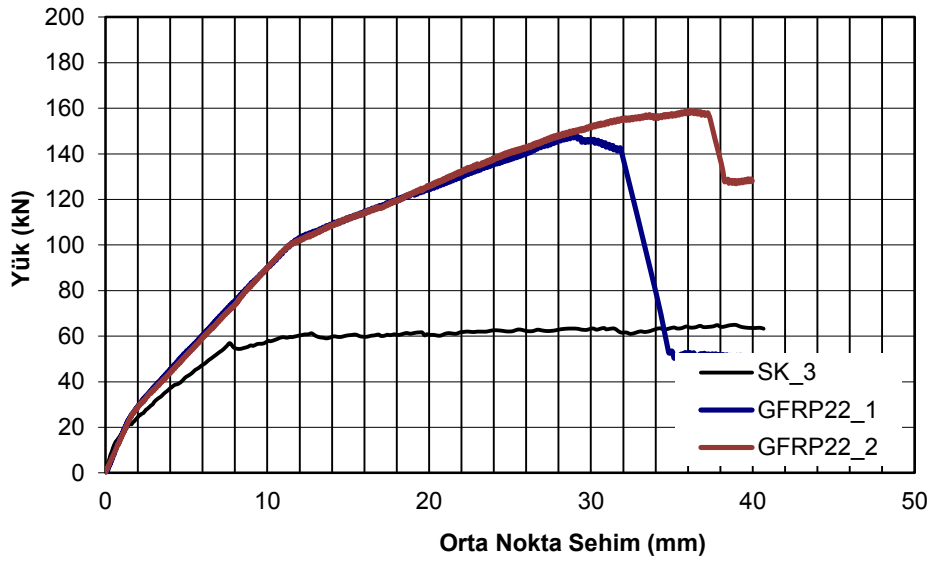
Şekil 5.17. Yükleme sonrası GFRP22 kirişi deformasyonlar

GFRP22 kirişlerinin sonuçlarına göre, Ortalama yük 23.14 kN'a çıktığında kiriş ortasında ortalama 1.43 mm sehim oluşmuş kiriş alt 2. bölgesinde ilk eğilme çatlakları oluşmuştur. Ortalama yük 101.91 kN'na ulaştığında kiriş ortasında ortalama 11.48 mm sehim oluşmuştur. Kiriş Ortalama maksimum 153.71 kN yük taşımış bu yüke karşılık ortalama 32.58 mm sehim oluşmuştur (Tablo 5.17). CFRP22 ile güçlendirmelerden farklı olarak, kesme kırılması olduktan sonra da kiriş yük taşımaya devam etmiştir.

Tablo 5.17. GFRP22 kirişlerine ait yük ve sehim değerleri

Numune	İlk çatlak		Akma başlangıcı		Kırılma	
	Yük (kN)	Sehim (mm)	Yük (kN)	Sehim (mm)	Yük (kN)	Sehim (mm)
1	23.12	1.40	102.30	11.52	148.40	29.10
2	23.16	1.46	101.51	11.44	159.02	36.06
Ortalama	23.14	1.43	101.91	11.48	153.71	32.58

Şahit kirişlerine kıyasla GFRP22 kirişlerinin yük taşıma kapasitelerinde önemli artışlar olmuştur. GFRP22 kirişi şahit kiriş ile karşılaştırıldığında ilk çatlak yükü ortalama %62.9 artmış, yüke karşılık gelen sehim ise %62.5 atmıştır. Akma yükü %76.4 artmış akma yüküne karşılık gelen sehim ise %38.1 artmıştır. Maksimum yük %145.0 artmış ancak maksimum yüke karşılık gelen sehim %3.2 daha düşük çıkmıştır (Şekil 5.19).



Şekil 5.18. GFRP22 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri

5.2.6.1. GFRP22 kirişlerinin süneklik oranları

GFRP22 kirişlerinin süneklik düzeyleri akma anındaki şekil değiştirmenin kopma anındaki şekil değiştirmeye oranı ile hesaplanmıştır. Kirişlerin ortalama süneklik oranı 3.07 olarak bulunmuştur (Tablo 5.18). Kirişinin yük taşıma kapasiteleri artmasına rağmen süneklik düzeylerinde % 36.2 oranında azalma meydana gelmiştir (Şekil 5.19).

Tablo 5.18. GFRP22 kirişlerin süneklik oranları

Numune	Akma anındaki şekil değiştirme Δy (mm)	Kopma anındaki şekil değiştirme Δu (mm)	Süneklik $\mu\Delta = \Delta u / \Delta y$
1	11.52	32.44	2.82
2	11.44	38.05	3.33
Ortalama	11.48	35.25	3.07

5.2.6.2. GFRP22 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri

GFRP22 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri maksimum eğilme kuvvetinin % 85'ine denk gelen orta nokta sehim değerleri ve akma anındaki sehim dikkate

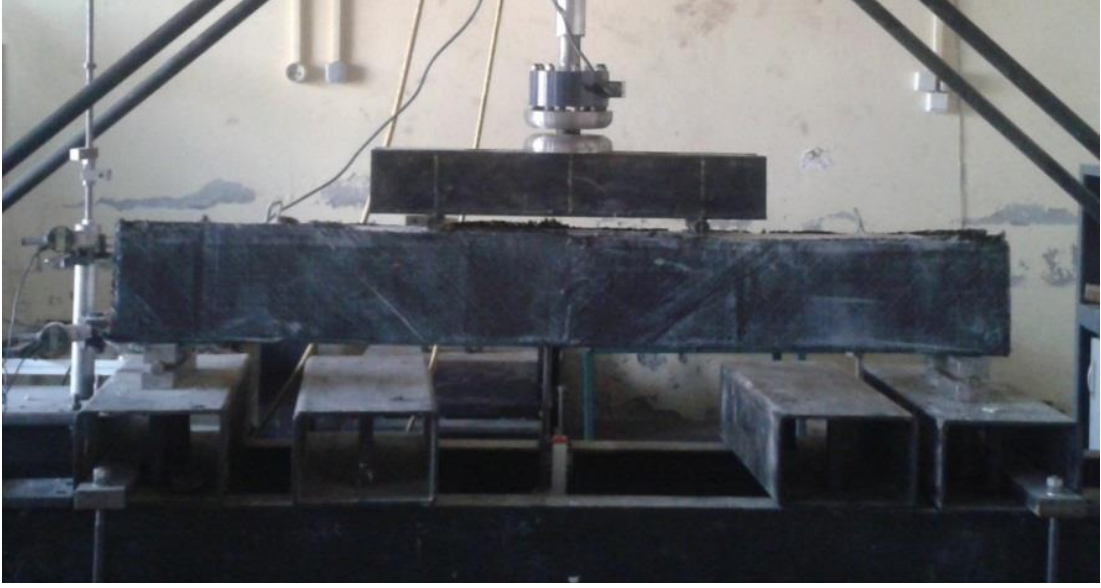
alınarak yük- sehim eğrisinin altında kalan alan hesaplanarak bulunmuştur. GFRP22 kirişleri ortalama 3804.19 Joule enerji yutmuştur (Tablo 5.19). Şahit kirişlere kıyasla enerji yutma kapasitesi %77.3 oranında artmıştır.

Tablo 5.19. GFRP22kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri

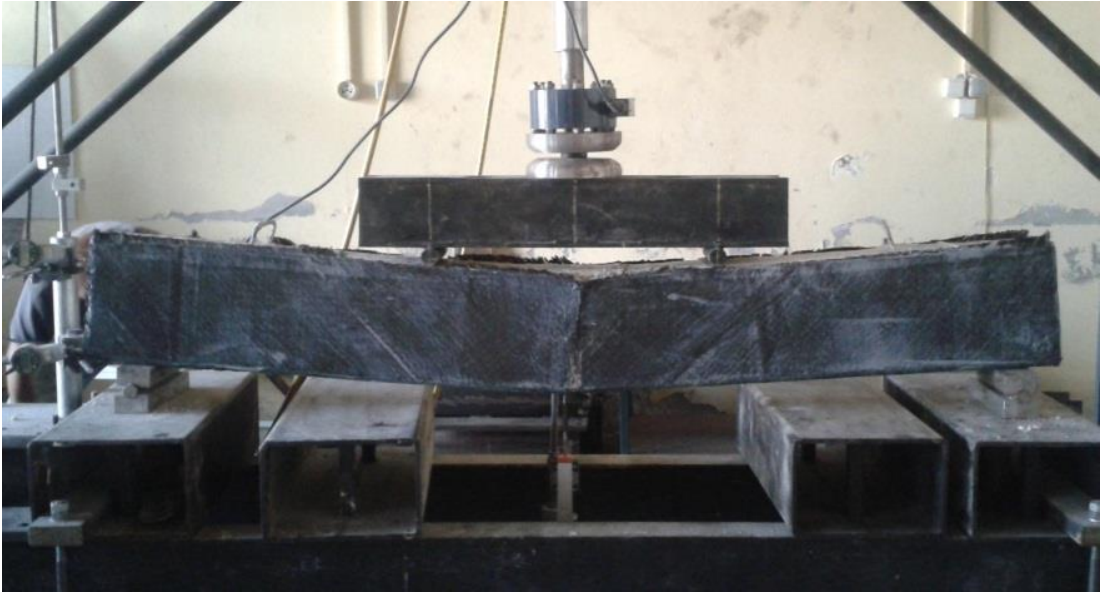
Numune	Yutulan enerji Joule - (kN.mm)
1	3347.57
2	4260.80
Ortalama	3804.19

5.2.7. CFRP21-1 kirişi eğilme deneyi

CFRP22 kirişlerinin kesme kırılması ile göçmesi sonucunda kesme kırılmasına dik gelecek şekilde açılı sargı etkileri araştırılmıştır. İki adet betonarme kiriş alt ve yan yüzeyleri iki kat boyuna ve bir kat enine 90° ve bir kat enine 45° karbon kumaş ile sarılarak (CFRP21-1) güçlendirilmiştir. Dört nokta eğilme deneyi ile test edilmiştir (Şekil 5.20). CFRP21-1 Kiriş numunelerinden birinde eğilme kırılması diğerinde ise kesme kırılması ile deney sonlandırılmıştır. Eğilme kırılması neticesinde kiriş yük taşımaya devam etmiştir (Şekil 5.21). Alt ve yan yüzeylerdeki elyaf tamamen koptuktan sonra yükleme sonlandırılmıştır. İkinci kiriş kesme kırılması ile taşıma gücünü önemli ölçüde kaybetmiştir (Şekil 5.22).



Şekil 5.19. Yükleme öncesi CFRP21-1 kirişi



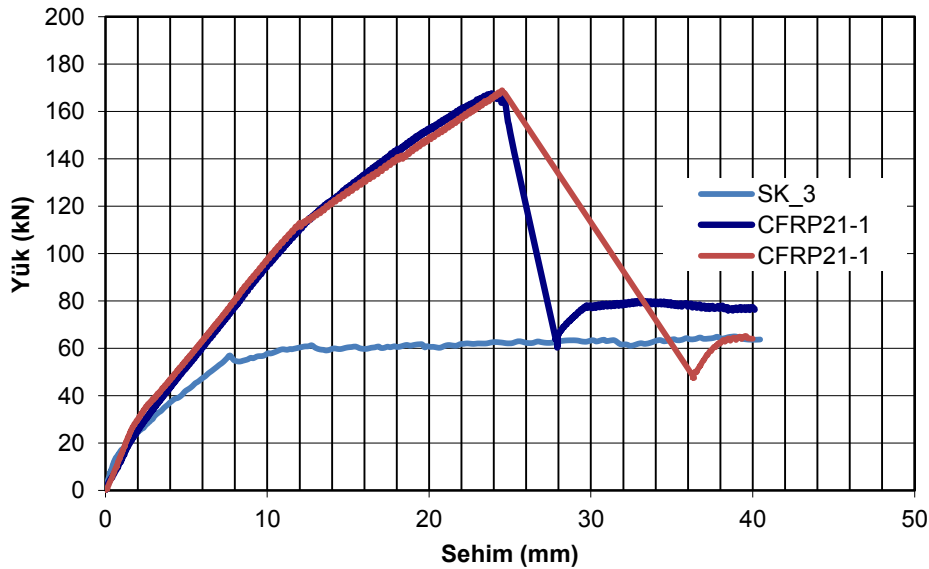
Şekil 5.20. Yükleme sonrası CFRP21-1 kirişi deformasyonlar

CFRP21-1 kirişinin yük taşıma kapasitesinde önemli artışlar olmuştur (Şekil 5.22). CFRP21-1 kirişinde Ortalama 26.60 kN yüke karşılık kiriş ortasında ortalama 1.88 mm sehim oluşmuş kirişin alt 2. bölgesinde ilk eğilme oluşmuştur. Ortalama yük 111.31 kN olduğunda kiriş ortasında ortalama 11.98 mm sehim oluşmuş yük arttıkça sehim de artmaya devam etmiştir. CFRP21-1 kirişlerinin ortalama maksimum 168.32 kN yük taşımış ve bu yüke karşılık sehim değeri ortalama 24.19 mm olarak ölçülmüştür (Tablo 5.20).

Tablo 5.20. CFRP21-1 kirişlerine ait yük ve sehim değerleri

Numune	İlk çatlak		Akma başlangıcı		Kırılma	
	Yük (kN)	Sehim (mm)	Yük (kN)	Sehim (mm)	Yük (kN)	Sehim (mm)
1	28.12	1.80	109.60	11.58	168.97	24.51
2	25.07	1.95	113.02	12.38	167.66	23.87
Ortalama	26.60	1.88	111.31	11.98	168.32	24.19

CFRP21-1 kirişi şahit kiriş ile karşılaştırıldığında ilk çatlak yükü ortalama %87.2 artmış, yüke karşılık gelen sehim ise %113.1 atmıştır. Akma yükü %93.8 artmış akma yüküne karşılık gelen sehim ise %44.1 artmıştır. CFRP21-1 kirişi Maksimum yükü %168.3 artmış ancak maksimum yüke karşılık gelen sehim %28.1 daha düşük çıkmıştır (Tablo 5.32).



Şekil 5.21. CFRP21-1 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri

5.2.7.1. CFRP21-1 kirişlerinin süneklik oranları

CFRP21-1 kirişlerinin süneklik düzeyleri akma anındaki şekil değiştirmenin kopma anındaki şekil değiştirmeye oranı ile hesaplanmıştır. Kirişlerin ortalama süneklik

oranı 2.09 olarak bulunmuştur (Tablo 5.21). Kirişinin yük taşıma kapasiteleri artmasına rağmen süneklik düzeylerinde bir azalma meydana gelmiştir (Şekil 5.22).

Tablo 5.21. CFRP21-1 kirişlerin süneklik oranları

Numune	Akma anındaki şekil değişirme Δy (mm)	Kopma anındaki şekil değişirme Δu (mm)	Süneklik $\mu\Delta = \Delta u / \Delta y$
1	11.58	25.27	2.18
2	12.38	24.68	1.99
Ortalama	11.98	24.98	2.09

5.2.7.2. CFRP21-1 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri

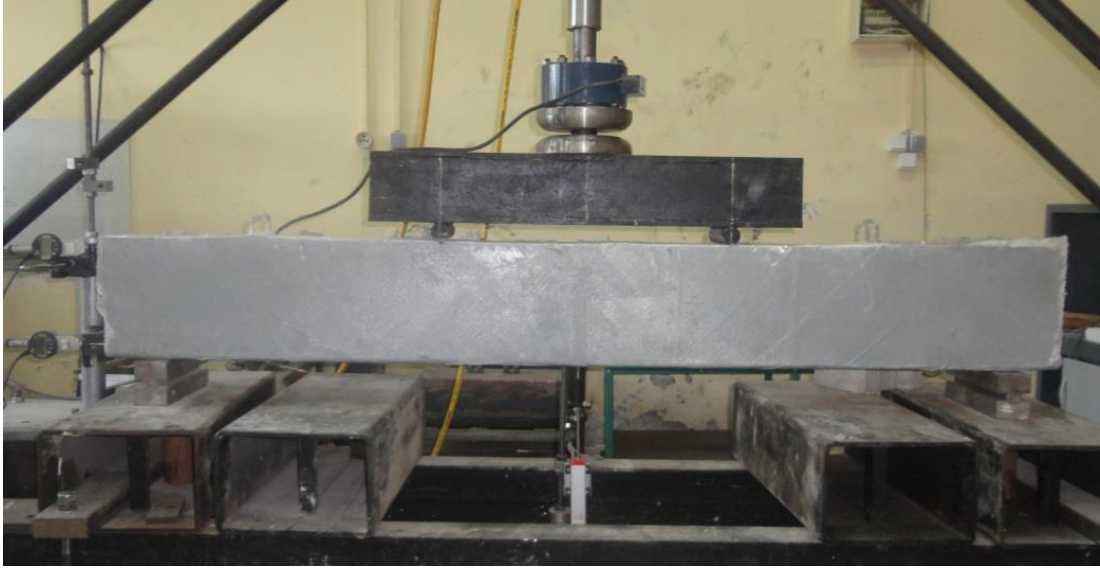
CFRP21-1 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri maksimum eğilme kuvvetinin % 85'ine denk gelen orta nokta sehim değerleri ve akma anındaki sehim dikkate alınarak yük- sehim eğrisinin altında kalan alan hesaplanarak bulunmuştur. Şahit kirişler ortalama 2579.96 Joule enerji yutmuştur (Tablo 5.22).

Tablo 5.22. CFRP21-1 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri

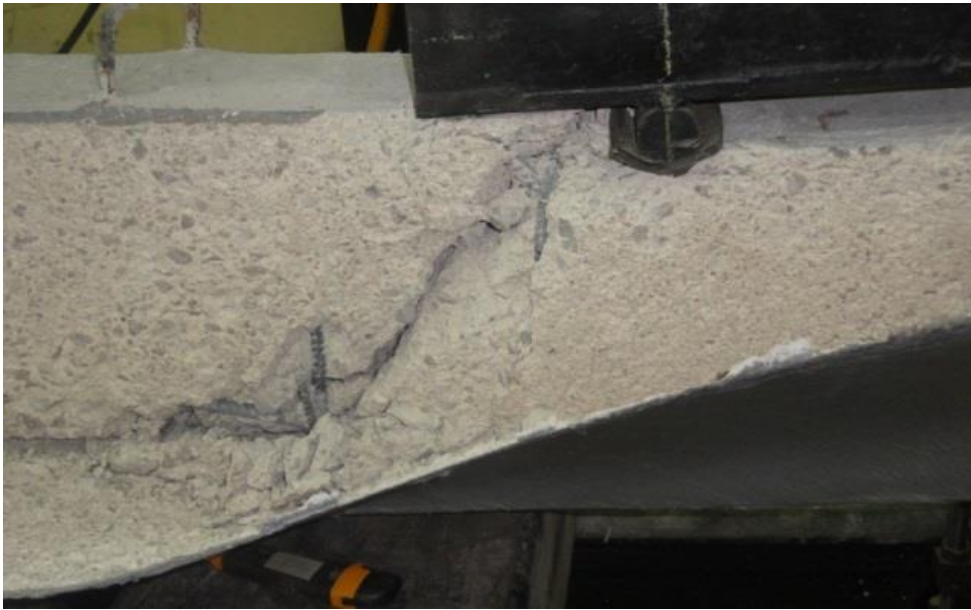
Numune	Yutulmuş enerji Joule-(kN.mm)
1	2538.55
2	2621.38
Ortalama	2579.96

5.2.8. GFRP21-1 kirişi eğilme deneyi

GFRP22 kirişinin kesme kırılması ile göçmesi dikkate alınmış ve açılı sarma ile kiriş taşıma kapasitesini artırmak hedeflenmiştir. Bu amaçla iki adet betonarme kiriş alt ve yan yüzeyleri iki kat boyuna ve bir kat enine 90° ve bir kat enine 45° cam kumaş ile sarılarak güçlendirilmiş ve dört nokta eğilme deneyi ile test edilmiştir (Şekil 5.23). GFRP21-1 kiriş numuneleri nihai dayanıma ulaşınca kesme kırılması oluşmuştur ve deney sonlandırılmıştır (Şekil 5.24).



Şekil 5.22. Yükleme öncesi GFRP21-1 kirişi



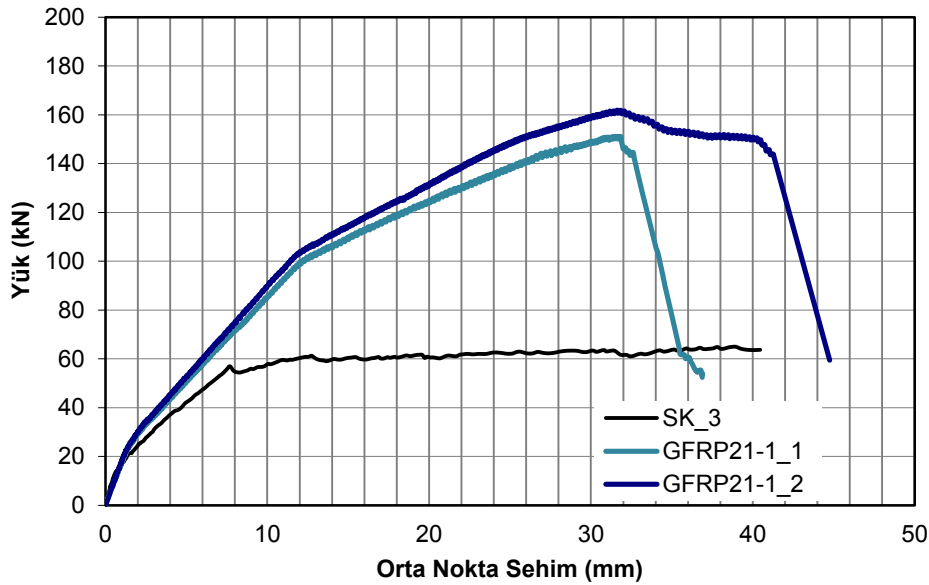
Şekil 5.23. Yükleme sonrası GFRP21-1 kirişi deformasyonlar

GFRP21-1 kirişlerinde ortalama yük 23.94 kN'a geldiğinde kiriş ortasında ortalama 1.43 mm sehim oluşmuş kiriş alt 2. bölgesinde ilk eğilme çatlakları oluşmaya başlamış yük ve sehim artışları devam etmiştir (Şekil 5.25). Ortalama yük 102.65 kN'na ulaştığında ortalama 12.30 mm sehim ile yük artışı ile birlikte sehim artmaya devam etmiştir. GFRP21-1 kirişlerinin ortalama 156.55 kN yük taşımış ve bu yüke karşılık sehim değeri ortalama 31.65 mm olarak ölçülmüştür (Tablo 5.23).

Tablo 5.23. GFRP21-1 kirişlerine ait yük ve sehim değerleri

Numune	İlk çatlak		Akma başlangıcı		Kırılma	
	Yük (kN)	Sehim (mm)	Yük (kN)	Sehim (mm)	Yük (kN)	Sehim (mm)
1	23.92	1.45	100.76	12.36	151.17	31.65
2	23.96	1.41	104.54	12.23	161.93	31.64
Ortalama	23.94	1.43	102.65	12.30	156.55	31.65

GFRP21-1 kirişi şahit kiriş ile karşılaştırıldığında ilk çatlak yükü ortalama %68.6 artmış, yüke karşılık gelen sehim ise %62.5 atmıştır. Akma yükü %78.7 artmış akma yüküne karşılık gelen sehim ise %47.9 artmıştır. Maksimum yük %149.5 artmış ancak maksimum yüke karşılık gelen sehim %6.0 daha düşük çıkmıştır (Tablo 5.32).



Şekil 5.24. GFRP21-1 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri

5.2.8.1. GFRP21-1 kirişlerinin süneklik oranları

GFRP21-1 kirişlerinin süneklik düzeyleri akma anındaki şekil değiştirmenin kopma anındaki şekil değiştirmeye oranı ile hesaplanmıştır. Kirişlerin ortalama süneklik

oranı 3.03 olarak bulunmuştur (Tablo 5.24). Kirişinin yük taşıma kapasiteleri artmasına rağmen süneklik düzeylerinde bir azalma meydana gelmiştir (Şekil 5.25).

Tablo 5.24. GFRP21-1 kirişlerin süneklik oranları

Numune	Akma anındaki şekil değiştirme Δy (mm)	Kopma anındaki şekil değiştirme Δu (mm)	Süneklik $\mu\Delta = \Delta u / \Delta y$
1	12.36	33.10	2.68
2	12.23	41.30	3.38
Ortalama	12.30	37.20	3.03

5.2.3.1. GFRP21-1 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri

GFRP21-1 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri maksimum eğilme kuvvetinin % 85'ine denk gelen orta nokta sehim değerleri ve akma anındaki sehim dikkate alınarak yük- sehim eğrisinin altında kalan alan hesaplanarak bulunmuştur. GFRP21-1 kirişleri ortalama 4138.37 Joule enerji yutmuştur (Tablo 5.25).

Tablo 5.25. GFRP21-1 kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri

Numune	Yutulan enerji Joule-(kN.mm)
1	3412.22
2	4864.51
Ortalama	4138.37

5.3. Sonuçların Karşılaştırılması

Çeşitli şekilde cam ve karbon kumaşlarla güçlendirilen betonarme kirişlerin yük taşıma kapasiteleri, süneklik, enerji yutma kapasitesi, ekonomiklik açısından karşılaştırmaları yapılmıştır. Cam lifli kumaşların, karbon lifli kumaşlardan daha ekonomik olması nedeni ile CFRP'ye alternatif olarak daha ekonomik olan GFRP'nin kullanım imkanları araştırılmıştır.

5.3.1. FRP11 ve GFRP21 kiriş deneylerinin karşılaştırılması

Bu bölümde bir kat enine ve bir kat boyuna cam veya karbon kumaşlarla ve iki kat boyuna ve bir kat enine sarılarak güçlendirilen betonarme kirişler değerlendirilmiştir. Bu deney kirişlerinin karşılaştırmaları, yük-sehim değerleri, enerji yutma kapasiteleri, süneklik oranları açısından ele alınmış ve sonuçlar ayrıntılı olarak aşağıda sunulmuştur.

5.3.1.1. FRP11 ve GFRP21 kirişlerinin yük-sehim grafiklerinin karşılaştırılması

Elyaf Takviyeli Plastik (FPR) kullanarak güçlendirilen betonarme kirişlerin tamamında şahit kirişlere göre taşıma gücünde ve enerji yutma kapasitelerinde dikkate değer artışlar elde edilmiştir.

Bir kat boyuna ve bir kat enine cam veya karbon kumaşlarla ayrıca iki kat boyuna ve bir kat enine cam kumaşla sarılarak güçlendirilen kirişlerin yük taşıma kapasitelerinde önemli artışlar elde edilmiştir. CFRP11 kirişinin akma yükünde %84.6, kopma yükünde ise %155.9 oranında artış olmuştur. GFRP11 kirişlerinin akma yükünde %51.9, kopma yükünde ise %89.7 artışlar meydana gelmiştir. GFRP21 kirişlerinin Akma yükü %78.9 kopma yükü %136.1 oranında artmıştır

GFRP11 kirişi CFRP11 kirişi ile karşılaştırıldığında ilk çatlak yükü %0.9, çatlama yüküne karşılık sehim %22.0 daha düşük çıkmıştır. Akma yükü %34.0, akma yüküne karşılık sehim %18.2 daha düşük çıkmıştır. CFRP11 kirişine göre Maksimumu yük %69.2 daha düşük çıkmış ancak sehim 11.9 daha yüksek çıkmıştır. Maksimum yüke göre GFRP11 kirişi yük taşıma kapasitesi düşük olmasına rağmen daha fazla deformasyon yapma kapasitesine sahip olduğu anlaşılmaktadır (Tablo 5.26).

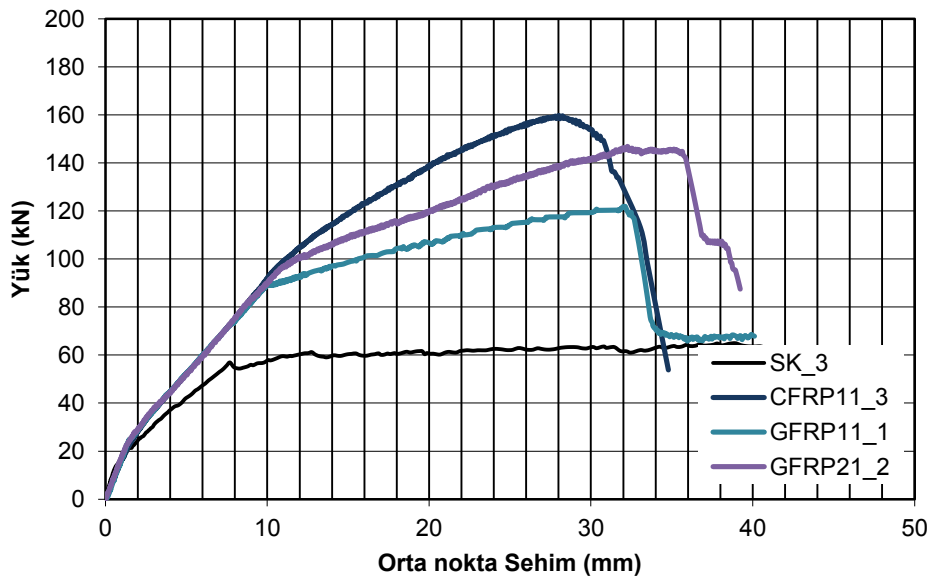
GFRP21 kirişi CFRP11 kirişi ile karşılaştırıldığında ilk çatlak yükü %3, çatlama yüküne karşılık sehim %16 daha düşük çıkmıştır. Akma yükü %3.1, akma yüküne karşılık sehim %2.8 daha düşük çıkmıştır. CFRP11 kirişine göre Maksimumu yük %7.7 daha düşük çıkmış ancak sehim 9.4 daha yüksek çıkmıştır. Maksimum yüke

göre GFRP11 kirişi yük taşıma kapasitesi düşük olmasına rağmen daha fazla deformasyon yapma kapasitesine sahip olduğu anlaşılmaktadır (Tablo 5.26).

GFRP21 kirişi GFRP11 kirişi ile kıyaslandığında ilk çatlak yükü ortalama %2.5, yüke karşılık gelen sehim ise %3.8 daha düşük çıkmıştır. Akma yükü %17.8, akma yüküne karşılık gelen sehim ise %18.3 artmıştır. Maksimum yük %24.5 artmış ancak maksimum yüke karşılık gelen sehim %4.2 daha düşük çıkmıştır. Kiriş elemanında sarım arttıkça yük taşıma kapasitesi artmakta ancak sehim yapma kapasitesi düşmektedir (Tablo 5.26).

Tablo 5.26. Şahit kiriş, FRP11 ve GFRP21 kirişlerinin yük-sehim artışları

Karşılaştırma Şekli	İlk Çatlak		Akma Başlangıcı		Kırılma	
	Yük (%)	Sehim (%)	Yük (%)	Sehim (%)	Yük (%)	Sehim (%)
CFRP11 ŞK	75.92	92.80	84.60	41.14	155.92	-15.99
GFRP11 ŞK	75.01	67.80	51.90	22.69	89.69	-4.15
GFRP21 ŞK	70.66	61.36	78.87	45.11	136.10	-8.13
GFRP11 CFRP11	-0.91	-22.00	-34.00	-18.21	-69.17	11.90
GFRP21 CFRP11	-2.99	-16.31	-3.10	02.81	-07.75	9.36
GFRP21 GFRP11	-2.48	-3.84	17.75	18.27	24.47	-4.15



Şekil 5.25. FRP11 ve GFRP21 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri

5.3.1.2. FRP11 ve GFRP21 kirişlerinin süneklik oranlarının karşılaştırılması

Güçlendirilen CFRP11, GFRP11 ve GFRP21 kirişleri şahit kirişe ve birbirleri arasında karşılaştırılmıştır. Şahit kirişlerde süneklik düzeyi ortalama 4.81 çıkmıştır (Tablo 5.27). CFRP11, GFRP11 ve GFRP21 kirişlerinin yük taşıma kapasitesi önemli oranda artmasına rağmen sünekliğinde düşme olmuştur. Güçlendirilen kirişlerin süneklik oranlarında CFRP11 kirişinde ortalama %43.2, GFRP11 kirişinde ortalama %32.4, GFRP21 kirişinde ise ortalama %41 düşme meydana gelmiştir.

Tablo 5.27. FRP11 ve GFRP21 kirişlerinin karşılaştırmalı süneklik yüzdeleri

Karşılaştırma isimleri	Süneklik değişimi
	%
CFRP11 ŞK	-43.2
GFRP11 ŞK	-32.4
GFRP21 ŞK	-41.0
GFRP11 CFRP11	11.0
GFRP21 CFRP11	04.0
GFRP21 GFRP11	-12.7

5.3.1.3. FRP11 ve GFRP21 kirişlerinin enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması

Tablo 5.28'de şahit kirişe göre ve kendi aralarında karşılaştırılan CFRP11, GFRP11 ve GFRP21 kirişlerinin enerji yutma yüzdeleri verilmiştir. . Kirişlerin CFRP11, GFRP11 ve GFRP21 şeklinde güçlendirilmesinin kirişin enerji yutma kapasitelerini önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. Güçlendirilen tüm kirişlerde yutulan enerji miktarları artma olmuştur. Şahit kirişe göre GFRP21 kirişi yutulan enerji miktarı olarak ortalama %67.7 ile en iyi sonucu vermiştir.

Tablo 5.28. FRP11 ve GFRP21 kirişlerinin karşılaştırmalı enerji yutma kapasite yüzdeleri

Karşılaştırma isimleri	Enerji yutma kapasitesi (%)
CFRP11 ŞK	50.5
GFRP11 ŞK	41.4
GFRP21 ŞK	67.7
GFRP11 CFRP11	-9.5
GFRP21 CFRP11	11.4
GFRP21 GFRP11	18.7

5.3.2. FRP22 kiriş deneylerinin karşılaştırılması

Cam veya karbon takviyeli polimerlerle (FRP) iki kat boyuna ve enine sarılarak güçlendirilen betonarme kirişler bu bölüme karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar yük-sehim değerleri, enerji yutma kapasiteleri, süneklik oranları açısından ele alınmış ve sonuçlar ayrıntılı olarak aşağıda sunulmuştur.

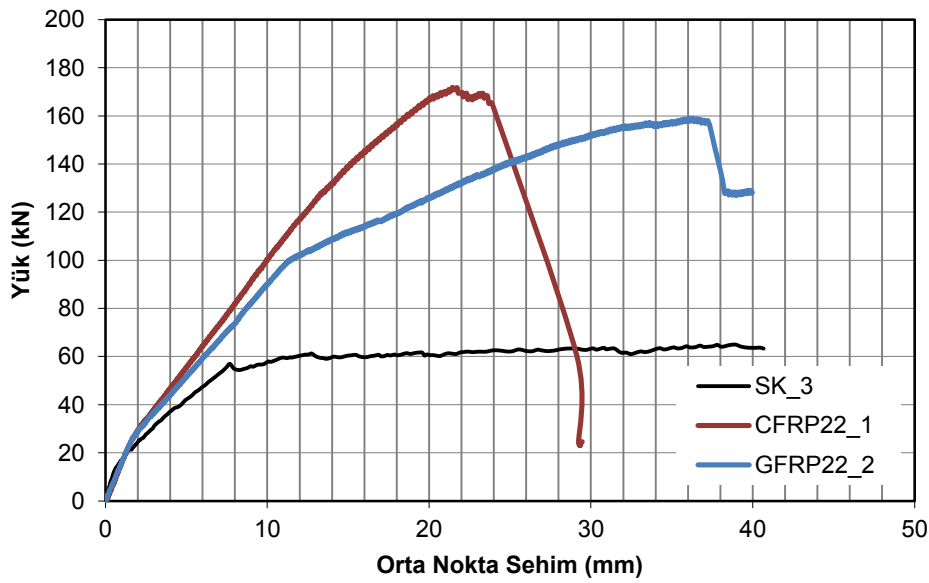
5.3.2.1. FRP22 kirişlerinin yük-sehim grafiklerinin karşılaştırılması

FRP kompozitlerle CFRP ile iki kat enine ve boyuna (CFRP22) ve GFRP ile iki kat enine ve boyuna sarılarak güçlendirilen kirişlerin (GFRP22) eğilme ve kesme taşıma gücü ve enerji yutma kapasitelerinde şahit kirişlere göre önemli artışlar elde edilmiştir. Şahit kirişe göre CFRP22 kirişinde akma yükü %126.9, kırılma yükü %188.1 oranında artmıştır. Aynı şekilde GFRP22 kirişinin akma yükünde %76.4 kırılma yükünde ise %145 oranında artışlar elde edilmiştir (Şekil 5.27).

GFRP22 kirişi CFRP22 kirişi ile karşılaştırıldığında ilk çatlak yükü %0.5, çatlama yüküne karşılık sehim %1.1 daha yüksek çıkmıştır. Akma yükü %22.3, akma yüküne karşılık sehim %16.8 daha düşük çıkmıştır. CFRP22 kirişine göre kırılma yükü %15.0 daha düşük çıkmış ancak sehim 35.6 daha yüksek çıkmıştır. Kırılma yüküne göre GFRP22 kirişi yük taşıma kapasitesi düşük olmasına rağmen daha fazla deformasyon yapma kapasitesine sahip olduğu anlaşılmaktadır (Tablo 5.29).

Tablo 5.29. FRP22 kirişlerinin yük-sehim artışları

Karşılaştırma isimleri	İlk Çatlak		Akma Başlangıcı		Kırılma	
	Yük (%)	Sehim (%)	Yük (%)	Sehim (%)	Yük (%)	Sehim (%)
CFRP22 ŞK	62.04	60.80	126.92	66.00	188.08	-28.59
GFRP22 ŞK	62.92	62.50	76.42	38.09	145.01	-3.20
GFRP22 CFRP22	0.54	1.06	-22.25	-16.81	-14.95	35.55



Şekil 5.26. Şahit kiriş, FRP22 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri

5.3.1.2. FRP22 kirişlerinin süneklik oranlarının karşılaştırılması

Şahit kirişlere göre FRP22 kirişlerinin yük taşıma kapasitelerinde önemli artış olsa da süneklik oranlarında düşüş meydana gelmiştir. Şahit kirişe göre CFRP22 kirişi süneklik oranının ortalama %61.3'ünü kaybetmiştir. GFRP22 kirişi ise süneklik oranının ortalama %36.2'sini kaybetmiştir. Dolayısı ile GFRP22 kirişi CFRP22 kirişine göre ortalama %65.1 daha sünek davranmıştır (Tablo 5.30).

Tablo 5.30. FRP22 kirişlerinin karşılaştırmalı süneklik yüzdeleri

Karşılaştırma isimleri	Süneklik değişimi %
CFRP22 ŞK	-61.3
GFRP22 ŞK	-36.2
GFRP22 CFRP22	65.1

5.3.2.3. FRP22 kirişlerinin enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması

CFRP22 ve GFRP22 kirişlerinin enerji yutma yüzdeleri şahit kirişe göre ve kendi aralarında karşılaştırılmıştır. CFRP22 ve GFRP22 şeklindeki güçlendirme kirişlerin enerji yutma kapasitelerini önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. CFRP22 kirinin yuttuğu enerji miktarı şahit kirişin yuttuğu enerji miktarından %36.3 daha yüksek çıkmıştır. GFRP22 kirişi yutulan enerji miktarı olarak ortalama %77.3 değeri ile şahit ve CFRP22 kirişlerine göre daha yüksek çıkmıştır.

Tablo 5.31. FRP22 kirişlerinin karşılaştırmalı enerji yutma kapasite yüzdeleri

Karşılaştırma isimleri	Yutulan enerji (%)
CFRP22 ŞK	36.3
GFRP22 ŞK	77.3
GFRP22 CFRP22	30.1

5.3.3. FRP21-1 kiriş deneylerinin karşılaştırılması

CFRP ve GFRP ile iki kat boyuna ve bir kat 90° enine ve kesme kırılmasına dik gelecek şekilde 45° açılı sarılarak güçlendirilen kirişler (CFRP21-1 ve GFRP21-1) şahit kiriş ve kendi aralarında taşıma gücü deformasyon kabiliyeti enerji yutma kapasiteleri, süneklik oranları açısından ele alınmış ve sonuçlar ayrıntılı olarak incelenmiştir.

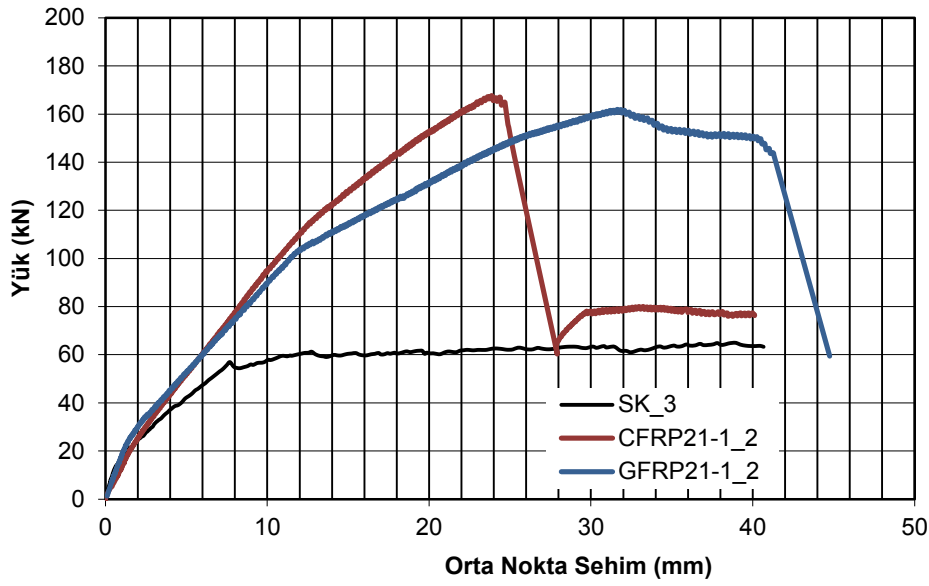
5.3.3.1. FRP21-1 kirişlerinin yük-sehim değerlerinin karşılaştırılması

FRP kompozitlerle CFRP21-1 ve GFRP21-1 şeklinde güçlendirilen kirişlerin eğilme dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri şahit kirişlere göre önemli derecede artmıştır. CFRP21-1 kirişi şahit kiriş ile karşılaştırıldığında ilk çatlak yükü ortalama %87.2 artmış, yüke karşılık gelen sehim ise %113.1 artmıştır. Akma yükü %93.8 artmış akma yüküne karşılık gelen sehim ise %44.1 artmıştır. GFRP21-1 kirişi kırılma yükü 168.3 artmış ancak maksimum yüke karşılık gelen sehim %28.1 daha düşük çıkmıştır (Tablo 5.32).

GFRP21-1 kirişi CFRP21-1 kirişi ile karşılaştırıldığında ilk çatlak yükü %10.0, çatlama yüküne karşılık sehim %23.7 daha düşük çıkmıştır. Akma yükü %7.8, akma yüküne karşılık sehim %2.6 daha yüksek çıkmıştır. CFRP21-1 kirişine göre kırılma yükü %7.0 daha düşük çıkmış ancak sehim 30.8 daha yüksek çıkmıştır. Kırılma yüküne göre GFRP21-1 kirişinin yük taşıma kapasitesi kısmen düşük olsa da daha fazla deformasyon yapma kapasitesine sahip olduğu anlaşılmaktadır (Tablo 5.32).

Tablo 5.32. FRP21-1 kirişlerinin yük-sehim artışları

Karşılaştırma isimleri	İlk çatlak		Akma başlangıcı		Kırılma	
	Yük (%)	Sehim (%)	Yük (%)	Sehim (%)	Yük (%)	Sehim (%)
CFRP21-1ŞK	87.24	113.07	93.81	44.11	168.29	-28.13
GFRP21-1ŞK	68.55	62.50	78.73	47.89	149.54	-5.98
GFRP21-1CFRP21-1	-9.98	-23.73	-7.78	2.63	-6.99	30.82



Şekil 5.27. Şahit kiriş ve FRP21-1 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri

5.3.3.2. FRP21-1 kirişlerinin süneklik oranlarının karşılaştırılması

Şahit kirişlere göre FRP21-1 kirişlerinin süneklik oranlarında düşüş olmuştur. Şahit kirişe göre CFRP21-1 kirişi süneklik oranının ortalama %56.5'ini kaybetmiştir. GFRP21-1 kirişi ise süneklik oranının ortalama %37'sini kaybetmiştir. GFRP21-1 kirişi CFRP21-1 kirişine göre ortalama% 45 daha sünek davranmıştır (Tablo 5.33).

Tablo 5.33. FRP21-1 kirişlerinin karşılaştırmalı süneklik yüzdeleri

Karşılaştırma isimleri	Süneklik değişimi
	%
CFRP21-1 ŞK	-56.5
GFRP21-1 ŞK	-37.0
GFRP21-1 CFRP21-1	45.0

5.3.3.3. FRP21-1 kirişlerinin enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması

Şahit kirişe göre ve kendi aralarında karşılaştırılan CFRP21-1 ve GFRP21-1 kirişlerinin enerji yutma yüzdeleri Tablo 5.34'da verilmiştir. CFRP21-1 kirinin yuttuğu enerji miktarı şahit kirişin yuttuğu enerji miktarından % 20.3 daha yüksek

çıkmiştir. GFRP21-1 kirişi şahit kirişe göre % 77.3 daha çok enerji yutmuştur. GFRP21-1 kirişi CFRP21-1 kirişine göre %92.9 daha çok enerji yutmuştur (Tablo 5.34).

Tablo 5.34. FRP21-1 kirişlerinin karşılaştırmalı enerji yutma kapasite yüzdeleri

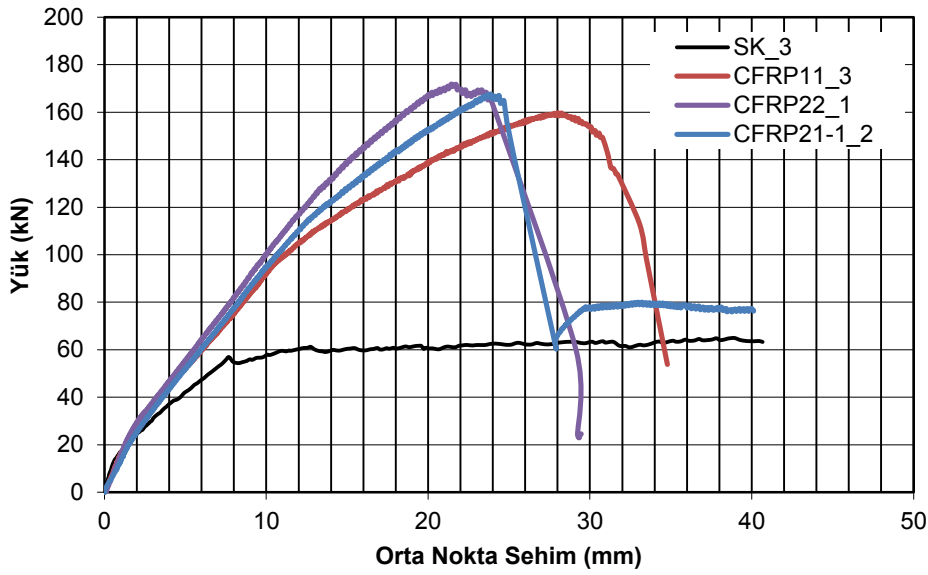
Karşılaştırma isimleri	Yutulan enerji (%)
CFRP21-1 ŞK	20.3
GFRP21-1 ŞK	92.9
GFRP21-1 CFRP21-1	60.4

5.3.4. CFRP ile kiriş güçlendirmede sargı etkileri

CFRP ile güçlendirilen kirişlerde şahit kirişe göre yük taşıma kapasitelerinde önemli artışlar olmuştur. Şahit kirişe göre; ortalama yük taşıma kapasitesi CFRP11 kirişlerinde % 155.9'a, CFRP22 kirişlerinde %188.1'e, CFRP21-1 kirişlerinde % 168.3'e çıkmıştır (bakınız. Tablo 5.28 Tablo 5.31 ve Tablo 5.34). Yük taşıma kapasiteleri açısından en iyi sonuç CFRP22 şeklindeki güçlendirmede elde edilmiştir. CFRP ile yapılan güçlendirmede sargı sayısı arttıkça yük taşıma kapasitesi atmakta ancak artış aynı oranda olmamaktadır (Şekil 5.29).

CFRP ile güçlendirilen kirişler enerji yutma açısından değerlendirildiğinde şahit kirişe göre; CFRP11 kirişlerinde yutma kapasitesi %50.5 oranında artış, CFRP22 kirişlerinde enerji yutma kapasitesi ortalama %36.3 oranında artış, CFRP21-1 kirişlerinde enerji yutma kapasitesi ortalama % 20.3 oranında artmıştır. CFRP kirişlerinde sargı miktarı arttıkça yük taşıma kapasitesi artmasına rağmen kirişin enerji yutma kapasitesi düşmektedir. Enerji yutma kapasitesi açısından iyi sonuç CFRP11 kirişinde elde edilmiştir.

Sargı miktarı arttıkça kiriş sünekliğini büyük ölçüde (%43-%61) kaybetmektedir. CFRP11, CFRP21-1 ve CFRP22 kirişlerinin süneklik oranları sırası ile 2.73, 2.09 ve 1.86 çıkmıştır. Süneklik açısından en verimli sonuç CFRP11 kirişinde elde edilmiştir.



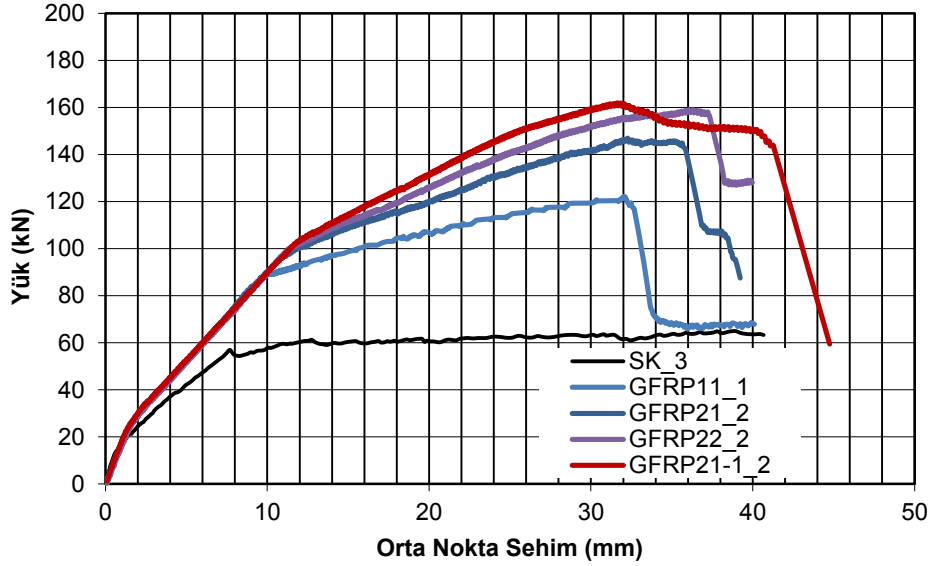
Şekil 5.28. Şahit kiriş ve CFRP ile güçlendirilen kirişlerin yük-sehim grafikleri

5.3.5. GFRP ile kiriş güçlendirmede sargı etkileri

GFRP ile güçlendirilen kirişlerde şahit kirişe göre yük taşıma kapasitelerinde önemli artışlar olmuştur. Şahit kirişe göre; ortalama yük taşıma kapasitesi GFRP11 kirişlerinde % 89.7'ye, GFRP21 kirişlerinde %136.1'e, GFRP22 kirişlerinde % 145'e ve GFRP21-1 kirişlerinde %149.5'e çıkmıştır (bakınız. Tablo 5.26 Tablo 5.29 ve Tablo 5.32). Yük taşıma kapasiteleri açısından en iyi sonuçlar GFRP21-1 ve GFRP22 şeklindeki güçlendirmede elde edilmiştir. GFRP ile yapılan güçlendirmede sargı sayısı arttıkça yük taşıma kapasitesi artmış ancak bu artış aynı oranda olmamıştır (Şekil 5.30).

Şahit kirişe göre; GFRP11 kirişlerinde enerji yutma kapasitesi %41.4, GFRP21 kirişlerinde enerji yutma kapasitesi ortalama %67.7, GFRP22 kirişlerinde enerji yutma kapasitesi ortalama%77.3, GFRP21-1 enerji yutma kapasitesi ortalama %92.9 oranında artmıştır. GFRP kirişlerinde sargı miktarı arttıkça kirişin enerji yutma kapasitelerinin arttığı tespit edilmiştir. GFRP ile çeşitli şekillerde güçlendirilen kirişlerde en verimli sonucu GFRP22 ve GFRP21-1 vermiştir.

GFRP kirişlerde sargı miktarı arttıkça kiriş sünekliğini bir miktar (%32-%41) kaybetmektedir. GFRP11, GFRP21, GFRP21-1 ve GFRP22 kirişlerinin süneklik oranları sırası ile 3.25, 2.84, 3.03 ve 3.07 çıkmıştır. GFRP21 kirişi haricinde tüm GFRP kirişlerin süneklik oranı 3'ün üzerinde çıkmıştır.



Şekil 5.29. Şahit kiriş ve GFRP ile güçlendirilen kirişlerin yük-sehim grafikleri

BÖLÜM 6. EĞİLME YÜKÜ ETKİSİNDEKİ HASARLI BETONARME YAPI ELEMANLARININ GFRP KULLANILARAK GÜÇLENDİRİLMESİ

Bu bölümde; Türkiye’deki mevcut yapılarda yaygın olarak karşılaşılan kesme ve eğilme dayanımları düşük ve hasara uğramış betonarme kirişler dikkate alınarak deney elemanları laboratuvar ortamında üretilmiştir. Laboratuvar ortamında eğilme testine tabi tutularak hasara uğratılan iki adet betonarme kiriş epoksi enjeksiyonu ile onarılmış ve GFRP ile güçlendirilmiştir. Hasar gören kirişler daha önceki çalışmalar ışığında GFRP ile iki kat enine ve iki kat boyuna sarılarak güçlendirilmiştir. Onarılan betonarme kirişler GFRP ile güçlendirilerek eğilme ve kesme dayanımları, süneklikleri ve enerji yutma kapasitelerindeki performans değişiklikleri araştırılmıştır. Onarılan ve GFRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerden elde edilen sonuçlar; şahit betonarme kirişler, CFRP ve GFRP ile güçlendirilen betonarme kirişler ile karşılaştırılarak hasar görmüş betonarme kirişlerin GFRP ile güçlendirilebilirliği araştırılmıştır.

6.1. GFRP22-O/G Kirişi Eğilme Deneyi

Reçine enjeksiyonu ile onarılan ve GFRP ile iki kat enine ve iki kat boyuna sarılarak güçlendirilen kirişler (GFRP22-O/G) dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 6.1). GFRP22-O/G kirişi göçme yükü oluşuncaya kadar yüklenmiş ve deney verileri bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Kirişler nihai dayanıma erişince 1. veya 3. bölgeden kesme kırılması ile göçtüğü tespit edilmiştir (Şekil 6.2).



Şekil 6.1. Yükleme öncesi GFRP22-O/G kirişi



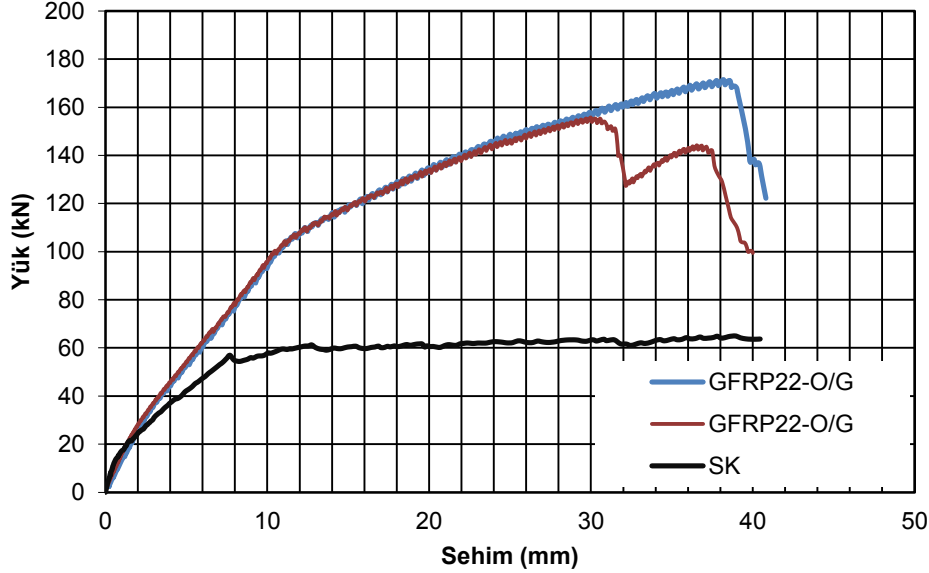
Şekil 6.2. Yükleme sonrası kiriş deformasyonu

Yapılan deney sonuçları değerlendirilerek kirişlere ait yük-sehim grafikleri çizilmiş ve ortalama yük-sehim değerleri bulunmuştur (Şekil 6.3). GFRP22-O/G kirişlerinde Ortalama yük 25.04 kN'a ulaştığında kiriş ortasında ortalama 1.86 mm sehim oluşmuş kiriş alt 2. bölgesinde ilk eğilme çatlakları oluşmaya başlamış yük ve sehim artmaya devam etmiştir. Ortalama yük 106.13 kN'na ulaştığında ortalama 11.49 mm sehim oluşmuş, yük ve sehim artmaya devam etmiştir. Ortalama yük 163.64 kN'na çıktığında kiriş numune ortalama 34.10 mm sehim yapmış ve kiriş taşıma gücünü kaybetmiştir (Tablo 6.1).

Tablo 6.1. GFRP22-O/G kirişlerine ait yük ve sehim değerleri

Numune	İlk çatlak		Akma başlangıcı		Kırılma	
	Yük (kN)	Sehim (mm)	Yük (kN)	Sehim (mm)	Yük (kN)	Sehim (mm)
1	22.47	1.52	106.05	11.48	171.51	38.19
2	27.61	2.20	106.20	11.49	155.76	30.01
Ortalama	25.04	1.86	106.13	11.49	163.64	34.10

GFRP22-O/G kirişlerinin, şahit kirişlerine kıyasla yük taşıma kapasitelerinde önemli artışlar olmuştur. GFRP22-O/G kirişinin şahit kirişe kıyasla ilk çatlak yükünde ortalama %76.3, yüke karşılık gelen sehimde ise %111.4 oranında artış olmuştur. Akma yükü %84.8, akma yüküne karşılık gelen sehim ise %38.2 oranında artmıştır. GFRP22-O/G kirişi kırılma yükünde %160.8 oranında ve kırılma yüküne karşılık gelen sehimde %1.3 oranında artışlar elde edilmiştir (Tablo 6.4).



Şekil 6.3. GFRP22-O/G kirişlerine ait yük-sehim grafikleri

6.1.1. GFRP22-O/G kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri

GFRP22-O/G kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri maksimum eğilme kuvvetinin % 85'ine denk gelen orta nokta sehim değerleri ve akma anındaki sehim dikkate alınarak yük-sehim eğrisinin altında kalan alan hesaplanarak bulunmuştur. GFRP22-O/G kirişleri ortalama 4510.77 Joule enerji yutmuştur (Tablo 6.2).GFRP22-O/G kirişin enerji yutma kapasitesi şahit kirişe göre %110.3 oranında arttığı tespit edilmiştir.

Tablo 6.2. GFRP22 O/G kirişlerinin enerji yutma kapasiteleri

Numune	Yutulan enerji Joule-(kN.mm)
1	4758.15
2	4263.39
Ortalama	4510.77

6.1.2. GFRP22-O/G kirişlerinin süneklik oranları

GFRP22-O/G kirişlerinin süneklik düzeyleri akma anındaki şekil değiştirmenin kopma anındaki şekil değiştirmeye oranı ile hesaplanmıştır. Kirişlerin ortalama süneklik oranı 3.45 olarak bulunmuştur (Tablo 6.3). GFRP22-O/G kirişinin yük taşıma ve enerji yutma kapasitelerinde önemli artışlar olmasına rağmen süneklik düzeyi şahit kirişe göre %28.3 oranında düşük çıkmıştır.

Tablo 6.3. GFRP22 O/G kirişlerin süneklik oranları

Numune	Akma anındaki şekil değiştirme Δy (mm)	Kopma anındaki şekil değiştirme Δu (mm)	Süneklik $\mu\Delta = \Delta u / \Delta y$
1	11.48	41.27	3.59
2	11.49	37.90	3.30
Ortalama	11.49	39.6	3.45

6.2. GFRP22-O/G, FRP11 ve GFRP21 Kiriş Deneylerinin Karşılaştırılması

Onarım ve güçlendirmesi yapılan kirişler cam ve karbon kumaşlarla bir kat enine ve boyuna sarılarak (FRP11) cam kumaşla bir kat edine ve iki kat boyuna sarılarak (GFRP21) güçlendirilen kirişlerle yük-sehim değerleri, enerji yutma kapasiteleri, süneklik oranları açısından karşılaştırmaları yapılmış ve sonuçlar ayrıntılı olarak aşağıda sunulmuştur.

6.2.1. GFRP22-O/G, FRP11 ve FRP21 kirişlerinin yük-sehim grafiklerinin karşılaştırılması

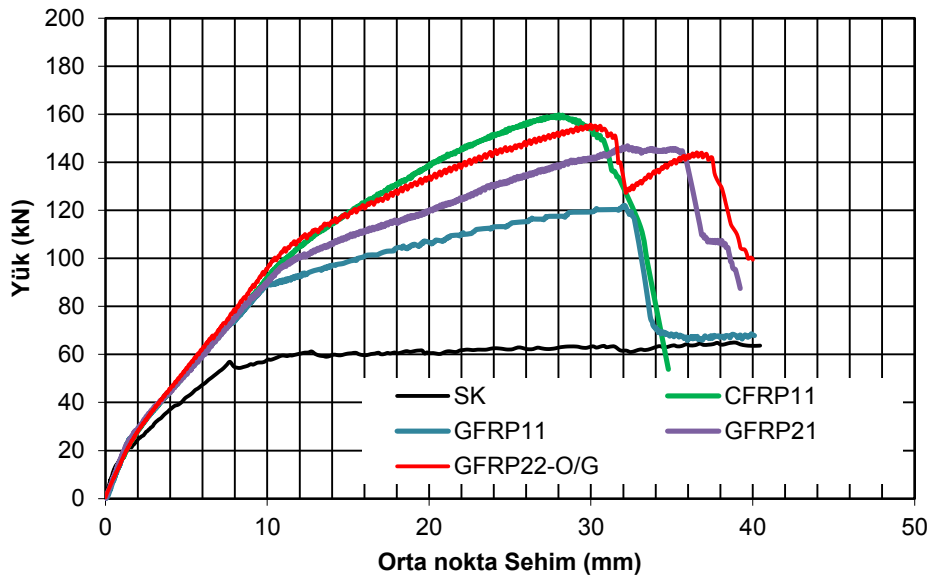
FRP kompozelerle onarılan ve güçlendirilen kirişlerin yük taşıma kapasitelerinde şahit kirişlere göre önemli artışlar elde edilmiştir. GFRP22-O/G kirişinin şahit kirişe kıyasla ilk çatlak yükü ortalama %76.3, yüke karşılık gelen sehim ise %111.4 oranında atmıştır. Akma yükü %84.8 oranında akma yüküne karşılık gelen sehim ise %38.2 oranında artmıştır. GFRP22-O/G kirişi kırılma yükü %160.8 artmış ve kırılma yüküne karşılık gelen sehim %1.3 artmıştır (Tablo 6.4).GFRP22-O/G kirişlerinin CFRP11 kirişine göre yük taşıma kapasiteleri birbirine yakın çıkmıştır. GFRP22-O/G kirişi ile CFRP11 kirişinin ilk çatlak yükü benzer çıkmış, ancak çatlama yüküne karşılık sehim %9.6 daha yüksek çıkmıştır. Akma yükü ve akma yüküne karşılık sehim yakın çıkmıştır. Kırılma yükü yakın çıkmış ancak kırılma yüküne karşılık gelen sehim %20.6 daha yüksek çıkmıştır (Tablo 6.4).

GFRP22-O/G kirişi GFRP11 kirişi ile karşılaştırıldığında ilk çatlak yükü benzer çıkmış ancak; çatlama yüküne karşılık sehim %26 daha yüksek çıkmıştır. Akma yükü %21.6, akma yüküne karşılık sehim %12.6 daha yüksek çıkmıştır. GFRP11 kirişine göre kırılma yükü % 37.5, sehim 5.7 daha yüksek çıkmıştır. GFRP22-O/G kirişlerinin GFRP11 kirişine göre dayanımları ve yük taşıma kapasiteleri daha yüksek çıkmıştır (Tablo 6.4). GFRP22-O/G kirişi GFRP21 kirişi ile kıyaslandığında ilk çatlak yükü %3.3, yüke karşılık gelen sehim ise %31.0 artmıştır. Akma yükü %3.3 yüksek, ancak akma yüküne karşılık gelen sehim ise %4.8 daha düşük artmıştır. Kırılma yükü %10.5, kırılma yüküne karşılık gelen sehim %10.3 artmıştır.

GFRP22-O/G kirişinin yük taşıma ve deformasyon yapma kabiliyeti GFRP21 kirişine göre daha yüksek çıkmıştır (Tablo 6.4).

Tablo 6.4. GFRP22-O/G kirişinin, ŞK, FRP11 ve GFRP21 kirişlerine göre yük-sehim artışları

Karşılaştırma isimleri	İlk çatlak		Akma başlangıcı		Kırılma	
	Yük (%)	Sehim (%)	Yük (%)	Sehim (%)	Yük (%)	Sehim (%)
GFRP22-O/G - ŞK	76.3	111.4	84.8	38.2	160.8	1.3
GFRP22-O/G-CFRP11	0.2	9.6	0.1	-2.1	1.9	20.6
GFRP22-O/G-GFRP11	0.7	26.0	21.6	12.6	37.5	5.7
GFRP22-O/G-GFRP21	3.3	31.0	3.3	-4.8	10.5	10.3



Şekil 6.4. GFRP22-O/G, ŞK, FRP11 ve GFRP21 kirişlerine ait örnek yük-sehim grafikleri

6.2.2. GFRP22-O/G, FRP11 ve FRP21 kirişlerinin süneklik oranlarının karşılaştırılması

Onarım ve güçlendirilmesi yapılan GFRP22-O/G kirişi; şahit kirişe, güçlendirilmesi yapılan CFRP11, GFRP11 GFRP21 kirişlerine göre süneklik oranları açısından karşılaştırılmıştır. GFRP22-O/G kirişinin süneklik oranları CFRP11 kirişine göre

%26.4, GFRP11 kirişine göre %6.2 ve GFRP21 kirişine göre %21.5 daha yüksek çıkmıştır (Tablo 6.5).

Tablo 6.5. GFRP22-O/G kirişinin, ŞK, FRP11 ve FRP21 kirişlerine göre karşılaştırmalı süneklik yüzdeleri

Karşılaştırma isimleri	Akma anındaki şekil değiştirme Δy (mm)	Kopma anındaki şekil değiştirme Δu (mm)	Süneklik $\mu\Delta = \Delta u / \Delta y$
GFRP22-O/G -ŞK	38.3	-1.0	-28.3
GFRP22-O/G-CFRP11	-2.0	23.9	26.4
GFRP22-O/G-GFRP11	12.6	19.4	6.2
GFRP22-O/G-GFRP21	-4.7	15.7	21.5

6.2.3. GFRP22-O/G, FRP11 ve FRP21 kirişlerinin enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması

Epoksi enjeksiyonu ile onarma ve GFRP ile güçlendirmenin kirişin enerji yutma kapasitesini önemli bir şekilde artırdığı tespit edilmiştir. Güçlendirilen tüm kirişlerde tüketilen enerji ve yutulan enerji miktarları artma olmuştur. GFRP22-O/G kirişin enerji yutma kapasitesi şahit kirişe göre %110.3, CFRP11 kirişine göre %39.7, GFRP11 kirişine göre %48.7 ve GFRP21 kirişine göre %25.4 arttığı tespit edilmiştir (Tablo 6.6).

Tablo 6.6. GFRP22-O/G, FRP11 ve GFRP21 kirişlerinin karşılaştırmalı enerji yutma kapasite yüzdeleri

Karşılaştırma isimleri	Yutulan enerji (%)
GFRP22-O/G-ŞK	110.3
GFRP22-O/G-CFRP11	39.7
GFRP22-O/G-GFRP11	48.7
GFRP22-O/G-GFRP21	25.4

6.3. GFRP22-O/G ile FRP22 Kiriş DeneYlerinin Karşılaştırılması

GFRP22-O/G kirişleri, cam ve karbon elyafla iki kat edine ve boyuna sarılarak güçlendirilen (FRP22) kirişlerle yük taşıma-sehim değerleri, enerji yutma kapasiteleri ve süneklik oranları açısından karşılaştırmaları yapılmış ve sonuçlar ayrıntılı olarak aşağıda sunulmuştur.

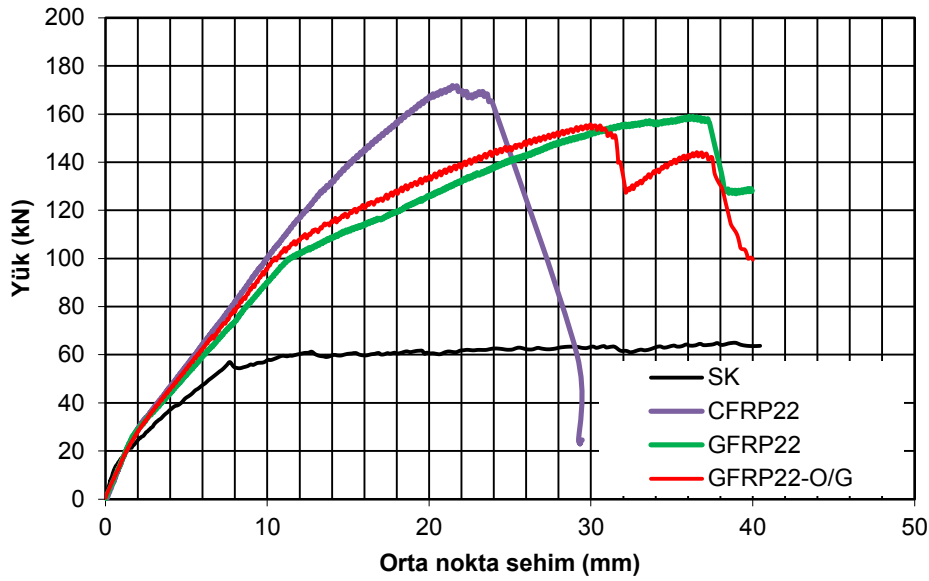
6.3.1. GFRP22-O/G ile FRP22 kirişlerinin yük-sehim grafiklerinin karşılaştırılması

GFRP22-O/G kirişi CFRP22 kirişi ile karşılaştırıldığında ilk çatlak yükü %8.8, çatlama yüküne karşılık sehim %31.4 daha yüksek çıkmıştır. Akma yükü %18.6, akma yüküne karşılık sehim %16.7 daha düşük çıkmıştır. CFRP22 kirişine göre Maksimumu yük % 9.5 daha düşük, sehim %41.9 daha yüksek çıkmıştır (Tablo 6.7). GFRP22-O/G kirişlerinin CFRP22 kirişlerine göre dayanımları kısmen daha düşük olsa da kopma uzamaları daha yüksek çıkmıştır (Şekil 6.5).

GFRP22-O/G kirişi GFRP22 kirişi ile karşılaştırıldığında ilk çatlak yükü %8.2, çatlama yüküne karşılık sehim %30.1 daha yüksek çıkmıştır. Akma yükü %4.7, akma yüküne karşılık gelen sehim benzer çıkmıştır. GFRP22 kirişine göre Maksimumu yük % 6.5, sehim 4.7 daha yüksek çıkmıştır (Tablo 6.7). GFRP22-O/G kirişlerinin GFRP22 kirişine göre dayanımları ve yük taşıma kapasiteleri benzerlik göstermektedir (Şekil 6.5).

Tablo 6.7. GFRP22-O/G kirişinin FRP22 kirişlerine göre yük-sehim artışları

Karşılaştırmalar	İlk çatlak		Akma başlangıcı		Kırılma	
	Yük (kN)	Sehim (mm)	Yük (kN)	Sehim (mm)	Yük (kN)	Sehim (mm)
GFRP22-O/G-CFRP22	8.8	31.4	-18.6	-16.7	-9.5	41.9
GFRP22-O/G-GFRP22	8.2	30.1	4.7	0.1	6.5	4.7



Şekil 6.5. GFRP22-O/G, ŞK ve FRP22 kirişlerine ait örnek yük-sehim grafikleri

6.3.2. GFRP22-O/G ile FRP22 kirişlerinin süneklik oranlarının karşılaştırılması

Epoksi enjeksiyonu ile onarılan ve GFRP ile güçlendirilen kirişlerin süneklik oranları aynı sarım şekli ile güçlendirilen CFRP22 ve GFRP22 kirişlerine göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Onarımı ve güçlendirilmesi yapılan GFRP22-O/G kirişi sadece güçlendirme yapılan CFRP22 kirişine göre süneklik oranı %85.5, GFRP22 kirişine göre %12.4 daha yüksek çıkmıştır (Tablo 6.8).

Tablo 6.8. GFRP22-O/G ve FRP22 kirişlerinin karşılaştırmalı süneklik yüzdeleri

Karşılaştırma isimleri	Süneklik değişimi (%)
GFRP22-O/G-CFRP22	85.5
GFRP22-O/G-GFRP22	12.4

6.3.3. GFRP22-O/G ile FRP22 kirişlerinin enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması

GFRP22-O/G kirişlerin enerji yutma kapasitesinde CFRP22 ve GFRP22 kirişlere göre iyi sonuçlar elde edilmiştir. Güçlendirilen tüm kirişlerde yutulan enerji

miktarları artma olmuştur. GFRP22-O/G kirişin enerji yutma kapasitesi, CFRP22 kirişine göre %54.3, GFRP22 kirişine göre %18.6 arttığı tespit edilmiştir. Epoksi enjeksiyonu ile onarma ve GFRP ile güçlendirmenin kirişin enerji yutma kapasitesini önemli bir şekilde artırdığı tespit edilmiştir (Tablo 6.9).

Tablo 6.9. FRP22 kirişlerinin karşılaştırmalı enerji yutma kapasite yüzdeleri

Karşılaştırma isimleri	Yutulan enerji (%)
GFRP22-O/G-CFRP22	54.3
GFRP22-O/G-GFRP22	18.6

6.4. GFRP22-O/G ile FRP21-1 Kiriş Deneylelerinin Karşılaştırılması

Onarım ve güçlendirilmesi yapılan kirişlerin cam ve karbon elyaf ile iki kat boyuna bir kat 90° enine ve bir kat 45° enine sarılarak güçlendirilen kirişlerle (FRP21-1) karşılaştırmaları, yük-sehim değerleri, enerji yutma kapasiteleri, süneklik oranları açısından ele alınmış ve sonuçlar ayrıntılı olarak aşağıda sunulmuştur.

6.4.1. GFRP22-O/G ile FRP21-1 kirişlerinin yük-sehim değerlerinin karşılaştırılması

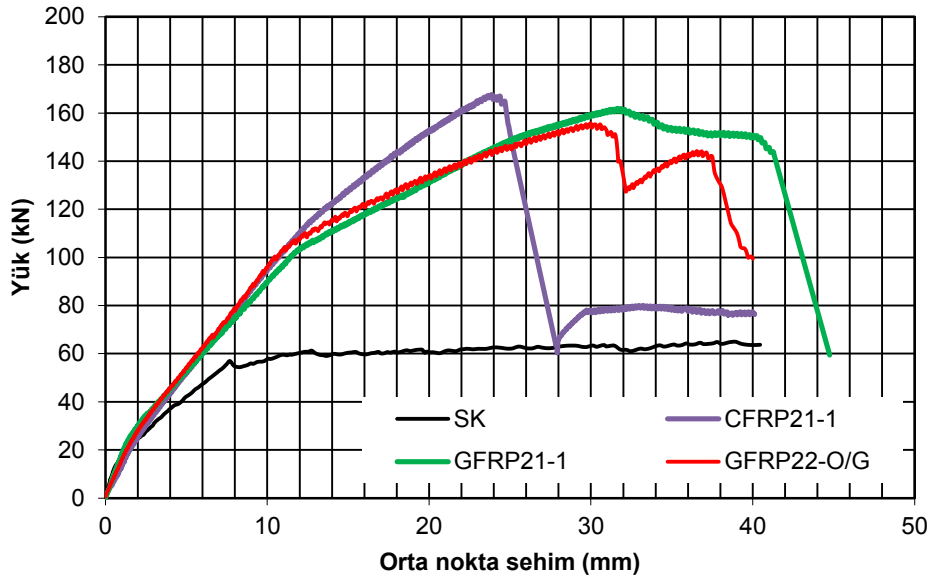
FRP'lerle güçlendirilen kirişlerin yük taşıma kapasitelerinde önemli artışlar elde edilmiştir. GFRP22-O/G kirişi CFRP21-1 kirişi ile karşılaştırıldığında kirişin davranışı benzer çıkmış ancak maksimumu yüke karşılık gelen sehim %41 oranında daha yüksek çıkmıştır (Tablo 6.10). GFRP22-O/G kirişlerinin CFRP21-1 kirişlerine göre dayanımları kısmen daha düşük olsa da kopma uzamaları daha yüksek çıkmıştır (Şekil 6.6).

GFRP22-O/G kirişi GFRP21-1 kirişi ile karşılaştırıldığında ilk çatlak yükü %4.6, çatlama yüküne karşılık sehim %30.1 daha yüksek çıkmıştır. Akma yükü %3.4 daha yüksek, akma yüküne karşılık sehim %6.5 daha düşük çıkmıştır. GFRP21-1 kirişine göre Maksimumu yük % 4.5, sehim %7.8 daha yüksek çıkmıştır (Tablo 6.10).

GFRP22-O/G kirişlerinin GFRP21-1 kirişine göre dayanımları ve yük taşıma kapasiteleri birbirine yakın çıkmıştır (Şekil 6.6).

Tablo 6.10. FRP21-1 kirişlerinin yük-sehim artışları

Karşılaştırma isimleri	İlk çatlak		Akma başlangıcı		Kırılma	
	Yük (%)	Sehim (%)	Yük (%)	Sehim (%)	Yük (%)	Sehim (%)
GFRP22-O/G-CFRP21-1	-5.8	-0.8	-4.7	-4.1	-2.8	41.0
GFRP22-O/G-GFRP21-1	4.6	30.1	3.4	-6.5	4.5	7.8



Şekil 6.6. Şahit kiriş, GFRP22-O/G ve FRP21-1 kirişlerine ait yük-sehim grafikleri

6.4.2. GFRP22-O/G ile FRP21-1 kirişlerinin süneklik oranlarının karşılaştırılması

Epoksi enjeksiyonu ile onarılan ve GFRP ile güçlendirilen kirişlerin süneklik oranları CFRP21-1 ve GFRP21-1 kirişlerine göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Onarımı ve güçlendirilmesi yapılan GFRP22-O/G kirişi sadece güçlendirme yapılan CFRP21-1 kirişine göre süneklik oranı %65.1, GFRP21-1 kirişine göre %13.9 daha yüksek çıkmıştır (Tablo 6.11).

Tablo 6.11. GFRP22-O/G ile FRP21-1 kirişlerinin karşılaştırmalı süneklik yüzdeleri

Karşılaştırma isimleri	Süneklik değişimi (%)
GFRP22-O/G-CFRP21-1	65.1
GFRP22-O/G-GFRP21-1	13.9

6.4.3. GFRP22-O/G ile FRP21-1 kirişlerinin enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması

GFRP22-O/G kirişlerin enerji yutma kapasitesinde CFRP21-1 ve GFRP21-1 kirişlere göre iyi sonuçlar elde edilmiştir. Güçlendirilen tüm kirişlerde tüketilen enerji ve yutulan enerji miktarları artma olmuştur. GFRP22-O/G kirişin enerji yutma kapasitesi, CFRP21-1 kirişine göre %74.8, GFRP21-1 kirişine göre %9 arttığı tespit edilmiştir. Epoksi enjeksiyonu ile onarma ve GFRP ile güçlendirmenin kirişin enerji yutma kapasitesini önemli bir şekilde artırdığı tespit edilmiştir (Tablo 6.12).

Tablo 6.12. GFRP22-O/G ile FRP21-1 kirişlerinin karşılaştırmalı enerji yutma kapasite yüzdeleri

Karşılaştırma isimleri	Yutulan enerji (%)
GFRP22-O/G-CFRP21-1	74.8
GFRP22-O/G-GFRP21-1	9.0

BÖLÜM 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; Türkiye'deki mevcut yapılarda yaygın olarak karşılaşılan ve güçlendirilmeye ihtiyaç duyulan betonarme elemanlardaki düşük dayanımlı betonlar dikkate alınmış ve bu tür elemanların güçlendirilmesinde CFRP kompozitler yerine GFRP kompozitlerin etkin bir şekilde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, deneyler üç farklı modelde kurgulanmıştır. İlk deney modelinde, üç farklı basınç dayanımında üretilen deney numuneleri, ikinci deney modelinde C16/20 kalitesinde üretilen betonarme kirişler ve üçüncü deney modelinde ise laboratuvar ortamında eğilme ve kesme hasarına uğratılmış betonarme kirişler CFRP ve GFRP ile güçlendirilerek test edilmiştir. Deney elemanlarının taşıma gücü, süneklikleri, deformasyon yapma ve enerji yutma kapasiteleri incelenmiştir. FRP'lerle güçlendirilen numunelerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve elemanların güçlendirilmesinde CFRP yerine daha ekonomik olan GFRP kompozitlerin kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen sonuç ve öneriler üç alt başlık altında özetlenmiştir. Birinci kısımda basınç elemanları üzerinde yapılan güçlendirme, ikinci kısımda eğilme elemanları üzerinde yapılan güçlendirme, üçüncü kısımda ise eğilme elemanları üzerinde yapılan onarım ve güçlendirme çalışmaları verilmiştir.

7.1. Basınç Elemanlarının Güçlendirilmesi

Bu çalışmada, üç farklı dayanım grubunda üretilen standart silindirik betonlar tek doğrultulu karbon ve cam kumaşlar ile güçlendirilerek sabit hızlı ve tekrarlı yüklemeler altında test edilmişlerdir. Bu deney sonuçlarından elde edilen verilere göre, cam ve karbon kullanılarak güçlendirilen betonların basınç dayanımları ve şekil değiştirme kapasitelerinde önemli artışlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

1. Türkiye'deki mevcut yapı stokunda bulunan beton dayanımı çok düşük olan betonlar dikkate alınarak ortalama basınç dayanımı yaklaşık 6.75 MPa olan Seri 1 (S1) beton numuneleri üretilmiştir. Bu numunelerden;
 - a) Bir kat karbon kumaş ile güçlendirilen (S1-CFRP1) betonların basınç dayanımındaki artış 4.61 kat, şekil değiştirme kapasitesindeki artış 7.28 kat,
 - b) Bir kat cam kumaş ile güçlendirilen (S1-GFRP1) betonların basınç dayanımındaki artış 2.99, şekil değiştirme kapasitesindeki artış 6.72 kat,
 - c) İki kat cam kumaş ile güçlendirilen (S1-GFRP2) betonların basınç dayanımındaki artış 4.56, şekil değiştirme kapasitesindeki artış 10.06 kat olmuştur.
 - d) İki kat GFRP ile güçlendirilen Seri 1 betonların (S1- GFRP2) basınç dayanımı bir kat CFRP ile güçlendirilen betonların (S1- GFRP1) basınç dayanımına oldukça yakın çıkmıştır. Diğer yandan GFRP ile güçlendirilen betonların deformasyon yapma kapasitesi ortalama %38.2 daha yüksek çıkmıştır.

Bu sonuçlar dikkate alındığında, Türkiye'deki mevcut yapı stokunda bulunan beton dayanımı çok düşük olan betonları tek kat CFRP yerine iki kat GFRP ile güçlendirerek daha iyi performans elde edilebileceği anlaşılmaktadır.

2. Türkiye'deki mevcut yapı stokunda yaygın olarak karşılaşılan beton dayanımı düşük betonlar dikkate alınarak ortalama basınç dayanımı yaklaşık 11 MPa olan Seri 2 (S2) beton numuneleri üretilmiştir. Bu numunelerden;
 - a) Bir kat karbon elyaf ile enine sarılarak güçlendirilen betonların (S2-CFRP1) basınç mukavemetindeki artış 3.23 kat, şekil değiştirme kapasitesindeki artış 7.17 kat,

- b) Bir kat cam kumaş sarılarak güçlendirilen betonların (S2-GFRP1) basınç mukavemetindeki artış 2.24 kat, şekil değiştirme kapasitesindeki artış 6.45 kat,
- c) Cam kumaş ile iki kat sarılarak güçlendirilen (S2-GFRP2) betonların basınç mukavemetindeki artış 3.61 kat, şekil değiştirme kapasitesindeki artış 10.52 kat olarak hesaplanmıştır.
- d) İki kat GRFP ile güçlendirilen Seri 2 betonlarıyla bir kat CFRP ile güçlendirilen Seri 2 betonları kıyaslandığında, GFRP betonlarının dayanımı CFRP betonlarına göre %11.8 daha yüksek çıkmıştır. GFRP betonlarının deformasyon yapma kapasitesi ise ortalama %46.6 daha yüksek çıkmıştır.

Bu sonuçlara göre, Türkiye'deki mevcut yapı stokunda yaygın olarak karşılaşılan beton dayanımı düşük olan betonlar dikkate alındığında; iki kat GFRP ile güçlendirilen betonların performanslarının bir kat CFRP ile güçlendirilen betonların performanslarına yakın olduğu belirlenmiştir.

3. Türk Deprem Yönetmeliği'nde (TDY) belirlenen minimum beton basınç dayanımı dikkate alınarak ortalama basınç dayanımı 20.82 MPa olan Seri 3 (S3) beton numuneleri üretilmiştir. Bu numunelerden;
 - a) Bir kat karbon kumaş ile güçlendirilen (S3-CFRP1) betonların basınç dayanımlarındaki artış 1.98 kat, şekil değiştirme kapasitesindeki artış 6.38 kat,
 - b) Bir kat cam kumaş ile güçlendirilen (S3-GFRP1) betonların basınç mukavemetindeki artış 1.41 kat, şekil değiştirme kapasitesindeki artış 4.79 kat,

- c) İki kat cam kumaş ile güçlendirilen (S3-GFRP2) betonların basınç mukavemetindeki artış 2.17 kat, şekil değiştirme kapasitesindeki artış 8.66 kat olarak hesaplanmıştır.
- d) İki kat GRFP ile güçlendirilen Seri 3 betonuyla bir kat CFRP ile güçlendirilen Seri 3 betonu kıyaslandığında, GFRP betonunun dayanımı CFRP betonuna göre % 9.5 daha yüksek çıkmıştır. GFRP betonunun deformasyon yapma kapasitesi ortalama %42.3 daha yüksek çıkmıştır.

Bu sonuçlara göre, Türk Deprem Yönetmeliği'nde (TDY) belirlenen minimum beton basınç dayanımı dikkate alındığında; iki kat GFRP ile güçlendirilen betonların performanslarının bir kat CFRP ile güçlendirilen betonların performanslarına yakın olduğu gösterilmiştir.

4. CFRP ve GFRP ile güçlendirilen betonlar yükleme durumunda göçme yüküne erişinceye kadar bütünlüğünü korumuş, karbon ve cam liflerin beton yüzeylerinden sıyrılmamış, beton lifler kopmaya başladıktan sonra kırılmıştır.
5. CFRP ve GFRP ile güçlendirilen Seri 1-2-3 betonları üzerinde yapılan yükleme boşaltma deneylerinde gerilme-deformasyon eğrisinin bir önceki eğrinin bittiği yerden devam ettiği görülmüştür. Sabit hızlı yükleme durumundaki basınç dayanım değeri ve deformasyon yapma kapasitelerinin benzer olduğu tespit edilmiştir. Her iki durumunda da kırılma anına kadar betonların bütünlüğünü koruduğu tespit edilmiştir.
6. Elde edilen sonuçlar GFRP kompozitlerin beton dayanımı düşük ve etriye adım mesafesi standartlara uygun olmayan betonarme kolonların güçlendirilmesinde etkin bir şekilde kullanılabileceğini açıkça ortaya koymuştur. Özellikle etriye mesafesi standartların çok üzerinde olan betonarme kolonların bu bölgedeki betonlarına kuşatma etkisi özelliği kazandırılarak betonun bütünlüğü korunmuş, boyuna donatıların burkulması engellenmiş, düşük dayanımlı betonun dayanımı ve sünekliği arttırılmış olacaktır.

7. Seri 1-2-3 betonlarından elde edilen sonuçlar ve daha ekonomik olması, yerli olarak üretiliyor olması, şekil değiştirme kapasitesinin daha yüksek olması gibi avantajlar da dikkate alındığında cam elyaf kompozitlerin alternatif bir güçlendirme elemanı olarak karbon elyaf yerine kullanılabilceği belirlenmiştir.

7.2. Eğilme Elemanlarının Güçlendirilmesi

Bu çalışmada; depremde hasar görmemiş ancak güçlendirilmeye ihtiyaç duyulan betonarme yapılarıdaki kirişler dikkate alınarak dikdörtgen kesitli kirişler laboratuvar ortamında $\frac{1}{2}$ ölçeğinde üretilmiştir. Güçlendirilen kirişlerin sargı bölgesinde etriye sıkılaştırılması yapılmamış, kesme ve eğilme taşıma gücü yetersiz tutulmuştur. Kirişler CFRP ve GFRP ile güçlendirilerek kirişlerin, eğilme ve kesme dayanımına, enerji yutma kapasitelerine ve süneklik oranlarına etkileri araştırılmıştır. betonarme kiriş numunelerinden elde edilen güçlendirme sonuçları karşılaştırılarak CFRP yerine GFRP'nin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yapılan çalışmada CFRP ve GFRP ile güçlendirilen kirişlerin yük taşıma kapasitelerinde önemli artışlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

1. FRP sargı katmanını artırıldığında kirişlerin yük taşıma kapasiteleri artmıştır ancak yük taşıma kapasitelerindeki artış sargı katmanındaki artışla aynı oranda olmadığı tespit edilmiştir.
2. CFRP ile bir kat boyuna, bir kat 90° enine sarılarak güçlendirilmiş kirişlerde (CFRP11) şahit kirişe göre ortalama yük taşıma kapasiteleri %155.9, CFRP ile iki kat boyuna, iki kat 90° enine sarılarak güçlendirilmiş kirişlerde (CFRP22) ortalama yük taşıma kapasiteleri %188.1, CFRP ile iki kat boyuna, bir kat 90° enine, bir kat 45° enine sarılarak güçlendirilmiş kirişlerde (CFRP21-1) ortalama yük taşıma kapasiteleri % 168.3 artmıştır. Yük taşıma kapasiteleri ve sargı kolaylığı dikkate alındığında CFRP22 şeklindeki güçlendirmenin daha avantaj sağlayacağı açıktır.
3. Şahit kirişe göre GFRP ile bir kat boyuna bir kat 90° enine sarılarak güçlendirilmiş kirişlerde (GFRP11) ortalama yük taşıma kapasiteleri %89.7, iki

kat boyuna, bir kat 90° enine sarılarak güçlendirilmiş kirişlerde (GFRP21) %136.1, iki kat boyuna, iki kat 90° enine sarılarak güçlendirilmiş kirişlerde (GFRP22) % 145 ve iki kat boyuna, bir kat 90° enine, bir kat 45° enine açılı olarak sarılarak güçlendirilmiş kirişlerde (GFRP21-1) %149.5 artmıştır. Yük taşıma kapasiteleri açısından GFRP21-1 ve GFRP22 şeklindeki güçlendirme daha uygun olduğu tespit edilmiştir. GFRP21-1 kirişinin sargısının zorluğu nedeni ile güçlendirme için GFRP22 daha uygun olacaktır.

4. GFRP ile güçlendirilen kirişler enerji yutma kapasiteleri açısından değerlendirildiğinde şahit kirişe göre; GFRP11 kirişlerinde enerji yutma kapasitesi %41.4, GFRP21 kirişlerinde enerji yutma kapasitesi ortalama %67.7, GFRP22 kirişlerinde enerji yutma kapasitesi ortalama %77.3, GFRP21-1 kirişlerinde enerji yutma kapasitesi ortalama %92.9 oranında artmıştır. GFRP kirişlerinde sargı miktarı arttıkça kirişin enerji yutma kapasitelerinin arttığı tespit edilmiştir. GFRP ile çeşitli şekillerde güçlendirilen kirişlerde en verimli sonucu GFRP22 ve GFRP21-1 vermiştir.
5. CFRP ile güçlendirilen kirişler enerji yutma kapasiteleri açısından değerlendirildiğinde şahit kirişe göre; CFRP11 kirişlerinde enerji yutma kapasitesi %50.5 oranında artış, CFRP22 kirişlerinde enerji yutma kapasitesi ortalama %36.3 oranında artış, CFRP21-1 kirişlerinde enerji yutma kapasitesi ortalama % 20.3 oranında artmıştır. CFRP kirişlerinde sargı miktarı arttıkça yük taşıma kapasitesi artmasına rağmen kirişin enerji yutma kapasitesi düşmektedir. Enerji yutma kapasitesi açısından iyi sonuç CFRP11 şeklinde güçlendirilen kirişlerde elde edilmiştir.
6. GFR21, GFRP22 ve GFRP21-1 şeklide yapılan güçlendirmelerin CFRP ile yapılan güçlendirmelere göre kısmen dayanımları düşük olsa da sünekliği, enerji yutma kapasiteleri daha yüksektir.
7. FRP kompozitlerle gücendirilen kirişlerin sargı miktarı arttıkça dayanım artmasına rağmen kirişlerin süneklik oranları düşmektedir. Ancak GFRP kirişlerin süneklik kaybı CFRP kirişlerinden daha az olmuştur.

8. Kirişlerle ilgili yapılan güçlendirme çalışmalarında FRP sargı katmanı arttıkça kiriş yan yüzeylerinden FRP betonu kopararak ayrıldığı görülmüştür. Kiriş yan yüzeylerine ankraj uygulaması yapılarak FRP'nin ayrılmasını önlenebilir.
9. Deneysel çalışmaların zorluğu ve zaman alması dikkate alındığında, yapılan çalışmalar nümerik modellerle doğrulanarak farklı beton sınıfları ve lif çeşitleri için geliştirilebilir.

7.3. Eğilme Elemanlarının Onarım ve Güçlendirilmesi

Bu bölümde; eğilme ve kesme hasarlarına uğramış olan betonarme kirişlerin onarımı ve güçlendirilmesi amaçlanmıştır. Laboratuvar ortamında eğilme hasarına uğratılan iki adet betonarme kiriş epoksi enjeksiyonu ile onarılmış ve GFRP ile sarılarak güçlendirilmeye çalışılmıştır. Hasar gören kirişler daha önceki çalışmalar ışığında GFRP ile iki kat enine ve iki kat boyuna sarılarak güçlendirilmiş kirişin eğilme ve kesme dayanımına, enerji yutma kabiliyetlerine, süneklik düzeylerine etkileri araştırılmıştır. GFRP sarılarak güçlendirilen betonarme kiriş numunelerinden elde edilen sonuçlar şahit kirişlerle, CFRP ile yapılan güçlendirmelerle ve GFRP ile yapılan güçlendirmelerle karşılaştırılarak hasar görmüş kirişlerin GFRP ile güçlendirilebilirliği araştırılmıştır. Onarım ve güçlendirilmesi yapılan GFRP22-O/G kirişin, CFRP ve GFRP ile güçlendirilen hasarsız kirişlerin yük taşıma, enerji yutma kapasitelerinde önemli artışlar oluşturur. Deneysel çalışmadan elde edilen bulgulara göre;

1. Epoksi enjeksiyonu ile onarılan ve GFRP ile güçlendirmenin kirişin (GFRP22-O/G) kirişinin şahit kirişe göre akma yükü %84.8, akma yüküne karşılık gelen sehim ise %38.2 artmıştır. GFRP22-O/G kirişinin yük taşıma kapasitesi %160.8 artmış ve kırılma yüküne karşılık gelen sehim benzerlik göstermektedir. Epoksi enjeksiyonu ile onarma ve GFRP ile güçlendirme kirişin enerji yutma kapasitesini önemli bir şekilde artırdığı tespit edilmiştir. GFRP22-O/G kirişinin enerji yutma kapasitesindeki artış yaklaşık %110 civarındadır. GFRP22-O/G kirişinin yük taşıma ve enerji yutma kapasitelerinde önemli artışlar olmasına rağmen süneklik düzeyi şahit kirişe göre %28.3 oranında düşmüştür.

2. GFRP22-O/G kirişlerinin CFRP11 kirişine göre yük taşıma kapasiteleri birbirine yakın çıkmıştır. Ancak kırılma yüküne karşılık gelen sehim %20.6 daha yüksek çıkmıştır. GFRP22-O/G kirişin enerji yutma kapasitesi CFRP11 kirişine göre %39.7, sünekliği %26.4 daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir.
3. GFRP22-O/G kirişlerinin GFRP11 kirişine göre dayanımları ve enerji yutma kapasitesi ve sünekliği daha yüksek çıkmıştır. GFRP22-O/G kirişi GFRP11 kirişine göre akma yükü %21.6, akma yüküne karşılık sehim %12.6 daha yüksek çıkmıştır. GFRP11 kirişine göre kırılma yükü %37.5, sehim %5.7 daha yüksek çıkmıştır. Onarım ve güçlendirilmesi yapılan kirişin enerji yutma kapasitesi %48.7, sünekliği %6.2 daha yüksek çıkmıştır. Hasar görmüş kiriş epoksi enjeksiyonu ile onarılıp GFRP ile iki kat enine ve boyuna güçlendirilmesi bir kat GFRP11 şeklindeki güçlendirmeye göre daha yüksek performans sergilemiştir.
4. Onarım ve güçlendirilmesi yapılan GFRP22-O/G kirişinin yük taşıma ve deformasyon yapma kabiliyeti GFRP21 kirişine göre daha yüksek çıkmıştır. GFRP22-O/G kirişi GFRP21 kirişine göre akma yükü ve sehim davranışı benzer çıkmıştır. Ancak GFRP22-O/G kirişinin kırılma yükü %10.5, kırılma yüküne karşılık gelen sehim %10.3 daha yüksektir. GFRP22-O/G kirişin enerji yutma kapasitesi %25.4, sünekliği %21.5 daha yüksek çıkmıştır.
5. GFRP22-O/G kirişlerinin GFRP21-1 kirişine göre dayanımları ve yük taşıma kapasiteleri birbirine yakın çıkmıştır. GFRP21-1 kirişine göre kırılma yükü %4.5, sehim %7.8 daha yüksek çıkmıştır. GFRP22-O/G kirişlerin enerji yutma kapasiteleri %9 sünekliği ise %13.9 daha yüksek çıkmıştır. Aynı şekilde güçlendirilen CFRP21-1 kirişiyle yük sehim davranışları benzer çıkmış, ancak kırılma yüküne sehim %41 oranında daha yüksek çıkmıştır. GFRP22-O/G kirişin enerji yutma kapasitesi, CFRP21-1 kirişine göre %74.8, sünekliği %65.1 daha yüksek çıkmıştır. GFRP22-O/G kirişlerinin GFRP21-1 ve CFRP21-1 kirişlerine göre dayanımları kısmen daha düşük olsa da kopma uzamasını ve enerji yutma kapasitesini önemli bir şekilde artırdığı tespit edilmiştir.

6. GFRP22-O/G kirişlerinin GFRP21-1 kirişine göre dayanımları ve yük taşıma kapasiteleri birbirine yakın çıkmıştır. GFRP21-1 kirişine göre kırılma yükü % 4.5, sehim %7.8 daha yüksek çıkmıştır. GFRP22-O/G kirişlerin enerji yutma kapasiteleri %9 sünekliği ise %13.9 daha yüksek çıkmıştır. Aynı şekilde güçlendirilen CFRP21-1 kirişiyle yük sehim davranışları benzer çıkmış, ancak kırılma yüküne sehim %41 oranında daha yüksek çıkmıştır. GFRP22-O/G kirişin enerji yutma kapasitesi, CFRP21-1 kirişine göre %74.8, sünekliği %65.1 daha yüksek çıkmıştır. GFRP22-O/G kirişlerinin GFRP21-1 ve CFRP21-1 kirişlerine göre dayanımları kısmen daha düşük olsa da kopma uzamasını ve enerji yutma kapasitesini önemli bir şekilde artırdığı tespit edilmiştir.
7. GFRP22-O/G kirişlerinin GFRP22 kirişine göre dayanımları ve yük taşıma kapasiteleri benzerlik göstermektedir. GFRP22-O/G kirişinin GFRP22 kirişine göre kırılma yükü %6.5, sehim %4.7 daha yüksek çıkmıştır. GFRP22-O/G kirişin enerji yutma kapasitesi %18.6, süneklik oranı %12.4 daha yüksek çıkmıştır.
8. GFRP22-O/G kirişi CFRP22 kirişi ile karşılaştırıldığında akma yükü %18.6, akma yüküne karşılık sehim %16.7 daha düşük çıkmıştır. CFRP22 kirişine göre kırılma yükü %9.5 daha düşük, sehim %41.9 daha yüksek çıkmıştır. GFRP22-O/G kirişlerinin CFRP22 kirişlerine göre dayanımları kısmen daha düşük olsa da kopma uzamaları daha yüksek çıkmıştır. CFRP22 kirişine göre enerji yutma kapasitesi %54.3, süneklik oranı %85.5 daha yüksek çıkmıştır.
9. Epoksi enjeksiyonu ile onarılan ve GFRP ile güçlendirilen kirişlerin, aynı sarım şekli ile güçlendirilen CFRP22 ve GFRP22 kirişlerinin süneklik oranları ile benzer çıkmıştır.
10. Elde edilen sonuçlar ile onarılan hasarlı betonarme kirişlerin GFRP ile etkili bir şekilde güçlendirilebileceği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

ADHIKARY, B. B., MUTSUYOSHI, H., Behavior of concrete beams strengthened in shear with carbon-fiber sheets, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, May-June, 258-264, 2004.

AKBARZADEH H., MAGHSOUDI A. A., Flexural strengthening of RC continuous beams using hybrid FRP sheets, CICE 2010 - The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, China, September 27-29, 2010,.

ALMUSALLAM T. H., Load–deflection behavior of RC beams strengthened with GFRP sheets subjected to different environmental conditions Original Research Article, *Cement and Concrete Composites*, Volume 28, Issue 10, November, 879-889, 2006.

ARSLAN, M.H., KORKMAZ, H.H., What is to be learned from damage and failure of reinforced concrete structures during recent earthquakes in Turkey?, *Engineering Failure Analysis*, 14 (1), p.1-22, Jan 2007.

ATTARI N., AMZIANE S., CHEMROUK M., Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets *Construction and Building Materials* 37, 746–757, 2012.

CELEBI E., AKTAS M., CAGLAR N., OZOCAK A., KUTANIS M., MERT N., OZCAN Z., October 23, 2011 Turkey/Van–Ercis earthquake: structural damages in the residential buildings, *Natural Hazard*, Vol. 64 , DOI: 10.1007/s11069-012-0478-9 , November, 2012.

CHAJES, M. J., JANUSZKA, T. F., MERTZ, D. R., THOMSON, JR., T. A. AND FINCH, JR., W. W., Shear strengthening of reinforced concrete beams using externally applied composite fabrics, *ACI Structural Journal*, 92 (3): 295-303, 1995.

COLE, C., BELARBI, A., Confinement characteristics of rectangular FRP-jacketed RC columns, proceedings of the fifth international symposium on fiber reinforced polymer for reinforced concrete structures (FRPRCS-5), Cambridge, UK, July 16-18, 823-832, 2001.

DIAGANA, C., LI, A., GEDALIA, B., DELMAS, Y, Shear strengthening effectiveness with CFF strips, *Engineering Structures*, 25: 507-516, 2003.

DOĞANGÜN A., Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl Earthquake in Turkey, *Engineering Structures*, 26 (6), 841-856, May 2004.

ESFAHANI, M., KIANOUSH, M., TAJARI, A., Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets, *Engineering Structures*, 29, 2428–2444, 2007.

FURUTA, T., KANAKUBO, T., AND FUKUYAMA, H., Evaluation of shear capacity of RC columns strengthened by continuous fiber, 6th FRPRCS conference, Singapore, China, July 8-10, 2003.

GARDEN, H.N., HOLLAWAY, L.C., An experimental study of the influence of plate end anchorage of carbon fibre composite plates used to strengthen reinforced concrete beams, *Composite Structures*, Vol. 42, pg: 175-188, 1998.

GHOBARAH, A., GALAL, K.E., Seismic rehabilitation of short rectangular RC columns, *Journal of Earthquake Engineering*. 8(1), 45-68, 2003.

HUA WEI, ZHIMIN WU, XIA GUO, FUMIN YI, Experimental study on partially deteriorated strength concrete columns confined with CFRP, *Engineering Structures*, 31 2495-2505, 2009.

ILKİ, A., BEDİRHANOĞLU, I., BASEGMEZ, I.H., DEMİR, C, KUMBASAR, N., Shear retrofit of low strength reinforced concrete short columns with GFRP composites, *The 3rd International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Miami, Florida, 2006.

KHALIFA, A., NANNI, A., Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites, *Cement & Concrete Composites*, 22: 165-174 (2000).

KHALIFA, A., GOLD, W.J., NANNI, A., ABDEL AZIZ, M.I., Contribution of externally bonded FRP to shear capacity of flexural members, *ASCE, Journal of Composites for Construction*, 2(4), 195-203, 1998.

KHALIFA, A., NANNI, A., Rehabilitation of rectangular simply supported RC beams with shear deficiencies using CFRP composites, *Construction and Building Materials*, 16: 135-146, 2002.

LAM L., TENG J.G., CHEUNG C.H., XIAO Y., FRP-confined concrete under axial cyclic compression *Cement and Concrete Composites*, 28 949–958, 2006.

LI, A., DIAGANA, C. AND DELMAS, Y, CFRP contribution to shear capacity of strengthened RC beams, *Engineering Structures*, 23: 1212-1220, 2001.

MACHIDA, A., MARUYAMA, K., Design code development for fibre-reinforced polymer structures and repairs new materials in construction, 4, 149-160, 2002.

MOOCHUL SHIN, BASSEM ANDRAWES, Experimental investigation of actively confined concrete using shape memory alloys, *engineering structures* 32, 656-664, 2010.

NORRIS, T., SAADATMANESH, H.; EHSANI, M. R., Shear and flexural strengthening of R/C beams with carbon fiber sheets,, Journal of Structural Engineering, 123 (7): 903-911, 1997.

RAHIMI, H., HUTCHINSON, A., Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates, J. Compos. for Constr., Vol:5, Issue 1, pg:44-56, 2001.

RICHART, F.E., BRANDTZAEG, A., BROWN, R.L., A study of the failure of concrete under combined compressive stresses Engineering Experimental Station, University of Illinois, Bulletin no 185, 1928.

SAADATMANESH, H., EHSANI, M. R., ‘‘RC beams strengthened with GFRP plates, I: Experimental study, J. Engineering Structures, ASCE, Vol: 117(11), 3417–3433, 1991.

SEZEN, H., WHITTAKER A.S., ELWOOD, K.J., MOSALAM, K.M., Performance of reinforced concrete buildings during the August 17, 1999 Kocaeli, Turkey earthquake, and seismic design and construction practice in Turkey, Engineering Structures, 25 (1), 103-114, Jan 2003.

SUNDARRAJA M.C., RAJAMOHAN S., Strengthening of RC beams in shear using GFRP inclined strips – An experimental study, Construction and Building Materials 23, 856–864, 2009.

TÂLJSTEN, B., ELFGREN., L., Strengthening concrete beams for shear using CFRP-materials: evaluation of different application methods, Composites Part B: Engineering, 31: 87-96, 2000.

TÂLJSTEN, B., Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets, Construction and Building Materials, 17, 15-26, 2003.

TDY- 2007, Afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkında yönetmelik, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 130, 150-154, 2007.

TENG, J.G., LAM, L., AND CHEN, J.F., shear strengthening of RC beams with FRP composites, New Materials In Construction 6, 173-184, 2004.

TRIANAFILLOU, T. C, Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites,, ACI Structural Journal, 95 (2): 107-115, 1998.

TRIANAFILLOU, T.C., Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites, ACI Structural Journal, 95(2), 107-115, 1998.

TS 3529, Beton agregalarında birim ağırlıklarının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1980.

TS 3530 EN 933-1, Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımı tayini- Eleme metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1999.

TS 500, Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.

TS 708, Beton çelik çubukları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1985.

TS 802, Beton karışımı hesap esasları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1985

TS EN 1008, Beton - Karma suyu - Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2003

TS EN 197-1 Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.

WEGIAN, F.M., ABDALLA, H.A., Shear capacity of concrete beams reinforced with fiber reinforced polymers, *Composite Structures*, 71: 130-138, 2005.

YE, L., YUE, Q., ZHAO, S., LI, Q., Shear strength of reinforced concrete columns strengthened with carbon-fiber-reinforced plastic sheet, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 128 (12), 1527-1534, 2002.

YOSHIMURA, K., KIKUCHI, K., KUROKI, M., OZAWA, K., MASUDA, Y., Experimental study on seismic behavior of RC short columns strengthened by carbon fiber sheets composite and hybrid structures, *Proceedings of the 6th ASCCS International Conference on Steel-Concrete Composite Structures*, Los Angeles, California, 927-934, 2000.

ZHANG, Z., AND HSU, C.T., Shear strengthening of reinforced concrete beams using carbon-fiber-reinforced polymer laminates, *ASCE Journal of Composites for Construction*, 9(2), 158-169, 2005.

ÖZGEÇMİŞ

Ali SARIBIYIK, 12.01.1982 Tarihinde Kahramanmaraş'ın Andırın İlçesi'nde doğdu. İlkokulu Kahramanmaraş'ta tamamladıktan sonra ortaokul ve lise eğitimini Adana'da tamamladı. 2006 yılında Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Yapı Eğitimi Bölümü'nden fakülte birincisi ve bölüm birincisi olarak mezun oldu. 2008 yılında Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı'nda yüksek lisansını tamamladı. Yüksek lisans döneminde Sakarya Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi'nde yürütülmekte olan Sera Tasarımında Pultruzyon Metoduyla Üretilen Cam Fiber Takviyeli Plastiklerin Kullanılması başlıklı Tübitak projesinde yardımcı personel olarak görev aldı. 2008 yılında Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora başladı. Aynı yıl içerisinde Düzce Üniversitesi, Düzce Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü'nde Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı ve halen görevini sürdürmektedir. Doktora döneminde Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde yürütülmekte olan Betonarme Kirişlerin Güçlendirilmesinde Cam Elyaf İle Karbon Elyaf Malzemelerin Karşılaştırılması başlıklı – BABK Projesinde araştırmacı olarak çalıştı.