T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LİFLİ POLİMERLE FARKLI BİÇİMLERDE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME PERFORMANSLARININ BELİRLENMESİ

İLKNUR DALYAN

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YAPI PROGRAMI

DANIŞMAN
PROF. DR. BİLGE DORAN

İSTANBUL, 2019

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LİFLİ POLİMERLE FARKLI BİÇİMLERDE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME PERFORMANSLARININ BELİRLENMESİ

İlknur DALYAN tarafından hazırlanan tez çalışması 11.01.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Bilge DORAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Bilge DORAN

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Yusuf AYVAZ

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. H. Orhun KÖKSAL

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi _____

Doç. Dr. Murat Serdar KIRÇIL

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Hakan ERDOĞAN

Kocaeli Üniversitesi _____

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün 2016-05-01-DOP06 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmam boyunca bilgi ve tecrübesiyle benden yardım ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Bilge DORAN'a, değerli görüşleriyle tezime verdiği katkılar için Sayın hocam Prof. Dr. H. Orhun KÖKSAL'a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Tezimin gelişmesinde değerli yorumlarıyla beni yönlendiren Sayın Hocam Prof. Dr. Yusuf AYVAZ'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamda bana yardımcı ve destek olan Dr. Öğr. Üyesi Selen AKTAN'a, İnş. Müh. Mehmet AYAYDIN'a, İnş. Yük. Müh. Barış ŞAHİN'e ve Ergün ATASOY'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamın her safhasında bana destek olan çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmada kullanılan CFRP kumaş, epoksi ve astar malzemelerin tedarik edildiği OTS İnşaat Mühendislik Mimarlık Danışmanlık Ar-Ge Yazılım San. Tic. Ltd. Şti.'ne teşekkür ederim.

Hayatım boyunca hep yanımda olan, her zaman beni destekleyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ocak, 2019

İlknur DALYAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ x

ŞEKİL LİSTESİ xi

ÇİZELGE LİSTESİ xvi

ÖZET xviii

ABSTRACT xxi

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 23
1.3 Hipotez 25

BÖLÜM 2

LİF TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT MALZEMELER 27

2.1 Lif Takviyeli Polimer Kompozit Malzemenin Bileşenleri 27
2.1.1 Lifler 27
2.1.2 Matris 29
2.2 FRP Kompozit Malzemelerin Fiziksel Özellikleri 30
2.2.1 Yoğunluk 30
2.2.2 Elastisite Modülü 31
2.2.3 Poisson Oranı 31
2.2.4 Isıl Genleşme Katsayısı 32
2.2.5 Yüksek Sıcaklığın Etkisi 32
2.3 FRP Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri 32
2.3.1 Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkisi ve Çekme Dayanımı 32
2.4 FRP Kompozit Malzemenin Zamana Bağlı Davranışı 33
2.4.1 Sünme kopması 33

2.4.2 Yorulma 34
2.5 Dayanıklılık 34
2.6 FRP Kompozit Malzemelerin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı 34

BÖLÜM 3

FRP KOMPOZİT MALZEME İLE GÜÇLENDİRME 40

3.1 Betonarme Yapı Elemanlarının FRP ile Güçlendirilmesi 41
3.1.1 Kirişlerin Eğilme Güçlendirilmesinde FRP Kullanımı 42
3.1.2 Kirişlerin Kesme Güçlendirilmesinde FRP Kullanımı 43
3.1.3 Döşemelerin Eğilme Güçlendirilmesinde FRP Kullanımı 44
3.1.4 Kolonların Güçlendirilmesinde FRP Kullanımı 45
3.2 FRP ile Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Göçme Biçimleri 47

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMA 52

4.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemelerin Özelikleri 52
4.1.1 Beton 52
4.1.2 Donatı 56
4.1.3 Astar, Epoksi ve CFRP 58
4.2 Deney Kirişlerinin Üretimi 61
4.3 Deney Kirişlerinin Güçlendirilmesi 63
4.3.1 Deney Düzeneği 68
4.3.1.1 Yükleme Düzeneği 68
4.3.1.2 Ölçüm Düzeneği 68
4.4 Deney Sonuçları 69
4.4.1 1. Grup Deney Kirişleri 71
4.4.1.1 K20R Deney Kirişi 71
4.4.1.2 K20KG00 Deney Kirişi 72
4.4.1.3 K20KG50 Deney Kirişi 72
4.4.1.4 K20KGU Deney Kirişi 73
4.4.2 2. Grup Deney Kirişleri 74
4.4.2.1 K40R Deney Kirişi 74
4.4.2.2 K40KG00 Deney Kirişi 75
4.4.2.3 K40KG70 Deney Kirişi 76
4.4.2.4 K40KGU Deney Kirişi 77

BÖLÜM 5

SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ VE AKMA KRİTERLERİ 79

5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi 79
5.2 Elasto- Plastik Analiz İçin Akma/Kırılma Kriterleri 83
5.2.1 Rankine Kriteri 87
5.2.2 Kayma Gerilmesi Kriteri (Tresca ve von Mises) 88
5.2.3 Mohr-Coulomb Kriteri 94

5.2.4 Drucker-Prager Kriteri 96
5.3 İzotropik Hasar Modeli 98
5.4 Önerilen Sanal Malzeme Modeli 102
5.5 Elasto-plastik Hasar Yaklaşımı 103

BÖLÜM 6

SAYISAL MODEL SONUÇLARI VE İRDELEMELER 109

6.1 Literatürden Seçilen Kiriş Örnekleri için Sayısal İrdelemeler 109
6.2 Deney Kirişlerine Ait Üç Boyutlu Sayısal Modelleme 117
6.2.1 Deney Kirişlerinin Önerilen Bünyesel Modelleme Tekniği ile Sayısal Analizi 117
6.2.2 Sonuçların Karşılaştırılması 121
6.2.2.1 K20R Deney Kirişi 122
6.2.2.2 K20KG00 Deney Kirişi 123
6.2.2.3 K20KG50 Deney Kirişi 127
6.2.2.4 K20KGU Deney Kirişi 130
6.2.2.5 K40R Deney Kirişi 134
6.2.2.6 K40KG00 Deney Kirişi 135
6.2.2.7 K40KG70 Deney Kirişi 138
6.2.2.8 K40KGU Deney Kirişi 141

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER 145

KAYNAKLAR 150

ÖZGEÇMİŞ 161

SİMGE LİSTESİ

A	Malzeme parametresi
A	Hasar görmüş kesit alanı
c	Kohezyon
d	Hasar değişkeni
$d_{\max}$	Maksimum agrega çapı
E	Elastisite modülü
f_c	Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_t	Betonun çekme dayanımı
f_y	Çeliğin akma dayanımı
G_f	Kırılma enerjisi
h	Sonlu eleman boyutu
I_1	Gerilme tensörünün hidrostatik bileşeni
J_2	Gerilme tensörünün ikinci invaryantı
J_3	Gerilme tensörünün üçüncü invaryantı
k	Malzeme sabiti
L	Kirişin mesnetler arasındaki uzunluğu
N_i	Doğrusal hexahedral elemandaki *i* düğüm noktasının şekil fonksiyonu
p_{ij}	Küresel gerilme tensörü
$R_{e,act}$	Gerçek akma dayanımı değeri
R_e	Çeliğin akma dayanımı
$R_{e,nom}$	Belirtilmiş akma dayanımı değeri
R_m	Çeliğin çekme dayanımı
S_{ij}	Deviyatorik gerilme tensörü
S_1, S_2, S_3	Deviyatorik gerilmeler
S_1, σ_1	1 doğrultusundaki asal gerilme
S_2, σ_2	2 doğrultusundaki asal gerilme
S_3, σ_3	2 doğrultusundaki asal gerilme
t_f	FRP malzemesinin kalınlığı

u_i	Doğrusal hexahedral elemandaki *i* düğüm noktasının x doğrultusundaki yer değiştirmesi
v_i	Doğrusal hexahedral elemandaki *i* düğüm noktasının y doğrultusundaki yer değiştirmesi
w_i	Doğrusal hexahedral elemandaki *i* düğüm noktasının z doğrultusundaki yer değiştirmesi
ξ,η,ζ	Doğal koordinat sistemi bileşenleri
σ_m	Ortalama normal gerilme
δ_{ij}	Kronecker deltası
σ_{oct}	Oktahedral normal gerilme
τ_{oct}	Oktahedral kayma gerilmesi
φ	Malzemenin içsel sürtünme açısı
α	Malzeme sabiti
σ	Nominal gerilme
$\overline{\sigma}$	Asal gerilme
ε	Birim şekil değiştirme
τ^*	Başlangıç hasar eşiği
η	Hasar modeli malzeme parametresi
ε_{rup}	FRP'nin kopma yırtılma birim şekil değiştirmesi
σ_{ij}	Gerilme tensörü

KISALTMA LİSTESİ

ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
AFRP	Aramid Lif Takviyeli Polimer
BRS2	İki Düğüm Noktalı Çubuk Eleman
CFRP	Karbon Lif Takviyeli Polimer
DP	Drucker-Prager
EP	Elasto Plastik
EPD	Elasto-plastik Hasar
FEM	Sonlu Eleman Methodu
FRP	Lif Takviyeli Polimer
GFRP	Cam Lif Takviyeli Polimer
HX8M	Sekiz Düğüm Noktalı Altı Yüzlü Eleman
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MC	Mohr-Cloumb
NLFEA	Doğrusal Olmayan Sonlu Eleman Analizi
QTS4	Dört Düğüm Noktalı Kabuk Eleman

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Kırpılmış karbon lif [53] 28
Şekil 2. 2 Kırpılmış cam lif [56] 28
Şekil 2. 3 Aramid lif [58] 29
Şekil 2. 4 Liflerin eğim açısının bir fonksiyonu olarak poisson oranı [63] 32
Şekil 2. 5 FRP kompozit ve bileşenlerinin gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi [66] . 33
Şekil 2. 6 CFRP, GFRP ve AFRP kumaş [78] 37
Şekil 2. 7 Yapısal güçlendirmede kullanılan ticari olarak temin edilebilen çeşitli FRP sistemleri [77] 37
Şekil 2. 8 FRP ve çeliğin gerilme birim şekil değiştirme eğrisi [42] 39
Şekil 3. 1 Betonarme kirişte eğilme (ve kesme) güçlendirmesi [54] 42
Şekil 3. 2 Döşemenin CFRP kumaş ile güçlendirilme uygulaması [54] 44
Şekil 3. 3 Tek yönlü döşemelerde FRP ile güçlendirme a-görünüş b- kesit [83] 45
Şekil 3. 4 İki yönlü döşemede FRP ile güçlendirme a-döşeme alt yüzeyi b- kesit [83] 45
Şekil 3. 5 Kolonlarda FRP sargı uygulaması [54] 46
Şekil 3. 6 Betonarme kolonlarda FRP güçlendirme yöntemleri a- kumaş ile sargılama b- şeritler ile kısmi sargılama c- prefabrike manto d- spiral halkalar e- otomatik sargı f- reçine infizyonu [83] 47
Şekil 3. 7 FRP ile güçlendirilmiş kirişlerde göçme biçimleri (a) Betonun ezilmesi (b) FRP'nin kopması (c) kesme göçmesi [54] 49
Şekil 3. 8 Sıyrılma göçme tipleri [95] 50
Şekil 4. 1 Hazırlanan küp ve silindir beton numuneleri 53
Şekil 4. 2 Beton basınç dayanım deneyi 53
Şekil 4. 3 Silindir beton numune deneyi 55
Şekil 4. 4 Silindir beton numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği 55
Şekil 4. 5 Silindir beton numunelerin elastisite modülü tayini 56
Şekil 4. 6 Çelik çekme deney düzeneği 57
Şekil 4. 7 Astar malzemesi 58
Şekil 4. 8 Epoksi katkılı yapıştırıcı malzeme 58
Şekil 4. 9 Karbon lif takviyeli polimer kumaş 60
Şekil 4. 10 Deney kirişlerinin geometrik özellikleri ve donatı planı 61
Şekil 4. 11 Betonarme kirişler için hazırlanan donatı ağları 62
Şekil 4. 12 Donatı ağının kalıba yerleştirilmesi 62
Şekil 4. 13 Kalıplara beton dökülmesi 63

Şekil 4. 14 Deney kirişlerinin hazırlanması a)kirişlerin zımparalanması b) kiriş üzerindeki tozların temizlenmesi c) kiriş yüzeyine astar uygulaması 64
Şekil 4. 15 Deney kirişlerine CFRP uygulaması a) kiriş yüzeyine epoksi uygulaması b) CFRP malzemenin yapıştırılması 64
Şekil 4. 16 Deney kirişlerinin güçlendirme biçimleri 66
Şekil 4. 16 Deney kirişlerinin güçlendirme biçimleri (devamı) 66
Şekil 4. 17 Deney düzeneği 68
Şekil 4. 18 Deney kirişinde LVDT yerleşimi 68
Şekil 4. 19 Veri toplama sistemi 69
Şekil 4. 20 1. Grup deney kirişlerinin yük yer değiştirme eğrileri 69
Şekil 4. 21 2. Grup deney kirişlerinin yük yer değiştirme eğrileri 70
Şekil 4. 22 K20R deney kirişinin yük-yer değiştirme eğrisi 71
Şekil 4. 23 K20R deney kirişinin göçme mekanizması 71
Şekil 4. 24 K20KG00 deney kirişinin yük-yer değiştirme eğrisi 72
Şekil 4. 25 K20KG00 deney kirişinin göçme mekanizması 72
Şekil 4. 26 K20KG50 deney kirişinin yük-yer değiştirme eğrisi 73
Şekil 4. 27 K20KG50 deney kirişinin göçme mekanizması 73
Şekil 4. 28 K20KGU deney kirişinin yük-yer değiştirme eğrisi 74
Şekil 4. 29 K20KGU deney kirişinin göçme mekanizması 74
Şekil 4. 30 K40R deney kirişinin yük-yer değiştirme eğrisi 75
Şekil 4. 31 K40R deney kirişinin göçme mekanizması 75
Şekil 4. 32 K40KG00 deney kirişinin yük-yer değiştirme eğrisi 76
Şekil 4. 33 K40KG00 deney kirişinin göçme mekanizması 76
Şekil 4. 34 K40KG70 deney kirişinin yük-yer değiştirme eğrisi 77
Şekil 4. 35 K40KG70 deney kirişinin göçme mekanizması 77
Şekil 4. 36 K40KGU deney kirişinin yük-yer değiştirme eğrisi 78
Şekil 4. 37 K40KGU deney kirişinin göçme mekanizması 78
Şekil 5. 1 Aynı sisteme ait farklı boyutlarda sonlu eleman ağları [111] 80
Şekil 5. 2 Bir, iki ve üç boyutlu sonlu eleman örnekleri, a) Bir boyutlu çubuk eleman, b) İki boyutlu dikdörtgen eleman, c) İki boyutlu üçgen eleman, d) Üç boyutlu dikdörtgen prizma (tuğla) eleman [114] 81
Şekil 5. 3 Doğrusal hexahedral eleman [115] 82
Şekil 5. 4 Basınç altındaki beton için elastoplastik idealizasyon [118] 84
Şekil 5. 5 Yükleme ve boşaltma durumlarında akma yüzeyi [118] 85
Şekil 5. 6 Oktahedral gerilme düzlemleri [122] 86
Şekil 5. 7 Rankine maksimum asal gerilme kriteri (a) meridyen düzlemde, $(\theta = 0^{\circ})$; (b) π düzleminde [118] 88
Şekil 5. 8 π düzleminde Tresca akma gerilmesi yüzeyi [116] 90
Şekil 5. 9 İki eksenli gerilme uzayında Tresca akma gerilmesi yüzeyi [129] 90
Şekil 5. 10 Akma yüzeyi ile $\sigma_x - \tau_{xy}$ düzleminin kesişimi [118] 93
Şekil 5. 11 von Mises ve Tresca akma yüzeyleri [133] 94
Şekil 5. 12 Mohr-Cloumb kriteri (a) asal gerilme uzayında (b) π düzleminde [133] 95
Şekil 5. 13 Drucker-Prager ve Mohr Coulomb akma yüzeyi [125] 97
Şekil 5. 14 Druker-Prager kriteri (a) meridyen düzlemi (b) π düzlemi [135] 98
Şekil 5. 15 Tek boyutlu hasar modeli-efektif gerilmenin yorumlanması [139] 99
Şekil 5. 16 Hasar modeli için tek eksenli gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi [31] ... 100

Şekil 5. 17 Önerilen hasar fonksiyonu için hesaplanan eğriler $\left(f_t = 0,495\ \mathrm{MPa} \right)$ 100
Şekil 5. 18 Hasar seviyesinin belirlenmesi için önerilen hasar fonksiyonu (*M*) 101
Şekil 5. 19 Çatlak önü bölgesi genişliği [145], [146] 101
Şekil 5. 20 Betonarme bir kirişin eğilme altında tipik yük-yer değiştirme davranışı [30] 103
Şekil 5. 21 (a) Betonarme kiriş için elastoplastik model tahmini (b) rijitliği azaltılmış zayıf kiriş için elastoplastik model tahmini [30] 104
Şekil 5. 22 Bir betonarme kirişin eğilme davranışı için izotropik hasar modellerinin tahmini [30] 105
Şekil 5. 23 a) von Mises, b) geliştirilmiş von Mises akma kriteri [30] 105
Şekil 5. 24 a) Beton ve CFRP için HX8M katı eleman b) çelik donatı için BRS2 çubuk eleman 108
Şekil 5. 25 CFRP kumaşın seyrek sonlu elemanlı modeli 108
Şekil 5. 26 CFRP kumaşın sık sonlu elemanlı modeli 108
Şekil 5. 27 CFRP kumaşın sonlu eleman analizlerinden elde edilen yük-yer değiştirme eğrisi 108
Şekil 6. 1 BFS-1 kirişi güçlendirme biçimi ve kesiti [4] 111
Şekil 6. 2 BFS-1 kirişinin göçme mekanizması [4] 111
Şekil 6. 3 BFS-1 kirişinin sonlu eleman modeli 111
Şekil 6. 4 BFS-1 kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme ilişkileri 112
Şekil 6. 5 B6-16D-1L10 kiriş detayları [3] 112
Şekil 6. 6 B6-16D-1L10 kirişinin sonlu eleman modeli 113
Şekil 6. 7 B6-16D-1L10 kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme ilişkileri 113
Şekil 6. 8 E3 kirişi güçlendirme biçimi [150] 114
Şekil 6. 9 E3 kirişinin sonlu eleman modeli 114
Şekil 6. 10 E3 kirişinin sonlu deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme ilişkileri . 114
Şekil 6. 11 Y.044 kirişi için deney düzeneği [152] 115
Şekil 6. 12 Y.044 deney kirişinin donatı detayı ve kesit boyutları [152] 115
Şekil 6. 13 Y.044 kirişinin sonlu eleman modeli 116
Şekil 6. 14 Y.044 kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme ilişkileri 116
Şekil 6. 15 1. Grup deney kirişlerine ait deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri 120
Şekil 6. 16 2. Grup deney kirişlerine ait deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri 121
Şekil 6. 17 (a) K20R deney kirişinin sayısal modeli (b) 2 boyutlu kesiti 122
Şekil 6. 18 K20R deney kirişinin gerilme birim şekil değiştirme grafiği 122
Şekil 6. 19 K20R deney kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri 123
Şekil 6. 20 (a) K20KG00 deney kirişinin sayısal modeli (b)2 boyutlu kesiti 123
Şekil 6. 21 K20KG00 deney kirişinin gerilme birim şekil değiştirme grafiği 124
Şekil 6. 22 K20KG00 deney kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri 124
Şekil 6. 23 K20KG00 deney kirişinde CFRP kumaşın sıyrıldığı ve koptuğu noktalar 125

Şekil 6. 24 K20KG00 deney kirişinde CFRP malzemedeki açıklık ortası birim şekil değiştirmenin max. 0,008 olduğu durumdaki birim şekil değiştirme dağılımı 126
Şekil 6. 25 K20KG00 deney kirişinde deneyde elde edilen maksimum yükün sayısal analizde karşı geldiği analiz adımındaki CFRP malzemedeki birim şekil değiştirme dağılımı..... 126
Şekil 6. 26 K20KG00 deney kirişinde hesapla bulunan G_f değerine karşılık gelen sayısal analiz adımında CFRP kumaşın birim şekil değiştirme dağılımı..... 126
Şekil 6. 27 (a) K20KG50 deney kirişinin sayısal modeli (b)2 boyutlu kesiti 127
Şekil 6. 28 K20KG50 deney kirişinin gerilme birim şekil değiştirme grafiği 127
Şekil 6. 29 K20KG50 deney kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri 128
Şekil 6. 30 K20KG50 deney kirişinin ön yüzünde CFRP kumaşın sıyrıldığı noktalar 128
Şekil 6. 31 K20KG50 deney kirişinin arka yüzünde CFRP kumaşın sıyrıldığı noktalar . 129
Şekil 6. 32 K20KG50 deney kirişinde CFRP malzemedeki açıklık ortası birim şekil değiştirmenin max. 0.008 olduğu durumdaki birim şekil değiştirme dağılımı 129
Şekil 6. 33 K20KG50 deney kirişinde deneyde elde edilen maksimum yükün sayısal analizde karşı geldiği analiz adımındaki CFRP malzemedeki birim şekil değiştirme dağılımı..... 130
Şekil 6. 34 (a) K20KGU deney kirişinin sayısal modeli (b) 2 boyutlu kesiti..... 130
Şekil 6. 35 K20KGU deney kirişinin gerilme birim şekil değiştirme grafiği..... 131
Şekil 6. 36 K20KGU deney kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri 131
Şekil 6. 37 K20KGU deney kirişinin ön yüzünde CFRP kumaşın sıyrıldığı noktalar..... 132
Şekil 6. 38 K20KGU deney kirişinin arka yüzünde CFRP kumaşın sıyrıldığı noktalar... 132
Şekil 6. 39 K20KGU deney kirişinde CFRP malzemedeki açıklık ortası birim şekil değiştirmenin max. 0.008 olduğu durumdaki birim şekil değiştirme dağılımı 133
Şekil 6. 40 K20KGU deney kirişinde deneyde elde edilen maksimum yükün sayısal analizde karşı geldiği analiz adımındaki CFRP malzemedeki birim şekil değiştirme dağılımı..... 133
Şekil 6. 41 K20KGU deney kirişinde hesapla bulunan G_f değerine karşılık gelen sayısal analiz adımında CFRP kumaşın birim şekil değiştirme dağılımı 133
Şekil 6. 42 (a) K40R deney kirişinin sayısal modeli (b) 2 boyutlu kesiti..... 134
Şekil 6. 43 K40R deney kirişinde kirişinin gerilme birim şekil değiştirme grafiği 134
Şekil 6. 44 K40R deney kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri 135
Şekil 6. 45 (a) K40KG00 deney kirişinin sayısal modeli (b) 2 boyutlu kesiti 135
Şekil 6. 46 K40KG00 deney kirişinin gerilme birim şekil değiştirme grafiği 136
Şekil 6. 47 K40KG00 deney kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri 136
Şekil 6. 48 K40KG00 deney kirişinde CFRP kumaşın sıyrıldığı noktalar..... 137
Şekil 6. 49 K40KG00 deney kirişinde CFRP malzemedeki açıklık ortası birim şekil değiştirmenin max. 0.008 olduğu durumdaki birim şekil değiştirme dağılımı 137

Şekil 6. 50 K40KG00 deney kirişinde deneyde elde edilen maksimum yükün sayısal analizde karşı geldiği analiz adımındaki CFRP malzemedeki birim şekil değiştirme dağılımı..... 138
Şekil 6. 51 K40KG00 deney kirişinde hesapla bulunan G_f değerine karşılık gelen sayısal analiz adımında CFRP kumaşın birim şekil değiştirme dağılımı..... 138
Şekil 6. 52 (a) K40KG70 deney kirişinin sayısal modeli (b)2 boyutlu kesiti 138
Şekil 6. 53 K40KG70 deney kirişinin gerilme birim şekil değiştirme grafiği 139
Şekil 6. 54 K40KG70 deney kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri 139
Şekil 6. 55 K40KG70 deney kirişinde CFRP kumaşın sıyrıldığı noktalar 140
Şekil 6. 56 K40KG70 deney kirişinde CFRP malzemedeki açıklık ortası birim şekil değiştirmenin max. 0.008 olduğu durumdaki birim şekil değiştirme dağılımı 141
Şekil 6. 57 K40KG70 deney kirişinde deneyde elde edilen maksimum yükün sayısal analizde karşı geldiği analiz adımındaki CFRP malzemedeki birim şekil değiştirme dağılımı..... 141
Şekil 6. 58 (a) K40KGU deney kirişinin sayısal modeli (b) 2 boyutlu kesiti..... 141
Şekil 6. 59 K40KGU deney kirişinin gerilme birim şekil değiştirme grafiği..... 142
Şekil 6. 60 K40KGU deney kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri 142
Şekil 6. 61 K40KGU deney kirişinde CFRP kumaşın sıyrıldığı noktalar 143
Şekil 6. 62 K40KGU deney kirişinde CFRP malzemedeki açıklık ortası birim şekil değiştirmenin max. 0.008 olduğu durumdaki birim şekil değiştirme dağılımı 144
Şekil 6. 63 K40KGU deney kirişinde deneyde elde edilen maksimum yükün sayısal analizde karşı geldiği analiz adımındaki CFRP malzemedeki birim şekil değiştirme dağılımı..... 144
Şekil 6. 64 K40KGU deney kirişinde hesapla bulunan G_f değerine karşılık gelen sayısal analiz adımında CFRP kumaşın birim şekil değiştirme dağılımı 144

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1 Yapısal güçlendirme uygulamaları için farklı lifli kompozitlerin niteliksel karşılaştırılması [81] 38
Çizelge 4. 1 Küp beton numunelerin 7 günlük dayanım sonuçları 54
Çizelge 4. 2 Kırılan küp beton numunelerin 28 günlük dayanım sonuçları 54
Çizelge 4. 3 Çelik çekme deneyinin sonuçları 57
Çizelge 4. 4 TS 708 sınır değerleri [98] 57
Çizelge 4. 5 Astar malzemesinin teknik özellikleri [99] 59
Çizelge 4. 6 Epoksi malzemesinin teknik özellikleri [100] 60
Çizelge 4. 7 CFRP malzemenin teknik özellikleri [101] 61
Çizelge 4. 8 Deney kirişlerinin özellikleri 67
Çizelge 4. 9 Deney sonuçları 70
Çizelge 6. 1 Kirişlerde kullanılan malzemelerin özellikleri 109
Çizelge 6. 2 Sonlu elaman analizinde kullanılan betonun (çekirdek beton) mekanik özellikleri 110
Çizelge 6. 3 Sonlu elaman analizinde kullanılan sanal malzemenin mekanik özellikleri 110
Çizelge 6. 4 Sonlu elamanlar analizinde kullanılan betonun (çekirdek beton) mekanik özellikleri 118
Çizelge 6. 5 Sonlu elamanlar analizinde kullanılan sanal malzemenin mekanik özellikleri 119
Çizelge 6. 6 Sayısal analiz sonuçlarından ve hesaptan elde edilen G_f değerleri 119
Çizelge 6. 7 Hesapla bulunan G_f değerine karşılık gelen kiriş sayısal analiz adımına ait yük yer değiştirme ve deneylerden edilen yük yer değiştirme değerleri 120
Çizelge 6. 8 K20KG00 deney kirişinde CFRP malzemenin sıyrıldığı düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirme değerleri 125
Çizelge 6. 9 K20KG00 deney kirişinde 1., 2. ve 3. durum için açıklık ortası yük-yer değiştirme değerleri 125
Çizelge 6. 10 K20KG50 deney kirişinde CFRP malzemenin sıyrıldığı düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirme değerleri 129
Çizelge 6. 11 K20KG50 deney kirişinde 1., 2. ve 3. durum için açıklık ortası yük-yer değiştirme değerleri 129
Çizelge 6. 12 K20KGU deney kirişinde CFRP malzemenin sıyrıldığı düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirme değerleri 132

Çizelge 6. 13 K20KGU deney kirişinde 1., 2. ve 3. durum için açıklık ortası yük-yer değiştirme değerleri 132
Çizelge 6. 14 K40KG00 deney kirişinde CFRP malzemenin sıyrıldığı düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirme değerleri 137
Çizelge 6. 15 K40KG00 deney kirişinde 1., 2. ve 3. durum için açıklık ortası yük-yer değiştirme değerleri 137
Çizelge 6. 16 K40KG70 deney kirişinde CFRP malzemenin sıyrıldığı düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirme değerleri 140
Çizelge 6. 17 K40KG70 deney kirişinde 1., 2. ve 3. durum için açıklık ortası yük-yer değiştirme değerleri 140
Çizelge 6. 18 K40KGU deney kirişinde CFRP malzemenin sıyrıldığı düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirme değerleri 143
Çizelge 6. 19 K40KGU deney kirişinde 1., 2. ve 3. durum için açıklık ortası yük-yer değiştirme değerleri 143

ÖZET

LİFLİ POLİMERLE FARKLI BİÇİMLERDE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME PERFORMANSLARININ BELİRLENMESİ

İlknur DALYAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bilge DORAN

Yirmi yıllık bir süreden beri lif takviyeli polimer (FRP) malzemeler betonarme elemanların güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasının başlıca amacı betonarme kirişlerin eğilme dayanımını arttırmak için dıştan yapıştırma şeklinde uygulanan karbon lif takviyeli polimer (CFRP) kullanımında eğilme performansı/maliyet oranını iyileştirecek üç farklı güçlendirme biçiminin etkilerinin hem deneysel hem de sayısal yöntemlerle araştırılmasıdır.

Çalışmanın başlangıcında, kirişlerde çekme donatısının altında kalan beton örtüsünün etkili olduğu kabul edilerek deney kirişleri için üç farklı güçlendirme biçimi belirlenmiştir. Bu amaçla altı adet betonarme kirişte: a) sadece kiriş alt yüzeyine, b) kiriş alt yüzeyi ile eğilme donatısı içine alacak şekilde iki yan yüzeye 50 ve 70 mm yükseklikte, c) kirişin alt yüzeyi ile birlikte yan yüzeylerinin tamamına yakın bir kısmına karbon lif takviyeli polimer kumaş yapıştırılmıştır. Kirişlerin boyutları 150×250×2600 mm olup 1. grup ve 2. grup deney kirişlerinin net beton örtüleri sırasıyla 20 mm ve 40 mm olarak seçilerek bu kısmın kirişin eğilme performansına olan etkisi incelenmiştir. Her bir deney serisinde yer alan bir adet kontrol numunesinin davranışı referans alınarak kirişlerin eğilme davranışlarında gözlenen iyileşmeler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Deneysel çalışmalarda tüm güçlendirme biçimlerinin kirişin eğilme kapasitesini, kontrol kirişlerine oranla %55 ila %116 arasında arttırdığı görülmüştür. Yan yüzeylerin büyük bir kısmını içine alacak şekilde yapılan U sargı uygulamasının kirişin donatı üzerinde kalan

bölgesindeki kuşatma etkisiyle kirişin eğilme kapasitesinin diğer iki tür güçlendirmeye oranla beklendiği gibi bir miktar daha arttırdığı belirlenmiştir. Bu artış, U sargılama sırasında çekme donatısı altında kalan net betonun sargılanmasında kullanılan malzeme miktarı göz önüne alındığında performans/maliyet açısından diğer iki güçlendirme türüne göre çok daha düşük oranlarda kalmaktadır. Bu sonuç ile denge altı betonarme kirişlerdeki donatı kullanımı sonucunda eğilme kapasitesinde meydana gelen artışın denge üstü donatı kullanımında çok daha fazla olması ile bir analoji kurulabilir.

Tez kapsamında deneysel olarak CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin davranışlarında çekme donatısı altında kalan beton örtüsünün etkisi araştırılmış ve sonrasında deneysel sonuçların modellenmesi amacıyla üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemi ile çözümde kullanılabilecek pratik bir bünyesel modelleme tekniği geliştirilmiştir. Modellemede en önemli varsayım deneysel çalışmanın da odak noktalarından biri olan donatı altındaki beton davranışı incelemek için yapılmıştır. Betonarme yönetmelikleri, tasarım için taşıma gücü sınır durumunu tanımlarken tarafsız eksen altında kalan betonun taşıma gücünü tamamen ihmal etmektedirler. Sadece minimum donatı hesabında, taşıma gücü değerinden çok düşük olan ve kesitin ilk çatladığı noktaya kadar olan çekme kapasitesi dikkate alınmaktadır. Önerilen modelleme yaklaşımında ise sadece çekme donatısı altında kalan ve taşıma gücü yönteminde hiçbir şekilde dikkate alınmayan net beton örtüsü için donatı üstündeki beton kısma nazaran daha zayıf bir malzeme (sanal malzeme) modeli kullanılması yoluna gidilmiştir.

Geçmişte yapılan modelleme çalışmalarından yola çıkılarak sonlu eleman analizlerinde tercih edilen elasto-plastik hasar modeli hem zayıf hem de normal beton için kullanılmıştır. Ancak, daha zayıf bir malzeme (sanal malzeme) olarak tanımlanan donatı altı betonun CFRP ile etkileşmesi sonucunda kullanılan sargı miktar ve biçimine bağlı olarak bünyesel modelin ihtiyaç duyduğu parametreler orantılı bir şekilde değiştirilmiştir. Beton için bünyesel model olarak elasto-plastik hasar modeli seçilmiştir. Böylelikle CFRP sargı ile güçlendirilen dolayısıyla davranışları önemli oranda değişen bu üç malzemeli (beton, CFRP ve sanal malzeme) kompozit yapı elemanlarının sonlu elemanlar yönteminde uygun malzeme model ve parametreleri ile analizlerinin pratik ve hızlı bir şekilde yapılabilmesi amaçlanmıştır. Beton ile CFRP sargı arasındaki enterfaz davranış için ileri sürülen ve deneysel ölçümlere dayanmayan karmaşık sayısal modellerin etkisi de geliştirilen sanal malzemenin bünyesel davranışı içinde ifade edilmiştir. Bu bağlamda, daha önce yığma duvarlarda yığma-harç arasındaki enterfaz davranış için başarılı bir şekilde kullanılmış olan bir yaklaşımdan faydalanılmıştır. Bu modellemenin yanında elasto-plastik hasar modellemesi ile tüm kirişler ayrıca karşılaştımalı olarak gerekli malzeme parametreleri için öneriler geliştirilerek incelenmiştir.

Sayısal çözümlemelerin sonlandırılması sırasında örtü betonu için çizdirilen $\sigma-\varepsilon$ eğrilerinden kırılma enerjileri hesaplanmış ve G_f için öngörülen değerlere ulaştığında analizler sonlandırılmıştır. Bu aşamada belirleyici olan çatlak önü bölgesi genişliği değeri için önerilerde bulunulmuştur.

Tez kapsamında önerilen bünyesel modelleme yaklaşımının deneysel verileri tahmin etmekteki hassasiyeti, çalışmanın deneysel kısmında kullanılan kirişler ile literatürde yer alan benzer deney kirişlerinin davranışları üzerinde denenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme kirişler, güçlendirme, karbon lif takviyeli polimer, sonlu elemanlar yöntemi, elasto-plastik hasar modeli

ABSTRACT

FLEXURAL PERFORMANCE EVALUATION OF RC BEAMS DIFFERENTLY STRENGTHENED WITH FIBRE REINFORCED POLYMER

İlknur DALYAN

Department of Civil Engineering

PhD. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Bilge DORAN

Fibre Reinforced Polymer (FRP) materials have been used for the strengthening of reinforced concrete members for 20 years. The principal aim of this thesis is the determination of the effect of three different strengthening schemes applied externally bonded by using carbon fibre reinforced polymers in order to increase bending strength of concrete beams both experimentally and numerically.

In the beginning of the study, three different strengthening schemes for testing beams were selected considering that concrete cover is effective under tensile effect of beams. For this purpose, following three forms of CFRP fabric bonding have been applied to; a) only to the bottom surface of the beam, b) the two side surfaces with 50 and 70 mm height including bottom surface of the beam and flexural reinforcement, c) the bottom surface of the beam and to the almost all parts of side surface. Size of the beams are 150x250x2600 mm. Concrete cover for 1st and 2nd group test beams are selected as 20mm and 40 mm respectively and the influence of concrete cover on the flexural performance of beam have been investigated. By referencing the behavior of one control specimen in each experiment, improvements in flexural behaviors of the beams series have comparatively been provided.

During the experimental studies, it has been observed that all strengthening schemes have increased the flexural capacity almost at 55 – 110 % when compared with control beams. It has also been resulted that when U shaped wrapping has been applied to the

almost all parts of the side surfaces, flexural capacity of the beam under the effect of confinement on over reinforcement, as compared to other two schemes of strengthening, increases little as expected. Due to the amount of material used in U-wrapping technique, this increase, when compared with other two strengthening schemes provides less performance-cost value. With this result, an analogy can be resulted between increase in flexural capacity of under reinforced concrete beams with over reinforcement.

Within the scope of this thesis, the effect of concrete cover on the behavior of CFRP strengthened beams were investigated and then for the purpose of modelling the results, a practical modelling technique that uses three dimensional non-linear finite element method was developed. The most important assumption in modelling was made in order to investigate the behavior of concrete cover, which is also the main point of experimental study. Concrete reinforcement codes, when describing load carrying capacity for design neglects the load carrying capacity under natural axis. Only in minimum reinforcement calculation, tension capacity until the first point where the section first cracks and where the load carrying capacity is low must be considered. In the proposed modeling approach, a weaker virtual material model was used for the concrete cover, which is only under the tension reinforcement and which is not taken into consideration in the load carrying capacity method, compared to the concrete part on the reinforcement.

From the previous modelling studies, elasto-plastic damage model which is preferred in finite element analysis has been used both for concrete cover and core concrete. However, depending on the amount and form of the wrap used as a result of the interaction of the under reinforcement with CFRP, which is defined as a weak virtual material, the parameters required by the constitutive model have been changed proportionally and the elasto-plastic damage model has been chosen as the constitutive model for concrete. In this way, it is aimed to make practical and fast analysis of the three composite materials (concrete, CFRP and virtual material) with finite element method where their behaviors changed significantly has been wrapped and ultimately strengthened with CFRP. The effects of the numerical models proposed for the inter-phase behaviour between concrete and CFRP which is independent of experimental measurements have been explained within the constitutive behavior of virtual materials. In this context, an approach, that has previously been used for interphase behavior between masonry and mortar walls successfully, have been benefited.In addition to this modelling, all beams for necessary material parameters for the elasto-plastic damage modelling have been investigated by developing proposals.

At the most critical point during the termination of the numerical analysis, the fracture energies of the $\sigma-\varepsilon$ curves for concrete cover were calculated and the analysis were terminated when it reached the predicted values for G_f . At this stage the suggestions were made for the determinant crack band width.

Within the scope of the thesis, the precision of predicting the experimental data in constitutive modelling approach has been tested with the behaviours of beams used in the experimental part of the study and also with the behaviors defined in the literature.

Keywords: Reinforced concrete beams, strengthening, carbon fibre reinforced polymer, finite element method, elasto-plastic damage model

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Lif Takviyeli Polimer (FRP) uygulanmasının kolay olması, uygulandığı yapı elemanının şeklini değiştirmemesi, yüksek dayanımlı ve hafif olması, yüksek korozyon dayanımına sahip olması ve çok farklı şekil ve çeşitlerde bulunmasından dolayı yapısal elemanların güçlendirilmesinde son yıllarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. FRP malzeme uygulaması eğilme ve kesme dayanımı yetersiz betonarme kirislerin güçlendirilmesi için tercih edilen başlıca tekniklerdendir.

Bu tez kapsamında, donatı altı çatlamış beton bölgenin (örtü betonu) eğilme davranışına etkisini dikkate almak üzere farklı şekillerde FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme altındaki davranışı incelenmiş, yük-yer değiştirme diyagramları ayrı ayrı elde edilmiştir. Elde edilen yük-yer değiştirme ilişkileri esas alınarak davranışı en yakın şekilde tahmin eden bir sayısal model önerisinde bulunulmuştur. Deney kirişlerinin sayısal modellenmesinde, elasto-plastik hasar modeli kullanılmış ve net beton örtüsünün eğilme etkisindeki kiriş davranışına olan etkisini bir şekilde sayısal modele yansıtabilmek için sanal malzeme yaklaşımı benimsenmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Teknik literatürde, betonarme kirişlere dıştan yapıştırılan FRP malzemelerin kirişin eğilme ve/veya kesme kapasitesini arttırdığı birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Ancak bu artışların kiriş davranışında temel olan sünek davranışı etkilememesi ve bunun tasarım hesaplarında kontrol altına alınması gerekmektedir. Bu ise, FRP sargının kirişe yaptığı katkının sonlanarak kademeli bir şekilde sıyrılma ve kopmaların gerçekleştiği yük altındaki göçmeye yakın kiriş davranışın bilinmesi ve gerçeğe uygun bir şekilde

modellenmesi ile sağlanabilir. Literatürde FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişler ile ilgili deneysel ve sayısal pek çok çalışma mevcuttur. Bu kısımda konu ile ilgili yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Al-Amery ve Al-Mahaidi [1], betonarme kirişlerin kesme ve eğilmeye karşı güçlendirilmesinin araştırıldığı bir dizi deneysel çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışmada, CFRP şeritlerin ve sargıların kullanılarak farklı şekillerde güçlendirilen 6 adet betonarme kirişe ek olarak 1 adet güçlendirilmemiş kontrol kiriş numunesini test etmişlerdir. Deney sonuçlarına dayanarak, CFRP sargı ve levhaların kirişin dayanımına etkili bir iyileştirme kazandırdığını ifade etmişlerdir. Ayrıca, sıyrılma göçmesi önlendiğinde daha sünek bir davranış elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

Toutanji vd. [2], çalışmalarında biri kontrol kirişi ve 7 adedi 3 ila 6 kat CFRP tabakanın inorganik epoksi ile yapıştırılmasıyla güçlendirilmiş 108x158x1800 mm boyutlarında toplam 8 adet betonarme kirişi test ve analiz etmişlerdir. Kesme göçmelerini önlemek için, kirişleri her iki tarafta 45° olarak yönlendirilmiş, organik epoksi ile bağlanmış 50 mm genişliğindeki CFRP şeritleri kullanarak dıştan güçlendirmişlerdir. Tüm kirişleri dört noktalı yük altında eğilme testine tabi tutarken; yük, eğilme, orta açıklık birim şekil değiştirme ve göçme biçimlerini göçmeye kadar kaydetmişlerdir. Üç ve dört kat FRP ile güçlendirilmiş kirişlerin FRP'nin kopması ile göçtüğünü; beş ve altı kat FRP ile güçlendirilmiş kirişlerin, FRP'nin ayrılmasıyla göçtüğünü gözlemlemişlerdir. FRP ile güçlendirilmiş kirişlerin sünekliğinin, kontrol kirişine kıyasla büyük ölçüde azaldığını ifade etmişlerdir. Ayrıca bir moment yer değiştirme modeli geliştirmişler; mevcut ve diğer benzer çalışmalarda test edilen kirişlerde kullanmışlardır. Deneysel ve geliştirdikleri modeldeki moment ve yer değiştirme değerlerini karşılaştırdıklarında önerilen model ile deney sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Esfahani vd. [3], çalışmalarında CFRP tabakaları ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme davranışlarını araştırmışlardır. Donatı oranının (ρ) güçlendirilmiş kirişlerin eğilme dayanımına etkisini incelemişlerdir. 3 adedi kontrol kirişi, 9 adedi farklı uzunlukta, sayıda ve genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş 150x200x2000 mm boyutlarında toplam 12 adet betonarme kiriş üretmişlerdir. 25 MPa dayanıma sahip beton ve 8, 10, 12, 16 ve 20 mm çapında donatı kullanarak ürettikleri kirişleri 4 noktalı yük altında test etmişlerdir.

ACI 440.2R-02 (Amerikan Beton Enstitüsü Komite Raporu) ve ISIS Kanada tasarım kılavuzlarına göre kirişlerin yük kapasitelerini hesaplamışlardır. Güçlendirilmiş kirişlerin eğilme dayanımının ve rijitliğinin, kontrol numunelerine kıyasla arttığını gözlemlemişlerdir. Deney sonuçlarınının ACI 440.2R-02 ve ISIS Kanada tasarım kılavuzları kullanılarak yapılan tahminlerin, ρ_{max} en büyük kod değeri ile karşılaştırıldığında küçük donatı oranına sahip kirişlerin eğilme dayanımını arttırmada kullanılan CFRP tabakaların etkilerini aşırı abarttığını ifade etmişlerdir. İki tasarım kılavuzunun önerdiği denklemlerin, büyük ρ değerine sahip kirişler için daha uygun olduğunu belirtmişlerdir.

Siddiqui [4], çalışmasında eğilme ve kesme güçlendirmesi yapılan kirişlerde farklı FRP yerleşiminin yeterlilik ve etkinliğini araştırmıştır. Bu amaçla 6 adet betonarme kirişi iki noktalı eğilme altında test etmiştir. İlk gruptaki kirişleri kesmede güçlü, eğilmede zayıf olarak; ikinci gruptaki kirişler ise kesmede zayıf, eğilmede güçlü olarak tasarlamıştır. İki grupta da birer tane kontrol numunesi ve farklı şekillerde CFRP kullanarak güçlendirdiği 2 adet güçlendirilmiş kiriş bulunduğunu belirtmiştir. Bütün kirişleri aynı yüklemeye maruz bırakarak, farklı şekillerdeki CFRP uygulamalarının etkinliğini değerlendirmiştir. Kirişlerin çekme yüzeyine uygulanan CFRP kumaşların, U şeklindeki uç ankrajlı CFRP ile eğilme kapasitesinin artmasında çok etkili olduğunu aynı zamanda yeterli şekil değiştirme kapasitesini de sağladığını gözlemlemiştir. Kesme güçlendirmesi için CFRP kumaş kullanılarak eğimli güçlendirilen kirişlerin, CFRP kumaşların dikey olarak kullanılması ile güçlendirilen kirişlere göre daha fazla performans gösterdiğini gözlemlemiştir. Eğimli CFRP kumaş kullanılarak güçlendirilen kirişlerin, dik yönde kumaşlarla güçlendirilen kirişlere göre daha yüksek kesme ve şekil değiştirme kapasitesi gösterdiğini, eğimli CFRP kumaşların dikey CFRP kumaşlara göre çatlakların yayılmasını durdurmada daha etkili olduğunu vurgulamıştır.

Barris vd. [5], GFRP çubukları ile güçlendirilmiş beton kirişler ile ilgili deneysel bir çalışma yapmışlar, kullanılabilirlik ve son limit durumları için tasarım kılavuz denklemleri ve diğer tahmin modelleri ile karşılaştırmışlardır. Çalışmada, donatı oranı ve etkili derinlik-yükseklik oranını değiştirerek kısa süreli eğilme davranışını değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Genişliği değişken, derinliği 190 mm, uzunluğu 2050 mm olan GFRP çubuklarla güçlendirilmiş 6 adet betonarme kirişi 4 noktalı yük altında test etmişlerdir.

Test ettikleri kirişler için mevcut tasarım hükümlerinin işletme yüküne kadar olan davranışları makul ölçüde iyi tahmin ettiğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte, son sınır durumunda, yük kapasitesini düşük tahmin ettiğini belirmişlerdir. İşletme edilebilirlik davranışı açısından, işletme yükü seviyesinde ACI 440.1R-06, Eurocode 2 ve Bischoff'un eğilme altındaki yer değiştirme tahminlerinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu ifade etmişlerdir. Deneysel çatlak genişliğinin, ACI 440.1R-06 tarafından önerilen minimum değerle daha uyumlu olduğu, bu durumun beton ile deneylerde kullanılan GFRP çubukları arasında çok iyi bir aderans olduğunu gösterdiğini ifade etmişlerdir. Tüm kirişlerin göçme biçimlerinin tasarım kılavuzlarında öngörülenlerle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Deney kirişlerinin betonun ezilmesinden dolayı gevrek veya yarı-gevrek biçimde göçmesine rağmen, göçmeden önce büyük yer değiştirmeler yaptığını gözlemlemişlerdir.

Kotynia [6], çalışmasında lif takviyeli polimerlerin dıştan yapıştırılarak (EB) ve yüzeye yakın bölgeye monte edilmesiyle (NSM) güçlendirilen betonarme kirişlerde CFRP ile beton arasındaki aderans davranışını incelemiştir. Çalışmasında incelediği parametreler kiriş açıklığı ve derinliği, boyuna donatı, CFRP levha ve şerit tipleri, CFRP uzunluğu ve beton basınç dayanımıdır. Basınç dayanımı 20 - 40 MPa arasında olan, CFRP şerit ve levhaların değişik biçimlerde kullanılmasıyla güçlendirdiği betonarme kirişlerde 4 noktalı eğilme deneyi yapmıştır. 11 adet kirişi CFRP şerit ve levhaların dıştan yapıştırılmasıyla, 39 adet kirişi ise beton örtü içinde boyuna yapılan olukların içine CFRP şerit ve levhaların monte edilmesiyle toplam 50 adet kirişi güçlendirmiştir. Kirişleri kesit boyutlarına göre kısa (150x200 mm) ve yüksek (150x400 mm), hesap açıklığına göre ise kısa (1350 mm) ve uzun (2000 mm) açıklık olmak üzere sınıflandırmıştır. Kalınlığı ve genişliği sırasıyla 1,4 mm, 90 mm olan CFRP şeritler ile 0,13 mm kalınlığında ve 90 mm genişliğinde CFRP levhalar numunelere yapıştırılmak sureti ile bahsedilen kirişleri güçlendirmiştir. Yüzeye yakın monte edilen CFRP şeritler için numunelerde 17 mm derinliğinde 6 mm genişliğinde oyuklar açmış ve şeritleri bu oyuklara monte ederek kirişleri güçlendirmiştir. Yaptığı deneyler göçme biçimlerinde ve FRP-beton arasındaki aderansa donatının etkisinin önemini doğrulamıştır. Beton dayanımının artmasının CFRP'nin sıyrılmasını geciktirmekle beraber CFRP malzemenin sıyrılma birim şekil değiştirmesini de artırdığını gözlemlemiştir. Güçlendirilmiş kirişlerde donatının akması ve eğilme göçmesini izleyen

beton örtünün ayrılmasının taşıma yükünü kontrol ettiği ve boyuna donatılı kirişlerde FRP-beton arayüzündeki aderans göçmesini etkilemediğini ifade etmiştir. Levhaların dıştan yapıştırılmasıyla güçlendirilen kirişlerde ön üretimli şeritler ile güçlendirilen kirişlere kıyasla daha büyük CFRP birim şekil değiştirmesine ulaşıldığını belirtmiştir.

CFRP yapışma uzunluğunun konumunun sıyrılma birim şekil değiştirmesini olumsuz yönde etkilediğini; eğer yapışma uzunluğu tamamen eğilme bölgesinde ise CFRP sıyrılmasının, yapışma uzunluğu kesme-eğilme bölgesinde olan kirişten daha sonra meydana geldiğini belirtmiştir. FRP-beton birleşimi ve göçme modlarında çelik donatıların kritik rolü olduğunu çalışmada yaptığı deneyler ile doğrulamıştır.

Dong vd. [7], yaptıkları çalışmada FRP kumaşlarla (CFRP/GFRP) eğilme ve eğilme-kesme güçlendirilmesi yapılan betonarme kirişlerin yapısal davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Eğilme güçlendirmesi ve eğilme-kesme güçlendirmesi yaptıkları kirişlerdeki deneysel sonuçlar ile teorik hesap sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Deney kirişlerini iki gruba ayırmışlardır. İlk grupta güçlendirilmiş kirişlerin eğilme davranışını incelemek için C20 ve C30 beton sınıfına giren 7 adet betonarme kiriş numunesi üretmişlerdir. Bu kirişlerden bir adedinin kontrol kirişi, diğer kirişlerin ise CFRP kumaşları tek veya çift kat kullanarak güçlendirdikleri kirişler olduğunu belirtmişlerdir. CFRP katman sayısının güçlendirilmiş kirişlerin göçme yüküne, taşıma yüküne, gerilme ve şekil değiştirmeye olan etkisini araştırmak için güçlendirmede CFRP malzemeyi tek veya çift kat kullanmışlardır. İkinci grupta ise güçlendirilmiş kirişlerin eğilme ve kesme davranışını birlikte incelemek için 7 adet betonarme kiriş numunesi üretmişlerdir. Bu kirişlerden iki tanesini farklı beton dayanımına sahip kontrol kirişi olarak üretmişlerdir. Bir adet kirişi tek kat GFRP tabakayı kiriş yüzeyine U şeklinde yapıştırarak, diğer 4 adet kirişi ise bir veya iki kat CFRP'yi kiriş yüzüne L şeklinde yapıştırarak güçlendirmişlerdir. Bütün kirişleri 4 noktalı eğilme yükü altında test etmişlerdir. Eğilme-kesme testlerinde inceledikleri temel parametrelerin CFRP, GFRP katman sayısı, etriye oranı, kiriş yüksekliği ve beton dayanımı olduğunu belirtmişlerdir. Eğilme güçlendirmesi yapılan kirişlerde, CFRP'nin sıyrılması ve kesme çatlaklarının yükleme noktası boyunca yayılması şeklinde iki temel göçme mekanizması gözlemlemişlerdir. İlk çatlak yükü ve taşıma yükünün öncelikle CFRP katman sayısına ve yükleme öncesi duruma bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Tek kat ve 2 kat FRP kumaşla güçlendirilmiş kirişleri karşılaştırdıklarında 2 kat FRP kumaş uyguladıkları kirişlerde göçme yükünün ve son limit yük taşıma kapasitesinin %23 ve %22 oranında arttığını gözlemlemişlerdir. Yer değiştirmenin ise % 39 oranında azaldığını belirtmişlerdir. CFRP tabaka sayısının arttırılmasının rijitliği arttırmakta oldukça etkili olduğunu görmüşlerdir. Beton örtüsünün kalınlığının kiriş derinliği boyunca genişleyen ilk çatlak yükünde az bir etkiye sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Güçlendirilmiş kirişlerin maksimum taşıma yükünün boyuna donatı oranına göre kesit derinliğinden daha fazla etkilenmediğini ifade etmişlerdir. Güçlendirilmiş kirişlerin son limit yük taşıma kapasitesini (taşıma gücü) tasarım modellerini kullanarak tahmin etmişlerdir. Eğilme ve kesme güçlendirmesi yaptıkları kirişlerde kesme göçmesi, eğilme göçmesi, CFRP'nin kopması ve eğilme göçmesi ve CFRP'nin sıyrılması ve kesme göçmesi gözlemlemişlerdir. Eğilme kesme güçlendirmesi yaptıkları kirişleri sadece eğilme güçlendirmesi yaptıkları kirişlerle kıyasladıklarında çatlak ve göçme yükününün çoğu durumda iki katına çıktığını belirtmişlerdir. Eğilme-kesme güçlendirmesi yaptıkları kirişlerin sadece eğilme güçlendirmesi yaptıkları kirişlere kıyasla daha yüksek bir yük taşıma kapasitesi ve daha rijit bir davranış gösterdiğini ifade etmişlerdir. Yaptıkları çalışmanın FRP kumaşların sadece dayanımı ve rijitliği değil bunun yanında kirişlerdeki çatlak gelişiminin kontrolünü ve sünekliği arttırdığını gösterdiğini belirtmişlerdir. Aynı donatı düzenlemesine ek olarak, kesit derinliği ve donatı oranının, yük taşıma kapasitesi ve kiriş üzerindeki başlangıç rijitliği üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir. CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerde kontrol kirişine göre eğilme kapasitesinde ve CFRP ve GFRP ile güçlendirilmiş kirişlerde kesme kapasitesinde artış gözlemlemişlerdir. Eğilme dayanımı ve maksimum kesme taşıma kapasitesindeki teorik tahminlerinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu doğrulamışlardır.

Reda vd. [8], çalışmalarında yüzeye yakın bölgeye monte edilen GFRP ile güçlendirilmiş kirişlerde GFRP'nin betondan sıyrılmasını engellemek ve yük taşıma kapasitesini arttırmak için bir dizi deneysel araştırma yapmışlardır. Çalışmalarında aynı beton karışımına sahip 150x250x2200 mm boyutlarında 11 adet betonarme kiriş kullanmışlardır. 1 adet kontrol kirişi dışındaki diğer kirişleri ise GFRP çubukları düz olarak ve uçlarda eğimli olarak kirişe monte ederek güçlendirmişlerdir. Bütün kirişleri 4 noktalı statik yükleme altında test etmişlerdir. Deneysel çalışmalarında büyük GFRP çubukların

(1800 mm gibi) kiriş uçlarına ankrajlanarak yüzeye yakın bölgeye uygulanması ile güçlendirilen kirişlerin ankrajsız kirişlere göre çekme donatısı aktıktan sonra daha büyük rijitliğe sahip olduğunu görmüşlerdir. GFRP çubukların 45° bükülerek ankrajlandığı kirişlerin, ankrajsız ve GFRP çubukların 90° bükülerek ankrajlanmasıyla güçlendirilen kirişlere göre daha yüksek eğilme davranışı gösterdiğini gözlemlemişlerdir. 45° bükülerek ankrajlanarak güçlendirilen kirişlerin 90° bükülerek ankrajlanarak güçlendirilen kirişlere göre daha fazla sünek davranış sergilediğini belirtmişlerdir. Sabit moment bölgesindeki kısmi sıyrılmanın büyük GFRP çubuklar ile güçlendirilen kirişlerdeki eğilme davranışı üzerindeki etkisinin küçük olduğunu ifade etmişlerdir. Sonuç olarak, uçlarından bükülmüş GFRP çubukların güçlendirilmiş kirişlerde beton örtünün ayrılmasını önlediğini ve yük taşıma kapasitesini arttırdığını vurgulamışlardır. Güçlendirilmiş kirişlerde yük-gerilme, yük-yer değiştirme eğrilerinin deneysel veriler ile uyum içerisinde olduğunu belirtmişlerdir.

Nayak vd.[9], GFRP kumaşlarla dıştan güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışları üzerinde deneysel bir çalışma yapmışlardır. Boyutları 120mm × 150mm × 1000mm olan, bir adedi kontrol kirişi ve 9 adedi bir, iki, üç ve dört kat GFRP kumaş ile çeşitli şekillerde güçlendirilmiş toplam 10 adet kirişi iki noktalı yükleme altında eğilme için test etmişlerdir. Kirişlerde ilk çatlaklara ve göçmeye karşılık gelen yükleri, yük eğilme değerlerini kaydetmişlerdir. Deney sırasında kirişlerin göçme biçimlerini de gözlemlemişlerdir. Ayrıca FRP kumaş tabakalarıyla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin en büyük tasarım dayanımını tahmin etmek için IS 456-2000'e ek olarak bir tasarım önerisi geliştirmişlerdir. Güçlendirilmiş betonarme kirişlerinin deneysel eğilme dayanım değerlerini, sayısal modelden hesaplanan tasarım eğilme dayanım değerleri ile ve doğrulama için ACI 440-2R-08 tasarım kodu ile karşılaştırmışlardır. Güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme dayanımının, tüm güçlendirme biçimleri için tabaka sayısındaki artışla arttığını belirtmişlerdir. Güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kontrol kirişine kıyasla eğilme dayanımındaki artışın güçlendirme biçimlerine göre farklılık gösterdiğini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte, GFRP kumaş ile çekme yüzünün ve her iki yan yüzeyin yarısı sargılanmış kirişlerin eğilme dayanımı ve süneklik bakımından diğer güçlendirme biçimlerine göre üstün performans gösterdiğini belirtmişlerdir. Kirişin çekme bölgesinin 2 kat GFRP kumaş ile sargılandığı kirişlerin, diğer güçlendirilmiş

kirişlere göre eğilme dayanımında artış gösterdğini belirtmişlerdir. Güçlendirilmiş betonarme kirişlerin önerdikleri model ile tahmin ettikleri en büyük eğilme dayanım değerlerinin ACI 440-2R-08 ile hesaplanan değer ile uyumlu olduğunu ancak deneysel araştırmadan elde edilenlerden daha düşük olduğunu ifade etmişlerdir.

Huang vd. [10], çalışmalarında PFRP (Pultrusion- profil çekme yöntemi ile üretilmiş lif takviyeli polimer) kompozit ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme davranışını araştırmışlardır. 150 × 300 × 2000 mm boyutlarında iki kontrol kirişi ve PFRP ile güçlendirilmiş altı adet betonarme kirişi dört noktalı eğilme altında test etmişlerdir. Çalışmadaki deneysel değişkenleri PFRP plakaların kalınlığı (dört ve altı katmanlı levha) ve donatı oranı (%0,223 ve 0,503) olarak belirlemişlerdir. Kirişlerde 31,4 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanmışlardır. Ayrıca PFRP ile güçlendirdikleri kirişlerin deneysel taşıma gücü değerlerini, CFRP ve GFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişler için önerilen ACI 440.2R-08'de verilen denklemlerle karşılaştırmışlardır. Deneyde incedikleri kirişlerde PFRP güçlendirmenin yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. PFRP ile güçlendirilmiş düşük donatı oranına sahip betonarme kirişin sünekliğinin, büyük donatı oranına sahip güçlendirilmiş kirişlerden daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. PFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin, kontrol kirişlerine kıysala süneklik ve enerji yutma açısından önemli bir artışa sahip olduğunu ifade etmişlerdir. PFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin, CFRP ve GFRP ile güçlendirilen kirişler için önerilen ACI 440.2R-08 tasarım kılavuzlarındaki denklemlerle hesaplananlarla nispeten uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Buraya kadar literatürde yer alan FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişler için bazı deneysel çalışmalar, kapsam ve sonuçları irdelenmiştir. Literatür çalışmasının bu kısmında ise, konuyla ilgili deneysel ve sonlu eleman analizi yapılan çalışmalar derlenmiştir.

Norris vd. [11], CFRP kumaşlarla hasarlı veya yeterli dayanıma sahip olmayan betonarme kirişlerin davranışlarını incelemek için deneysel ve analitik bir çalışma yapmışlardır. 13 adedi eğilme test kirişi, altı adedi kesme test kirişi olmak üzere 19 adet kiriş üretmişlerdir. Bütün test kirişlerini 127x203 mm en kesitli ve 13 adet kiriş 2440 mm ve 6 adet kiriş 1220 mm boyutlarında üretmişlerdir. Kirişleri üç farklı CFRP sistemi ile

güçlendirmişlerdir. Kiriş yüzeyine yapıştırdıkları lifli malzemedeki liflerin kiriş ekseni ile yaptıkları açılara (0°, 90°, ±45°; 0/90°, ±45°) göre çeşitli sargılama biçimleri belirlemiş ve CFRP malzemenin kiriş dayanımına ve rijitliğine olan etkisinini, bu lif düzenlemeleri için ele almışlardır. CFRP ile güçlendirme işlemi bittikten sonra kirişlere, göçme meydana gelinceye kadar yük uygulamışlardır. Çalışmanın sayısal modelleme kısmında kirişlerin eğilme davranışını tahmin etmek için artımsal şekil değiştirme tekniği kullanmışlardır. Sayısal analizler için bir bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Betonda gerilmeyi hesaplamak için Hognestadt gerilme bloğundaki The Park ve Paulay [12] sayısal yaklaşımını kullanmışlardır. Çelik donatıyı ise elasto-plastik kabul etmişlerdir. FRP malzemeyi doğrusal elastik olarak modellemişlerdir. ACI denklemlerini kullanarak kirişlerin kesme dayanımı tahmin etmiş ve güçlendirilmiş kirişlerin kesme dayanımına FRP'nin katkısını içermesi için bu denklemleri geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, FRP düzenlemelerine bağlı olarak göçmenin farklı türleri ve kiriş dayanımında meydana gelen artışları gözlemlemişlerdir. CFRP levhaların, kirişin gövde ve çekme yüzüne yapıştırıldığında mevcut beton kirişlerin mukavemet ve rijitliğinde artış sağladığını gözlemlemişlerdir. Artışın büyüklüğünün ve göçme şeklinin takviye liflerinin yönü ile ilgili olduğunu belirtmişlerdir. Deneysel sonuçların CFRP tabakaların kirişlere gerilmeleri karşılayacak biçimde yapıştırıldığında mukavemet ve rijitliği arttırdığını gösterdiğini belirtmişlerdir. CFRP malzemedeki lifleri kirişlerde çatlaklara dik yönde çatlakların açılmalarını engelleyecek biçimde yerleştirdiklerinde rijitlikte ve dayanımda beklendiği gibi büyük bir artış gözlemlemişlerdir. CFRP malzemedeki lifleri kirişteki çatlaklara eğik olarak yerleştirdiklerinde, daha küçük bir mukavemet ve rijitlik artışı gözlemlemişlerdir.

Aram vd. [13], yaptıkları çalışmada farklı göçme mekanizmaları üzerinde durmuşlardır. FRP ile güçlendirilmiş kirişlerde 4 noktalı eğilme testinden elde edilen yük-orta açıklık eğilme sonuçlarını ve güçlendirilmiş kirişlerde sıyrılma göçme mekanizmalarını analitik ve sayısal modeller kullanarak araştırmışlardır. Deney ve hesaplardan elde ettikleri değerler ile mevcut uluslararası yapı kodları ve kılavuzlardan (ACI, fib, ISIS, JSCE, SIA, TR55 vb.) elde ettikleri değerleri karşılaştırmışlardır. FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerde temel göçme biçimlerinin kesme göçmesi, eğilme göçmesi (betonun ezilmesi ve FRP'nin kopması) ve FRP'nin sıyrılması olduğunu ifade etmişlerdir. FRP ile güçlendirilmiş kirişlerin eğilmedeki en genel göçme biçiminin FRP'nin sıyrılması

olduğunu ve genel olarak FRP plakasının betondan sıyrılmasının yüksek gerilmeler nedeniyle olduğunu belirtmişlerdir. Sıyrılmanın başlangıcının genellikle beton-FRP arayüzünde yüksek gerilme dağılımının olduğu bölgede gerçekleştiğini ve bu bölgelerin FRP malzemenin sonunu; kesme ve eğilme çatlaklarının etrafını içerdiğini vurgulamışlardır. Bu nedenle yapı kod ve kılavuzlarının plaka sonu sıyrılması (mesnete yakın düzlemdeki sıyrılma) ve orta açıklık sıyrılması olmak üzere iki sıyrılma göçmesi modunda yoğunlaştığını ifade etmişlerdir. İlk modun plaka ucunun yakınında meydana gelen ve betonda ilerleyen ya da plağın kesme noktasında meydana gelen göçme olan tabaka sonu kesme göçmesi ya da son çatlaktaki ankraj göçmesi olduğunu belirtmişlerdir. İkinci modun ise göçmeye neden olan kesme ve eğilme çatlakları olduğunu ve daha sonra çatlağın levha ucuna doğru ilerlediğini ifade etmişlerdir. Çalışmalarının deneysel kısmında, 1 adedi referans kirişi, 3 adedi farklı CFRP plakalar ile güçlendirdikleri 4 adet deney kirişini test etmişlerdir. Referans kirişinin betonun ezilmesiyle, güçlendirilmiş kirişlerin ise CFRP plakaların kopması ve sıyrılmasıyla göçtüğünü gözlemlemişlerdir. CFRP dayanımı az olan ve düşük sünekliye sahip güçlendirilmiş kirişte CFRP'nin koptuğunu ve elastisite modülü yüksek olan CFRP ile güçlendirilmiş kirişte en az şekil değiştirme meydana geldiğini belirlemişlerdir. FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışlarını tahmin etmek için ATENA yazılımı ile doğrusal olmayan sonlu eleman analizi yapmışlardır. Yapı kodları ve kılavuzlarındaki mesnete yakın düzlemdeki sıyrılma ve orta açıklıktaki sıyrılmanın önlenmesi için tasarım sınırlamaları sunmuşlardır. Çalışmada Fib2, JSCE'deki birim şekil değiştirme sınırlarının FRP'nin rijitliğine ve betonun özelliklerine bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. Son çatlakta FRP kuvvetini sınırlandırarak plaka ucu sıyrılmasının engellenebileceğini belirlemişlerdir. Çeşitli kod ve kılavuzları kullanarak tahmin edilen sıyrılma yükleri arasında % 250'e varan bir tutarsızlık olduğunu belirlemişlerdir.

Godat vd. [14], yaptıkları çalışmada FRP ile güçlendirilen kirişlerde boyut etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları deneysel çalışma, üç ayrı seride farklı boyutlara sahip 7 betonarme kirişi içermektedir. Her seriden 1 adet kirişi, U şeklinde FRP ile güçlendirilen kirişlerle karşılaştırmalı değerlendirme yapmak için kullanmışlardır. Deney sonuçlarından, CFRP şeritlerin efektif eksenel birim şekil değiştirmesinin küçük numunelerde daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir. CFRP kesme güçlendirmeli

kirişlerin davranışını modelleyen bir sonlu eleman analizi geliştirmişlerdir. Bu sayısal modelin, CFRP şerit ile beton arasındaki ara yüzey davranışını da içerdiğini ifade etmişlerdir.

Huang J., [15], çalışmasında GFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin modellenmesinde sonlu elemanlar metodu (FEM) ile çözüm tekniğinin uygulanabilirliğini araştırmıştır. Bu amaçla, deney sonuçları ile ANSYS yazılımı ile geliştirdiği üç boyutlu gerilme analizi sonuçlarını karşılaştırmıştır. Çalışmasında, Almusallam ve Al-Salloum'dan [16] uyarlanmış CFRP ile güçlendirilmiş bir betonarme kirişin eğilme davranışını simüle ederek önerilen sayısal modelin doğruluğunu değerlendirmiştir. Almusallam ve Al-Salloum tarafından 1 adet GFRP çubukla güçlendirilmiş ve 4 noktalı eğilme testi yapılmış betonarme kirişin sonlu eleman analizinde beton için SOLID 65, donatı için Link 8 elemanı kullanmıştır. Servis yükleri altında FEM'den elde edilen sonuçların deney sonuçlarıyla uyumlu olduğunu belirtmiştir. GFRP çubuk ve beton arasındaki kaymanın deney kirişinde daha düşük taşıma gücü kapasitesine neden olduğunu belirtmiştir. FEM'in, kirişteki taşıma yükünü ACI 440'dan fazla tahmin etmesine rağmen, GFRP ile güçlendirilmiş kirişin çatlama yükünü ve rijitliğini doğru bir şekilde tahmin ettiğini belirtmiştir. Ancak ilk çatlak yükü ve taşıma yük kapasitesinde FEM ve deneysel sonuçlar arasında farklılıklar olduğunu vurgulamıştır.

Chen vd. [17], çalışmalarında, betonarme kirişlerin kesme için güçlendirilirken, FRP kompozitlerin kiriş kenarlarına yapıştırma, U şeklinde sargılama ve bütünüyle sargılama olmak üzere farklı şekillerde kullanılabileceği ifade etmişler; kiriş kenarlarına yapıştırılan FRP'ler ile güçlendirilmiş kirişlerin neredeyse tamamındaki ve U şeklinde FRP sargılama ile güçlendirilmiş kirişlerin çoğundaki kesme göçmesinin, FRP'deki sıyrılmaya bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Geçmişte yapılan çalışmalarda, FRP tabakaların sıyrılmasının kiriş bütününde nasıl ilerlediği ve sıyrılmanın kesme davranışına ne tür etkilerinin olduğuyla ilgili hala anlaşmazlıklar olduğunu ifade eden yazarlar, güçlendirilmiş kirişlerde FRP tabakaların ilerleyen sıyrılması üzerine analitik bir çalışma yapmışlardır. Analitik çözümlemenin geçerliliğini, sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulamışlardır.

Jankowiak [18], CFRP şeritlerle güçlendirilmiş basit mesnetli betonarme kirişlerin deneysel ve sayısal analizi ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Deneyleri, güçlendirmenin

kirişlerin yük taşıma kapasitesine olan etkisini incelemek için yapmıştır. Çalışmanın esas amacının, farklı ön yükleme durumlarında güçlendirmenin etkisini değerlendirmek olduğunu ifade etmiştir. 120x300x3300 mm boyutlarındaki kirişleri 5 gruba ayırmış ve bu kirişlere ön yükleme yapmış daha sonra CFRP şeritlerle güçlendirmiştir. Söz konusu kirişlerin sayısal analizlerini FEM kullanarak yapmıştır. Beton davranışını tanımlamak için beton hasar plastisite modeli kullanmıştır. Donatı için doğrusal elastik-plastik malzeme kabulu yapmıştır. CFRP çubukları lineer elastik izotropik malzeme olarak kabul etmiştir. Modellerin, deneysel sonuçlarla iyi bir uyum gösterdiğini belirtmiştir. Ayrıca bu çalışmada ön yüklemenin CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin yük taşıma kapasitesinde önemli bir konu olduğunu vurgulamıştır.

Oudah ve El-Hacha [19], yaptıkları çalışmada, FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin şekil değiştirme özelliği ile bağlantılı yeni bir süneklik ifadesi geliştirmişlerdir. Yüksek dayanım/ağırlık oranı, korozyon dayanıklılığı ve yüksek yorulma performansı bakımından çelik çubukla karşılaştırıldığında FRP'nin üstün performansına rağmen, FRP malzemenin doğrusal elastik davranışından dolayı, FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin daha düşük süneklik gösterdiklerini belirtmişlerdir. Geliştirdikleri ifadede, yüklemenin statik veya tekrarlı oluşunu göz önünde bulundurmuşlardır. Yaklaşımlarını, öngerilmeli yüzeye gömülü FRP kullanarak güçlendirilmiş kirişlerin deney sonuçları ile doğrulamışlardır.

Hawileh [20], FRP çubukların yüzeye yakın monte edilmesi (NSM) tekniğiyle güçlendirilmiş betonarme kirişlerin 4 noktalı eğilme deneyindeki tepkisini ve yük taşıma kapasitesini doğrusal olmayan sonlu elaman yaklaşımıyla tahmini üzerinde çalışmıştır. Geliştirdiği sonlu eleman modelinde betonu, donatıdaki akmayı, dolgu yapışma malzemesindeki çatlağı, NSM donatı ve beton yüzeyindeki aderansı ve dolgu malzemesi ile beton arasındaki aderansı doğrusal olmayan yapısal malzeme özellikleri ile dikkate almıştır. Sayısal analiz sonuçlarını diğer araştırmacılar tarafından test edilen NSM FRP çubuklarla güçlendirilen 7 adet numuneden elde edilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırmıştır. 7 adet deney numunesinden 5 adedi iki adet 6 mm çapında CFRP çubuk ile diğer 2 adedi ise 1 adet 12 mm çapında CFRP çubuğun kiriş alt yüzüne monte edilmesiyle güçlendirilmiştir. ANSYS yazılımı ile sonlu elaman analizi yapmıştır. Beton ve dolgu malzemesini sekiz noktalı katı yapısal eleman (SOLID 65) kullanarak simüle etmiştir. Donatı ve CFRP NSM çubukları üç boyutlu iki noktalı yapısal çubuk eleman (LINK

8) olarak, rijit çelik destekleri üç boyutlu 8 noktalı yapısal eleman (SOLID 45) olarak modellemiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde, geliştirilen sonlu eleman modelini deneylerden elde edilmemiş 9 adet numune davranışını incelemek için kullanmıştır. Yazar, bu parametrik çalışmayı farklı NSM FRP çubuk tipleri ve FRP çubuk boyutları kullanılarak güçlendirilmiş kiriş numunelerindeki eğilme performansı etkilerini araştırmak için yaptığını ifade etmiştir. Deneysel sonuçlar ile sayısal model sonuçlarını karşılaştırdığında numunelerin eğilmeden göçmeye kadar olan bütün bölümlerinde yük-yer değiştirme eğrilerinin uyumlu olduğunu gözlemlemiştir. Herhangi bir şekilde NSM FRP donatı ile (CFRP, GFRP, AFRP) güçlendirilmiş kirişlerde eğilme dayanımının arttığını belirtmiştir. FRP donatı boyutları arttıkça göçme yükünün arttığı, hali ile boyut artışının güçlendirilmiş betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesi ve rijitliğinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ifade etmiştir. NSM FRP kullanılarak eğilmede güçlendirilmiş kirişlerin analizi ve modellenmesinde geliştirdiği sonlu eleman modelinin uygun olduğunu vurgulamıştır.

Ye vd. [21], iki kısımdan oluşan bir çalışma yapmıştır. İlk kısımda güçlendirilmiş kirişin eğilme-kesme bölgesinde yan yana iki temel eğilme çatlağı arasındaki kiriş parçasını, ortadaki çatlaktan kaynaklı sıyrılmayı araştırmak için yeni mekanik bir model olarak almışlardır. Bunu kiriş parça modeli olarak tanımlamışlardır. Yeni basit kiriş parça modelinin mantıklı olduğunu kanıtlamak için Saint-Venant Prensibine ve sayısal bir örneğe dayalı bir açıklama yapmışlardır. Çalışmanın ikinci kısmında parametrik bir çalışma yapmışlardır. Yük seviyesinin etkilerini, ortadaki çatlak kaynaklı sıyrılmadaki kiriş parçasının geometrisini, FRP-beton arayüzeyindeki aderans kayma ilişkisini kiriş parça modeline dayalı doğrusal olmayan sonlu eleman analiz yöntemiyle araştırmışlardır. 3 boyutlu sonlu eleman analizlerinde ANSYS yazılımı kullanmışlardır. Yazılımda betonu 8 noktalı katı eleman (solid 65), donatıyı 4 noktalı katı eleman (solid 45), FRP'yi 4 noktalı kabuk eleman (shell 41) olarak modellemişlerdir. 2 noktalı çatlamış elemanı (combine 39) donatı-beton arayüzünü ve FRP-beton arayüzünü modellemek için kullanmışlardır. FRP levha ortalama gerilmesini 3000 MPa olan ve kopana kadar doğrusal-elastik malzeme olarak kabul etmişlerdir. Kiriş parçasının geometrik değerlerini, derinlik h=250 mm, uzunluk L_m=100 mm, genişlik w=150 mm, eğilme-kesme bölgesi a=900 mm,

paspayı=25mm, donatı çapı=12 mm ve FRP alanı=2x0.11mmx80mm olarak vermişlerdir. Beton basınç dayanımının 40 MPa olduğunu belirtmişlerdir.

Sayısal sonuçların FRP levhalarının sıyrılma yükündeki etkilerini gösterdiğini belirtmişlerdir. FRP tabaka sayısının artmasıyla FRP'deki çekmenin arttığından bahsetmişlerdir. Sayısal analizlerin güçlendirilmiş kirişlerde FRP-beton arayüzündeki aderans kayma ilişkisinin sıyrılmadaki etkisinin çatlak açıklığından daha etkili olduğunu gösterdiğini ifade etmişlerdir. Önerdikleri basit kiriş parça modelinin, FRP ile güçlendirilen kirişlerde eğilme kesme bölgesindeki ortadaki çatlaktan kaynaklanan sıyrılmadaki sayısal çalışma için mantıklı olduğu vurgulamışlardır. FRP çekme gerilmesinin ve FRP'deki tabakaların ortadaki çatlaktan kaynaklanan sıyrılmada önemli etkileri olduğunu vurgulamışlardır.

Karakoç vd. [22], yaptıkları çalışmada geleneksel güçlendirme yöntemlerinden olan çelik ve FRP ile kuşatılmış betonarme kolonlar için önceden geliştirilmiş Drucker-Prager (DP) akma kriterinin gerektirdiği kohezyon ve içsel sürtünme açısı ile ilgili uygun bağıntıları düzenleyerek FRP kompozitlerle güçlendirilmiş betonarme kirişlerin doğrusal olmayan sonlu eleman analizlerine (NLFEA) uyarlamışlardır. Esas olarak beton ve kompozit örtü davranışı arasındaki kritik ilişkiyi öngörmek için yanal ve eksenel şekil değiştirme arasındaki ilişki üzerinde durmuşlardır. Bunun yanında farklı araştırmacılar tarafından test edilen betonarme kiriş numunelerini bu çalışmada yanal yüke karşı orta açıklık yer değiştirme tepkisi açısından doğrusal olmayan davranışlarını yansıtmak için LUSAS yazılımı ile sayısal olarak modellemiş ve analiz etmişlerdir.

Sürtünmeli malzemelerin modellenmesinde yaygın olarak kullanılan Mohr-Coulomb (MC) ve Drucker-Prager (DP) gibi temel plastik modeller, elastik sınırın ötesinde sürtünmeli malzemelerin (beton, kaya, toprak gibi) malzeme davranışını tanımlamak için modellenmesinde yaygın olarak benimsendiğini ifade etmişlerdir. Doran ve diğ. [23], beton prizma ve betonarme kirişler için yaptıkları çeşitli sonlu eleman uygulamalarının sonuçlarını dikkate alarak kohezyon için bir eşitlik önermişlerdir.

Betonarme kirişlerde çelik donatıların, olası kesme çatlaklarına karşı aderans ve kohezyonu arttırmak için kullanıldığını belirtmişlerdir. DP kriterinin diğer parametresi olan içsel sürtünme açısının, Köksal ve Karakoç [24] çalışmasında ve bu çalışmadaki

numerik modellemelerde, Lubliner ve diğ. [25] tarafından önerilen 30°- 35° olarak kabul edildiğini belirtmişlerdir.

FRP sargılı betonarme kirişlerin sayısal modellemesini, iki farklı çalışmadan alınan deney elemanları için yapmışlardır. Bu çalışmalardan birincisi; Ianniruberto ve Imbimbo [26], tarafından GFRP levhalar ile kesme güçlendirmesi yapılan 150mmx350 mmx3200 mm boyutlarında sekiz adet betonarme kirişin düşey yük altında test edildiği çalışmadır. Çalışmalardan diğeri Al-Amery ve Al-Mahaidi [1], 1 adedi kontrol amaçlı güçlendirilmemiş, diğerleri farklı şekillerde CFRP levha ve sargıları kullanarak güçlendirilmiş 6 adet betonarme kirişi test ettiği çalışmadır. FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin 3 boyutlu sonlu eleman analizlerini LUSAS yazılımı ile yapmışlardır. Beton ve donatı elemanları, DP kriterine uyan izotropik elasto-plastik elemanlar olarak kabul ederken, FRP sargı elemanları elastik ortotropik olarak tanımlamışlardır. Beton elemanları sekiz düğüm noktalı altı yüzeyli eleman (HX8M), çelik donatıları iki düğüm noktalı çubuk eleman (BRS2), FRP kompoziti ise dört düğüm noktalı kabuk eleman (QTS4) olarak modellemişlerdir .Bu çalışmada içsel sürtünme açısı değeri için 32° yerine 40°-45° kullanıldığında deneysel verilerle en uygun sonuçların çıktığı sonucuna varmışlardır. Betonarme yapılarda kesme transfer mekanizmasına göre, çatlak aralıkları, kayma yer değiştirmeleri ve çatlak yüzeylerindeki pürüzlülüğe bağlı olarak, FRP ile güçlendirilen kirişlerin DP kriteri uygulamalarında betondaki içsel sürtünme açısı değerinin arttırılmasının makul bir yaklaşım olacağını belirtmişlerdir. DP kriterinin kullanıldığı malzeme parametreleri ile yaptıkları sayısal analizleri deneysel sonuçlarla karşılaştırdıklarında, gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri ve kirişlerin yük taşıma kapasitesi için makul değerler elde edildiğini görmüşlerdir.

Akram vd. [27], çalışmalarında sonlu eleman yaklaşımıyla çeşitli tekniklerle FRP kompozitlerin yapıştırılmasıyla güçlendirilen betonarme dikdörtgen kirişlerin eğilme davranışlarını sayısal olarak araştırmışlardır. Betonarme güçlendirilmiş kirişi beş katmanlı kompozit eleman olarak kabul etmişlerdir. Bu katmanların, beton, çelik donatı çubukları, beton-donatı arayüzü, FRP-beton arayüzü ve FRP malzeme olduğunu belirtmişlerdir. Sonlu eleman analizlerinde CASTEM yazılımı kullanmış ve Geliştirilmiş Newton-Raphson modeli kullanmışlardır. Beton davranışını modellemek için Sellier vd. [28] tarafından önerilen izotropik hasar modelini kullanmışlardır. Bu hasar modelinde

elastisite modülü, çekme ve basınç dayanımı, çekme ve başınç altındaki kırılma enerjisi, tek eksenli gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin en üst noktasındaki birim şekil değiştirme gibi ölçülebilir parametrelerin kullanıldığını ifade etmişlerdir. Donatı için elastik-tam plastik malzeme modeli, donatı-beton arayüzü için elasto-plastik izotropik malzeme modeli, FRP malzemeler için doğrusal elastik model kullanmışlardır. Donatı-beton arayüzünü Hameed [29] tarafından önerilen yaklaşımla modellemişlerdir. Bu yaklaşımda donatı çubuğunu, arayüz elemanının merkezinde bulunan bir donatı elemanı ve yapışma yüzeyindeki arayüzdeki eş değer sistem ile değiştirildiğini belirtmişlerdir. FRP malzemenin gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinde kopmaya kadar doğrusal elastik olduğunu kabul etmişlerdir. Epoksi yapıştırıcı kullanılarak beton-FRP malzeme arasında göçme anına kadar tam aderansın olduğunu varsaymışlardır. Sayısal modeli doğrulamak amacıyla deneysel çalışma yapmışlar ve deney sonuçlarını model sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Deneysel çalışmada, dikdörtgen betonarme kirişleri CFRP ve GFRP malzemelerle değişik şekillerde güçlendirmişlerdir. Çalışmada 1 adedi kontrol numunesi 6 adedi CFRP levha ve 2 adedi GFRP çubuk ile güçlendirilmiş 75x150x1350 mm boyutlarında toplam 10 adet dikdörtgen betonarme kirişi incelemişlerdir. 1. grupta 2 adet kontrol numunesi, 2. grupta CFRP levhanın değişik şekillerde kiriş yüzeyine yapıştırılmasıyla ile güçlendirilmiş 6 adet kiriş ve 3. grupta GFRP şerit ile güçlendirilmiş 2 adet kiriş olmak üzere deney kirişlerini 3 gruba ayırmış ve 3 noktalı eğilme deneyi yapmışlardır. Sonlu eleman model sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır. Öngörülen hasar ve çatlak modellerinin deney boyunca yaptıkları deneysel gözlemlerle uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu çalışmalarında öne sürdükleri bünyesel model ve modelin ihtiyaç duyacağı malzeme parametrelerinin mühendislerce oldukça basit bir şekilde belirlenebileceğini ifade etmişlerdir. Böylece pahalı ve zaman alan deney çalışmalarının yapılmasının önüne geçilebileceğini belirtmişlerdir.

Aktan vd. [30] çalışmalarında, betonarme kirişler için, geliştirilmiş von Mises akma kriteri ile izotropik hasar modeli yaklaşımını içeren elasto-plastik model kullanmışlardır. Geliştirilmiş von Mises akma kriteri için mevcut tek eksenli basınç ve çekme gerilmesi değerleri ile Oliver ve diğ. [31] çalışmasındaki izotropik hasar modeli parametrelerini düzenleyerek (Oliver vd. tarafından önerilen izotropik hasar modeli parametrelerini

kalibre etmek için) Hawileh vd. [32] tarafından test edilen 5 adet betonarme kirişin sayısal modellerini hazırlamış ve analiz etmişlerdir. Bu betonarme kirişlerin 4 adedi CFRP ve GFRP ile farklı biçimlerde güçlendirilmiş, 1 adedi kontrol numunesi olup; 2 noktalı yükleme altında test edilmişlerdir. Güçlendirilmiş kirişlerin eğilme momenti kapasitelerini ISIS EC 4 (2014) denklemleriyle hesaplamışlardır. FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin elasto plastik analizinde izotropik hasar modeli ile geliştirilmiş von Mises akma kriterini birlikte kullanmışlardır. Analizlerde LUSAS yazılımını kullanmışlardır. Beton ve FRP kompoziti sekiz noktalı hexahedral (HX8M) katı eleman olarak, donatıyı ise iki noktalı izoparametrik çubuk eleman (BRS2) olarak modellemişlerdir. Betonarme kirişteki çekme donatısının alt kısmındaki net beton örtüsünün, çok düşük yük seviyelerinde bile çatlayan zayıf bir malzeme olarak göz önüne alınabileceğini düşünmüşlerdir. Bu nedenle, kirişin bu kısmını, üst kısmındaki beton malzemesinden daha zayıf olarak kabul etmişler ve bu kısımdaki malzeme parametrelerini daha düşük değerler olarak seçmişlerdir. Analitik ve deneysel sonuçları karşılaştırarak yük yer değiştirme davranışının tahmini için önerdikleri analitik yaklaşımın uygun olduğunu doğrulamışlardır. Daha zayıf bir malzeme olarak ifade ettikleri net beton örtüsü için malzeme parametrelerinin tanımının, kirişin genel davranışını kuvvetli şekilde etkilediğini görmüşlerdir. ISIS EC 4 (2004) analitik denklemlerinin güçlendirilmiş kirişlerin eğilme kapasitelerini çok iyi şekilde tahmin ettiğini doğrulamışlardır.

Sayed vd. [33] , çalışmalarında FRP kumaşlarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerdeki göçme çeşitlerini ve limit kesme kapasitesini belirlemek için 3 boyutlu sonlu eleman analizleri yapmışlardır. Uzunluğu 2400 mm olan yüksekliği 400 mm genişliği 160 mm'den 360 mm arasında değişen değerlere sahip 58 adet betonarme kiriş örneğini incelemiş ve sonlu eleman modeliyle analiz etmişlerdir. İnceledikleri kirişlerin beton basınç dayanımı 25 ila 50 MPa arasında değişmektedir. Tasarım modellerindeki tasarım kesme kapasitesini ACI 318'e göre hesaplamışlardır. Betonarme kirişlerde FRP'nin kirişin yan yüzeyine yapıştırılması, U sargı ve tam sargılamanın kesme kapasitesine katkısını tahmin etmek için bir sonlu eleman yaklaşımı benimsemişlerdir. Sonlu eleman analizleri için ANSYS yazılımı kullanmışlardır. Beton malzemeyi modellemek için 8 noktalı ve plastik şekil değiştirme kapasitesine sahip, ezilebilen ve çatlayabilen özellikte olan Solid 65 elemanı kullanmışlardır. Donatıyı 2 noktalı plastik şekil değiştirme kapasitesine sahip

Link 8 eleman olarak tanımlamışlardır. Sonlu eleman modelinde çubuk donatıları bilineer, izotropik ve elasto-plastik, çekme ve basınç altında aynı davranan malzeme olarak tanımlamışlardır. FRP kompoziti doğrusal elastik malzeme olarak kabul etmiş ve modellemek için Solid 46 elemanı kullanmışlardır. 3 boyutlu sonlu eleman analizi yapılan FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerdeki göçme modunun tahminini etkileyen parametreleri belirlemek için parametrik bir çalışma yapmışlardır. Bu parametrelerin kiriş genişliği, beton dayanımı, FRP kalınlığı, güçlendirme biçimi (tam, U-sargı ve yan yüzeye yapıştırma), FRP şerit yüksekliği ve FRP şeridin elastisite modülü olduğunu ifade etmişlerdir. Parametrik analiz sonuçlarından göçme modu ve kesme kapasitesi için bir model önermişlerdir. Önerdikleri modelden elde edilen sayısal sonuçları literatürden elde edilen 307 betonarme kirişden elde edilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Çalışmada önerilen modelin FRP ile güçlendirilmiş kirişteki göçme modunun (kopma ya da sıyrılma) tahmininde kullanılabileceği ve göçmedeki etkili birim şekil değiştirme değerlerinin tahmininde kullanılabileceğini belirlemişlerdir. Ayrıca kiriş genişliğinin, FRP ile güçlendirilmiş kirişlerin rijitlik ve dayanımında önemli bir faktör olduğunu; FRP kalınlığı arttıkça etkili birim şekil değiştirmenin azaldığını belirlemişlerdir. Sonlu eleman analizi sonuçlarına göre, beton dayanımının kirişteki çekme göçmesi olasılığına etkisinin, sıyrılma göçmesi olasılığından daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Beton dayanımı arttığında güçlendirilmiş kirişlerde kesme dayanımının da arttığını gözlemlemişlerdir.

Ha vd. [34], yaptıkları çalışmada, püskürtülen FRP laminelerle güçlendirilmiş kirişlerdeki arayüzey çatlağından kaynaklı sıyrılma (IC debonding) davranışını deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Çalışmanın deneysel kısmında 8 adedi FRP ile güçlendirilmiş ve 3 adedi kontrol kirişi olmak üzere 100x100x457 mm boyutlarında 11 adet kiriş üretmişlerdir. Beton ortalama basınç dayanımını 22,45 MPa olarak belirlemişlerdir. 1 adet betonarme çeliğini kirişlerin alt yüzünden 25 mm üste ani ve gevrek kırılmayı önlemek için yerleştirmişlerdir. Kirişlerde gerekli minimum donatı oranını ACI 318'e göre hesaplamışlardır. Kirişlerin güçlendirilmesinde GFRP kullanmışlardır. Betonarme numunelerin yük taşıma kapasitelerini, bu yüke karşılık gelen yer değiştirme ve birim şekil değiştirmeleri belirlemek için dört noktalı yükleme testi gerçekleştirmişlerdir. Güçlendirilmiş kirişlerdeki yük-yer değiştirme değerlerini, yük-birim şekil değiştirme değerlerini, çatlama yükünü, IC sıyrılma yükünü, maksimum yük ve enerji yutma

kapasitesini kontrol kirişleriyle karşılaştırılarak değerlendirmişlerdir. Kontrol numunelerinde ani ve gevrek kesme göçmesi gözlemlemişlerdir. Güçlendirilmiş kirişlerde ise kompozitteki IC sıyrılma ile kesme göçmesi, kompozitteki kopma ile kesme göçmesi ve kompozitteki IC sıyrılma ile kompozitteki kopma boyunca kesme göçmesi olmak üzere üç göçme modu gözlemlemişlerdir. FRP-beton birleşim noktalarındaki arayüz çatlağı tarafından tetiklenen sıyrılma birim şekil değiştirmelerini teorik olark hesaplamış ve deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Ara yüzey sıyrılmasındaki FRP kompozitin birim şekil değiştirme değerinin tahmini için Chen ve Teng modeli, Neubauer ve Rostasy modeli, geliştirilmiş Taljstan modeli ve Hollaway ve Teng modelini kullanmışlardır. Teorik çalışmalardan elde edilen FRP-beton birleşimindeki çatlak kaynaklı sıyrılma şekil değiştirmesi ve arayüz sıyrılma bölgesindeki FRP laminenin şekil değiştirme değerlerini hesaplamış ve deneysel verilerle karşılaştırmışlardır. FRP malzemenin kalınlığının ve oranının artmasının kırılma yükü, maksimum yük ve enerji yutma kapasitesinde, güçlendirme performansının artmasında daha fazla etkili olduğunu belirlemişlerdir. Yazarlar, yaptıkları bu çalışmanın arayüz çatlağının neden olduğu FRP sıyrılmasının anlaşılması için mevcut bilginin genişletilmesine katkıda bulunduğunu düşünmektedir.

Al-Rousan [35], çalışmasında CFRP levhaların sayı ve planının betonarme kirişlerdeki eğilme momenti, yer değiştirme, CFRP'deki çekme birim şekil değiştirmesi, akma momenti, beton basınç gerilmesi ve enerji yutma kapasitesine etkilerini incelemiştir. Farklı sayıda CFRP levhaların farklı şekillerde kullanılması ile güçlendirilmiş aynı geometri ve donatı detayına sahip 36 adet betonarme kirişi ve 7 adet kontrol kirişinin ANSYS yazılımını kullanarak doğrusal olmayan sonlu eleman analizi yapmıştır. Her gruptaki 5 kirişi sırasıyla 1, 2, 3, 4 ve 5 kat CFRP levha ile güçlendirmiştir. Modellediği kirişler 150x240x2440 mm boyutlarındadır. İncelenen temel parametrelerin CFRP kalınlığının kiriş derinliğine oranı, CFRP yüksekliğinin kiriş derinliğine oranı olduğunu belirtmiştir. Güçlendirme tasarımının eğilme göçmesi esasına dayandığını ifade etmiştir.

Betonu, plastik şekil değiştirme kapasitesine, ezilme, sünme ve 3 ortogonal yönde çatlama kapasitesine sahip SOLID65 eleman olarak modellemiştir. Donatı için elastisite modülünü 200 GPa, poisson oranını 0,3, akma gerilmesini 413 MPa almış ve üç boyutlu LINK8 eleman olarak modellemiştir. FRP levha ve epoksi malzemeleri SOLID 46 eleman

olarak modellemiştir. Kirişlerin davranışlarını 4 noktalı eğilme yükü altında analiz etmiştir. Çalışmada, CFRP levha sayısının artmasıyla en yüksek dayanımda dikkate değer bir artış gözlemlemiştir. Tek tabakalı çekme levhası ile güçlendirilmiş kirişlerdeki göçmenin, donatının akmasıyla başladığını, CFRP'nin bir kısmının göçmesiyle devam ettiğini ve finalde basınç bölgesinde betonun ezildiğini gözlemlemiştir. Diğer güçlendirilmiş kirişlerde göçmenin, donatının akmasıyla başladığını, bu durumu CFRP'nin kopmadan ya da ayrılmadan betonun ezilmesini izlediği belirtmiştir. CFRP levha sayısının ya da CFRP kalınlığının kiriş derinliğine oranındaki artışın enerji yutma kapasitesini azalttığını belirtmiştir. Ayrıca doğrusal olmayan sonlu eleman analizinin modellemede çok etkili bir araç olduğunu ve deneysel çalışmalar ile karşılaştırıldığında kompozit yapısal elemanların modellenmesinde minimum zaman ve minimum maliyet sağladığını vurgulamıştır.

Wang X., vd. [36] çalışmalarında, FRP levhalarla güçlendirilmiş kirişlerin maksimum eğilme yorulma kapasitelerinde etkili parametreleri belirlemek için 3 boyutlu sonlu eleman analizi yapmışlardır. Farklı boyut ve uzunluktaki 47 adet teorik deney numunesini tasarlamış ve FEM ile analizetmişlerdir. Temel parametreleri ve ikincil parametreleri yansıtmak için yorulma kapasitesini tahmin eden model geliştirmişlerdir. Bu temel parametrelerin donatının yorulma davranışı, FRP levhalar, beton-FRP arasındaki aderans olduğunu belirtmişlerdir. İkincil parametrelerin ise donatının akma dayanımı, beton dayanımı, FRP malzemenin genişliği ve kalınlığı ve diğer parametreler olduğunu ifade etmişlerdir. Önerilen modelin hassasiyetini doğrulamak için literatürdeki deneysel çalışmalardan elde edilen 181 adet kirişi analiz etmişlerdir. Sonlu eleman analizlerinde ANSYS yazılımını kullanmışlardır. Betonu modellemek için sekiz noktalı, her noktada üç serbestlik derecesine ve plastik şekil değiştirme kapasitesine sahip, 3 ortagonal yönde çatlayan ve ezilebilen SOLID65 elemanı kullanmışlardır. Çeliği modellemek için 2 noktalı ve her noktada 3 serbestlik derecesine ve plastik şekil değiştirme kapasitesine sahip LINK8 elemanı kullanmışlardır. Donatıyı sonlu eleman modelinde bilineer, izotropik, elastik-tam plastik malzeme olarak tanımlamışlardır. Kirişleri desteklemek için kullanılan çelik plakaları modellemek için 8 noktalı her noktada 3 serbestlik derecesine sahip SOLID 45 eleman olarak modellemişlerdir. Sonlu elaman modelinde çelik plakaların elastisite modülünü 210 GPa ve poisson oranını 0,3 olan

doğrusal elastik malzeme olduğunu varsaymışlardır. FRP malzemeyi her noktada 3 serbestlik derecesine sahip SOLID46 eleman olarak modellemişlerdir. FRP ve beton arasındaki arayüzü TARGE170 ve CONTA174 temas elemanı kullanarak modellemişlerdir. Parametrik çalışmada eğilme yorulma davranışında; boyuna çekme donatısı alanı, donatının akma dayanımı, kiriş genişliği, beton dayanımı, kiriş derinliği, kesme açıklığı, FRP levha kalınlığı ve genişliği, FRP levha çekme dayanımı ve kiriş maksimum taşıma yükü gibi parametrelerin etkisini değerlendirmişlerdir. Çekme boyuna donatı kesit alanının monotonik ve çevrimsel yük altında kirişin dayanım ve rijitliğini doğrudan etkileyen önemli bir faktör olduğunu belirtmişlerdir. Kesme açıklığının kirişteki eğilme yük kapasitesinde direkt etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Tahmin ettikleri sonuçların deneysel sonuçlarla uyum gösterdiğini belirtmişlerdir. Çalışmanın sonuç olarak FRP ile güçlendirilen ve güçlendirilmeyen kirişlerin yorulma kapasitesinin tahmini için önerdikleri modelin hassasiyetinin yüksek olduğunu yansıttığını vurgulamışlardır. Böylelikle FRP malzeme ile güçlendirilmiş ya da güçlendirilmemiş kirişlerde güvenli tasarım prosedürlerinin geliştirilmesinde önerdikleri modelin kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Kim vd. [37], çalışmalarında 3 veya 4 tabakalı gittikçe uzunlukları azalan ve uzunlukları değişmeyen CFRP ve GFRP şeritlerle güçlendirilmiş betonarme kirişlerdeki arayüz kesme gerilmesi ile maksimum moment arasındaki ilişkiyi deneysel ve analitik olarak araştırmışlardır. Kirişleri 4 noktalı yükleme altında test etmiş ve yük-yer değiştirme eğrilerini elde etmişlerdir. Tüm analizleri ABAQUS yazılımı kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarını deneysel sonuçlar ile kalibre etmişlerdir. Deneysel sonuçların, uzunlukları gittikçe azalan FRP şeritlerin güçlendirme etkisini arttırdığını ve daha düşük arayüz gerilmeleri ortaya çıkardığını gösterdiğini belirtmişlerdir. FRP şeritler ile güçlendirilmiş kirişlerin göçmesinde sadece malzeme dayanımlarının değil beton ile FRP şerit arasındaki aderansın da etkili olduğunu vurgulamışlardır. Analitik çalışmanın ise uzunlukları gittikçe azalan FRP şeritlerle güçlendirilen kirişlerdeki arayüze ilişkin kesme gerilmeleri arasındaki ilişkiyi doğruladığını ifade etmişlerdir.

Oehlers vd. [38], çalışmalarında genelde eleman boyunca olan orta bölgedeki sıyrılmayı (IC debonding) bir bölge ya da parçadaki yerel IC sıyrılmayı dikkate alan uygun bir model

geliştirmeye çalışmışlardır. FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerde dayanım ve sünekliği ölçmek için yeni yaklaşımlar için temel teknikleri tanımlamışlardır. Dayanımı arttırmak için FRP levhaların ve bunlarla güçlendirmenin nasıl yapılabileceğini araştırmışlardır. Çalışmanın amacının mevcut FRP malzemeler için ya da gelecekte geliştirlebilecek yeni FRP malzemeler için uygulamada direkt kullanılabilen kapsamlı mekaniğe dayalı tasarım yaklaşımı ya da basit tasarım kurallarını geliştirebilmek olduğunu ifade etmişlerdir. Yapım yönteminin servis davranışını etkilediği ancak limit yükü etkilemediğini belirtmişlerdir. Süneklik için tasarlanan kirişlerde FRP ile sargılanan kirişlerin sargısız kirişlerden daha büyük dayanım gösterdiğini belirtmişlerdir.

Köksal vd. [39], çalışmalarında CFRP kumaş ile güçlendirilmiş yedi adet betonarme deney kirişinde üç nokta eğilme deneyi yapmışlar ve deney sonuçlarını Amerikan Beton Enstitüsünün Lif Takviyeli Polimer Sistemleri ile Güçlendirme Yönetmeliğindeki (ACI 440.2R-08) öneriler ile karşılaştırmışlardır. 150x250x1500 mm boyutlarında, iki farklı beton dayanımına sahip olacak şekilde ürettikleri deney kirişlerini iki gruba ayırarak incelemişlerdir. 4 adet betonarme kirişten oluşan ilk grup numuneleri 25,7 MPa beton dayanımına sahip beton kullanarak üretmişlerdir. 3 adet betonarme kirişten oluşan ikinci grup numuneleri ise 6,8 MPa beton dayanımına sahip beton kullanarak üretmişlerdir. Her iki grupta da bir adet güçlendirilmemiş kontrol numunesi, bir adet alt yüzeyi CFRP ile güçlendirilmiş kiriş, bir adet alt yüzeyi ile birlikte çekme donatısını içine alacak şekilde yan yüzeye CFRP yapıştırılarak güçlendirilmiş kiriş mevcut olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca birinci grupta bir adet de U şeklinde CFRP ile sargılanmış kiriş bulunduğunu belirtmişlerdir. Bütün deney kirişlerini üç noktalı eğilme yüklemesi altında test etmiş ve göçme yüklerini ACI 440.2R-08 kodundaki eşitlik ile bulunan değerlerle karşılaştırmışlardır. Deney sonuçlarından, beton mukavemetinin, yapışmanın kesme gerilmesi için güçlendirilmiş kirişlerin eğilme kapasitesini hesaplamak için önemli bir parametre olduğunu belirlemişlerdir. Alt yüzey ve çekme donatısını içine alacak şekilde yan yüzeyi CFRP kumaşla güçlendirilmiş kirişlerin göçme yüklerini, ACI-440.2R-08 ile hesaplanan tasarım yükleri ile kararlaştırdıklarında uyumlu olduğunu belirlemişlerdir.

Hassan vd. [40], çalışmalarında boşluklu betonarme kirişlerde boşluk etrafındaki güçlendirme biçimlerini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. 1800 mm açıklığa sahip 57 betonarme kirişte ANSYS yazılımı kullanılarak sonlu eleman analizi yapmışlardır.

Bu kirişlerden 9 adedinin kontrol kirişi olup; bir adedinin boşluksuz, 4 adedi 200x100 mm boşluğa sahip ve boşluk merkezinden mesnete olan uzaklığının 225, 300, 350 ve 400 mm olan ve diğer 4 adedinin ise 300x100 mm boşluğa sahip ve boşluk merkezinden mesnete olan uzaklığının 225, 300, 350 ve 400 mm olduğunu belirtmişlerdir. CFRP ve GFRP kullanarak açıklık etrafında güçlendirdikleri diğer kırk sekiz betonarme kirişi güçlendirme şekline göre altı gruba ayırmışlar ve her grupta, kontrol kirişlerinde bulunan kirişlere benzer sekiz kiriş bulunduğunu belirtmişlerdir. Kiriş üretiminde 25 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanmışlardır. Boşluklu tüm kirişlerin güçlendirmesini açıklık çevresinde altı farklı şekilde FRP kullanarak yapmışlardır. Güçlendirmeyi (1), boşluğun etrafında dikey ve yatay CFRP levha kullanarak, güçlendirme (2), yatay levhanın yanı sıra boşluğun etrafında CFRP levhayı 45 derece eğim kullanarak, güçlendirme (3) ve (4) sırasıyla güçlendirme (1) ve (2) ile aynı ancak GFRP tabakaları kullanarak, güçlendirme (5) ve (6) sırasıyla güçlendirme (3) ve (4) ile aynıyken, kirişin ortasında eğilme alanında U şeklinde ek bir güçlendirme ile yapmışlardır.

Çalışmada, kirişlerin göçme yüklerini, çatlak düzeni, birim şekil değiştirmeyi, göçme biçimi ve enerji yutma kapasitesini analiz etmişlerdir. Analiz sonuçlarını İbrahim [41] tarafından 15 kiriş üzerinde yapılan deneysel çalışma karşılaştırmışlardır. FRP kullanarak kirişlerin boşluk bölgesinin güçlendirilmesinin, kirişin genel rijitliğini önemli ölçüde arttırdığını ve boşluk açılmasından dolayı kirişte kaybolan rijitliğin bir kısmını geri kazandırdığını vurgulamışlardır. GFRP levhaları iki kat kullanarak yapılan güçlendirme (3) ve (4)'ün, bir kat CFRP ve GFRP levhaları ile yapılan güçlendirme (1) ve (2) ile yaklaşık olarak eşit en büyük yük değerine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Bu durum yazarlar tarafından, katman sayısının önemli bir etkiye sahip olmadığı ve toplam katkının bir kat FRP tarafından yapıldığı olarak yorumlanmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Deprem etkisinde gerekli dayanım, süneklik ve rijitlik koşullarını sağlayamayan betonarme yapılar çeşitli yöntemlerle güçlendirilmektedir. Güçlendirme yöntemlerinin genel amacı eleman ya da sistemin dayanımını, sünekliğini ve rijitliğini istenilen düzeye getirmektir. Yapıların güçlendirilmesinde, geleneksel tekniklere ek olarak yeni teknikler

geliştirilmekte ve yapı sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. FRP malzemeler ile güçlendirme de bu yeni teknikler arasında yer almaktadır.

FRP malzemenin uygulanmasının hızlı ve kolay olması, FRP malzemenin yüksek dayanımlı ve düşük öz ağırlığa sahip olması, uygulandığı yapı elemanının şeklini değiştirmemesi, yüksek korozyon dayanımına sahip olması, eksenel çekme kapasitelerinin yüksek olması, yorulma mukavemetinin yüksek olması, kirişlerde eğilme, kesme dayanımlarını ve süneklik kapasitelerini arttırması ve çok farklı şekil ve çeşitlerde bulunması gibi sebeplerden dolayı yapısal elemanların güçlendirilmesinde son yıllarda tercih edilmektedir. FRP malzemenin dezavantajları ise dayanımın lif doğrultusuna bağlı olarak değişmesi, aderans/kenetlenmede düz yüzeyden dolayı problem oluşması ve pahalı bir malzeme olmasıdır.

Dıştan yapıştırılan lif takviyeli polimer malzemenin kirişin eğilme kapasitesini artırdığı birçok çalışmada incelenmiştir. İncelenen çalışmalarda güçlendirilen kiriş elemanının davranış ve kapasitesini etkileyen en önemli parametrelerden birinin güçlendirme şekli olduğu belirlenmiştir.

Güçlendirme amacıyla yapıştırılan FRP malzemenin göçme mekanizmalarının kirişin davranışı, rijitliği, dayanımı ve süneklik performansı üzerinde son derece etkili olduğu görülmüştür. Literatürde yer alan deneysel çalışmalar incelendiğinde betonarme elemanların yüzeyine yapıştırılan FRP malzemeler için üç temel göçme mekanizması olduğu görülmüştür. Gözlenen göçme mekanizmaları, FRP malzemenin beton yüzeyden soyulması, FRP malzeme ve beton yüzey arasındaki epoksinin kayma dayanımının aşılması ve FRP malzemenin kopması olarak sayılabilir. FRP malzeme eksenel çekme kapasitesinin çok yüksek olmasından dolayı kopması çok nadir gözlenen ve istenilen bir durumdur. Bu durum FRP malzemenin tüm dayanımından yararlanıldığı ve güçlendirmenin amacına ulaştığını gösteren önemli bir belirtidir. Genellikle FRP malzemenin, kopma dayanımına ulaşmadan çok daha önce beton kabuk ile birlikte yüzeyden soyulması ya da epoksinin kayma dayanımının aşılması göçme mekanizmaları çok daha öncede meydana gelmektedir. FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerde en çok gözlemlenen göçme mekanizması FRP ile birlikte beton kabuğunun yüzeyden soyulmasıdır. Bu göçme biçimi betonarme kirişlerin istenilen dayanım ve süneklik

düzeyine ulaşmasına engel olmakta ve kirişler çekme donatısı akma kapasitesine ulaşmadan çok daha önceki dayanım düzeylerinde göçmektedir.

CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerde eğilme performansı/maliyet oranını iyileştirmek bu çalışmanın başlıca amacıdır. Bu amaca ulaşmak için dikkate alınması gereken en önemli faktörün çekme donatısı altında kalan beton örtüsü (örtü beton) olduğu kabul edilmiştir. Bu doğrultuda altı adet betonarme kirişe a) sadece kirişin alt yüzeyine, b) kirişin alt yüzeyine ve eğilme donatısını içine alacak şekilde iki yan yüzeye 50 ve 70 mm yükseklikte, c) kirişin alt yüzeyi ile birlikte yan yüzeylerinin büyük bir kısmına U şeklinde CFRP kumaş yapıştırılmıştır. Kirişlerin boyutları 150×250×2600 mm olup 1. grup ve 2. grup deney kirişlerinin net beton örtüleri sırasıyla 20 mm ve 40 mm olarak seçilerek bu zayıf kısmın davranışının eğilme performansına olan etkisi sorgulanmıştır. Her bir deney serisinde yer alan bir adet kontrol kirişinin davranışı referans alınarak kirişlerin eğilme davranışlarında gözlemlenen iyileşmeler karşılaştırmalı olarak gözlenmiştir.

Çekme donatısı altında kalan net beton örtüsünün deneysel davranışa olan etkisini araştırmak için, doğrusal olmayan sonlu eleman analizlerinde bu kısım için pratik bir malzeme modeli geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yığma blok ile harç arasındaki enterfaz davranışının harç malzemenin modellenmesinde düşünülmesi gibi beton ve CFRP arasındaki enterfaz davranışı bu model içerisinde düşünülmüştür. Böylelikle mevcut uygulaması güç, deneysel ölçümlere dayanmayan modellere alternatif kolay uygulanabilir bir yaklaşım önermek amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Lifli polimer ile dıştan sargılama yöntemiyle güçlendirilmiş betonarme kiriş davranışında donatı altında kalan ve neredeyse ilk yüklemelerle birlikte çatlayan ve bu nedenle tasarım hesaplarında dikkate alınmayan net beton örtüsü; güçlendirilmiş kirişin eğilme davranışını önemli oranda etkilemektedir. Bu hipotezi denemek amacıyla bir deneysel program tasarlanmıştır. Deneysel çalışmada; kirişin sadece alt bölgesine CFRP kumaş yapıştırılmasıyla yapılan güçlendirme; kirişin alt yüzeyi ile birlikte çekme donatısını içine alacak şekilde yan yüzeylere CFRP kumaş yapıştırılmasıyla yapılan güçlendirme ve CFRP kumaş ile kirişin alt yüzeyi ile birlikte yan yüzeylerinin büyük bir kısmının U şeklinde

sargılanması ile yapılan güçlendirmenin kirişin eğilme davranışına olan etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Benzer varsayım doğrusal olmayan sonlu eleman modellerine taşınarak çekme donatısı altında kalan net beton örtüsü için sanal bir malzeme modeli kullanılmıştır. Bu model kirişte kullanılan betondan daha zayıf olarak düşünülen davranış parametrelerini içermektedir. Aynı zaman da sayısal analizlerde elasto-plastik hasar modelinin ihtiyaç duyduğu parametreler belirlenerek tüm kiriş için çözümlemeler gerçekleştirilmiştir. Böylelikle sanal malzeme kabulü ve bu kısma ait parametrelerinin kullanılmasının etkisi incelenecektir. İncelemedeki en önemli nokta çatlama bölgesinden elde edilecek kırılma enerjisi değeri olacaktır. Net beton örtüsü için öngörülen kırılma enerjisi değerine ulaşılmasıyla analizler sonlandırılacaktır. Modellemenin geçerliliği doktora çalışmasında elde edilen deneysel sonuçlar ve literatürde mevcut çalışmalarla denenerek gösterilmiştir.

BÖLÜM 2

LİF TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİT MALZEMELER

Lif takviyeli polimer (FRP) kompozitler bir polimer matrisinin içine gömülmüş liflerden oluşmaktadır [42], [43], [44]. Lif ve matrisin birleşiminden oluşan bu kompozit malzeme orijinal bileşenlerinden daha üstün özelliklere sahiptir. Malzemeyi oluşturan bileşenlerin her biri kompozitte kendi karakteristik yapısı ve özelliklerini korur [45]. FRP kompozitler çelik veya alüminyum gibi geleneksel yapı malzemelerinden farklı özellik gösterirler. FRP kompozitler anizotropik yani uygulanan yük yönünde belirgin özellik gösterirler [46], [47].

2.1 Lif Takviyeli Polimer Kompozit Malzemenin Bileşenleri

2.1.1 Lifler

Liflerin ana fonksiyonları, yükü taşımak ve FRP'de rijitlik, mukavemet, termal kararlılık ve diğer yapısal özellikleri sağlamaktır [48]. FRP kompozitinin performansı, liflerin tipi, hacim oranı, yönü ve matrisin mekanik özellikleri ile değerlendirilebilir [49], [50], [51]. Liflerin yönü, yapısal elemanın yükleme yönü ile aynı yönde olursa liflerin yüksek mukavemet ve rijitlik özelliklerinden yararlanılabilir [50]. Kompozit malzemede, lifler genellikle matris hacminin %30 - %70'ini oluşturur [45]. Yapısal uygulamalar için kullanılan kompozitlerdeki en yaygın lif türleri cam, aramid ve karbondur [45], [52].

Karbon Lif: Yapısal mühendislik uygulamalarında dayanımları nedeniyle karbon lifler güçlendirme için yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2. 1 Kırpılmış karbon lif [53]

Karbon lifler çok dayanıklıdır ve sıcak ve nemli ortamlarda ve yorulma yüklerine maruz kaldıklarında çok iyi performans gösterirler [42], [54]. Nemi emmezler. Uzunlamasına yönlerinde negatif veya çok düşük ısıl genleşme katsayısına sahiptirler, bu da onlara mükemmel boyutsal kararlılık kazandırmaktadır. Bununla birlikte, bu lifler termal ve elektriksel olarak iletkenlerdir [54]. Bu lif çok yüksek yorulma ve sünme direncine sahiptir. Bu liflerin darbe dayanıklılığı, aramid ve cam liflerden daha azdır. İlk çıktığında karbon lifler maliyet bakımından pahalı olmasına rağmen, bu malzemenin tüketimi büyük ölçüde arttıkça ve kalite iyileştikçe, maliyet önemli ölçüde azalmıştır [55]. Genel bir kural olarak, lifin çapı ne kadar küçük olursa, mukavemeti o kadar yüksek olmaktadır, ancak çoğu zaman çap küçüldükçe maliyet artmaktadır [51].

Cam Lif: Cam liflerin karakteristik özellikleri, yüksek mukavemet, kimyasallara karşı yüksek dirençli olması ve düşük maliyetli olmasıdır [52] (Şekil 2.2).



Şekil 2. 2 Kırpılmış cam lif [56]

Dezavantajları düşük çekme modülü, taşınırken aşınmaya karşı direncinin düşük olması, nispeten düşük yorulma direncine sahip olmaları ve kırılgan olmalarıdır [57]. Cam lifler

ayrıca sünme kopmasına karşı hassastır ve uzun süreli gerilmeler altında mukavemet kaybederler. Cam liflerin yüke dayanma sınırı genellikle en yüksek mukavemetin % 60'ından daha azdır [54].

Aramid Lif: Bu lifler bugün kullanılan takviye lifleri arasında en düşük özgül ağırlığa ve en yüksek çekme-mukavemet-ağırlık oranına sahiptir (Şekil 2.3).



Şekil 2. 3 Aramid lif [58]

Cam liften % 43 daha hafif ve çoğu karbon lifden yaklaşık % 20 daha hafiftirler. Yüksek mukavemete ek olarak, lifler ayrıca kimyasal ve termal bozulmanın yanında aşınma ve darbeye karşı da iyi bir direnç gösterirler [57]. Karbon lifleri gibi, lif uzunlamasına yönünde negatif genleşme katsayısına sahiptirler. Nispeten yüksek fiyatlı olması, kesme ve işlenmedeki zorlukları, yüksek nem emme, düşük erime sıcaklıkları ve nispeten zayıf basınç özellikleri onları yapısal mühendislik uygulamalarında FRP kompozit için daha az kullanılır hale getirmiştir [54].

2.1.2 Matris

Matris, lifleri birbirine bağlayan FRP kompozitinin polimer bileşenini ifade eder [42]. Yapısal kompozit malzemeler için matris, en yaygın olanı termoset tipi veya termoplastik tipte olabilir. Polyester, vinylester ve epoksi, yüksek performanslı takviye lifleri ile kullanılan en yaygın kullanılan polimerik matris malzemeleridir. Epoksiler polyester ve vinil esterlerden daha pahalıdır, ancak genel olarak daha iyi mekanik özelliklere ve olağanüstü dayanıklılığa sahiptirler [59].

Yüklerin çoğu, lifler tarafından paylaşıldığı için matrisler FRP kompozitin dayanımına önemli bir katkıda bulunmazlar [42]. Matris reçinesinin ana fonksiyonları, takviye lifleri

arasındaki gerilmeyi transfer etmek, lifleri bir arada tutmak için bir tutkal görevi görmek ve lifleri mekanik ve çevresel hasara karşı korumaktır [46]. Matrisler düşük büzülme ve termal genleşme katsayısı, yükü liflere transfer etmek için elastikiyet, yüksek sıcaklıkta dayanım, mükemmel kimyasal direnç ve boyutsal stabilite gibi özelliklere sahiptir.

Uygun matrisin seçilmesi, süneklik, darbe dayanımı gibi performans özelliklerini etkiler. Matris malzemesinin türü ve liflerle uyumluluğu da önemli ölçüde yapının göçme modunu etkiler [48], [60]. Kompozitlerin başarılı bir şekilde güçlendirme uygulamalarında kulanılması, matris ve takviye lifleri arasında güçlü bir yapışma ve arayüzey kuvvetleri gerektirir, ayrıca bu güçlü etkileşimin her türlü yükleme sırasında korunması gerekmektedir [61]. Lifler arasında oluşturulan kesme kuvvetleri matrisin özellikleriyle sınırlıdır. Matrisin liflerden daha yüksek bir birim şekil değiştirme kabiliyetine sahip olması önemlidir. Eğer değilse, lifler gücünü kaybetmeden önce matriste çatlaklar olacaktır ve lifler korunmayacaktır [62].

2.2 FRP Kompozit Malzemelerin Fiziksel Özellikleri

Temel olarak, FRP kompozitlerin özellikleri, bileşenlerinin özelliklerine, hacim oranlarına, liflerin yönüne ve lif-matris bağının özelliklerine bağlıdır.

2.2.1 Yoğunluk

FRP kompozitin en önemli özelliklerinden biri, yoğunluğunun düşük olmasıdır [63]. FRP kompozitlerin yoğunluğunun düşük olması, onlara yüksek düzeyde spesifik rijitlik ve spesifik mukavemet sağlamaktadır [64]. FRP malzemeleri (1,2 ila 2,1 g / cm^3) arasında değişen yoğunluklara sahiptir ve bu değerler dört ila altı kez çeliğin yoğunluk değerinden daha düşüktür. Düşük yoğunluk, nakliye maliyetlerini düşürür, yapıya eklenen ölü yükü azaltır ve malzemelerin proje sahasına taşınmasını kolaylaştırır [65].

FRP kompozit malzemenin yoğunluğu;

$$\rho_c = \rho_m.V_m + \rho_f.V_f \tag{2.1}$$

eşitliği ile bulunur. Eşitlikte,

ρ_c kompozitin yoğunluğunu, ρ_m matris malzemesinin yoğunluğunu, V_m matrisin hacmini, ρ_f lifin yoğunluğunu ve V_f lifin hacmini göstermektedir [63].

2.2.2 Elastisite Modülü

Kompozit malzemeyi güçlendiren liflerin türü ve yönü elastisite modül değerini önemli ölçüde etkiler. Liflerin hacim oranı, hem uzunlamasına hem de enine olarak kompozitin nihai modül değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Tek yönlü lifli polimerler için boyuna doğrultudaki elastisite modülü;

$$E_L = E_f.V_f + E_m.V_m \tag{2.2}$$

eşitliği ile hesaplanabilir.

Burada, E_L kompozitin boyuna modülünü (lifin yönünde), E_f lifin modülünü, V_f lifin hacmini, E_m matrisin modülünü ve V_m matrisin hacmini göstermektedir.

FRP malzemelerin çekme elastisite modülü, basınç elastisite modülünden genellikle daha büyüktür [65].

2.2.3 Poisson Oranı

Bir kompozit malzemenin poisson oranı, liflerin yönüne bağlı olarak büyük ölçüde değişebilir. Liflerin yönü ile yük yönü arasındaki açı 0° olduğunda, poisson oranı genellikle metallere benzer değerlere sahiptir, 0,25 ile 0,35 arasındadır.

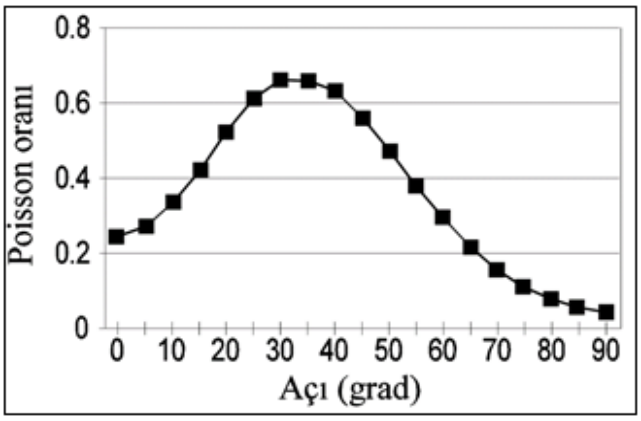
kompozitin poisson oranı;

$$\upsilon = \upsilon_f.V_f + \upsilon_m.V_m \tag{2.3}$$

eşitliği ile hesaplanır.

Burada, υ kompozitin poisson oranını, υ_m matrisin poisson oranını, V_m matrisin hacmini, υ_f lifin poisson oranını ve V_f lif malzemenin hacmini göstermektedir.

Şekil 2.4'de, poisson oranının liflerin eğim açısı ile nasıl değiştiği görülmektedir.



Şekil 2. 4 Liflerin eğim açısının bir fonksiyonu olarak poisson oranı [63]

2.2.4 Isıl Genleşme Katsayısı

Tek yönlü FRP malzemelerin ısıl genleşme katsayıları, reçinenin, lifin ve lif hacminin türüne bağlı olarak enine ve boyuna yönlerde farklılık göstermektedir.

2.2.5 Yüksek Sıcaklığın Etkisi

FRP kompozit malzemesinde liflerin termal özellikleri reçineden daha iyidir. Lifler belirli bir sıcaklık eşiğine ulaşıncaya kadar uzunlamasına yönde yükü taşımaya devam edebilirler. Bu sıcaklık eşiği aramid lifler için yaklaşık 175 ° C cam lifler için 1000 ° C'dir. Karbon lifleri 275 ° C'den daha yüksek sıcaklığa dayanabilirler [65].

2.3 FRP Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri

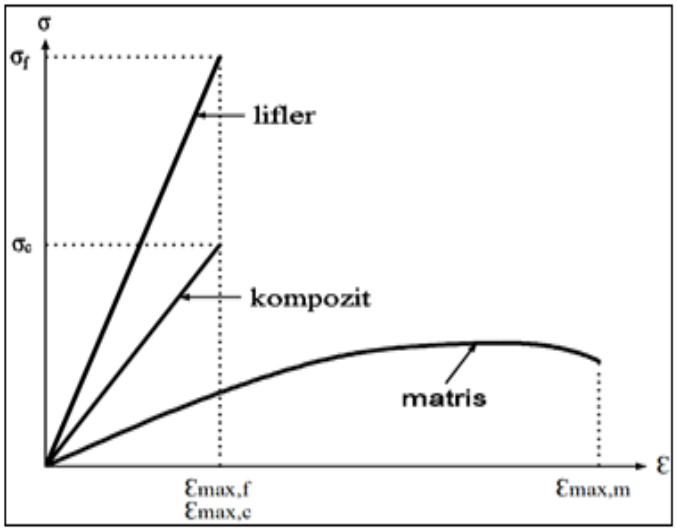
2.3.1 Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkisi ve Çekme Dayanımı

Şekil 2.5'de, tek yönlü olarak takviye edilmiş kompozit polimer ve bileşenleri için, liflerin yönündeki gerilme testi sırasında, ayrı ayrı basitleştirilmiş bir gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi sunulmuştur [63]. Matrisin maksimum şekil değiştirmesinin liflerin maksimum şekil değiştirmesinden çok daha büyük olduğu varsayılmaktadır. $\left(\varepsilon_{\max,m} \gg \varepsilon_{\max,f}\right)$ Bu varsayımla, $\sigma(\varepsilon)$ fonksiyonu lifler, matris ve kompozit için $\left(0;\varepsilon_{\max,f}\right)$ aralığında doğrusala yakındır.

Lif ve matris arasında ideal bir bağ olduğu varsayılırsa, bu

$$\sigma_c = \sigma_f . \upsilon_f + \sigma_m . \upsilon_m \quad (2.4)$$

eşitliği ile hesaplanabilir [64].



Şekil 2. 5 FRP kompozit ve bileşenlerinin gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi [66]

Bununla birlikte, reçine içinde küçük çatlaklar; basınçta lif burkulması; lif sıyrılması; matris ve liflerin veya her ikisinin viskoelastik şekil değiştirmesi formülasyonundan dolayı doğrusal olmayan davranışda gözlenebilir. Kompozit, kırılgan bir malzemedir ve plastik olarak akmaz, limit dayanımı ve göçme dayanımı aynıdır [64]. Kompozitteki bozulma, liflerin maksimum birim şekil değiştirmelerinin bir sonucu olarak gerilme değerleri için meydana gelmektedir. Eksenel çekme ve basınç mukavemetinde, lif özellikleri etkilidir. Çünkü eksenel yükün çoğunu lifler taşırlar. Onların rijitliği matristen daha yüksektir. Lif çekme yükü altında göçtüğünde, matris, liflerin yanal yüzeyindeki kesme gerilmesi ile yer değiştirmeye direnç gösterir. Basınç altında matris, liflerin dengede tutulmasına yardımcı olur ve düşük gerilme seviyesinde basınç burulmasını engeller [48].

2.4 FRP Kompozit Malzemenin Zamana Bağlı Davranışı

2.4.1 Sünme kopması

Zaman içinde sabit bir yüke maruz kalan FRP malzemeleri, dayanıklılık süresi olarak adlandırılan bir süreden sonra aniden göçebilir. Bu tür bir göçme sünme-kopması olarak bilinmektedir. Genel olarak sünme kopmasına en hassas olan cam liflerdir, aramid lifleri

orta derecede hassas ve karbon lifleri en az hassas olanlardır. Dayanıklılık süresi, ıslanma kuruma döngüsü, donma çözülme döngüsü, ultraviyole ışınlara maruziyet yüksek sıcaklık ve yüksek alkalilik gibi olumsuz çevre koşullarında da azalmaktadır [65]. Çoğu FRP kompoziti için, sünme şekil değiştirmesi, yüksek gerilme seviyeleri veya yüksek sıcaklıklar ya da ikisinin kombinasyonunda önemli rol oynar. Eğer yapının yükü üreticinin tavsiye ettiği gerime seviyelerinde tutulursa sünmenin önemli bir faktörü olmayacaktır [67].

2.4.2 Yorulma

Yorulma, çok sayıda yükleme döngüsünün tekrarlanması sonucunda bir malzemenin bütünlüğünün bozulması olarak tanımlanabilir. Malzemenin bütünlüğü genel olarak dayanım ve rijitlik gibi mekanik özellikler üzerinden ölçülür. Dayanımdaki kayıp bileşenin göçmesiyle doğrudan ilişkilidir [59]. FRP kompozit malzeme metalik malzemelerden daha fazla ölçüde gelişmiş yorulma direnci gösterir. Materyal güçlü olduğu için FRP'de yorulma göçmesi yaşanmaz. Daha büyük yapılarda sınırlı araştırma olmasına rağmen, FRP'deki yorulma göçmesinin bağlantılar ve ankrajlar dışında meydana gelmesi olası değildir [62]. FRP kompozitlerinden yorulma göçmesine en az eğilimli olan malzeme CFRP'dir. CFRP'nin başlangıç statik nihai dayanımının % 60 ila 70'i kadar bir dayanma limiti vardır.

2.5 Dayanıklılık

Birçok FRP malzemede, nem, sıcaklık ve kimyasallara maruz kalma dahil olmak üzere belirli çevresel etkilere maruz kaldıktan sonra mekanik özelliklerinde azalma gözlemlenir. FRP'nin bu etkilere dayanma kabiliyeti dayanıklılık olarak tanımlanabilir. Mekanik özelliklerde azalmanın boyutunu etkileyen faktörlerden bazıları maruz kalma süresi, maruz kalma ortamı, lif tipi, reçine tipi ve reçine sertleştirme yöntemi olarak sayılabilir [65].

2.6 FRP Kompozit Malzemelerin İnşaat Mühendisliği Uygulamalarında Kullanımı

Dünyanın her yerinde betonarme ve yığma yapılar inşa edilmektedir. Bununla birlikte, bu yapıların kullanımdaki değişiklikler, yük değişimleri, tasarımındaki değişiklikler, kullanılan yapı malzemesi veya doğal felaketler nedeniyle zarar gören veya güvensiz

yapıların güvenli bir şekilde kullanılması için bu yapıların onarılması ve güçlendirilmesi büyük bir sektördür. Bir yapının dayanım, rijitlik, süneklik ve dayanıklılık eksikliği nedeniyle güçlendirme veya iyileştirme gerektireceği birçok durum vardır [46].

Bir yapının ömrü boyunca güçlendirilmesini gerektiren bazı yaygın durumlar aşağıda sayılmıştır.

Çevresel etkiler: Yapılar yaşamları boyunca değişen çevresel koşullara maruz kalmaktadır. Bu çevresel etkiler zamanla malzeme bozulmasına neden olabilir veya şiddetli bir olay sırasında önemli hasarlar verebilir. Çevresel bozulmanın etkileri, düzenli bakımın yapılmadığı durumlarda özellikle hissedilecektir.

Kullanımda değişiklik: Yapıların, orijinal olarak tasarlandıkları durumdan farklı şekilde kullanılmaları nadir bir durum değildir. Kullanımdaki değişikliklerinden dolayı, yapı farklı veya büyük yük taleplerinde bulunabilir.

Tasarım standartlarındaki değişiklikler: Yapının kullanımı önemli ölçüde değiştirilmese bile, yapının karşılaması gereken standartlar zamanla değişebilir.

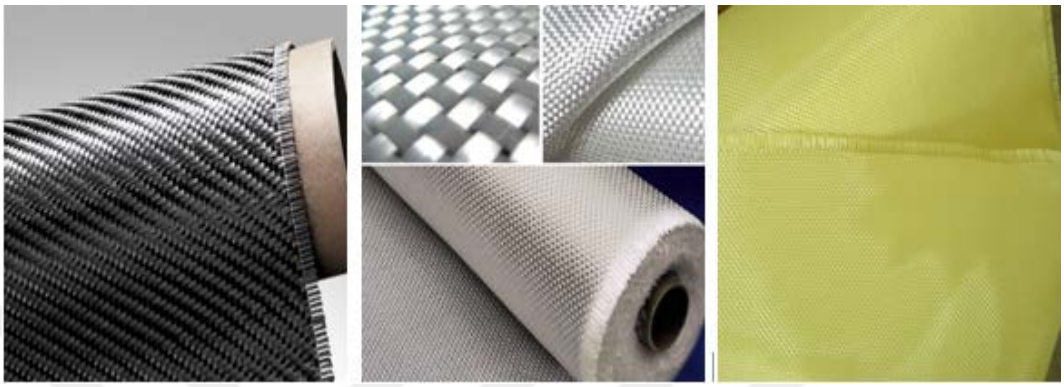
Tasarım veya inşaat sürecindeki hatalar: Yapılar, ilk tasarım veya yapımdaki hatalardan dolayı kullanılmadan önce güçlendirme gerektirebilir [68].

İstenen özelliklere, yapısal elemanlardaki kullanım ve hasar seviyesine bağlı olarak, bu durumlar yaygın olarak kullanılan çeşitli yöntemlerle onarılabilir ve güçlendirilebilir [52]. Güçlendirme uygulamaları yapılar için yeni değildir. Geçmişte güçlendirme genel olarak yapısal elemanlara çelik levhalar yapıştırılması ya da yapıya bir çeşit art germe uygulanması anlamına gelmekteydi [68]. Betonarme yapıların güçlendirilmesinde geleneksel güçlendirme yöntemlerine ek olarak gelişmiş kompozit malzemeler, yaygın hale gelmiştir [52]. FRP malzemesi, son yıllarda inşaat sektöründe yapıların iyileştirilmesi ve güçlendirilmesi için giderek artan bir şekilde kullanılan bir kompozit malzeme türüdür [42], [52], [54], [69]. Bunun nedeni, FRP kompozitlerin güçlü, dayanıklı, hafif, yüksek korozyon direncinin ve uygulama özelliklerinin kolay olmasıdır [42], [46], [52], [69], [70]. FRP'ler çelik levhalar gibi korozyondan etkilenmezler, bu da uzun servis ömrüne olanak tanır veya malzeme bakımı gerekliliğini sınırlandırır. Yüksek mukavemet ve rijitlik oranlarına sahip olmaları, FRP uygulaması, çelik levha yapıştırma ile karşılaştırıldığında FRP ağırlığının daha düşük olduğu anlamına gelir. Bu düşük ağırlık taşıma maliyetlerini

azaltır, dar alanlarda bile kurulumu önemli ölçüde kolaylaştırır ve iskele ihtiyacını ortadan kaldırır. Düşük ağırlık aynı zamanda FRP'lerin yapılardaki ölü yüke sadece küçük bir miktar arttırdığı anlamına gelir. Bu, güçlendirmenin yapıya daha fazla yararlı olmasını sağlar ve ayrıca FRP'lere, önemli ek ağırlıkların göçmeye neden olabileceği durumlarda bir onarım seçeneği sağlar [71]. Güçlendirme için kullanılan kompozit malzemelerin kullanımı kolaydır. Çelik levha yapıştırma uygulamasında 2 - 3 metreden daha uzun olmayan levhalar pratik olarak işlenebileceği için, bu teknik ile karşılaştırıldığında FRP uygulamalarında neredeyse sonsuz uzun plakalar veya tabakalar işlenebilir. İnce güçlendirici tabakalar birçok durumda avantajlı olabilir. İnce tabakalar, mevcut yapının boyutunu değiştirmez ve ince beton kaplamalar veya yüzey koruyucu malzemeler ile birleştirilebilmektedir. FRP malzemelerini en çok ihtiyaç duyulan yönde optimize etme olanağı tasarım için bir avantajdır [72]. Takviye liflerinin yerleştirilmesi tasarlanarak, mukavemet gibi özellikler farklı yönlerde kontrol edilebilir. Böylece, güçlendirmenin sadece gerekli yönde hareket etmesine izin verilir ve yapısal davranışların istenmeyen şekillerde değiştirilmesi engellenir. Uzun ince liflerden yapıldığından, FRP'lerin kullanımı çok kolaydır. Eğrilerin etrafına sarmak ve beton yüzeylerde mevcut düzensizlikleri kabul etmek için yapılabilir. Ayrıca, uzunlamasına üretilebilmekte, ek yer ihtiyacı ortadan kaldırılmakta ve üretim aşamasında boyutlandırma hataları ortadan kaldırılarak yerinde kesilebilmektedir [71]. FRP kompozitlerin diğer avantajları, yüksek elastisite modülüne ve yüksek yorulma direncine sahip olmalarıdır [46]. FRP'lerin çeşitli avantajlarına rağmen dezavantajlarıda yok değildir. Bu malzemeler, yangın veya çarpmadan zarar görmeye çok duyarlıdır ve korunmaları gerekmektedir. FRP'ler çevresel etkilerden etkilenirler ve nem, sıcaklık ve UV ışınlarından dolayı bozulmaya uğrarlar.

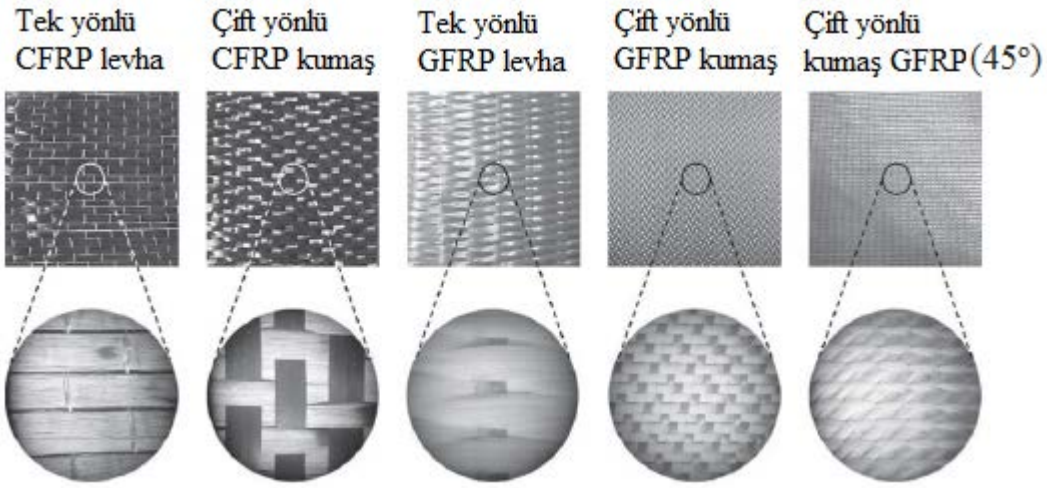
FRP'lerin, başlangıçtaki yüksek malzeme maliyeti bir dezavantajdır; ancak, kompozitlerin sunduğu nakliye ve kurulum maliyet avantajları nedeniyle, bütün bir güçlendirme projesinin maliyeti düşünüldüğünde çelik levhalarla güçlendirilmiş aynı projenin maliyetine benzer veya daha az olabilir [71]. Malzemenin diğer dezavantajları ise, süneklik değerinin düşük olması, değişken plastik davranış, bölgesel eğriliğe elverişli olması ve kesme dayanımının az olmasıdır [46]. Gevrek olarak göçmeleri de malzemenin olumsuz yanlarındandır [73]. FRP'ler yüksek sıcaklıklarda kullanım için uygun değildir. Bunun nedeni mekanik özellikleri etkileyen reçine malzemesinin bozulmasıdır [74]. FRP

malzemeler, özellikle çekme ve yorulma mukavemeti açısından, çelikten üstün mekanik ve fiziksel özelliklere sahiptir ve bu kaliteler çok çeşitli sıcaklıklar altında da devam etmektedir [75]. FRP'nin elastisite modülünün çelikten daha düşük olması, büyük yer değiştirme ve daha büyük çatlak genişliğine neden olabilir [76]. Betonarme yapılar için çok çeşitli FRP kompozit mevcuttur [77] (Şekil 2.6).



Şekil 2. 6 CFRP, GFRP ve AFRP kumaş [78]

Şekil 2.7'de yapısal güçlendirmede kullanılan karbon lif takviyeli polimer ve cam lif takviyeli polimer kompozitler görülmektedir [77]. CFRP ve GFRP inşaat mühendisliği uygulamalarında en çok kullanılan kompozitlerdir. AFRP kullanımı nispeten yüksek maliyet, sünmeye karşı duyarlılık, dayanıklılık kaygıları (nem emme) ve yüksek sıcaklıklarda performans zayıflığından dolayı daha nadirdir [79].



Şekil 2. 7 Yapısal güçlendirmede kullanılan ticari olarak temin edilebilen çeşitli FRP sistemleri [77]

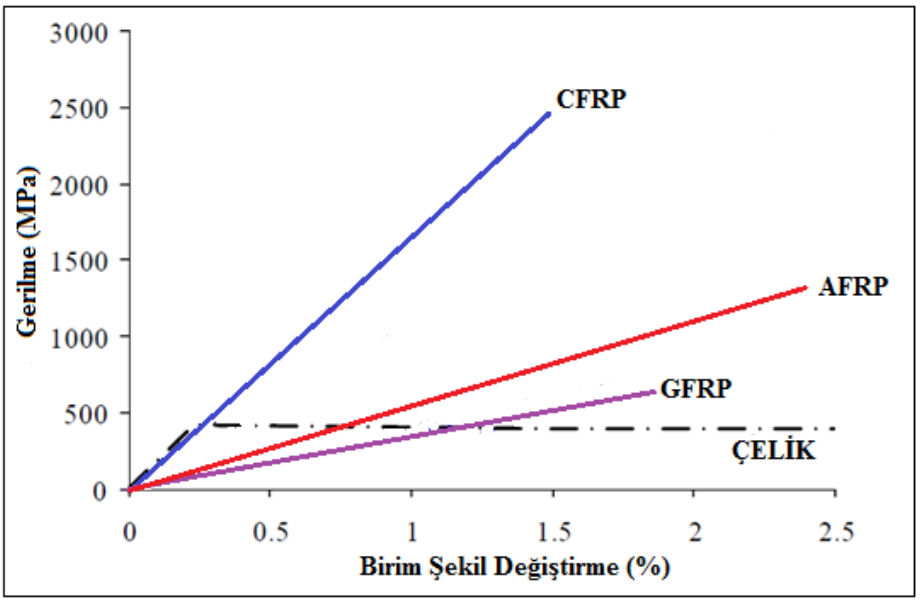
FRP malzeme seçimiyle ilgili olarak, diğer kompozitlere göre üstün özellikleri göz önüne alındığında, karbon lif takviyeli polimerlerin beton yapıların güçlendirilmesi için en yüksek potansiyeli sunduğuna inanılmaktadır [80]. CFRP kompozitleri GFRP kompozitlere üstün özelliklere sahiptir, ancak GFRP daha ucuzdur [44]. Çizelge 2.1'de yapısal güçlendirme uygulamaları için farklı lifli kompozitlerin niteliksel karşılaştırılması verilmiştir [81].

Çizelge 2. 1 Yapısal güçlendirme uygulamaları için farklı lifli kompozitlerin niteliksel karşılaştırılması [81]

Özellik	Karbon	Aramid	E-glass
Çekme Dayanımı	Çok İyi	Çok İyi	Çok İyi
Basınç Dayanımı	Çok İyi	Yetersiz	Yeterli
Elastisite Modülü	Çok İyi	İyi	Yeterli
Uzun Süreli Davranış	Çok İyi	İyi	Yeterli
Yorulma Davranışı	Mükemmel	İyi	Yeterli
Birim Hacim Ağırlık	İyi	Mükemmel	Yeterli
Alkali Direnci	Çok İyi	İyi	Yetersiz
Satış Bedeli	Uygun	Uygun	Çok İyi

Servis ömrü göz önüne alındığında, çalışmalar karbon lif takviyeli polimerlerin aramid ve cam liften daha fazla potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Onların dezavantajları maliyetlerinin yüksek olmasının yanı sıra, malzemenin kendisinde var olan anizotropi (azaltılmış radyal güç) ve üretimlerinde daha yüksek enerjiye ihtiyaç duyulmasıdır [48], [63]. FRP kompozitlerin yapısal kullanımı açısından, her üç FRP türünde ortak olan çok önemli bir özellik, gerilme-birim şekil değiştirme davranışlarının göçmeye kadar doğrusal elastik olmasıdır [42], [44], [65], [69], [77] (Şekil 2.8). Bunun iki ana yapısal sonucu vardır. Birincisi, bu malzemeler, çeliklerin sahip olduğu sünekliğe sahip değildir ve gevreklikleri, FRP kompozitleri ile güçlendirilmiş betonarme elemanların sünek davranışlarını sınırlayabilir [44], [42].

Örneğin, bir FRP alt yüzey plakası yapıştırılmış bir betonarme kiriş, her ikisi de kırılgan göçme olan FRP kopması veya betonun ezilmesi ile göçebilir. Bu tür kirişlerde, FRP kopma modu da kırılgan olduğundan, betonun ezilmesinden dolayı göçmeye izin verilir. Bu durum, betonun ezilmesinden önce çeliğin akmasının sağlanması gereken normal betonarme kiriş tasarımına zıttır [44].



Şekil 2. 8 FRP ve çeliğin gerilme birim şekil değiştirme eğrisi [42]

Bununla birlikte FRP kompozit betonarme kolonlar gibi betonu sargılamak için kullanıldığında, bu malzemeler kolonların mukavemetini ve sünekliğini büyük ölçüde artırabilir [42], [44]. FRP'lerin gevrek davranışlarının ikinci anlamı, gerilme yeniden dağılımının sınırlı olmasıdır [44].

BÖLÜM 3

FRP KOMPOZİT MALZEME İLE GÜÇLENDİRME

Yük taşıyıcı yapı elemanlarını güçlendirmek ve onarmak için kullanılan FRP kompozit uygulamaları, yapısal mühendislikte popüler uygulamalardır. Bu uygulamalar, yeni yapıların inşaasında değil mevcut yapılarda kullanıldığı için güçlendirme uygulamaları olarak bilinir.

Güçlendirme uygulamaları iki tip olarak sınıflandırılabilir.

Birinci tip uygulama, orijinal yapının mukavemet ve sünekliliğinin (tipik yer değiştirme kapasitesi) orijinal olarak tasarlandığı yüke göre (ya da yer değiştirmeye) artırıldığı güçlendirmedir. Bu artış, yapıyı mevcut bina kodları (özellikle sismik güçlendirme durumunda) ile uyumlu hale getirmek için ya da yapının kullanımındaki değişikliklerden dolayı istenebilir. Diğer FRP güçlendirme tipi onarım olarak isimlendirilebilir. Bu güçlendirme tipinde, FRP kompoziti, yapının yük taşıma kapasitesini veya sünekliğini tasarım yüküne veya yer değiştirmesine geri getirmek için mevcut veya bozulmuş bir yapıyı güçlendirmek için kullanılır. Bu nedenle aslında bir çeşit güçlendirme olarak tanımlanabilir. Betonarme yapılarda çelik takviyenin korozyona uğraması veya orijinal yapının servis yükleri altında hasar görmesi veya orijinal tasarıma göre inşa edilmemesi gibi çevresel etkiler nedeniyle orijinal yapı bozulduğunda onarım yapılması gerekir. FRP güçlendirmesi betonarme yapılar, öngerilmeli beton yapılar, ahşap yapılar ve yığma yapılar üzerinde başarıyla yapılmaktadır. Buna ek olarak, FRP kompozitler ile betonarme elemanlarda güçlendirme yapmak, ancak, FRP malzemenin yapıştırılacağı alt örtü tabakasındaki betonun, donatı üstündeki kuvvetlerin aktarılmasına izin vermek için uygun durumda olması durumunda elde edilebilir. Donatının korozyona uğradığı ve örtü

betonunun kazındığı eski pek çok betonarme elemanda, örtü betonu bunu gerçekleştirmek için genellikle yeterince iyi durumda değildir. Bu durumda FRP ile güçlendirmeden önce sistemin uygulanabilmesi için betonun tamir edilmesi gerekmektedir [54].

Ayrıca FRP malzemelerin kullanılması mevcut betonarme elemanların rijitlik özelliklerini değiştiremez. Bu nedenle, yapısal müdahale, mukavemet veya süneklikten ziyade rijitliği arttırmayı hedefliyorsa, FRP güçlendirme tekniği uygun bir çözüm olmayacaktır [51].

3.1 Betonarme Yapı Elemanlarının FRP ile Güçlendirilmesi

a) Boyuna donatıların kiriş ve kolonlardaki yetersizliği, eğilme göçmesine yol açar. Bu gibi durumlarda, beton elemanların eğilme kapasitesi, dıştan yapıştırılmış FRP plaka ve kumaşları kullanılarak arttırılabilir. Alternatif olarak yüzeye yakın monte edilmiş şeritler veya eleman eksenine paralel lif yönüne sahip olan çubuklar kullanılabilir.

b) Kolonlar, kirişler, perde duvarları ve kiriş-kolon birleşimleri gibi yapısal elemanlarda gevrek kesme göçmesini etkileyebilen enine donatının yetersizliği durumunda; beton elemanların kesme kapasitesi, eleman ekseni yönüne enine yönde FRP'nin dıştan yapıştırılması ile kolon ve kiriş durumunda veya kiriş-kolon ek yerleri durumunda hem kolon hem de kiriş yönünde artırılabilir.

c) Eğilme çatlağını, beton örtüsünün dökülmesi, enine donatının ve boyuna donatının burkulması veya betonun basınç ezilmesi göçmesine genellikle büyük esnek olmayan elastik şekil değiştirmeler eşlik eder. Kolon çevresi boyunca yerleştirilmiş FRP ceketleri ile betonu hapsederek, beton örtüsünün atması önlenir ve boyuna donatıların bükülmesi kontrol altına alınır. Bu şekilde daha sünek davranış geliştirilebilir ve büyük elastik şekil değiştirmeler devam ettirilebilir.

d) Bindirme bölgelerinde ek yerlerindeki zayıflık boyuna donatının, kolon uçlarının yakınındaki maksimum eğilme momenti bölgelerine birleştirildiği kolonlarda meydana gelir. Beton örtüsünde dikey çatlaklar geliştiğinde ve beton örtüsünün dökülmesiyle bu çatlaklar ilerlediğinde sıyrılma meydana gelebilir. Kolonun etrafında bindirme sargısının arttırılmasıyla, eğilme mukavemeti bozulması önlenebilir veya sınırlandırılabilir [51].

3.1.1 Kirişlerin Eğilme Güçlendirilmesinde FRP Kullanımı

Betonarme kirişlerde, donatıda korozyana bağlı bozulma, aşırı karbonasyon nedeniyle betonun çatlaması, donma-çözülme olayı, beton örtünün atması, alkali-silika reaksiyonlarının etkileri, yükleme şeklinde değişiklik gibi nedenlerden dolayı onarım ve güçlendirme yöntemlerine ihtiyaç duyulmuştur [82].

Binalarda malzeme bozulması ve bina için değişen ihtiyaçlar, çoğu durumda mevcut kirişlerin güçlendirilmesini gerektirir. Betonarme kirişlerin çekme bölgesine çelik plakaların eklenmesi dıştan güçlendirme için geleneksel yöntemlerden biridir. Epoksi yapıştırıcılı çelik plakaların kullanımı Avrupa ve Amerika Birleşik Devletleri'nde çok sık görülür ancak bir takım dezavantajlara sahiptir. Çelik levhalar ağır olduğu için taşınması ve takılması zordur, çelik plakaların uzunluğu, elle kaldırmayı sağlamak için 8-10 m ile sınırlıdır, dayanıklılık ve korozyon etkileri belirsizliğini korumaktadır, astarlama sistemlerini içeren yüzey hazırlığı gerekmektedir ve yapıştırma sırasında çelik levhaları yerinde tutmak için gerekli kalıp iskelesi pahalıdır.

Sahada ıslak işlemlerle ya da prefabrik levha olarak imal edilen kompozitlerin beton yüzeyine yapıştırılması ile etkili bir güçlendirme sağlanır (Şekil 3.1).



Şekil 3. 1 Betonarme kirişte eğilme (ve kesme) güçlendirmesi [54]

Malzemenin bu şekilde kullanımı ile malzemeden tasarruf sağlanabilir. Yöntemin etkinliği esas olarak kompozit malzemenin uygun seçimine ve kompozit ile beton yüzey arasındaki bağın etkinliği ve beton yüzeye bağlıdır [83].

Betonarme kirişlerin eğilme mukavemeti, bir FRP güçlendirme sisteminin, elemandaki ani gerilme kuvvetini arttırmak için eğilme elemanının çekme yüzeyine bağlanması ve bu suretle, elemanın moment kapasitesinin arttırılması ile sağlanır. Böylece, kirişin mukavemeti, eğilme kapasitesi ve rijitliği arttırılır [54].

FRP ile eğilme güçlendirilmesi, kirişin çekme bölgesine çelik şeritlerin eklenmesine benzer. Ancak, iki temel farklılık vardır. İlk olarak, FRP güçlendirme sistemi doğrusal elastik bir şekilde davranır ve akmaz. İkincisi ise, FRP güçlendirme sistemi, çelik levha sistemlerine göre kopma (sıyrılma veya ayrılma) göçmelerine daha hassastır.

Çelik levhaların kendileri çelik donatıya benzer bir gerilmeye sahip olacağından, çelik levha ile güçlendirilen sistemdeki gerilme seviyesi sınırlıdır ve epoksi ile bağlanan çelik levhalar tipik olarak uçlarında ve ayrıca genellikle uzunlukları boyunca çelik cıvatalarla sabitlenir [54].

3.1.2 Kirişlerin Kesme Güçlendirilmesinde FRP Kullanımı

Bir betonarme kirişinin kesmede yetersiz olması veya kesme kapasitesinin eğilme güçlendirmesinden sonra eğilme kapasitesinden daha az olması durumunda, ilgili kirişin kesme güçlendirmesinin dikkate alınması gerekir. Bir betonarme kirişin alt yüzeyine bağlanmış FRP malzemenin kirişin kesme davranışını, güçlendirilmemiş kirişlerle kıyaslandığında önemli ölçüde değiştirmediği anlaşılmıştır [84], [85]. Bu nedenle, kirişin kesme mukavemetini tahmin etmek için eğilme güçlendirmesi için alt yüzeye yapıştırılmış FRP şeritlerinin etkisi göz ardı edilebilir. Betonarme kirişlerin kesme kapasitesini geliştirmek için FRP şeritleri çeşitli biçimlerde kirişlere yapıştırılabilir [44].

FRP dış takviyesinin kesme etkisi, lif yönü maksimum asal çekme gerilmesine eşit olduğunda maksimuma çıkmasına rağmen bazen FRP'nin dıştan takviyesinin eksen yönüne dik olarak ana lif yönü ile birleştirilmesi daha pratiktir.

FRP'ler ana lif yönünde güçlü oldukları için sadece kesme çatlaklarını en iyi şekilde kontrol etmek için yönlendirilmeleri önerilir. Bir kirişteki kesme kuvvetleri, ters çevrimli yükleme altında tersine çevrilebilir ve bu nedenle, lifler, her iki yönde kesme kuvvetinin gerekliliğini karşılamak üzere iki farklı yönde düzenlenebilir [83].

Eğilme güçlendirmesi durumunda olduğu gibi, FRP ve beton arasındaki bağ, göçme modunda ve kesme güçlendirmesi yapılmış elemanın taşıma gücünde çok önemli bir rol oynar [44].

3.1.3 Döşemelerin Eğilme Güçlendirilmesinde FRP Kullanımı

FRP kompozitleri kullanılarak döşemelerin eğilme güçlendirmesinde temel uygulama, FRP şeritlerini veya tabakalarını döşemenin çekme yüzeyine yapıştırmaktır [86] (Şekil 3.2).



Şekil 3. 2 Döşemenin CFRP kumaş ile güçlendirilme uygulaması [54]

İki yönlü döşemelerin güçlendirilmesi için FRP kompozitlerinin kullanımı konusunda çok sınırlı araştırmalar yapılmış, ancak konsol döşemeler dahil tek yönlü döşemeler üzerinde önemli çalışmalar yapılmıştır. Özellikle, betonarme konsol döşemeler üzerine yapılan son çalışmalarda, FRP kopması veya betonun ezilmesi ve ara yüzey sıyrılması ile eğilme göçmesi gözlenmiştir [44].

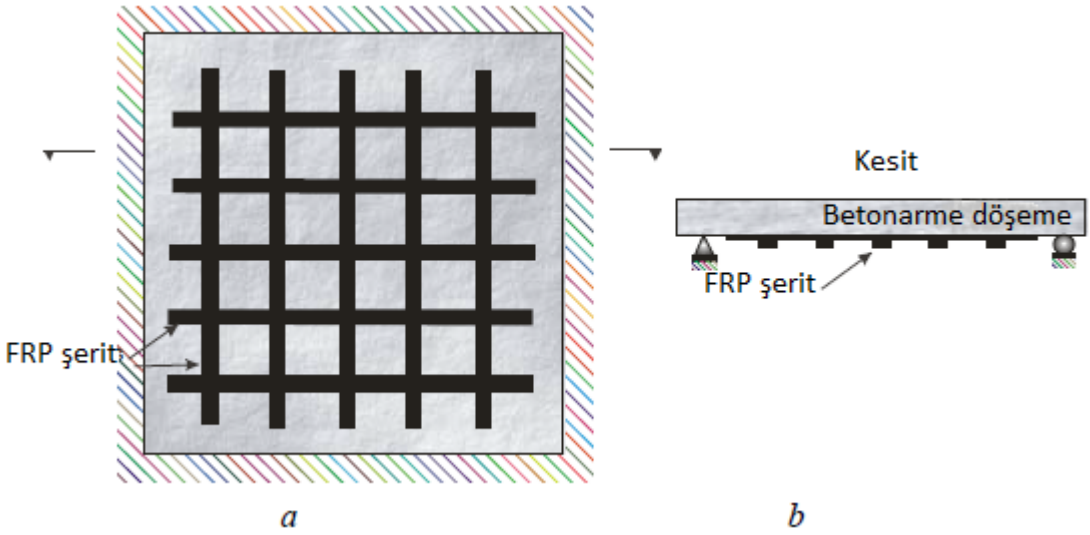
Tek yönlü döşemeler, FRP şeritlerini gerekli yönde yapıştırılmasıyla güçlendirilir (Şekil 3.3). İki yönlü döşemeler için, iki yönlü FRP şeritlerini her iki yönde yapıştırarak güçlendirme yapılmalıdır [83] (Şekil 3.4).



Şekil 3. 3 Tek yönlü döşemelerde FRP ile güçlendirme a-görünüş b- kesit [83]

İki yönlü bir döşemenin olası çökme mekanizması, böyle bir döşemenin güçlendirilmesinin merkez bölgede yoğunlaşabileceğini göstermektedir. Bu durumda FRP şeritleri kenarlardan uzak sonlandırılabilir [86].

Bu gibi güçlendirilmiş döşemelerin yük kapasitesi, akma çizgisi analizi ile tahmin edilebilir, çünkü FRP şeritler yapıştırılmayan döşeme parçası, akma çizgisinin oluşumu için yeterli sünekliğe sahiptir [83].



Şekil 3. 4 İki yönlü döşemede FRP ile güçlendirme a-döşeme alt yüzeyi b- kesit [83]

3.1.4 Kolonların Güçlendirilmesinde FRP Kullanımı

FRP kolon güçlendirmesinin en yaygın şekli, FRP kelepçelerin kolona dıştan sarılmasıdır. FRP kompozitlerin kullanımı, rijitlik artışı olmadan kolonun hapsedilmesini sağlar. Hapsetmenin bir sonucu olarak, FRP'nin çekme mukavemeti etkili bir şekilde kullanılırken betonun hem mukavemeti hem de limit birim şekil değiştirmesi arttırılabilir. FRP ile sargılanmış eksenel olarak yüklenmiş kolonlar için tasarım felsefesi temeldeki kolonun basınçta eksenel yüklenmesi durumunda yanal genişlemeyi karşılayabilmek amacıyla kolonun çevresindeki çekme gücünü taşımak için sargılama esasına

dayanmaktır. Beton kuşatılarak kolonun yanal genişlemesi kısıtlanır ve sonuç olarak eksenel basınç kapasitesini arttırılır [61], [62].

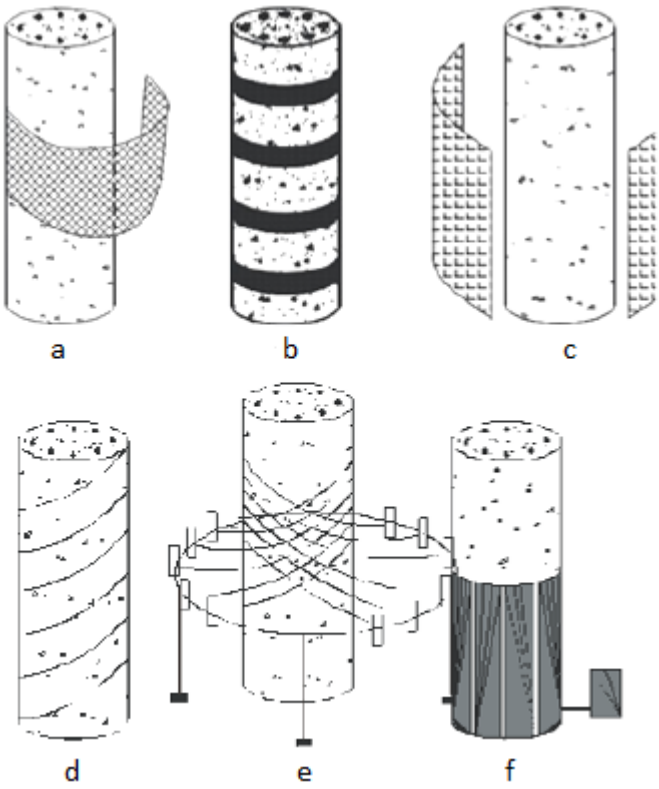
Çok sayıda çalışma, FRP kompozitler ile dıştan sargılamanın, kolonların, özellikle de dairesel kolonların kuvvetini arttırmak için çok etkili bir çözüm sağladığını kanıtlamıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3. 5 Kolonlarda FRP sargı uygulaması [54]

Bu teknik ayrıca kesme mukavemetindeki ve süneklikteki artışın temel düşünce olduğu kolonların sismik güçlendirme işlemleri için yaygın olarak kullanılır. Kumaş / lif tabakaları çok ince ve esnek olduklarından, dairesel ve dikdörtgen kolonların etrafına sarılabilirler. Dikdörtgen kolonların sargılanması için sağ köşeler yuvarlatılmalıdır. Alternatif olarak, bir kolonun dikdörtgen bölümü, prekast beton destekleyici malzemeler ilave edilerek veya FRP ile sarmadan önce hızlı sertleşen çimento kullanılarak oval bir bölüme dönüştürülebilir [44].

Birçoğu dünya çapında ticari olarak kullanılan birçok farklı yöntem (üretim süreci için mantolama malzemesine dayalı) büyük veya tam ölçekli olarak test edilmiştir. Betonarme kolonlarda FRP güçlendirme yöntemleri Şekil 3.6'da verilmiştir [83].



Şekil 3. 6 Betonarme kolonlarda FRP güçlendirme yöntemleri a- kumaş ile sargılama b- şeritler ile kısmi sargılama c- prefabrike manto d- spiral halkalar e- otomatik sargı f- reçine infizyonu [83]

3.2 FRP ile Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Göçme Biçimleri

Bir kesitin eğilme dayanımı göçme modunun kontrolüne bağlıdır [61]. Dıştan yapıştırılan FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin tepkisi ile ilgili deneysel çalışmalar üzerine yayınlanan literatür incelendiğinde sünek göçmeden gevrek göçmeye kadar birkaç farklı göçme modu gözlenmiştir. Bu göçme modları aşağıda verilmiştir (Şekil 3.7).

Donatının akmasını betonun ezilmesi takip eder: Kirişin eğilme dayanımına donatının akmasını betonun ezilmesi izleyerek ulaşılır ve FRP bozulmamış olarak kalır. Bu, hem orijinal hem de güçlendirilmiş kirişlerin düşük performans göstermesi durumunda gerçekleşir.

Donatı akmadan önce beton ezilir: Çok yüksek donatı oranlarına sahip betonarme elemanlarda göçmeye çeliğin akmasından ve FRP malzemenin kopmasından önce betondaki basınç ezilmesi neden olur. Bu göçme gevrektir ve istenmeyen bir göçme biçimidir. Bu yüzden aşırı donatılı bir betonarme kirişte eğilme güçlendirilmesi yapılması

uygun bir çözüm olmayabilir ve düşük donatılı bir betonarme kiriş güçlendirilirken kiriş aşırı donatılı hale getirilmemelidir [87].

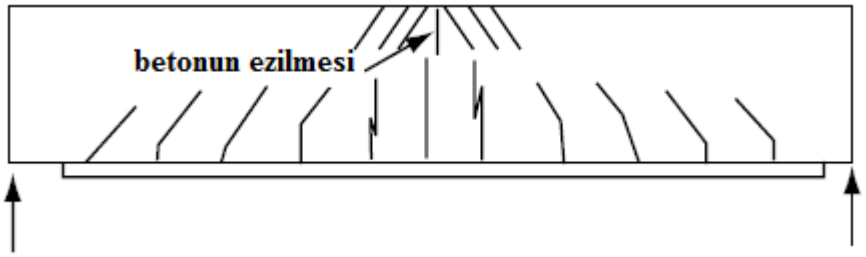
Donatının akmasını FRP'nin kopması izler: Hem donatı hem de FRP takviyesinin nispeten düşük oranları için betonun ezilmesinden önce donatının akmasını FRP'nin kopmasının izlemesiyle eğilme göçmesi meydana gelir. Bu göçmenin meydana gelmemesi için FRP takviye iyice sabitlenmelidir [88].

Kesme göçmesi: Betonarme kiriş, kesmede uygun şekilde donatılandırılmadığı durumda, herhangi bir eğilme göçmesinden önce kesme sınırına ulaşabilir ve kesme göçmesi meydanagelebilir [89].

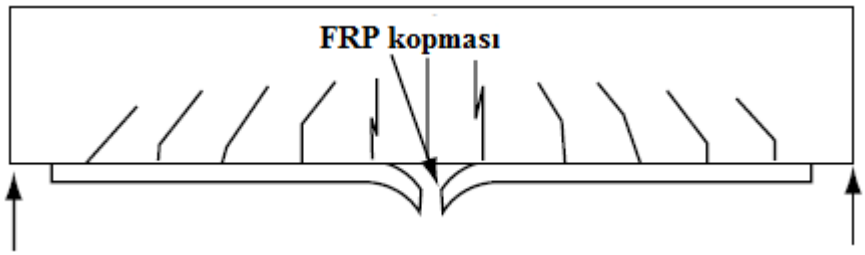
FRP ile güçlendirilmeyen kesitte donatının akması: Çok kısa plakalarla güçlendirilmiş kirişler için, çeliğin akması, kiriş boyunca FRP'nin olmadığı ve betonda bir çatlak oluşturduğu ve plakanın uçlarında etkili bir plastik mafsal oluşturan bir noktaya ilerleyebilir [89], [90].

FRP ile güçlendirilmiş sistemlerde en çok arzu edilen göçme biçimi çeliğin akmasından sonra betonun basınç göçmesidir. Bunun genellikle elde edilmesi zordur ve donatının akmasından sonra ortaya çıkan büyük kırılmalarda FRP sıyrılma ya da kopma modu ortaya çıkar. Beton kırılmadan önce oluşur. Güçlendirme sistemi, elemandan birkaç şekilde sıyrılabilir. Bunlar, kirişteki eğilme ve kesme çatlakları nedeniyle kirişin uçlarında (yüksek soyulma ve kesme gerilmeleri nedeniyle)veya iç kısmında beton alt katmanından betonda, (yapışkan tabakada veya CFRP laminatın kendisinde göçmeye bağlı olarak) meydana gelir [54].

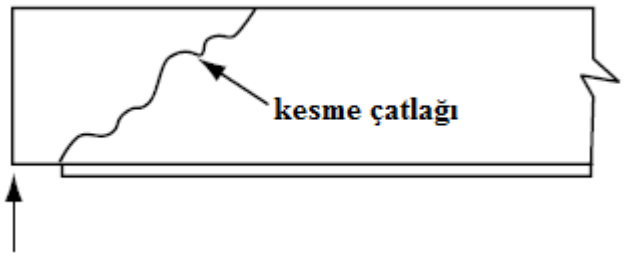
Beton, yüksek çekme gerilmelerine karşı koyamaz, bu nedenle FRP'nin alt katmandan sıyrılması veya ayrılması, güçlendirilmiş beton elemanlar için yüksek olasılıklı bir göçme modudur. Dışa yapıştırılmış bir FRP plaka ile güçlendirilmiş bir betonarme kiriş, eğilme yüküne maruz kaldığında, yüksek çekme ve aderans kesme gerilmeleri yapışma tabakasının yanında betonda gelişir. Genel olarak, FRP plakasının betondan ayrılması, bu yüksek gerilmelerden kaynaklanmaktadır. Bağ(aderans) yüzeyindeki en zayıf kısım yüzeye yakın beton tabakasıdır [13].



(a)



(b)



(c)

Şekil 3. 7 FRP ile güçlendirilmiş kirişlerde göçme biçimleri (a) Betonun ezilmesi (b) FRP'nin kopması (c) kesme göçmesi [54]

FRP sıyrılması ve örtü beton ayrılması ara yüzey gerilmelerinin beton tarafından sürdürülememesi durumunda ortaya çıkabilir. Sıyrılmanın başlaması genellikle beton-FRP arayüzünde yüksek gerilme dağılımlarının olduğu bölgede gerçekleşir (Şekil 3.8). Bu bölgeler FRP takviyesinin sonunu, kesme ve eğilme çatlakları etrafını içerir [13].

Beton örtünün ayrılması: Beton örtünün soyulması olarak da adlandırılabilir. Bu göçme modu güçlendirilmiş betonarme kirişlerin limit eğilme kapasitelerini elde etmelerini engellediği için erken göçmeye neden olur [91].

Plaka sonu sıyrılması: FRP plakasının ucunda başlayan bu göçme modu, kesme gerilmelerinin FRP'den betona aktarılmasından kaynaklanır. Bir beton tabakası FRP ile birlikte sıyrılır. Tepe (pik) kesme gerilmelerine plaka sonundaki kiriş kesitinin geometrik

süreksizliği neden olur. Bu göçme modu genellikle kısa ve çok gevrek olan levhalarla güçlendirilmiş kirişlerde meydana gelir [92], [38].

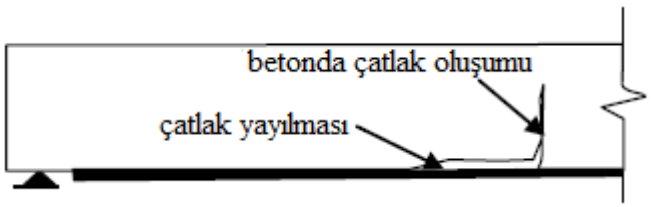
Orta açıklık sıyrılması: Tekil yükün yakınında maksimum eğilme momenti bölgesinde bir eğilme çatlağı başladığında, bu göçme modu aynı zamanda kesme gerilmelerinin FRP plakasından betona aktarılmasından da kaynaklanır [92], [38]. Bu göçme modu, plaka sonu sıyrılmasından daha sünektir. Çünkü kirişin tepkisi daha büyük sehim ve sünekliğe izin vermek için çekme donatısının aktığı bir seviyeye çekilir [38], [93], [94].



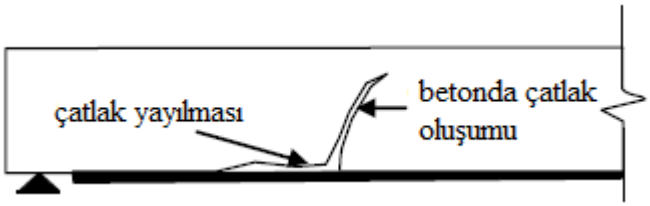
a) Beton örtünün ayrılması



b) Plaka ara yüzey sıyrılması



c) Eğilme çatlağı tarafından başlatılan orta açıklık sıyrılması



d) Eğilme-kesme çatlağı tarafından başlatılan orta açıklık sıyrılması

Şekil 3. 8 Sıyrılma göçme tipleri [95]

FRP plakaları ile eğilmede güçlendirilmiş belirli bir betonarme kirişinin sergilediği göçme mekanizması, hem geometrik hem de mekanik olmak üzere çeşitli parametrelere bağlıdır. Kompozit eylemlerin kaybına bağlı göçme modları en sık gözlenenler olmakla birlikte, esas olarak tekrarlanan deneysel testlerin büyük maliyeti nedeniyle tam olarak anlaşılamamıştır [87].

BÖLÜM 4

DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde, 2016-05-01-DOP06 no'lu Doktora Araştırma Projesi kapsamında yapılan çalışmalar sunulmuştur. Deneysel çalışmada aynı beton mukavemetine ve donatı sınıfına sahip 8 adet 150x250x2600 mm boyutlarında betonarme deney kirişi üretilmiştir. Net beton örtü kalınlığı 20 ve 40 mm olarak belirlenen deney kirişleri farklı iki grup şeklinde test edilmiştir.

4.1 Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemelerin Özelikleri

Deneysel çalışmada kullanılan kiriş numuneleri; piyasadan temin edilen donatı çeliği ve hazır beton kullanılarak üretilmiş, güçlendirme malzemesi olarak karbon lif takviyeli polimer kumaş kullanılmıştır.

4.1.1 Beton

Deney kirişlerinin üretilmesinde kullanılan C20 sınıfı beton hazır beton firmasından temin edilmiştir. Beton dökümü esnasında beton basınç dayanım deneylerinin yapılması için 2 set 150x150x150mm ebatlarında küp numuneler ve 2 set 100x200 mm ebatlarında silindir numuneler alınmıştır (Şekil 4.1). Silindir ve küp numuneler hazırlanırken kullanılan kalıplar yağlanmış, beton karışımı küp ve silindir numune kaplarına üç tabakada olmak üzere doldurulmuştur. Her seferinde betonun kalıp enkesit alanına eşit olacak şekilde dağılması için şişleme çubuğu yardımıyla sıkıştırma yapılmış, sıkıştırma sonrasında kalan boşlukları doldurmak için kalıbın dış kenarlarına tokmakla vurularak betonun kalıba iyice yerleşmesi sağlanmıştır.



Şekil 4. 1 Hazırlanan küp ve silindir beton numuneleri

Bu işlemlerden sonra, kalıbın üst yüzeyi mala yardımıyla düzeltilmiş ve beton yüzeyin üzerlerine numune adlarını ve tarihlerini gösteren etiketler yapıştırılmıştır. Numuneler 1 gün kirişlerin bulunduğu ortamda tutulmuş daha sonra laboratuvar ortamına alınmıştır. Numuneler kalıplarından çıkarılarak 2 set küp ve 2 set silindir numune 20±20C sıcaklıktaki kür havuzunda 28 gün bekletilmiştir.

Betonarme kirişlerin üretiminde kullanılan betonun 7 günlük ve 28 günlük dayanımı Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda yapılan deneylerle tespit edilmiştir (Şekil 4.2).



Şekil 4. 2 Beton basınç dayanım deneyi

Beton basınç dayanımının belirlenmesinde ELE marka 3000 kN kapasiteli universal basınç cihazı kullanılmıştır. Cihazda yükleme hızı TS EN 12390-6'ya [96] göre 0,6 MPa/sn'dir. Küp beton numunelerin 7 ve 28 günlük dayanım sonuçları Çizelge 4.1 ve 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4. 1 Küp beton numunelerin 7 günlük dayanım sonuçları

No	**Kesit (mm^2)**	**Yaş (gün)**	**Kırılma Yükü (N)**	**Dayanım (N/mm^2)**
1	22500	7	392700	17,45
2	22500	7	394800	17,55
3	22500	7	387700	17,23
Küp dayanım ortalaması				**17,4**

7 günlük dayanım sonuçlarına bakıldığında C20 betonun 28 günlük dayanımının %70'ini sağladığı görülmektedir.

Çizelge 4. 2 Kırılan küp beton numunelerin 28 günlük dayanım sonuçları

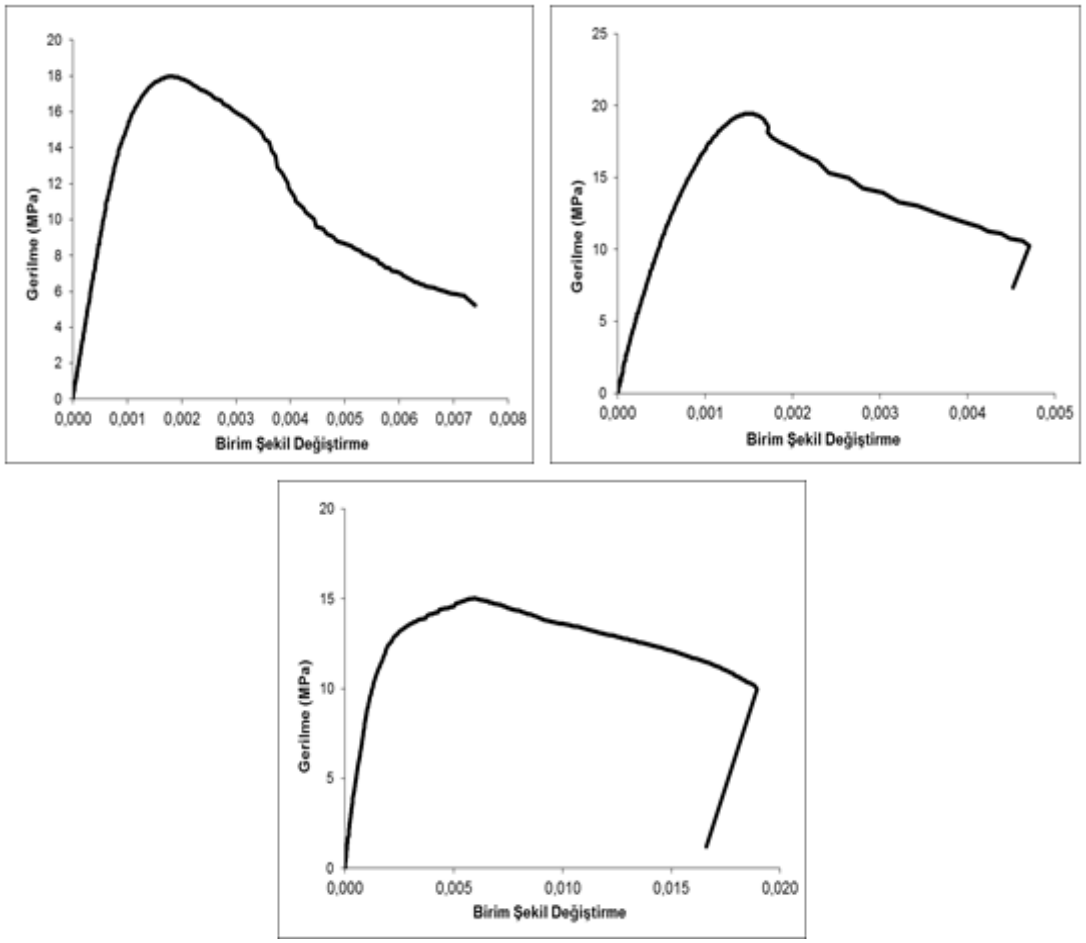
No	**Kesit (mm^2)**	**Yaş (gün)**	**Kırılma Yükü (N)**	**Dayanım (N/mm^2)**
1	22500	28	564300	25,1
2	22500	28	567500	25,2
3	22500	28	561100	24,9
Küp dayanım ortalaması				**25,1**

Küp beton dayanımı silindir beton dayanımına çevrildiğinde kullanılan beton dayanımı yaklaşık 20 MPa olarak bulunmuştur [97]. Deneylerde kullanılan betonun elastisite modülünü tayin etmek için 100 mm x 200 mm ebatlarındaki silindir numunelere başlık betonu yapılmış ve test edilmiştir. Silindir beton numuneler için çerçeve ve 2 adet Lineer potansiyometrik yer değiştirme ölçer (LVDT) kullanılarak yük- yer değiştirme değerleri veri toplayıcıya kaydedilmiştir (Şekil 4.3). Bu değerler gerilme-birim şekil değiştirme grafiğine dönüştürülerek gerilme-birim şekil değiştirme grafiği çizilmiştir (Şekil 4.4).

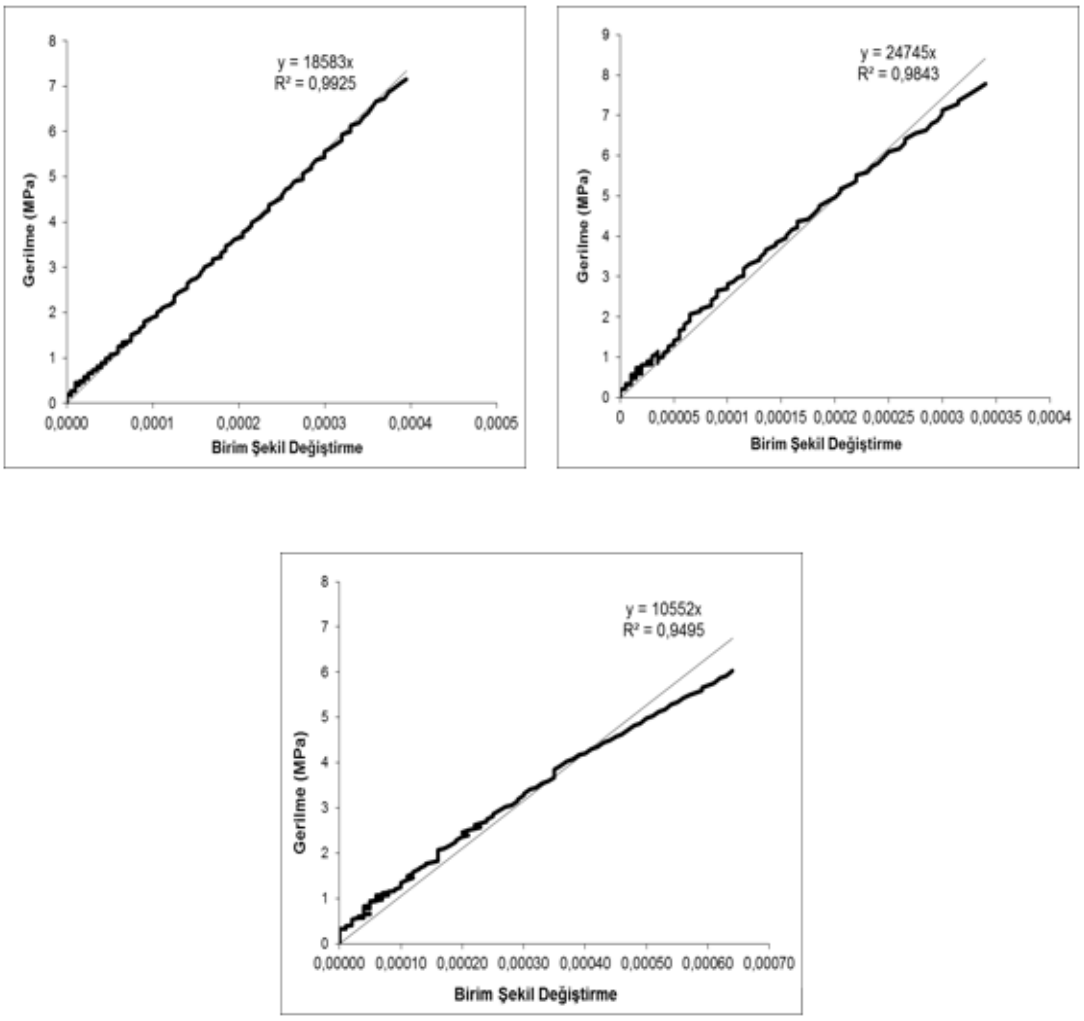


Şekil 4. 3 Silindir beton numune deneyi

TS 500'e [97] göre %40'lık gerilme değerine karşı gelen noktaya kadar olan noktalar bir doğru ile birleştirilmiş ve doğrunun eğimi belirlenerek elastisite modülü hesaplanmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4. 4 Silindir beton numunelerin gerilme-şekil değiştirme grafiği



Şekil 4. 5 Silindir beton numunelerin elastisite modülü tayini

Silindir beton numunelere başlık betonu yapıldığı ve başlık betonu deney esnasında düşük yüklerde kırıldığı için silindir numunelerin beton dayanımları düşük çıkmıştır. Dolayısıyla elastisite modüllerinin ortalaması da hayli düşük kalmıştır. Ayrıca yük-yer değiştirme değerlerini okumadaki hassasiyetten dolayı elastisite modülü alınan noktaya göre 10000 ila 25000 arasında değişmektedir. Bu sebeplerden dolayı beton basınç dayanımı olarak küp numune sonuçları dikkate alınmış ve elastisite modülü de Bölüm 5'te verilen bağıntı yardımıyla hesaplanmıştır.

4.1.2 Donatı

Kiriş numunelerinde boyuna ve enine donatı olarak TS708'e [98] uygun olan S420 nervürlü çelik donatı kullanılmıştır. Kiriş numunelerinde donatıların özelliklerinin belirlenmesi için her çaptaki donatıdan üçer adet numune alınarak çekme deneyine tabi

tutulmuştur (Şekil 4.6). Çelik çekme deneyleri Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda 60 ton kapasiteli çelik çekme cihazında yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 4.3 'de ve TS 708'deki sınır değerler de Çizelge 4.4'de verilmiştir.



Şekil 4. 6 Çelik çekme deney düzeneği

Çizelge 4. 3 Çelik çekme deneyinin sonuçları

NO	Anma Çapı(mm)	Çap (mm)	Akma, R_e (N/mm²)	Çekme, R_m (N/mm²)	Çekme/Akma R_m / R_e	$R_{e,act} / R_{e,nom}$	Uzama %
1	8	8,1	511,2	758,6	1,48	1,22	16
2		8,09	518,2	756,5	1,46	1,23	20
3		8,09	524,7	770,2	1,47	1,25	10
1	12	12,01	463,8	574,4	1,24	1,10	17
2		12	460,6	573,1	1,24	1,10	12,5
3		12	466,4	568,7	1,22	1,11	23

Çizelge 4. 4 TS 708 sınır değerleri [98]

Akma (N/mm²) (min)	Çekme (N/mm²) (min)	Uzama % (min)	R_m / R_e (min)	$R_{e,act} / R_{e,nom}$ (maks)
420	500	10	1,15	1,30

4.1.3 Astar, Epoksi ve CFRP

Kiriş numunelerinin güçlendirilmesinde kullanılan astar, epoksi ve CFRP malzemesi OTS İnşaat Mühendislik Mimarlık Danışmanlık Ar-Ge Yazılım San. Tic. Ltd. Şti.'nden temin edilmiştir. Kullanılan astar malzemesi BASF marka MasterBrace P 3500, iki bileşenli düşük vizkositeli bir astar malzemesidir (Şekil 4.7).



Şekil 4. 7 Astar malzemesi

Bu malzeme kirişteki beton tabakaya nüfus ederek yapıştırıcı ile arasında sağlam bir bağ oluşturmaktadır. MasterBrace P 3500 malzemesinin teknik özellikleri Çizelge 4.5'de verilmiştir.

CFRP malzemesini kiriş yüzeylerine yapıştırmak için kullanılan epoksi katkılı yapıştırıcı, BASF marka MasterBrace SAT 4500 olarak adlandırılan malzemedir. Bu malzeme, 2 ayrı bileşenden oluşan, yüksek dayanımlı, düşük vizkositeli uygulanması kolay yapıştırıcı bir malzemedir (Şekil 4.8).



Şekil 4. 8 Epoksi katkılı yapıştırıcı malzeme

Çizelge 4. 5 Astar malzemesinin teknik özellikleri [99]

Fiziksel Özellikler			
Özellik		**Değer**	
Kalınlık		0,075 mm	
Yoğunluk		1102 kg/m^3	
Basınç Özellikleri		**Çekme Özellikleri**	
Özellik	**Değer**	**Özellik**	**Değer**
Akma gerilmesi	26,2 MPa	Akma gerilmesi	14,5 MPa
Akmada birim şekil değiştirme	%4	Akmada birim şekil değiştirme	%2
Elastisite modülü	670 MPa	Elastisite modülü	717 MPa
En büyük gerilme	28,3 MPa	En büyük gerilme	17,2 MPa
Kopma birim şek. değ.	%10	Kopma birim şek. değ.	%40
Eğilme Özellikleri		Poisson oranı	0.48
Özellik	**Değer**	**Özellik**	**Değer**
Akma gerilmesi	24,1 MPa	Akmada birim şekil değiştirme	%4
Elastisite modülü	595 MPa	En büyük gerilme	24,1 MPa
Kopma birim şekil değiştirme		Kopmadan büyük şekil değiştirme yapabilme	

Epoksi katkılı yapıştırıcı malzemeye ait teknik bilgiler ve karışım oranları Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4. 6 Epoksi malzemesinin teknik özellikleri [100]

Çekme Özellikleri		**Basınç Özellikleri**	
Özellik	**Değer**	**Özellik**	**Değer**
Akma gerilmesi	54 MPa	Akma gerilmesi	86,2 MPa
Akma birim şekil değiştirmesi	% 2,5	Akma birim şekil değiştirmesi	% 5
Elastisite modülü	3034 MPa	Elastisite modülü	2620 MPa
En büyük gerilme	55,2 MPa	En büyük gerilme	86,2 MPa
Kopma birim şekil değiştirmesi	% 3,5	Kopma birim şekil değiştirmesi	% 5
Poisson oranı	0,40		
Eğilme Özellikleri			
Özellik	**Değer**	**Özellik**	**Değer**
Akma gerilmesi	138 MPa	Akma birim şekil değiştirmesi	% 3,8
Elastisite modülü	3724 MPa	En büyük gerilme	138 MPa
Kopma birim şekil değiştirmesi		% 5	

Kiriş güçlendirme malzemesi olarak BASF marka MasterBrace FIB 300/50 CFS tek yönlü karbon lif takviyeli polimer malzeme kullanılmıştır. Malzeme 50 mm genişliğe, yüksek rijitlik ve mukavemete sahiptir (Şekil 4.9).



Şekil 4. 9 Karbon lif takviyeli polimer kumaş

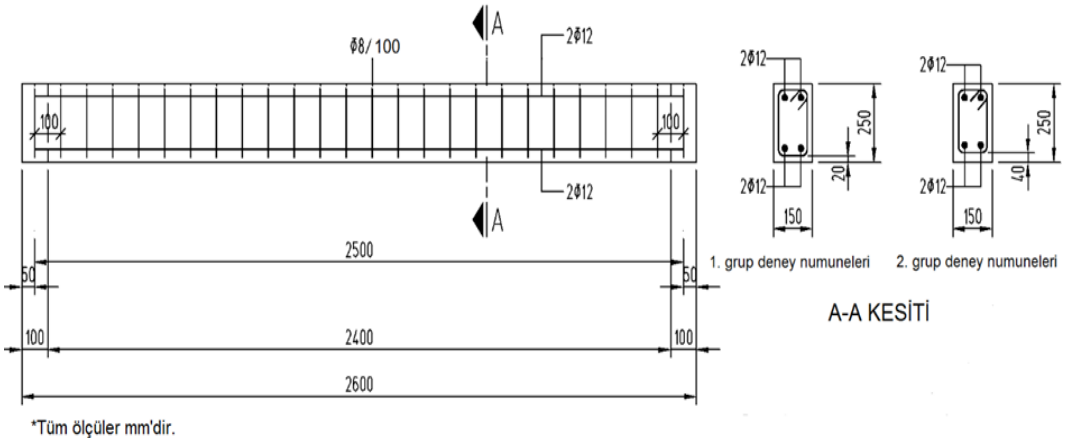
Karbon lif takviyeli polimer kumaşın teknik özellikleri Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4. 7 CFRP malzemenin teknik özellikleri [101]

MasterBrace FIB 300/50 CFS	
Malzeme	Karbon
Elastisite modülü	230000 N/mm^2
Çekme dayanımı	4900 N/mm^2
Tasarım kesit kalınlığı	0,166 mm
Toplam lif ağırlığı	300 g/m^2
Kopma uzaması	% 2,1
Genişlik	500 mm

4.2 Deney Kirişlerinin Üretimi

Bu tez kapsamında yapılacak olan deneysel çalışmada kullanılmak üzere, C20 beton sınıfına sahip 8 adet 150x250x2600 mm boyutlarında betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Kiriş donatısı olarak nervürlü donatı çeliği kullanılmış (S420), boyuna doğrultuda 2ϕ12 çekme donatısı, 2ϕ12 basınç donatısı ve enine doğrultuda ϕ8/10 etriye kullanılmıştır. Üretilen kiriş numunelerinin 4 adedinde net beton örtüsü 20 mm ve diğer 4 adedinde ise 40 mm'dir. Şekil 4.10'da betonarme kiriş numunelerinin geometrik özellikleri ve donatı düzeni verilmiştir.



Şekil 4. 10 Deney kirişlerinin geometrik özellikleri ve donatı planı

Kiriş numunelerinin donatı ağları, kalıpları ve beton döküm işleri İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında yapılmıştır. Kalıplar kalıp yağı ile yağlandıktan sonra hazırlanmış olan donatı düzeneği yerleştirilmiş ve paspayı aparatları yardımıyla gerekli olan paspayı miktarının bırakılması sağlanarak sabitlenmiştir. Deney kirişleri için hazırlatılan çelik donatı ağları ahşap kalıplara yerleştirilmiş, Şekil 4.11'de deney kirişlerine ait donatı ağı, Şekil 4.12'de ise kiriş kalıbının donatı ağı yerleştirildikten sonraki durumu görülmektedir.



Şekil 4. 11 Betonarme kirişler için hazırlanan donatı ağları



Şekil 4. 12 Donatı ağının kalıba yerleştirilmesi

Beton, kiriş kalıbının içine dökülmüş ve vibratör kullanılarak olabildiğince homojen ve boşluksuz olarak yerleşmesi sağlanmıştır. Vibratör uygulanırken yüzeye dik olarak tutulmasına ve donatılara çarpmamasına dikkat edilmiştir. Son olarak mala yardımıyla beton yüzeyi düzeltilmiştir (Şekil 4.13).

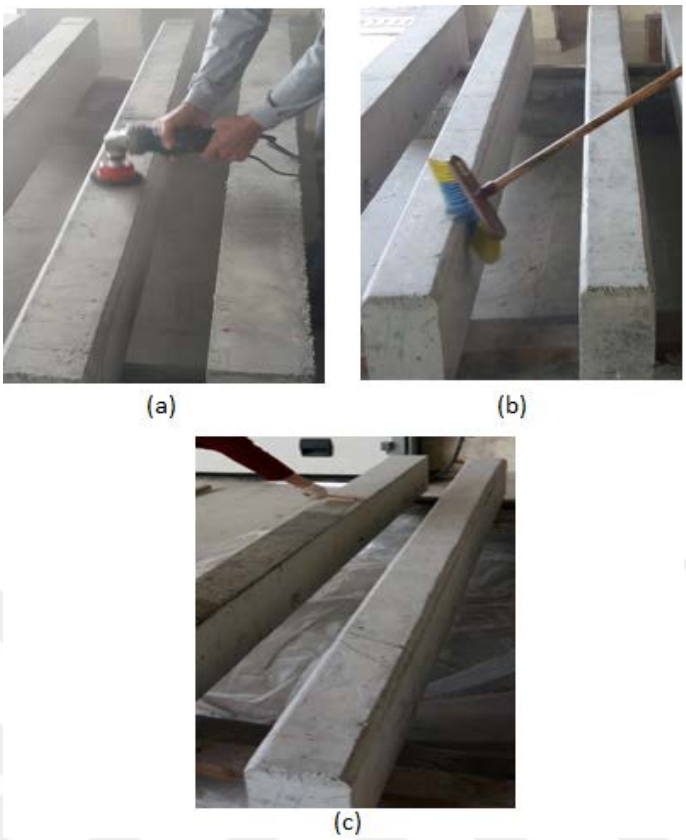


Şekil 4. 13 Kalıplara beton dökülmesi

4.3 Deney Kirişlerinin Güçlendirilmesi

Kirişler döküldükten 107 gün sonra, kirişlere karbon lif takviyeli polimer malzeme yapıştırma işlemine başlanmıştır. Öncelikle kiriş yüzeyleri zımparalanmıştır. Bu işlem, düzgün olmayan pürüzlü kiriş yüzeyinin düzeltilmesi amacıyla, CFRP uygulanacak kiriş yüzeyine uygulanmıştır. Daha sonra kirişin üzerinde biriken toz fırça yardımıyla temizlenmiştir. Kiriş yüzeyine yapıştırıcı ile CFRP malzemesini yapıştırmadan önce, yüzey ile yapıştırıcının daha iyi tutması amacıyla, daha düzgün bir yüzey elde etmek için kiriş yüzeyine astar malzemesi uygulanmıştır (Şekil 4.14).

MasterBrace P 3500 astar malzemesinin iki bileşeninden A-bileşeninin üzerine B-bileşeni 3:1 oranında olacak şekilde karıştırılmış, fırça yardımıyla ince bir tabaka halinde kiriş yüzeyine uygulanmıştır. Astar malzemesi güçlendirilecek olan 6 adet kirişe uygulandıktan sonra prizini alması için 4 saat bekletilmiştir. MasterBrace SAT 4500 epoksi malzemesi önce A-bileşeni 30 saniye karıştırılmış, sonra B-bileşeni tamamen A-bileşeninin içerisine boşaltılmış, karışım, birkaç dakika boyunca, homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılmıştır. Astarlanmış yüzeylere epoksi katkılı yapıştırıcı malzeme, 0,8-1 mm kalınlık elde edecek şekilde rulo ile bir kat sürüldükten sonra kurumadan, uygun ölçülerde kesilmiş lifli polimer kumaş dikkatli bir şekilde gerilerek yüzeye yapıştırılmıştır. Daha sonra rulo ile lifli polimer malzeme bastırılarak, MasterBrace SAT 4500 yapıştırıcının CFRP içine emdirilmesi ve yüzeyle arasında boşluk kalmaması sağlanmıştır.



Şekil 4. 14 Deney kirişlerinin hazırlanması a)kirişlerin zımparalanması b) kiriş üzerindeki tozların temizlenmesi c) kiriş yüzeyine astar uygulaması

İkinci kat yapıştırıcı yine rulo ile yüzeye yapıştırılmış olan CFRP malzeme üzerine lifleri doğrultusunda sürülmüştür (Şekil 4.15). Gerginleştirilen CFRP kumaş bastırılarak altında hava kalmaması sağlanmıştır. CFRP kumaşların üstü epoksi ile kapatıldıktan sonra kurumaya bırakılmıştır.



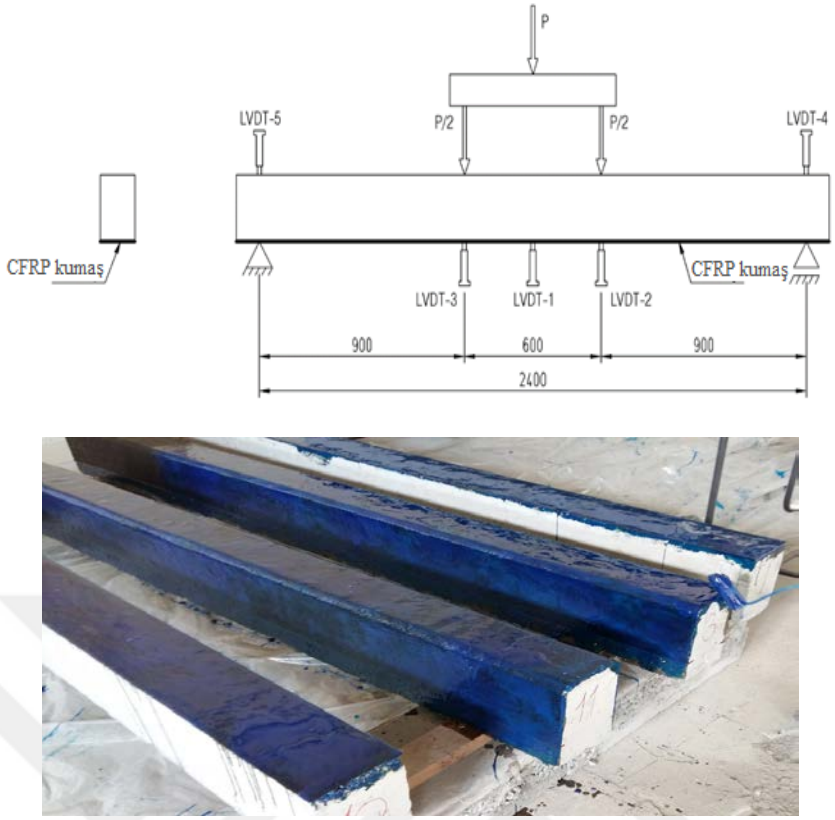
Şekil 4. 15 Deney kirişlerine CFRP uygulaması a) kiriş yüzeyine epoksi uygulaması b) CFRP malzemenin yapıştırılması

Toplam 8 adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş numunesi her grupta güçlendirilmeyen 1 adet referans kirişi ve CFRP'nin dıştan üç farklı biçimde yapıştırılmasıyla güçlendirilmiş 3 adet numune olmak üzere 2 gruba ayrılmıştır. Numuneler, referans kirişleri için "K-net beton örtüsü-R" ile güçlendirilmiş kiriş numuneleri için ise "K-net beton örtüsü-KG-sargı şekli" olarak isimlendirilmiştir. Her iki grupta da güçlendirme biçimlerinin ilkinde kirişin sadece eğilme (alt) yüzeyine CFRP kumaş yapıştırılmıştır (150x2600 mm); KG00. Bu yöntem, kirişlerin eğilme kapasitesinin CFRP malzeme ile iyileştirilmesinde en çok kullanılan yöntemlerinden biridir.

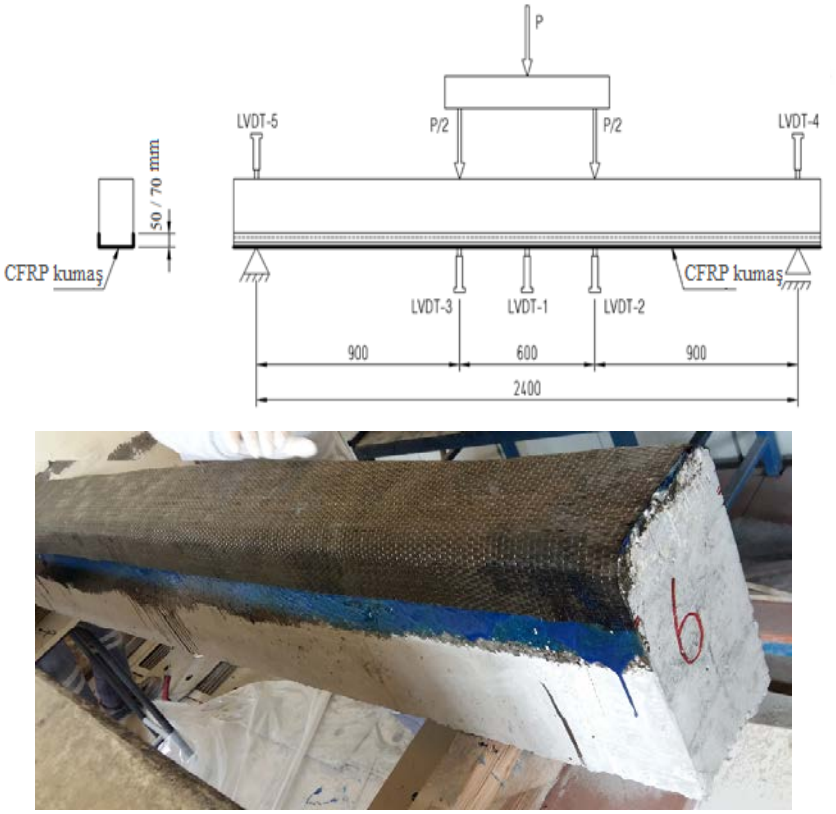
İkinci uygulama biçiminde ise, CFRP kumaş, kirişin alt yüzeyine ek olarak çekme donatılarını içine alacak şekilde iki yan yüze yapıştırılmıştır. 1. grup deney numunesinde yan yüzeylerde 50 mm yüksekliğinde (KG50), 2. grup deney numunesinde ise yan yüzeylerde 70 mm yüksekliğinde (KG70) bu uygulama yapılmıştır (250x2600; 290x2600).

Üçüncü uygulama biçiminde ise, CFRP kumaş kirişin alt yüzeyi ile yan yüzeylerinin büyük bir kısmına (175 mm) birlikte yapıştırılmıştır (500x2600mm); KGU. Kirişin yan yüzeylerinde basınç bölgesinde yapılacak güçlendirmenin eğilme performansına etkisinin fazla olmayacağı dikkate alındığında deneylerde yapılan bu uygulama biçiminin eğilme performansının incelenmesinde gerçekçi bir uygulama olduğu kabul edilebilir. Ayrıca, genişliği 500 mm olan CFRP kumaşın ayrı parçalar halinde kullanılması durumunda malzemede kopmalar olabileceği ve tek parça davranışı gösteremeyeceği olasılığı da bu uygulamayla önlenmiştir.

CFRP malzemenin kirişin yan yüzeylerinin bir kısmına yapıştırılmasıyla yapılan güçlendirme yöntemi, yan yüzeylerinin tamamına yapıştırılmasıyla yapılan güçlendirme yöntemi ile karşılaştırıldığında kullanılan malzeme miktarında önemli bir azalma söz konusudur. CFRP malzeme ve malzemeyi kiriş yüzeyine yapıştırmak için gerekli olan yapıştırıcı malzemenin maliyeti de dikkate alındığında ikinci yöntemin ekonomik olarak avantajlı olduğu söylenebilir. Deney kirişlerinin güçlendirme biçimleri Şekil 4.16'da görülmektedir.

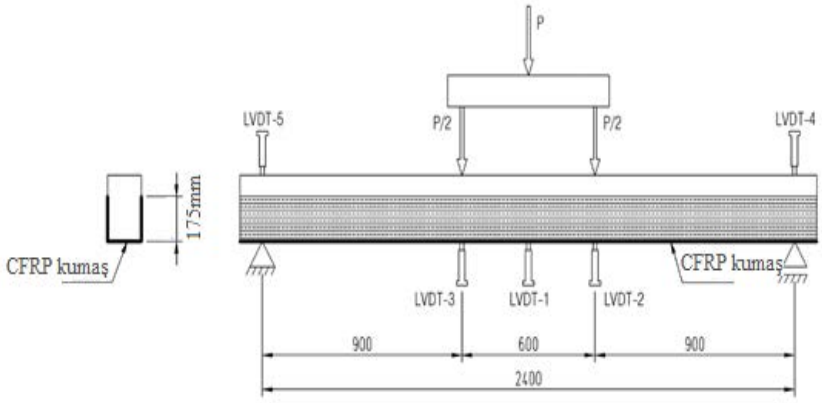


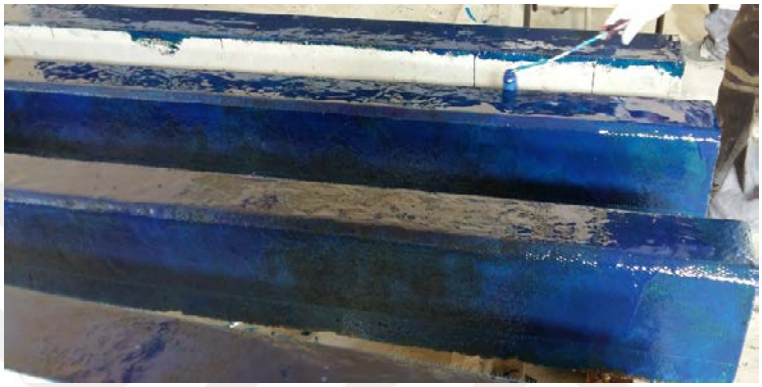
a) Deney kirişi K20KG00 ve K40KG00



b) Deney kirişi K20KG50 ve K40KG70

Şekil 4. 16 Deney kirişlerinin güçlendirme biçimleri





c) Deney kirişi K20KGU ve K40KGU

Şekil 4.16 Deney kirişlerinin güçlendirme biçimleri (devamı)

Deney kirişlerinin özellikleri Çizelge 4.8'de verilmiştir.

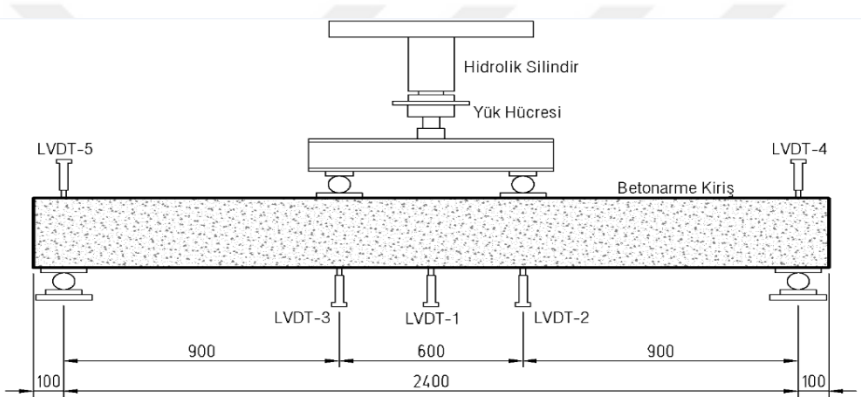
Çizelge 4. 8 Deney kirişlerinin özellikleri

Grup No	**Kiriş Adı**	**Beton dayanımı MPa**	**Çekme donatısı**	**CFRP tabaka sayısı**	**Güçlendirme biçimi**
1	K20R	20	2ϕ12	0	-
	K20KG00	20	2ϕ12	1	Şekil 4.16a
	K20KG50	20	2ϕ12	1	Şekil 4.16b
	K20KGU	20	2ϕ12	1	Şekil 4.16c
2	K40R	20	2ϕ12	0	-
	K40KG00	20	2ϕ12	1	Şekil 4.16a
	K40KG70	20	2ϕ12	1	Şekil 4.16b
	K40KGU	20	2ϕ12	1	Şekil 4.16c

4.3.1 Deney Düzeneği

4.3.1.1 Yükleme Düzeneği

Kiriş numuneleri Yıldız Teknik Ünversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarında bulunan yükleme cihazında test edilmiştir. Şekil 4.17'de görüleceği üzere kiriş numuneleri, mesnet noktalarından 0,375L=900 mm kadar uzaklıkta etkiyen simetrik iki tekil yük altında test edilmiştir. Uygulanan düşey yükün kirişe üniform olarak dağılması amacıyla çelik bir levha kullanılmış ve yük, 1000 kN kapasiteli yük hücresi ile uygulanmıştır (Şekil 4.17). Yükleme monotonik olarak göçme meydana gelene kadar artırılarak uygulanmıştır. Yükleme hızı 2mm/dak. olarak uygulanmıştır.



Şekil 4. 17 Deney düzeneği

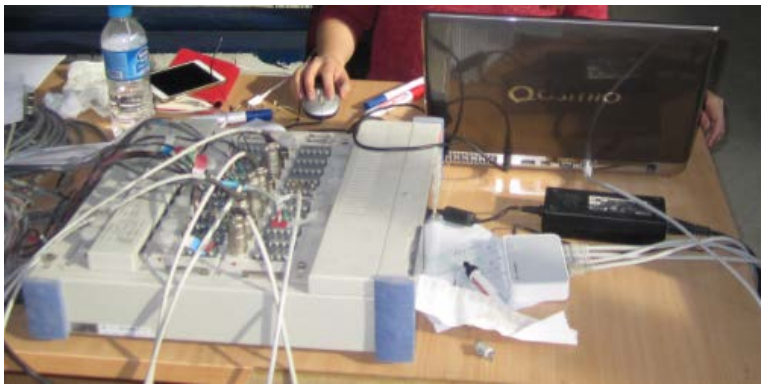
4.3.1.2 Ölçüm Düzeneği

Kirişin orta noktasında, yükün uygulandığı noktalarda ve mesnet kesimlerindeki düşey yer değiştirmeler LVDT ile ölçülmüştür. Bu bağlamda, açıklık ortasına 300 mm ölçüm boyuna sahip, diğer noktalara ise 100 mm ölçüm boyuna sahip LVDT yerleştirilmiştir (Şekil 4.18).



Şekil 4. 18 Deney kirişinde LVDT yerleşimi

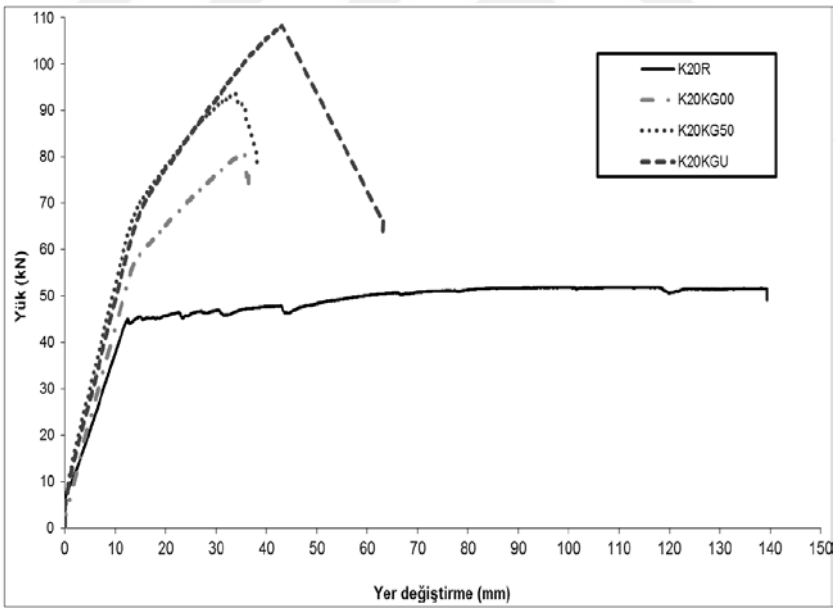
Deneyler sırasında veri toplama sistemi ile yük yer değiştirme değerleri bilgisayara kaydedilmiştir (Şekil 4.19).



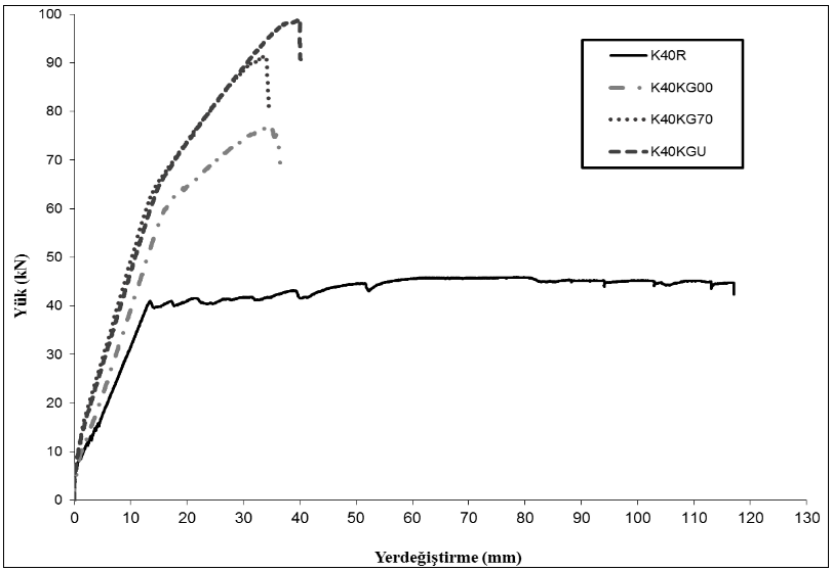
Şekil 4. 19 Veri toplama sistemi

4.4 Deney Sonuçları

Deney kirişlerinin yük açıklık ortası yer değiştirme grafikleri Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4. 20 1. Grup deney kirişlerinin yük yer değiştirme eğrileri



Şekil 4. 21 2. Grup deney kirişlerinin yük yer değiştirme eğrileri

Grafikler incelendiğinde 1. grup deney kirişlerinde yaklaşık 45 kN yük düzeyine kadar; 2. grup deney kirişlerinde ise yaklaşık 40 kN yük düzeyine kadar tüm deney kirişlerinin yaklaşık olarak eşit yer değiştirme yaptığı görülmüştür. Deney elemanlarında bu yük düzeylerine kadar kiriş yüzeyinde oluşan kılcal çatlaklar, bu yük düzeyinden sonra genişlemeye başlamıştır. Deney elemanlarının maksimum yük kapasiteleri CFRP kumaşın uygulanma biçimine göre değişiklik göstermektedir. Güçlendirilmiş deney kirişlerinde CFRP kumaşın sıyrılmasının betondaki çatlaklardan kaynaklandığı gözlenmiştir. Deney sonuçları Çizelge 4.9'da sunulmuştur.

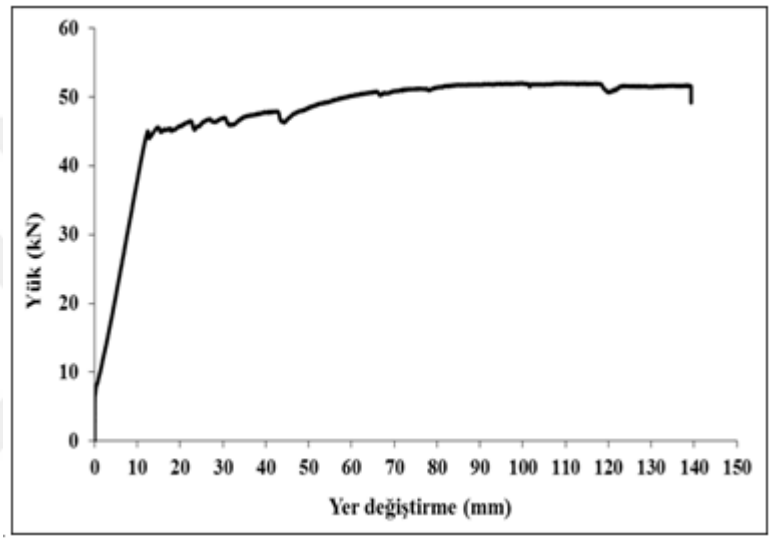
Çizelge 4. 9 Deney sonuçları

Grup No	**Kiriş Adı**	**Maksimum Yük (kN)**	**Göçme Mekanizması**
1	K20R	51,97	Eğilme göçmesi ve betonun ezilmesi
	K20KG00	80,43	CFRP'nin sıyrılması ve kopması
	K20KG50	93,56	CFRP'nin sıyrılması
	K20KGU	108,19	CFRP'nin sıyrılması ve kopması
2	K40R	45,87	Eğilme göçmesi ve betonun ezilmesi
	K40KG00	76,78	CFRP'nin sıyrılması
	K40KG70	91,43	CFRP'nin sıyrılması
	K40KGU	98,95	CFRP'nin sıyrılması ve kopması

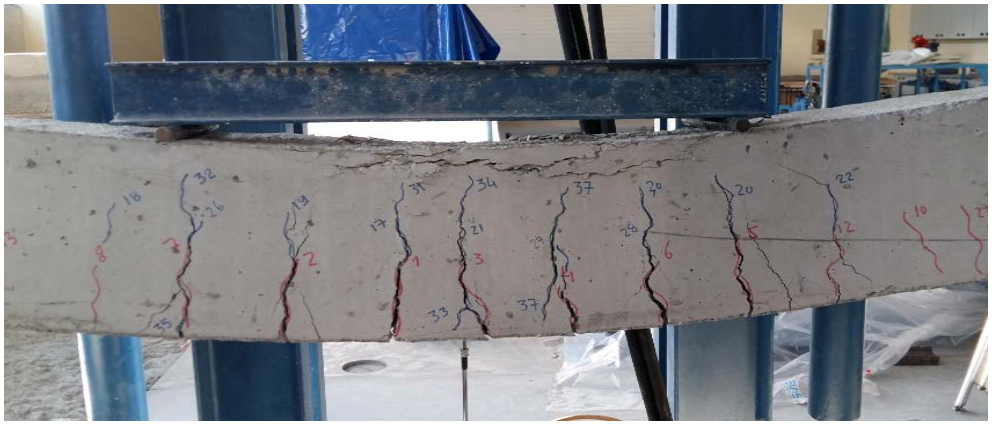
4.4.1 1. Grup Deney Kirişleri

4.4.1.1 K20R Deney Kirişi

Deney esnasında referans deney kirişi (K20R), 51,97 kN maksimum yük seviyesinde 99,76 mm yer değiştirme yapmıştır. Kirişin taşıdığı yük yaklaşık bu değerde sabit kalırken yer değiştirme artarak maksimum 139,35 mm olmuştur (Şekil 4.22). Deney esnasında yük altındaki kirişte eğilme çatlaklarının genişliği artarken basınç bölgesindeki betonda ezilme gözlenmiştir (Şekil 4.23).



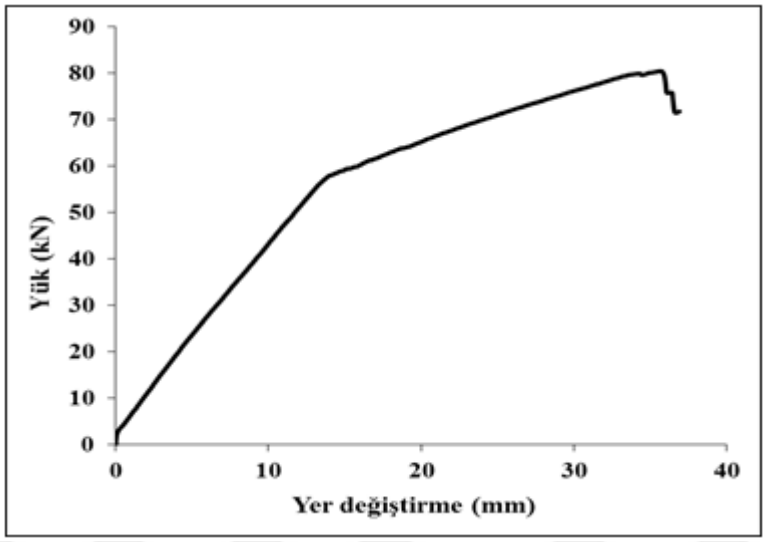
Şekil 4. 22 K20R deney kirişinin yük-yer değiştirme eğrisi



Şekil 4. 23 K20R deney kirişinin göçme mekanizması

4.4.1.2 K20KG00 Deney Kirişi

Deney kirişi K20KG00, 80,43 kN maksimum yük seviyesinde 35,72 mm yer değiştirme yapmıştır. Kirişin taşıdığı yük miktarında azalma olurken, yer değiştirme artarak maksimum 36,93 mm olmuştur (Şekil 4.24). K20KG00 kirişinin maksimum yük taşıma kapasitesi referans deney kirişinden %54,8 fazladır. K20KG00 kirişinde CFRP tabakanın yüzeyden sıyrıldığı ve koptuğu gözlenmiştir (Şekil 4.25).



Şekil 4. 24 K20KG00 deney kirişinin yük-yer değiştirme eğrisi

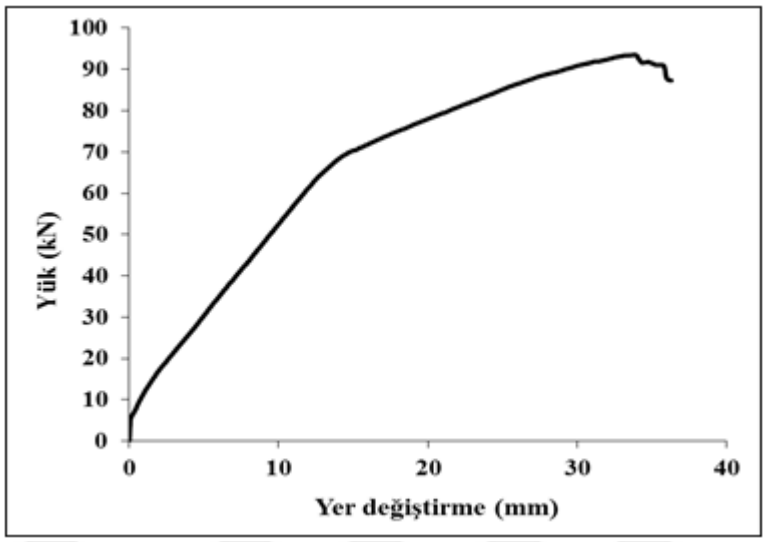


Şekil 4. 25 K20KG00 deney kirişinin göçme mekanizması

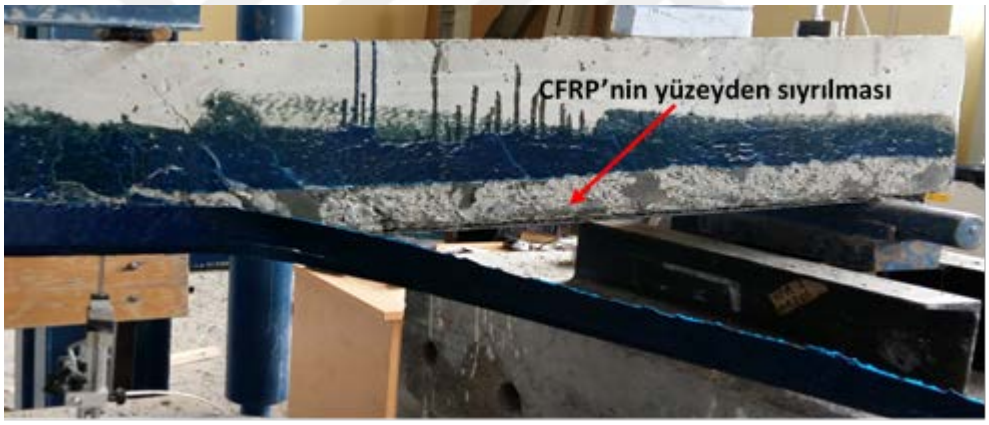
4.4.1.3 K20KG50 Deney Kirişi

Deney kirişi K20KG50, 93,56 kN maksimum yük seviyesinde 33,88 mm yer değiştirme yapmıştır. Kirişin taşıdığı yük miktarında azalma olurken, yer değiştirme artarak maksimum 39,15 mm olmuştur (Şekil 4.26). K20KG50 kirişinin maksimum yük taşıma

kapasitesi referans deney kirişinden %80,0 daha fazladır. K20KG50 kirişinde CFRP kumaşın beton yüzeyinden sıyrıldığı gözlenmiştir (Şekil 4.27).



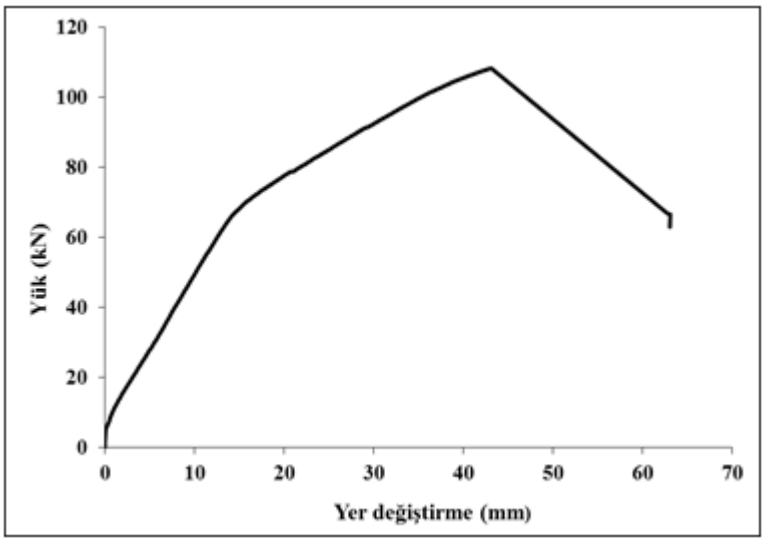
Şekil 4. 26 K20KG50 deney kirişinin yük-yer değiştirme eğrisi



Şekil 4. 27 K20KG50 deney kirişinin göçme mekanizması

4.4.1.4 K20KGU Deney Kirişi

Deney kirişi K20KGU, referans deney kirişinin yaklaşık olarak iki katından daha fazla yük taşıyarak 108,19 kN yük değerine ulaşmıştır. Deney kirişi K20KGU'nun bu yük seviyesinde 43,15 mm yer değiştirme yaptığı gözlenmiştir. Kirişin taşıdığı yük miktarında azalma olurken yer değiştirme artarak maksimum 63,07 mm olmuştur (Şekil 4.28). K20KGU kirişinde CFRP kumaşın beton yüzeyinden sıyrıldığı ve koptuğu gözlenmiştir (Şekil 4.29).



Şekil 4. 28 K20KGU deney kirişinin yük-yer değiştirme eğrisi

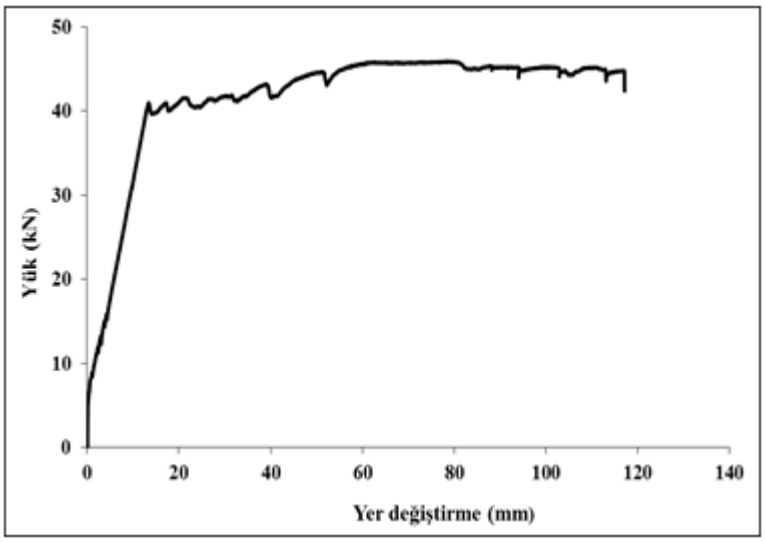


Şekil 4. 29 K20KGU deney kirişinin göçme mekanizması

4.4.2 2. Grup Deney Kirişleri

4.4.2.1 K40R Deney Kirişi

Deney esnasında referans deney kirişi (K40R), 45,87 kN yük seviyesinde 79,32 mm yer değiştirme yapmıştır. Kirişin taşıdığı yük yaklaşık bu değerde sabit kalırken yer değiştirme artarak maksimum 117,13 mm olmuştur (Şekil 4.30). Deney esnasında yük altındaki kirişte eğilme çatlaklarının genişliği artarken basınç bölgesindeki betonda ezilme gözlenmiştir (Şekil 4.31).



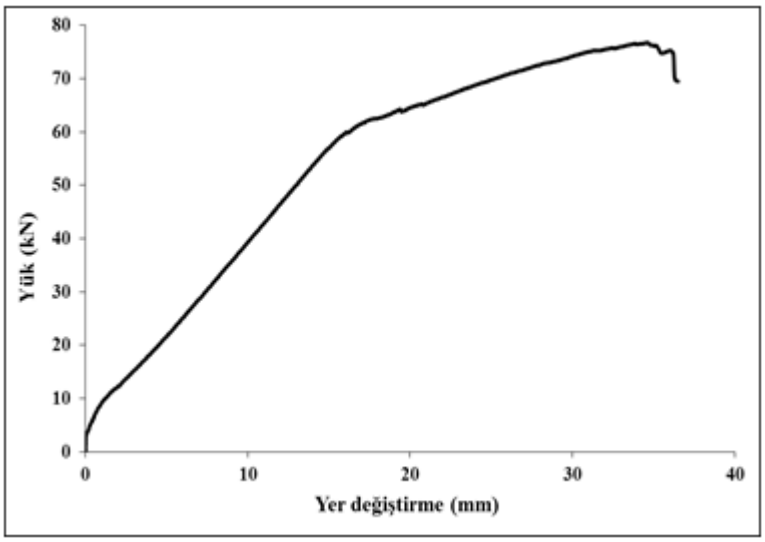
Şekil 4. 30 K40R deney kirişinin yük-yer değiştirme eğrisi



Şekil 4. 31 K40R deney kirişinin göçme mekanizması

4.4.2.2 K40KG00 Deney Kirişi

Deney kirişi K40KG00, 76,78 kN maksimum yük seviyesinde 34,63 mm yer değiştirme yapmıştır. Kirişin taşıdığı yük miktarında azalma olurken, yer değiştirme artarak maksimum 36,51 mm olmuştur. (Şekil 4.32). K40KG00 kirişinin maksimum yük taşıma kapasitesi referans deney kirişinden %67,4 fazladır. K40KG00 kirişinde CFRP kumaşın beton yüzeyden sıyrıldığı gözlenmiştir (Şekil 4.33).



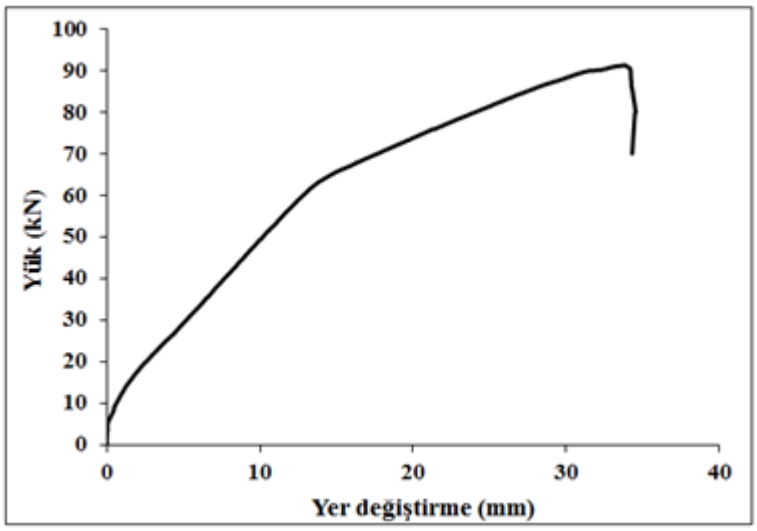
Şekil 4. 32 K40KG00 deney kirişinin yük-yer değiştirme eğrisi



Şekil 4. 33 K40KG00 deney kirişinin göçme mekanizması

4.4.2.3 K40KG70 Deney Kirişi

Deney kirişi K40KG70 91,43 kN maksimum yük seviyesinde 33,82 mm yer değiştirme yapmıştır. Kirişin taşıdığı yük miktarında azalma olurken, yer değiştirme artarak maksimum 34,56 mm olmuştur (Şekil 4.34). K40KG70 kirişinin maksimum yük taşıma kapasitesi referans deney kirişinin iki katıdır. K40KG70 kirişinde CFRP kumaşın beton yüzeyden sıyrıldığı gözlenmiştir (Şekil 4.35).



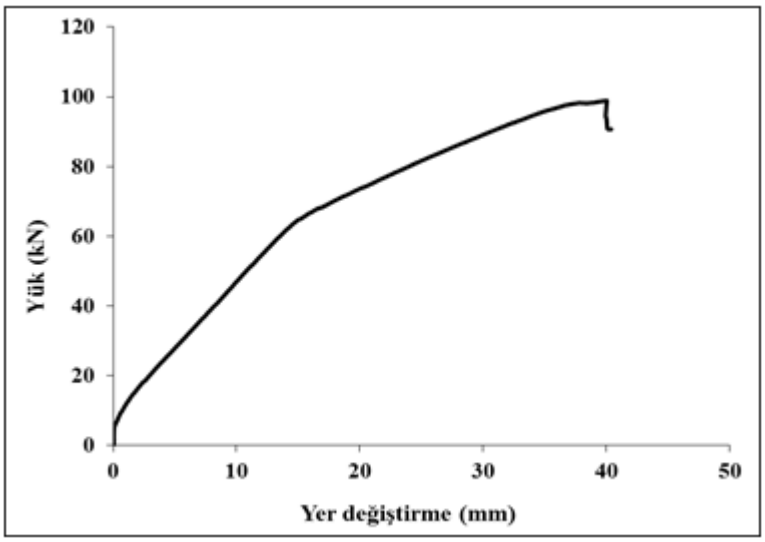
Şekil 4. 34 K40KG70 deney kirişinin yük-yer değiştirme eğrisi



Şekil 4. 35 K40KG70 deney kirişinin göçme mekanizması

4.4.2.4 K40KGU Deney Kirişi

Deney kirişi K40KGU, referans deney kirişinin iki katından daha fazla yük taşıyarak 98,95 kN yük değerine ulaşmıştır. Deney kirişi K40KGU'nun bu yük seviyesinde 40,04 mm yer değiştirme yaptığı gözlenmiştir. Kirişin taşıdığı yük miktarında azalma olurken yer değiştirme miktarı artarak maksimum 41,82 mm olmuştur (Şekil 4.36). K40KGU kirişinde CFRP kumaşın beton yüzeyden sıyrıldığı ve koptuğu gözlenmiştir (Şekil 4.37).



Şekil 4. 36 K40KGU deney kirişinin yük-yer değiştirme eğrisi



Şekil 4. 37 K40KGU deney kirişinin göçme mekanizması

BÖLÜM 5

SAYISAL ÇÖZÜM YÖNTEMİ VE AKMA KRİTERLERİ

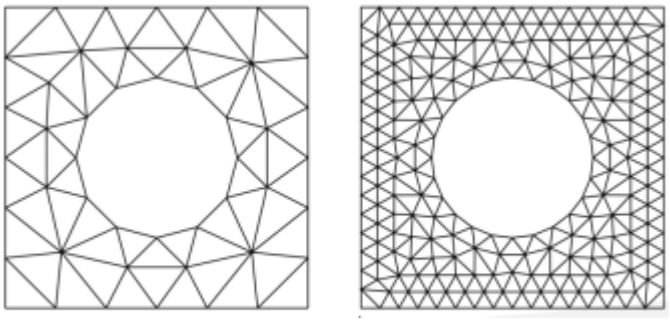
5.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık problemlere yaklaşık çözümler elde etmek için kullanılan matematiksel bir yöntemdir [102], [103]. Karmaşık problem daha basite indirgenerek kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmektedir [102], [104], [105].

Yöntem karmaşık ve değişik malzeme özellikleri olan sistemlerde uygulanabilir. Örneğin, heterojen (beton gibi) malzeme, anizotrop (ahşap gibi) malzeme, doğrusal olmayan malzeme vs. [106]. Sonlu elemanlar yönteminde, problem alanı sonlu eleman olarak adlandırılan birçok alt alana ayrılır. Bu nedenle problem alanı birçok sonlu eleman parçasından oluşur [107].

Şekil 5.1 'de aynı sistem için oluşturulmuş farklı iki sonlu eleman ağı görülmektedir. Şekil 5.1b' de sonlu eleman ağı Şekil 5.1.a'ya göre daha fazla elemandan oluşmaktadır. Bu durum elastik analizlerde sistemin hassasiyetini arttırabilir [104]. Ancak doğrusal olmayan analizlerde oluşturulan bu sonlu eleman ağı ile yapılan modellemede erken taşıma gücü kaybı görülebilir [108].

Düğüm noktalarında süreklilik, denge ve uygunluk şartları ile eleman kütle ve rijitlik matrisleri belirlenir [109]. Eleman rijitlik matrisleri, kütle ve yük matrisleri ile birleştirilerek sistem rijitlik matrisi elde edilir. Tüm sistem için elde edilen denge bağıntıları çözülerek düğüm noktalarındaki yer değiştirmeler ve buna bağlı olarak elemanlardaki gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler hesaplanır [110].



Şekil 5. 1 Aynı sisteme ait farklı boyutlarda sonlu eleman ağları [111]

Yöntemin üç temel özelliği vardır. Bunlar;

1) Geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan daha basit alt bölgelere ayrılır. 2) Herbir elemandaki, sürekli fonksiyonların, matematiksel polinomların doğrusal kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir. 3) Aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin düğüm noktalarındaki değerleri elde edilmesinin problemin çözümünde yeterli olmasıdır [112].

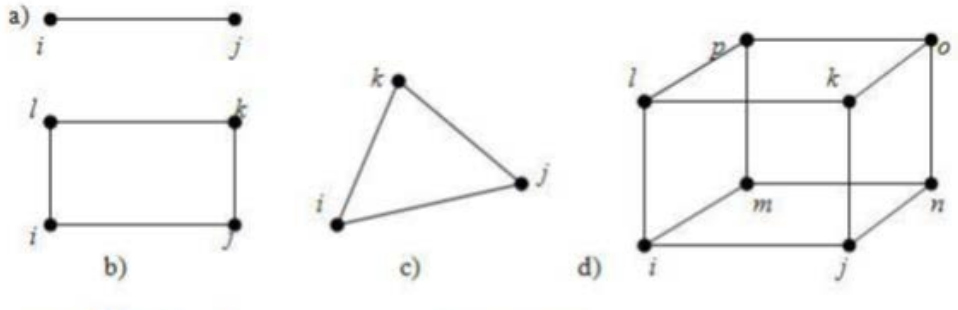
Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan elemanlar boyutlarına göre dört kısma ayrılabilir:

a) Tek boyutlu elemanlar: Tek boyutlu olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılan elemanlardır (Şekil 5.2).

b) İki boyutlu elemanlar: İki boyutlu (düzlem) olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılan elemanlardır. Bu grubun temel elemanı olan üç düğümlü üçgen elemanın altı, dokuz ve daha fazla düğüm içeren çeşitleri vardır. Düğüm sayısı seçilecek enterpolasyon fonksiyonunun derecesine göre belirlenir (Şekil 5.2).

c) Dönel elemanlar: Eksenel simetrik özellik gösteren problemlerin çözümünde kullanılır. Üç boyutlu olan bu elemanlar, eksenel simetrik problemlerin iki boyutlu problem gibi çözülmesine olanak sağladığı için çok kullanışlıdırlar (Şekil 5.2).

d) Üç boyutlu elemanlar: Bu grubun temel elemanı üçgen piramittir(Şekil 5.2). Bunun dışında altı yüzeyli elemanlar, üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan elemanlardır [113].



Şekil 5. 2 Bir, iki ve üç boyutlu sonlu eleman örnekleri, a) Bir boyutlu çubuk eleman, b) İki boyutlu dikdörtgen eleman, c) İki boyutlu üçgen eleman, d) Üç boyutlu dikdörtgen prizma (tuğla) eleman [114]

e) İzoparametrik Elemanlar: Çözüm bölgesinin sınırları eğri denklemleri ile tanımlanan bölgeyi gereken hassasiyette tanımlamak için elemanların boyutlarını küçültmek, dolayısıyla adetlerini artırmak gerekmektedir. Bu durum çözülmesi gereken denklem sayısını artırır, dolayısıyla gereken bilgisayar kapasitesinin ve zamanın büyümesine sebep olur. Bu olumsuzluklardan kurtulmak için, çözüm bölgesinin eğri denklemleri ile tanımlanan sınırlarına uyum sağlayacak eğri kenarlı elemanlara ihtiyaç hissedilmektedir. Böylece hem çözüm bölgesi daha iyi tanımlanmakta hem de daha az sayıda eleman kullanılarak çözüm yapılabilmektedir. Bu elemanlar üzerindeki düğüm noktaları bir fonksiyon ile tanımlanır. İzoparametrik sonlu elemanın özelliği, her noktasının yer değiştirmesinin ve konumunun aynı mertebeden aynı şekil (interpolasyon) fonksiyonu ile tanımlanabilmesi izoparametrik sonlu elemanın en belirgin özelliğidir.

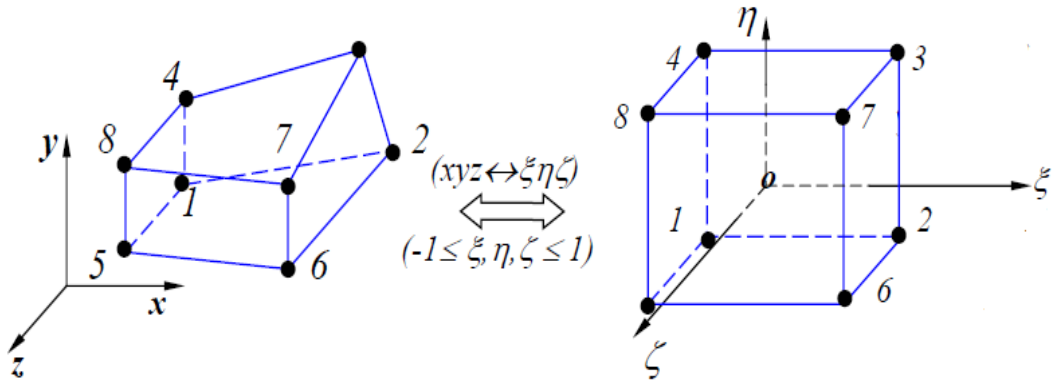
İzoparametrik elemanların şu özellikleri vardır:

a) Yerel koordinatlarda iki komşu eleman arasında süreklilik sağlanıyorsa, izoparametrik elemanlarda da sağlanıyor demektir.

b) Eğer interpolasyon fonksiyonu yerel koordinat takımındaki elemanda sürekli ise, izoparametrik elemanda da süreklidir.

c) Çözümün tamlığı yerel koordinatlarda sağlanıyor ise izoparametrik, elemanlarda da sağlanır.

İzoparametrik elemanların anılan özellikleri dolayısıyla, interpolasyon fonksiyonları lokal koordinatlarda seçilir [113]. Şekil 5.3'te doğrusal hexahedral eleman verilmiştir.



Şekil 5. 3 Doğrusal hexahedral eleman [115]

Elemandaki yer değiştirmeler,

$$u=\sum_{i=1}^{8}N_i u_i, \qquad v=\sum_{i=1}^{8}N_i v_i, \qquad w=\sum_{i=1}^{8}N_i w_i \tag{5.1}$$

şeklinde verilir.

Şekil fonksiyonları ise,

$$N_1=(\xi,\eta,\zeta)=\frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta)$$

$$N_2=(\xi,\eta,\zeta)=\frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta)$$

$$N_3=(\xi,\eta,\zeta)=\frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta) \tag{5.2}$$

$$\vdots$$

$$N_8=(\xi,\eta,\zeta)=\frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta)$$

denklemleri ile verilir.

Şekil fonksiyonları Denklem 5.3'deki ilişkilere sahiptir.

$$N_i = \left(\xi_j, \eta_j, \zeta_j\right) = \delta_{ij} \quad , \quad \text{i,j=1,2,....,8}$$
$$\sum_{i=1}^{8} N_i\left(\xi,\eta,\zeta\right) = 1 \tag{5.3}$$

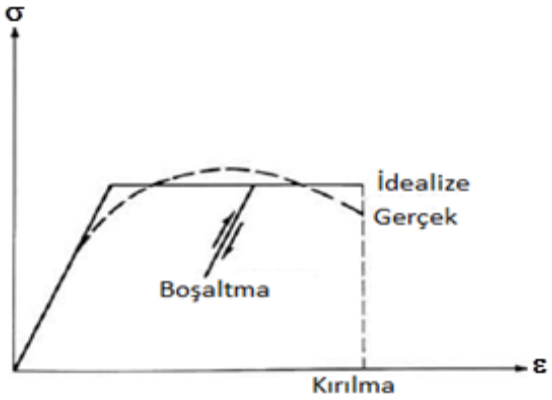
Koordinat dönüşümü yapılırsa, şekil fonksiyonları;

$$x = \sum_{i=1}^{8} N_i x_i, \qquad y = \sum_{i=1}^{8} N_i y_i, \qquad z = \sum_{i=1}^{8} N_i z_i \tag{5.4}$$

Aynı şekil fonksiyonu, yer değiştirme içinde kullanılır [115].

5.2 Elasto- Plastik Analiz İçin Akma/Kırılma Kriterleri

Elastik sınırı ve herhangi bir olası gerilme seviyesinde plastik şekil değiştirmenin başlangıcını tanımlayan durum, akma koşulu veya akma kriteri olarak adlandırılmaktadır. Elastik bölgede, uygulanan gerilme kaldırıldıktan sonra tüm şekil değiştirmeler geri kazanılacaktır. Ancak akma durumuna ulaşıldığında, gerilme tamamen ortadan kaldırıldıktan sonra bile şekil değiştirme geri alınamayacağı için şekil değiştirmenin bir kısmı kalıcı olacaktır. Şekil değiştirmenin bu kısmı plastik şekil değiştirme, kalıcı olmayan şekil değiştirme ise elastik şekil değiştirme olarak bilinir. Tek boyutlu yüklemenin basit durumu için, akma kriteri, plastik şekil değiştirmenin meydana geleceği bir gerilme değeri ile tanımlanır. Diğer bir deyişle, akma kriteri grafiksel olarak bir nokta ile temsil edilir. İki boyutlu yükleme durumunda, iki yükleme yönüne uygulanan gerilmelerin kombinasyonu bir sınır eğriye dokunduğunda akma meydana gelir. Aynı şekilde, üç boyutlu yükleme durumunda, üç yönde uygulanan gerilmelerin kombinasyonu bir sınır yüzeye dokunduktan sonra plastik şekil değiştirme meydana gelecektir. Kısaca, akma kriterleri genellikle gerilme uzayındaki bir yüzey ile temsil edilir [116]. Akma kriterleri, bir malzeme için plastik şekil değiştirmenin meydana geleceği ve aynı zamanda elasto-plastik davranış bölgelerinden elastik davranış bölgelerinin ayrıldığı gerilme koşullarının tanımlanmasını sağlar [117]. Akma kriteri gerilmelere ve malzeme parametrelerine bağlı olarak belirlenmektedir. Şekil 5.4'de tek eksenli gerilme-şekil değiştirme eğrisi verilen elastoplastik bir malzemenin gerilme durumu altında genel davranışı incelenecek olursa, malzemenin akma limitine kadar elastik olduğu görülmektedir.



Şekil 5. 4 Basınç altındaki beton için elastoplastik idealizasyon [118]

Akmanın başladığı gerilme durumuna karşılık gelen fonksiyon akma fonksiyonu olarak adlandırılmaktadır ve

$$f\left(\sigma_{ij}\right)=k \tag{5.5}$$

şeklinde gösterilir. Buradaki "*k*" malzeme sabitidir [118].

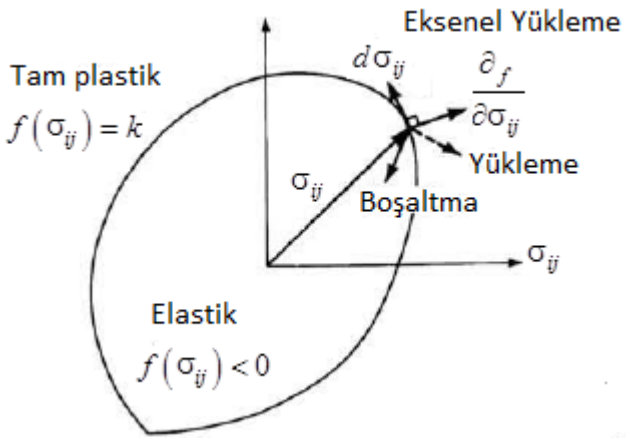
Akma yüzeyi, akma kriterinin asal gerilmeler düzleminde belirlemiş olduğu bir yüzeydir [119].

Akma yüzeyi gerilme geçmişi ile değişmezse, malzemenin mükemmel bir plastik olduğu bilinir. Bu pekleşmiş malzemelerin özel bir durumudur. Mükemmel bir plastik malzeme için, gerilme durumu, akma yüzeyinin içinde olduğunda, davranış elastiktir. Gerilme durumu akma yüzeyi boyunca uzandığında veya hareket ettiğinde plastik birim şekil değiştirmeler meydana gelecektir. Plastik ve elastik davranış için tüm gerilme koşulları, aşağıdaki gibi ifade edilebilir [116].

$$\text{Elastik:} f\left(\sigma_{ij}\right)<0 \quad \text{ya da} \quad df=\frac{\partial_f}{\partial\sigma_{ij}}d\sigma_{ij}<0 \tag{5.6}$$

$$\text{Plastik:} f\left(\sigma_{ij}\right)=0 \quad \text{ya da} \quad df=\frac{\partial_f}{\partial\sigma_{ij}}d\sigma_{ij}=0 \tag{5.7}$$

Akma fonksiyonu gerçekte dokuz boyutlu bir gerilme uzayında bir hiper yüzeyi temsil etmesine rağmen iki boyutlu olarak Şekil 5.5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 5 Yükleme ve boşaltma durumlarında akma yüzeyi [118]

Genel olarak akma kriteri invaryantlar cinsinden,

$$f(\sigma_{ij}) = f(I_1, J_2, J_3) \tag{5.8}$$

olarak yazılabilir [116].

I_1, gerilme tansörü σ_{ij} nin birinci invaryantı (değişmezi) dır. J_2 ve J_3 deviyatör tansörünün (S_{ij}) ikinci ve üçüncü değişmezleridir. Gerilme tansörü (σ_{ij}) deviyatör gerilme tansörü S_{ij} ve küresel gerilme tansörü p_{ij} olmak üzere iki kısımdan oluşur. Küresel gerilme tensörünün bileşenleri $\sigma_m \delta_{ij}$ dir. Bu durumda gerilme tansörü (σ_{ij});

$$\sigma_{ij} = S_{ij} + \sigma_m \delta_{ij} \tag{5.9}$$

şeklinde yazılır. Burada σ_m ortalama normal gerilme, δ_{ij} ise kronecker deltasıdır .

$$\sigma_m = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 = I_1/3 \tag{5.10}$$

$$\sigma_m \delta_{ij} = \sigma_m \begin{bmatrix} 1\,0\,0 \\ 0\,1\,0 \\ 0\,0\,1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_m\ 0\ 0 \\ 0\ \sigma_m\ 0 \\ 0\ 0\ \sigma_m \end{bmatrix} \tag{5.11}$$

Deviyatorik gerilme tensorü S_{ij}'nin değişmezleri,

$$J_1 = S_1 + S_2 + S_3 = 0$$
$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} = \frac{1}{6}\left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \right] \quad (5.12)$$
$$J_3 = \left| S_{ij} \right| = S_1 S_2 S_3$$

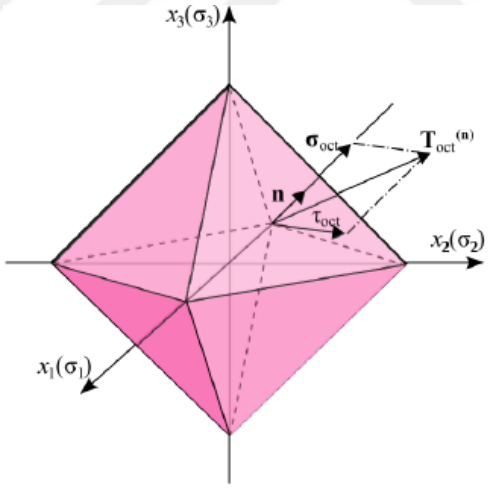
şeklinde yazılır. Burada S_1, S_2 ve S_3 üç temel deviyatörik gerilmedir [120].

Gerilme invaryantları Denklem 5.13'teki gibi ifade edilebilir [119], [120], [121].

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$
$$I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3 \quad (5.13)$$
$$I_3 = \sigma_1\sigma_2\sigma_3$$

Burada, I_1, I_2 ve I_3 gerilme invaryantları (değişmezleri) olarak bilinmesinin nedeni onların değerlerinin koordinat sistemi seçimine göre değişmemesidir [121].

Oktahedral Kayma Gerilmesi: Üç asal eksen ile eşit açılar yapan bir düzleme *oktahedral düzlem* denir [118]. Toplam 8 adet oktahedral düzlem vardır (Şekil 5.6). Bu düzlemdeki gerilme tensörünün normal ve kayma bileşenleri sırasıyla oktahedral normal gerilme σ_{oct} ve oktahedral kayma gerilmesi τ_{oct}'dir [122].



Şekil 5. 6 Oktahedral gerilme düzlemleri [122]

Oktahedral düzlemde etkiyen normal ve kayma gerilmeleri,

$$\sigma_{oct} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_m$$
$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3} J_2} \quad (5.14)$$

şeklinde yazılır [119], [120] [122].

Haigh-Westergaard Gerilme Uzayı: Gerilme tansörü σ_{ij}'nin 6 bağımsız bileşeni olduğundan, bu bileşenleri 6 boyutlu uzayda düşünmek mümkün olsa da, bunun yerine daha kolay ve anlaşılır olması açısından, gerilme durumunu belirleyecek 3 asal gerilmeyi, 3 boyutlu *Haigh-Westergaard Gerilme Uzayı* düşünmek tercih edilir [123]. Herhangi bir noktada $(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3)$ ile verilen gerilme durumu, *Haigh-Westergaard* koordinatları (ξ,ρ,θ) ile ifade edilebilir [118].

Deviyatör gerilmelerin bileşenleri θ cinsinden ifade edilebilir:

$$s_1 = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{J_2}\cos\theta \tag{5.15}$$

$$s_2 = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{J_2}\cos\left(\frac{2\pi}{3}-\theta\right) \tag{5.16}$$

$$s_3 = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{J_2}\cos\left(\frac{2\pi}{3}+\theta\right) \tag{5.17}$$

5.2.1 Rankine Kriteri

Rankine kriterine göre, herhangi bir noktada maksimum normal çekme gerilmesi tek eksenli akma gerilmesi σ_y'ye ulaştığında, malzemede akma oluşacağı varsayılır. Üç boyutlu bir analizde ise akma bu kritere göre, çekmede $\sigma_1 = \sigma_y$ olduğunda, basınçta ise $\sigma_3 = \sigma_y$ olduğunda ortaya çıkacağı varsayılır [102].

Rankine tarafından önerilen, çekme ve küçük basınç gerilmeleri altında betonun gevrek davranışını tanımlayabilen ve maksimum çekme gerilmesi kriteri olarak bilinen bu kriter

$$f(I_1, J_2, \theta) = 2\sqrt{3}\sqrt{J_2}\cos\theta + I_1 - 3f_t' \tag{5.18}$$

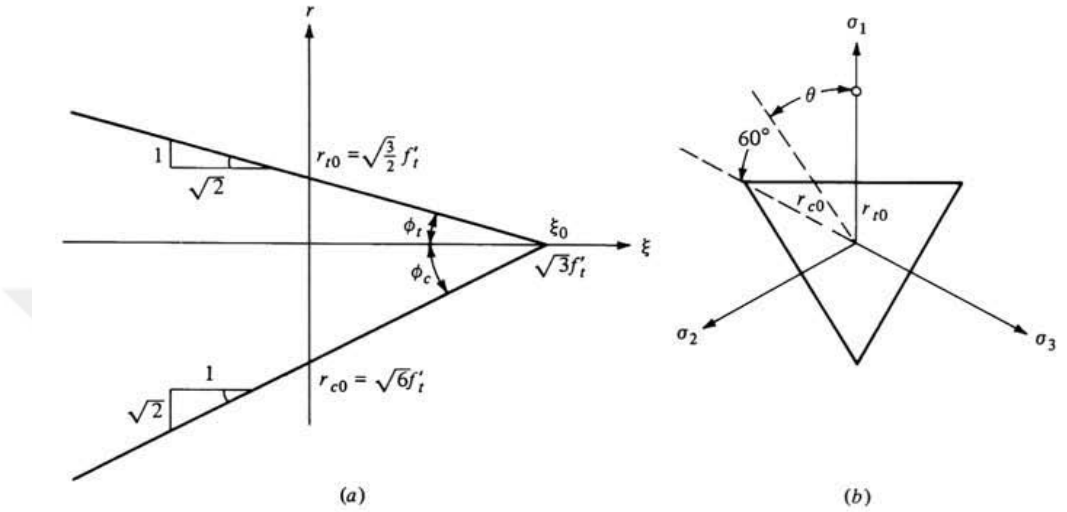
bağıntısıyla ifade edilir [124].

Haigh-Westargaard gerilme uzayı bileşenleri cinsinden;

$$f\left(\mathrm{r},\xi,\theta\right)=\sqrt{2}\mathrm{r}\cos\theta+\xi-\sqrt{3}f_{\mathrm{t}}' \tag{5.19}$$

ifade edilir.

Kırılma yüzeyindeki, π düzlemi $\left(\xi=0\right)$ ve çekme $\left(\theta=0\right)$ ve basınç $\left(\theta=60^{\circ}\right)$ meridyenleri üstündeki enkesit Şekil 5.7'de görülmektedir [118].



Şekil 5. 7 Rankine maksimum asal gerilme kriteri (a) meridyen düzlemde, $\left(\theta=0^{\circ}\right)$; (b) π düzleminde [118]

Rankine kriteri oldukça konservatiftir ve genellikle beton, demir gibi kırılgan malzemeler için uygundur. Ancak sünek malzemelerin plastik akışını büyük ölçüde etkileyen gerilmeleri hesaba katmadığı için sünek malzemeler için uygun bir kriter değildir [102].

5.2.2 Kayma Gerilmesi Kriteri (Tresca ve von Mises)

Yüksek hidrostatik basınç altında betonun sünek bir metal gibi davrandığı bilinmektedir. Sünek bir malzeme üzerindeki basıncın başlıca etkisi malzemenin sünekliğini büyük ölçüde arttırmak ve bu yüzden gevrek kırılma öncesinde çok büyük şekil değiştirmelere izin vermektir. Hacimdeki kalıcı ya da plastik değişim çok küçüktür. Akma değeri üzerindeki hidrostatik basıncın etkisi genel olarak kayda değer değildir. Bu gözlem, betonarmedeki donatı gibi çelik malzemeler için oldukça makuldür. Çünkü bu malzemelerdeki plastik şekil değiştirme, kalıcı kayma gerilmelerinin devamıdır.

Diğer yandan düşük hidrostatik basınçlar altında beton gibi taneli malzemelerde bu doğru değildir. Kalıcı şekil değiştirmeler genellikle büyük bir hacim değişikliği eşlik eder

ve hidrostatik basıncın büyük kesme mukavemeti üzerine etkisi vardır. Yüksek basınç aralığında metal ve beton için, malzemedeki akma değeri üzerindeki hidrostatik basınç etkisi ihmal edilebilir. Bu nedenle kayma gerilmesi, yüksek basınçta metaller ve betondaki akmanın temel nedeni olmalıdır. Problem bundan sonra izotropik akma kriterinin formunu yönlendiren kayma gerilmesinin fonksiyonunu belirlemektir [118].

$$f\left(s_1,s_2,s_3\right)=0 \quad \text{ya da} \quad f\left(J_2,\mathrm{J}_3\right)=0 \tag{5.20}$$

Tresca Akma Kriteri: Tresca kriteri, 1864 yılında Fransız mühendis Henri Tresca tarafından metaller için önerilmiştir [125]. Bu kriter, herhangi bir noktadaki maksimum kayma gerilmesi, malzeme için izin verilen kritik bir değere ulaştığında akma mümkün olacağını öngörür. Bu nedenle tresca kriteri genellikle maksimum kayma gerilmesi kriteri olarak adlandırılır [102], [125], [126], [127], [128]. Tresca akma kriteri, malzemenin tek eksenli gerilme ve basınç dayanımlarının eşit olduğunu varsaymaktadır [120].

Bu kriter asal gerilmeler açısından ifade edilirse, çiftler halinde alınan asal gerilmeler arasındaki farkların mutlak değerinin yarısının maksimumu, akmadaki "k" değerine eşit olmalıdır.

Maksimum kesme gerilmesi kriteri matematiksel olarak yazılırsa:

$$\max\left(\frac{1}{2}\left|\sigma_1-\sigma_2\right|,\frac{1}{2}\left|\sigma_2-\sigma_3\right|,\frac{1}{2}\left|\sigma_3-\sigma_1\right|\right)=k \tag{5.21}$$

"k" basit çekme testinden malzeme akma gerilme parametresidir.

$\sigma_1>\sigma_2>\sigma_3$ olursa, Denklem 5.21 aşağıdaki formda ifade edilebilir [127].

$$\frac{1}{2}\left(\sigma_1-\sigma_3\right)=\frac{1}{\sqrt{3}}\sqrt{J_2}\left[\cos\theta-\cos\left(\theta+\frac{2}{3}\pi\right)\right]=k \qquad \left(0\le\theta\le 60^\circ\right) \tag{5.22}$$

Tresca kriteri gerilme sabitleri cinsinden

$$f\left(J_2,\theta\right)=\sqrt{J_2}\sin\left(\theta+\frac{1}{3}\pi\right)-k=0 \tag{5.23}$$

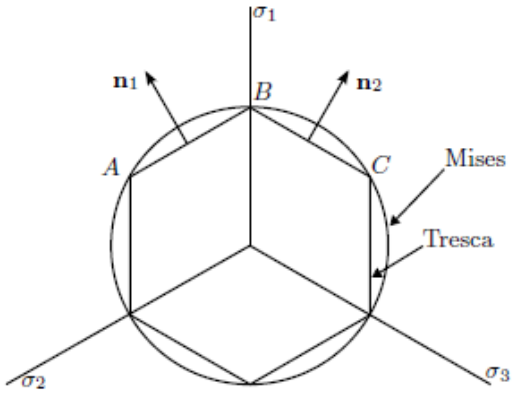
ya da aynı şekilde Haigh-Westargaard gerilme uzayı bileşenleri $\left(\xi,r,\theta\right)$ cinsinden

$$f\left(r,\theta\right)=r\sin\left(\theta+\frac{1}{3}\pi\right)-\sqrt{2}k=0 \tag{5.24}$$

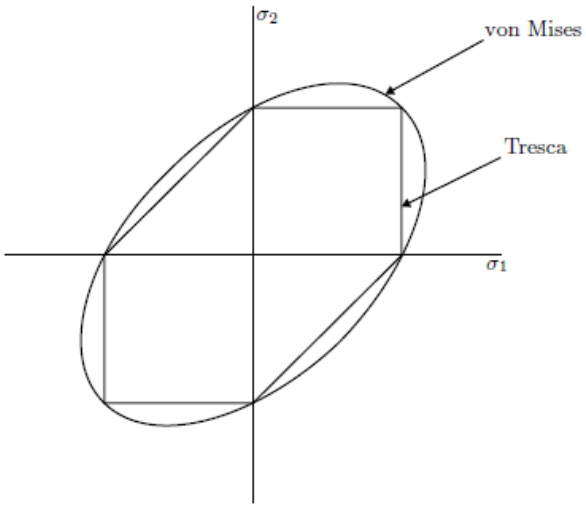
şeklinde yazılabilir.

Akma yüzeyindeki hidrostatik basınç etkisi bu tür malzemelerde göz önüne alınmadığı için Denklem 5.25 ve 5.24'de hidrostatik basınç I_1 ve ξ bağımsız olmalıdır.

Şekil 5.8'de görüldüğü gibi maksimum kayma gerilmesi kriteri üç yönlü koordinat ekseninde enine kesiti altıgen olan ve Şekil 5.9'da görüldüğü gibi $\sigma_3 = 0$ olan koordinat düzlemiyle ara kesiti altıgen olan silindire karşılık gelir [118].



Şekil 5. 8 π düzleminde Tresca akma gerilmesi yüzeyi [116]



Şekil 5. 9 İki eksenli gerilme uzayında Tresca akma gerilmesi yüzeyi [129]

Tresca akma kriteri, sadece ana gerilmeler açısından ifade edildiğinde parçalı doğrusaldır. Yüksek dereceli simetri içeren bazı önemli fiziksel problemlerde, ana gerilmelerin yönleri önceden bilinir.

Bu temel gerilmelerin göreceli değerleri, sıklıkla uygulanan yüklemenin doğasıyla da belirtilmektedir. Bu gibi durumlarda, Tresca kriteri teorik analizde önemli ölçüde basitleştirmeler sağlar [126]. Bu kriterin kullanımı, üç boyutlu problemlerde bazı matematiksel zorluklar yaratır [130].

von Mises Akma Kriteri: Yapılar çoğu zaman çelik gibi, plastik şekil değişimi gösteren ve sonrasında kırılmaya uğrayan malzemelerden yapılır. Emniyetli bir tasarım için yapıları her zaman elastik sınırın içinde veya diğer bir deyişle plastik şekil değişimi olmayacak şekilde tasarlamak gerekir. Deneylerin çoğu basit yükleme koşulları (tek eksenli gerilme gibi) altında yapıldığından bunun gerçekte gözlemlenen genel yükleme koşullarıyla nasıl ilişkili olabileceği konusu sıklıkla bir sorun oluşturur [131].

Maksimum kesme gerilmesi kriteri basit olmasına rağmen, orta asal gerilmenin herhangi bir etkisini yansıtmaz [127]. Diğer taraftan, tresca kriteri tüm plastik durumlarda aynı maksimum kesme gerilmesini öngörmektedir [117]. Eşitsizlikler ile ifade edilen Tresca kriterinin kullanımı, üç boyutlu problemlerde bazı matematiksel zorluklarla ilişkilidir. Bu durum von Mises'e altı yüzlü prizmanın çevreleyen dairesel silindir ile değiştirilmesi fikrini vermiştir [130].

1913 yılında von mises, Tresca'ya göre sayısal çözümler için daha uygun olduğu kanıtlanmış metaller için yeni bir akma kriteri sunmuştur. Bu akma durumu von mises kriteri olarak bilinir [117]. Oktahedral kayma gerilmesi veya distorsiyonun birim şekil değiştirme enerjisi olarak da adlandırılan Von Mises akma kriteri, basınçtan bağımsız malzemelerin akmasına neden olan anahtar değişken olarak maksimum kesme gerilmesine uygun alternatif bir seçimdir. Oktahedral kayma gerilmesinin kritik bir değer "*k*" değerine ulaşmasıyla akma başlar [127]. Oktahedral kayma gerilmesi, ikinci gerilme deviator değişkeni ile ilgili olduğundan, von Mises kriterine J_2 teorisi de denilmektedir [132].

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3} J_2} = \sqrt{\frac{2}{3}} k \tag{5.25}$$

Daha basit formda,

$$f\left(J_2\right) = J_2 - k^2 = 0 \tag{5.26}$$

şeklinde yazılabilir. Ya da asal gerilmeler cinsinden,

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 - (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 6k^2 \tag{5.27}$$

k teorik kesmede akma gerilmesidir. $\sigma_1 = \sigma_y, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ olduğunda tek eksenli bir gerilme testinde akma meydana gelecektir. Bu değerler Denklem 5.27'de yerine koyulursa,

$$k = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \tag{5.28}$$

elde edilir.

Eğer basit çekme akma gerilmesi σ_y her iki kriterde aynı olursa von Mises ve Tresca arasında kesmede akma gerilmesi oranı; k, $2/\sqrt{3} = 1.15$ olur [126], [127]. Grafiksel olarak von Mises dairesi, Şekil 5.9'da görüldüğü gibi Tresca altıgeni çevreler [127].

Bununla birlikte bu iki kriter sadece kayma gerilmesi halinde kullanılırsa (aynı k değeri) daire altıgen içinde kalır [118].

İki eksenli gerilme durumu için von Mises kriteri $\sigma_3 = 0$ koordinat düzlemi ile silindirin kesişimidir.

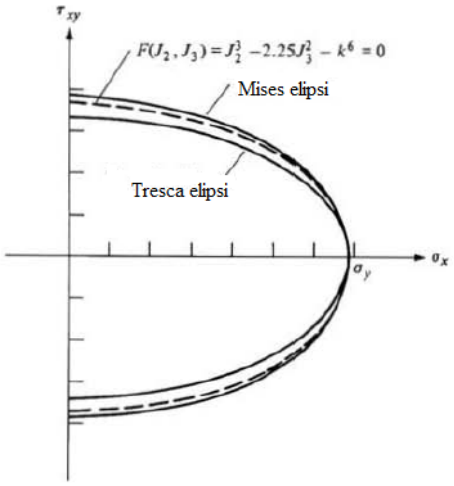
$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2 = \sigma_y^2 \tag{5.29}$$

Genel gerilme halinde von Mises yüzeyi ile $\sigma_x \tau_{xy}$ düzleminin kesişimi de elipstir ve

$$\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2 = \sigma_y^2 \tag{5.30}$$

bağıntısı ile ifade edilir [127] (Şekil 5.10).

von Mises kriteri, orta gerilmenin akma dayanımı üzerindeki etkisini dikkate alırken, Tresca kriteri asal gerilmeyi göz ardı eder ve sadece maksimum kayma gerilmesini dikkate alır. Mises kriteri, pratik kullanım için matematiksel olarak daha elverişlidir Her iki kriter de esas olarak akma dayanımı hidrostatik basınç için yoğun olan metaller için geliştirilmiştir [117].

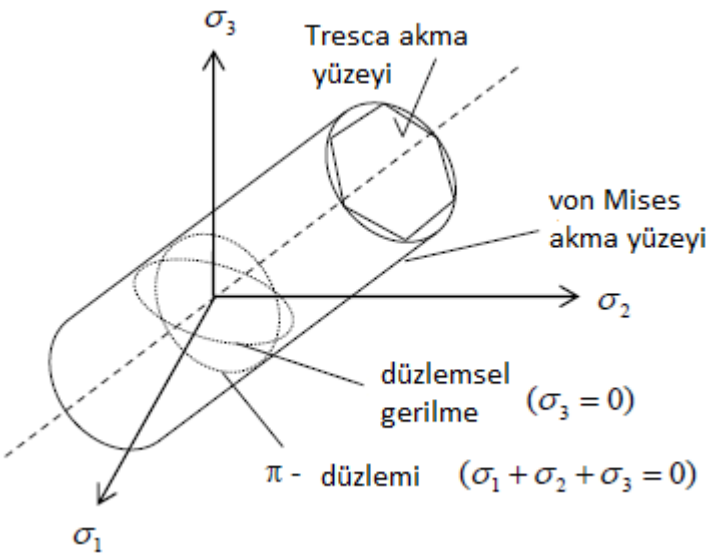


Şekil 5. 10 Akma yüzeyi ile $\sigma_x - \tau_{xy}$ düzleminin kesişimi [118]

Çoğu metal için, von Mises'in akma kriteri, akma sınırını Tresca'dan daha doğru bir şekilde tanımlar [126]. Bu kriter Rankine ve Tresca akma kriterlerinden çok daha az konservatiftir ve bu nedenle sünek malzemeyle kullanıldığında aşırı tasarımın ortadan kaldırılmasına yardımcı olabilir [102]. Şekil 5.11'de üç asal gerilmeye bağlı olarak Tresca ve von Mises akma yüzeylerinin karşılaştırılması gösterilmektedir [133].

Her ne kadar Tresca altıgeni ve von Mises dairesel silindiri arasındaki fark bizim iki kriterden herhangi birini kullanmamızı engelleyecek kadar önemli olmasa da altıgen üzerindeki köşeler matematiksel zorluklara ve olası sayısal karmaşıklığa neden olabilir [118].

Tresca kriteri, akmanın başlayacağı noktayı tahmin etmek için en büyük ve en küçük asal gerilmelerin farkını göz önüne almaktadır. Tresca kriterinden farklı olarak von Mises kriteri kullanıldığında ise, akmanın başlayacağı noktayı bulmak için her üç asal gerilmeyi de göz önüne alınmaktadır. Her iki kriter de, tek yönlü gerilme durumunda (yani eksen çizgileri üzerinde) akma gerilmesinin σ_0 değerini alacağını doğru bir şekilde tahmin etmektedir. İki kriter arasındaki fark, iki eksenli gerilme durumlarında ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5. 11 von Mises ve Tresca akma yüzeyleri [133]

von Mises kriteri, Tresca kriterine kıyasla akmanın başlayacağı gerilmenin mutlak değerini biraz daha yüksek bir değerde tahmin etmektedir. Kolaylığından dolayı Tresca kriteri mühendislik uygulamalarında daha sık tercih edilse de, von Mises kriterinin her üç asal gerilmeyi de göz önüne alması nedeniyle, daha gerçekçi bir tahmin yapabildiği söylenebilir [106].

5.2.3 Mohr-Coulomb Kriteri

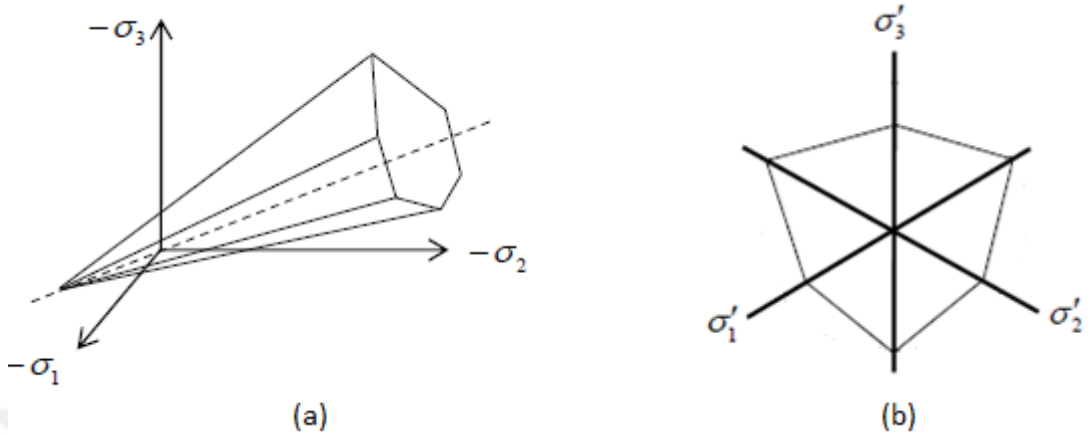
1900 yılında ortaya atılan Mohr-Coulomb kriteri, hidrostatik basınç etkisini dikkate alan ilk kriterdir [117]. Mohr-Coulomb kriteri Tresca kriterinin bir uzantısıdır. Başka bir deyişle, Mohr-Coulomb kriteri, Tresca kriterine ekstra malzeme parametrelerinin eklenmesiyle gerilme ve malzeme sıkıştırmadaki mukavemet farkının etkisini hesaba katabilir. Mohr-Coulomb kriteri, çekme ve basınç mukavemet farkı göz ardı edilemeyecek beton, kaya ve toprak vb. malzemeler için yaygın olarak kullanılmaktadır [120]. Mohr – Coulomb göçme yüzeyi, deviatorik gerilme alanında altıgen kesitli bir konidir. Şekil 5.12 'de kritere ait göçme yüzeyi verilmiştir [122].

Denklem 5.31 ilgili Mohr çemberi için göçme zarfıdır.

$$|\tau| = f(\sigma) \tag{5.31}$$

Zarf $f(\sigma)$ deneysel olarak belirlenmiş bir fonksiyondur.

Mohr kriterine göre malzemenin göçmesi en büyük Mohr dairesinin zarfa tam teğet olduğu tüm gerilme durumları için ortaya çıkacaktır. Bu orta seviyedeki asal gerilmenin göçme üzerinde etkisi olmadığı anlamına gelmektedir [118].



Şekil 5. 12 Mohr-Cloumb kriteri (a) asal gerilme uzayında (b) π düzleminde [133]

Mohr–Coulomb göçme kriterinin beton gibi malzemeler için en genel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$\tau_f = c + \sigma_{nf} tan\phi \tag{5.32}$$

c kohezyon ve ϕ malzemenin sürtünme açısıdır. τ_f ve σ_{nf} ise sırasıyla göçmede kayma dayanımı ve buna karşılık gelen normal gerilmedir [120]. Sürtünmesiz malzemelerin özel durumlarında $\phi = 0$ için Denklem 5.32'de $\tau = c$ olur ve Tresca değeri azalır ve kohezyon c=k'daki akma gerilmesine eşittir. Bu doğrusal zarf ortalama gerilme seviyesinde beton gibi gevrek sünek malzemelerin kırılması için iyi bir yaklaşım sağlamaktadır [118]. Diğer taraftan, eğer $\phi = 90^\circ$ ise Mohr – Coulomb modeli Rankine modeline eşdeğerdir. Mohr Coulomb kriterinin bu formu σ_2 yönüne paralel bir düzlemdeki göçme için uygulanabilen formu;

$$\tau_m = \sigma_m \sin\phi + c\cos\phi \tag{5.33}$$

Üç boyutlu Mohr-Coloumb göçme kriteri aşağıdaki şekilde ifade edilir [122].

$$\pm\frac{\sigma_1-\sigma_2}{2}=\left(\frac{\sigma_1+\sigma_2}{2}\right)\sin(\phi)+c\cos(\phi)$$
$$\pm\frac{\sigma_2-\sigma_3}{2}=\left(\frac{\sigma_2+\sigma_3}{2}\right)\sin(\phi)+c\cos(\phi) \quad (5.34)$$
$$\pm\frac{\sigma_3-\sigma_1}{2}=\left(\frac{\sigma_3+\sigma_1}{2}\right)\sin(\phi)+c\cos(\phi)$$

Gerilme kestirimleri ile Mohr-Coloumb kriterinin dezavantajları,

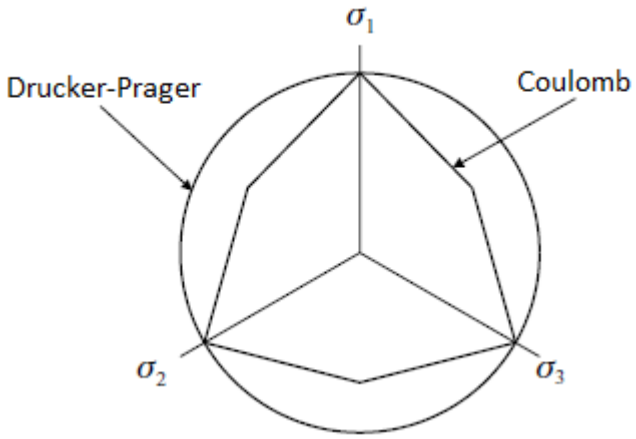
- Ortalama gerilmenin etkisi hesaba katılmaz. Bu betonun maksimum iki eksenli basınç dayanımının tek eksenli basınç dayanımı f_c ile aynı olduğunu ima eder. Bu deney sonuçlarına zıttır. İki eksenli basınç hali için maksimum basınç dayanımının arttığı bilinmektedir.
- Meridyenler düz çizgidir. Hidrostatik basınç arttıkça bu yaklaşım zayıflar.
- Göçme yüzeyi pürüzsüz bir yüzey değildir. Köşelerin sayısal analizde ele alınmasının zor olduğu bilinmektedir.

Gerilme kestirimleri ile Mohr-Coloumb kriterinin avantajları,

- Kriterin deney sonuçlarından sapmaları kriterin basitliği göz önüne alındığında pratik ilgi alanı açısından engelleyici değildir.
- Kriter kesme ve basınç göçme modlarını kısmen açıklamaktadır. Örneğin, basınç yüklemesi için kriter, kesme kaymalarından dolayı göçmeye neden olduğunu belirtir [118].

5.2.4 Drucker-Prager Kriteri

Mohr Coulomb kriterinin değiştirilmiş formu 1952 yılında hem metal hem de toprak plastisitesi alanından önde gelen araştırmacılardan olan D.C. Drucker and W. Prager. tarafından önerilmiştir. π düzleminde Drucker ve Prager akma yüzeyi grafiği, Şekil 5.13'te gösterildiği gibi Coulomb altıgenine değen bir dairedir [125].



Şekil 5. 13 Drucker-Prager ve Mohr Coulomb akma yüzeyi [125]

Drucker-Prager akma kriteri, hacimsel plastik gerilme gösteren malzemelerin sünek davranışlarını tanımlamak için kullanılabilir. Drucker-Prager akma kriteri şu şekilde yazılabilir:

$$F\left(\sigma_{ij}\right)=\alpha I_1+\sqrt{J_2}=k \tag{5.35}$$

Burada, I_1 gerilme tensörünün hidrostatik bileşenidir ve α ve k çeşitli yollarla, Mohr-Coulomb kriterinin sürtünme açısı (φ) ve kohezyon (c) ile ilişkilendirilebilen malzeme sabitleridir [134].

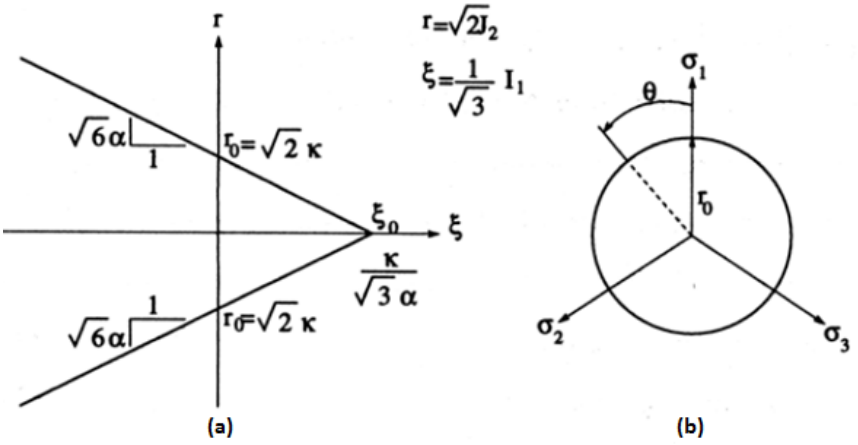
Ya da aynı şekilde $\xi=I_1/\sqrt{3}$ ve $\rho=\sqrt{2J_2}$ alınarak,

$$F\left(\xi,\rho\right)=\sqrt{6}\alpha\xi+\rho-\sqrt{2}k=0 \tag{5.36}$$

şeklinde ifade edilir.

Asal gerilme uzayında açıkça meridyen düzleminde dik dairesel koni olan Denklem 5.36'da verilen göçme yüzeyi ve π düzlemindeki kesiti Şekil 5.14'de verilmiştir.

Drucker-Prager yüzeyi pürüzsüz bir Mohr-Coloumb yüzeyi ya da basınca bağlı malzemeler için toprak ve beton gibi von Mises yüzeyinin bir uzantısı olarak görülebilir. Druker-Prager kriteri Mohr Coulomb kriterine oldukça yakındır [118].



Şekil 5. 14 Druker-Prager kriteri (a) meridyen düzlemi (b) π düzlemi [135]

Drucker-Prager konisinin Mohr-Coulomb altıgen piramidini sınırladığını ve malzeme sabitlerinin "α" ve "k" olarak elde edildiği kabul edilirse anılan sabitler,

$$\alpha=\frac{2\sin\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)} \qquad k=\frac{6c\cos\phi}{\sqrt{3}(3-\sin\phi)} \tag{5.37}$$

şeklinde tanımlanabilir [132].

5.35 bağıntısındaki sabitlerle belirlenen koni, altıgen piramidi içine almakta ve Mohr-Coulomb akma yüzeyinin üzerinde bir dış sınır göstermektedir (Şekil 5.13). Ayrıca iç koni çekme meridyeninden (ρ_t) geçer, burada θ = 0° 'dır ve iç koniyi belirleyecek sabitler,

$$\alpha=\frac{2\sin\phi}{\sqrt{3}(3+\sin\phi)} \qquad k=\frac{6c\cos\phi}{\sqrt{3}(3+\sin\phi)} \tag{5.38}$$

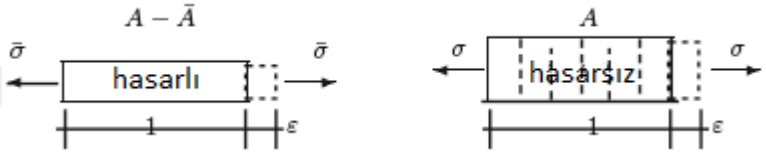
olarak bulunur [118], [123], [136].

5.3 İzotropik Hasar Modeli

Sürekli hasar mekaniği, malzemedeki mikro çatlakların, gözeneklerin yayılması ile malzemenin bütünlüğünü aşamalı olarak kaybetmesini tanımlayan bünyesel bir teoridir. Mikro yapıdaki bu değişiklikler, makro ölçekte gözlenen malzeme rijitliğinin bozulmasına yol açar. Yani, fiziksel olarak, rijitlik kaybı, yayılmış mikro çatlaklar ve mikro gözeneklerin bir sonucu olarak düşünülebilir [137], [138]. İlk hasar modeli, bir sürekli ortam mekaniği modeli ile çatlama olaylarını temsil etmek için 1958'de Khachanov tarafından ortaya atılmıştır [139]. İzotropik hasar modelleri, doğrusal olmayan davranışların tek bir iç

değişkenle tanımlandığı hasar teorisinin en basit halidir [24].Kesitin birim başlangıç alanı başına kuvvet olarak tanımlanan nominal gerilme σ ile birim etkili alan başına kuvvet olarak tanımlanan asal gerilme $\bar{\sigma}$ olarak tanımlanır [137].Tek boyutlu bir gerilme durumu için, iç hasar değişiminin yorumlanması, hasar görmüş kesit alanı (A) ile hasar görmemiş örnek A'nın nominal kesiti arasındaki oran olarak kullanılabilir (Şekil 5.15). Yani, hasarsız malzemede etkili olan gerçek gerilme olarak, etkili gerilme $\bar{\sigma}$ tanımlanabilir:

$$\left.\begin{array}{l} A-\bar{A}=(1-d)A\,;0\le d\le 1 \\ f:=\sigma A=\bar{\sigma}(A-\bar{A}) \end{array}\right\} \Rightarrow \bar{\sigma}=\sigma/(1-d) \tag{5.39}$$



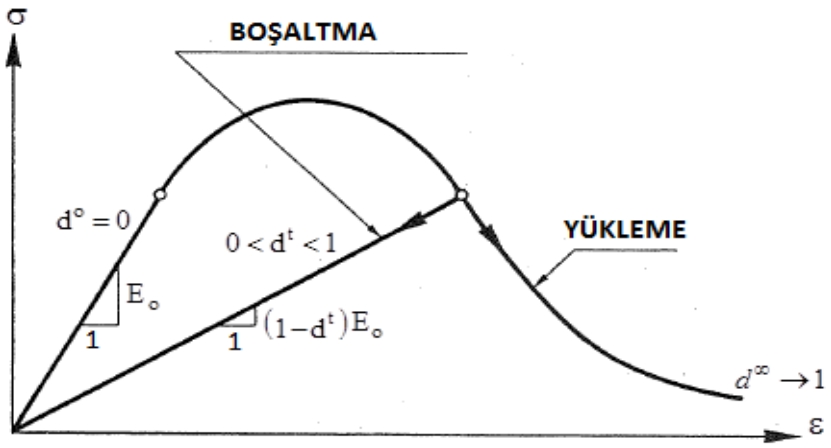
Şekil 5. 15 Tek boyutlu hasar modeli-efektif gerilmenin yorumlanması [139]

Dış yüklere bağlı olarak mikro çatlakların etkisi, hasarsız malzeme için 0'dan tamamen hasar görmüş malzeme için 1'e kadar değişen hasar değişkeni (d) ile tanımlanabilir [31], [140], [141]. Mikro-kusurların yayılmasından ve bunların birleşiminden ötürü, hasar değişkeni büyür ve bozunma işleminin geç safhalarında asimetrik olarak sınır değeri *d* = 1'e yaklaşır, bu da sıfır alana indirgenmiş etkin alana sahip tam bir hasarlı malzemeye karşılık gelir [142]. Nominal gerilme σ, asal gerilme $\bar{\sigma}$ ile yer değiştirdiğinde eş değer şekil değiştirme hipotezine göre hasar görmüş malzemenin birim şekil değiştirme tepkisi hasar görmemiş malzemeninkine eşit olarak kabul edilebilir. Bu durum şu şekilde formüle edilebilir [139].

$$\varepsilon:=\frac{\bar{\sigma}}{E}=\frac{\sigma}{(1-d)E}\Rightarrow\sigma=(1-d)E\varepsilon \tag{5.40}$$

İzotropik hasar modeli betonun çekme altında bozulma, basınç, çekme ve basınç gerilme durumları gibi mekanik özelliklerini esas alan basit ve verimli bir model olabilir. Modelde malzeme rijitliği sadece skaler faktörden etkilendiği için izotropi korunur [31].

Şekil 5.16'da hasar modeli için tek eksenli gerilme birim şekil değiştirme eğrisi görülmektedir.



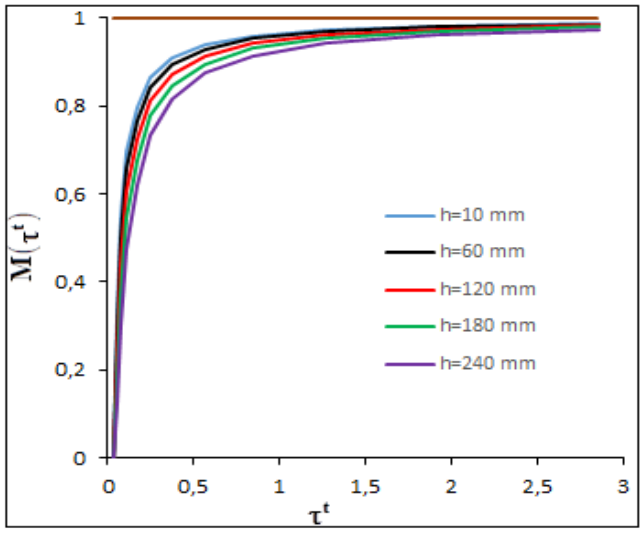
Şekil 5. 16 Hasar modeli için tek eksenli gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi [31]

Hasar değerinin gelişimini tanımlayan skaler fonksiyonun $M(.)$ monotonik ve 0 ila 1 arasında olması gerekir [31]. Bazı çalışmalardan sonra hasar fonksiyonu için

$$M\left(\tau^t\right)=1-\frac{\tau^*}{\tau^t}\exp\left\{A\left(1-\frac{\tau^*}{\tau^t}\right)\right\} \qquad 0<\tau^*\le\tau^t \tag{5.41}$$

önerilmiştir.

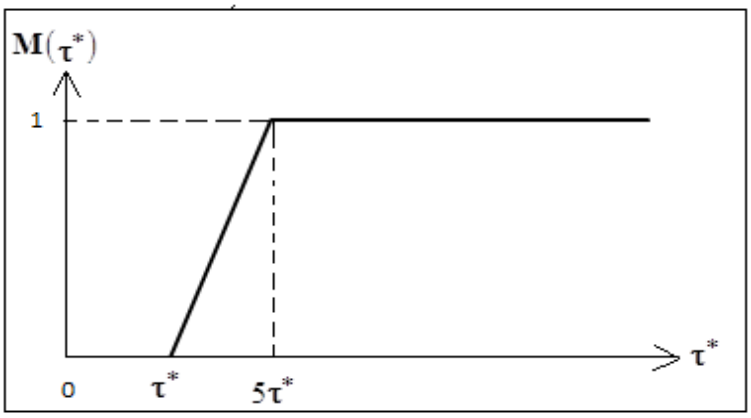
5.41 'de verilen eşitlikte *A* parametresi Köksal vd. [143] tarafından önerilen h/310 eşitliği ile bulunmuştur. Farklı karakteristik uzunluklar (h) için bulunan M değerleri Şekil 5.17'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 17 Önerilen hasar fonksiyonu için hesaplanan eğriler $\left(f_t=0,495\ \mathrm{MPa}\right)$

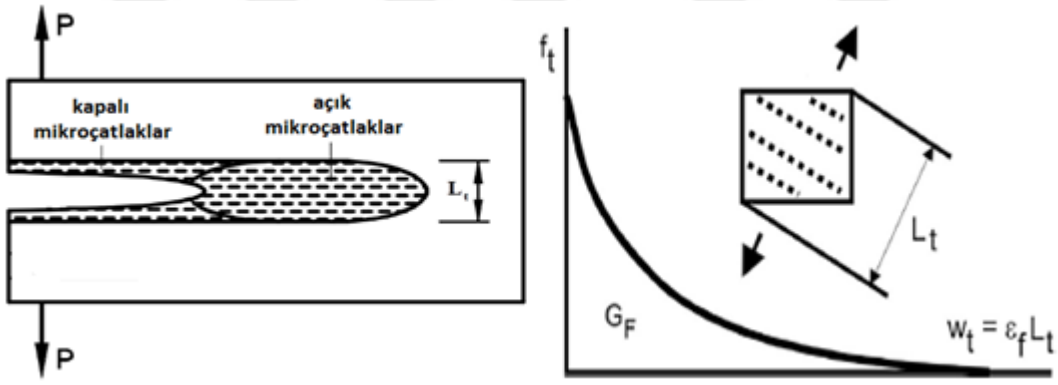
Bu fonksiyon için hesaplanan eğriler Şekil 5.18'de görüldüğü gibi doğrusal bir eğri olarak basitleştirilmiştir [24]. Bu durumda önerilen hasar fonksiyonu,

$$M(\tau^t)=\frac{1}{4}\left(\frac{\tau^*}{\tau^t}-1\right) \qquad \tau^* \le \tau^t \le 5\tau^* \quad \text{ise}$$
$$M(\tau^t)=1 \qquad 5\tau^* < \tau^t \quad \text{ise} \tag{5.42}$$



Şekil 5. 18 Hasar seviyesinin belirlenmesi için önerilen hasar fonksiyonu (*M*)

Bu tek eğriden yola çıkılarak Bazant ve Oh [144] tarafından önerilen optimum bir boyut kullanılması durumunda çatlak önü bölgesi genişliği içinde tek bir değer kullanılması mantıklı olacaktır. Şekil 5.19'da çatlak önü bölgesi genişliği görülmektedir.



Şekil 5. 19 Çatlak önü bölgesi genişliği [145], [146]

Červenka vd. [146] çalışmalarında çatlak önü bölgesi genişliğini 10-50 mm aralığında olduğunu belirtmişlerdir.

Bu çalışmada da deneysel sonuçlarla uyumlu olacak şekilde bu değer için 10 mm lik bir uzunluk kullanılmıştır. Bazı çalışmalarda her ne kadar bu bölge agrega çapının bir fonksiyonu olarak ifade edilmekle beraber kırılma moduna göre de büyük değişiklikler göstermektedir. En büyük değerine çekme kırılmasında ulaşırken, kesme kırılmasında bu değer çekme kırılmasındaki değerin % 20'lerine kadar düşmektedir. Bu nedenle kirişlerin

sonlu eleman analizlerinde bu da dikkate alındığında Oliver vd. [31] izotropik hasar modeli kullanıldığında 10 mm lik değerin deneysel sonuçları en iyi tahmin ettiği görülmüştür.

Bu çalışmada kullanılan LUSAS [147] sonlu eleman yazılımında elastisite modülü matrisindeki azalma işleminde hasar değişkeni kullanılır. Böylece hasarın etkisi izotropik veya doğrusal olmayan olarak göz önüne alınmıştır. Bahsedilen yazılımda yer alan Simo ve Oliver hasar modelleri ile yapılan hasar analizlerinde, elastik malzeme modelleri von-Mises, Hill ve Hoffman doğrusal olmayan modelleri ile birlikte uygulanabilmektedir. Yazılımda yer alan Simo hasar modeli hasarın çekme ve basınçta eşit olarak oluşmasına izin verirken; Oliver hasar modelinde çekme ve basınç altında hasar dayanımlarındaki farklılık hesaba katılabilmektedir.

5.4 Önerilen Sanal Malzeme Modeli

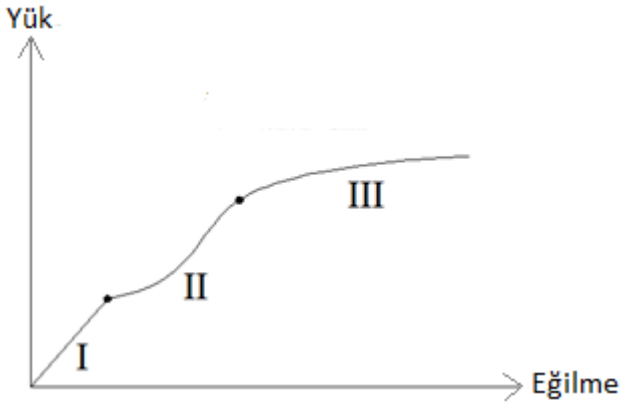
Beton homojen olmayan kompozit bir malzemedir. Bu malzemenin içindeki en büyük boyuta iri agregalar sahiptir. İri agregaların bir ölçüsü olarak betonun bünyesel modellemesinde en büyük agrega çapı $d_{\max}$ kullanılagelmektedir. Literatürdeki çalışmalar beton için geliştirilen bünyesel modellerin uygulanabilirlik sınırının eleman boyutunun en büyük agrega çapının 3-5 katı olduğunu göstermektedir. Analizlerde sınırlı eleman boyutu bir sınır değer üzerinde seçildiğinde betonun bünyesel modellerinin oldukça hassas bir şekilde uygulamasında bir sınır bulunmamaktadır. Ancak verilen sınır değerden küçük boyutlarda betonun tek bir malzeme olarak bütünlüğünü koruyamadığı anlaşılmaktadır. Bu boyutların altında kullanılacak herhangi bir elemanda da beton için önceden önerilmiş bağıntıların geçerliliğini yitireceği bilinen bir gerçektir. Bu nedenle boyut bağımlılığı denilen kırılma mekaniği tabanlı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu bağıntılarda temel parametre betonun tek eksenli çekme altındaki çatlak oluşumunu ifade eden G_f kırılma enerjisidir. Ancak sadece çekme değil kesme altındaki çatlak oluşumlarından kaynaklanan enerji değerleri de sonucu değiştirebilmektedir. Bu çalışmada çekme donatısı altında kalan net beton örtüsü olarak nitelendirilen kısım 20 mm kalınlığındadır ve bu değer bünyesel bağıntıların uygulanabildiği sınırın altında kalmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada kırılma mekaniği yaklaşımlarına alternatif olarak

bir sanal malzeme modeli kullanılması tercih edilmiştir. Doğal olarak bu malzemenin dayanım ve elastisite modülü değerleri donatı üstünde kalan betondan daha düşük olacaktır. Değerlerin belirlenmesi için parametrik çalımalar yapılmış ve deney kirişleri ve literatürdeki bazı kirişler başarıyla modellenmiştir.

5.5 Elasto-plastik Hasar Yaklaşımı

Bu tez kapsamında betonarme kiriş için, hasar mekaniği yaklaşımı ile betonarmenin gerilme birim şekil değiştirme davranışının ifade edilmesini sağlayan plastisite yaklaşımlarının birleşiminden oluşan elasto-plastik hasar (EPD) mekaniğinden türetilen malzeme modeli önerilmiştir. Ayrıca bu malzeme modeli için çoğu deneysel olarak belirlenen gerekli malzeme parametreleri kullanılmıştır.

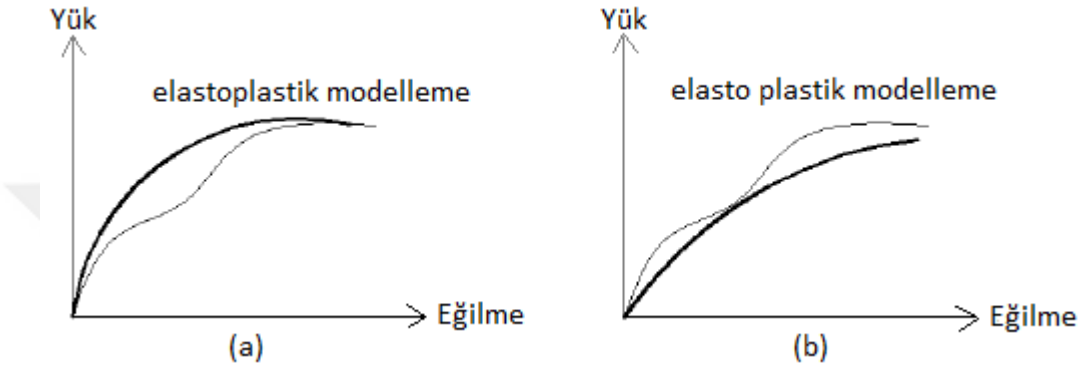
En genel haliyle betonarme bir kirişin yük-yer değiştirme eğrisi Şekil 5.20'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, yük elastik sınırı geçtiği zaman, doğrusal elastik davranış betondaki çekme çatlaklarının başlamasıyla kaybolmaktadır. Yük-yer değiştirme eğrisinin ikinci kısmındaki rijitlik kaybı, kirişin açıklık bölgesinde oluşan çekme çatlakları ile meydana gelmektedir. Eğrinin üçüncü kısmında ise, betonun basınç altında ezilmesi ve donatının akması görülmektedir.



Şekil 5. 20 Betonarme bir kirişin eğilme altında tipik yük-yer değiştirme davranışı [30]

Elastik davranış elastik hasar bağıntılarıyla açıklanırken, elastik bölgenin ötesindeki davranış plastisite yaklaşımı ile ifade edilmiştir. Toplam birim şekil değiştirme elastik şekil değiştirme ve plastik şekil değiştirmenin toplamından oluşmaktadır. Elastoplastik modeller, çekme çeliğinin ve basınç altındaki betonun davranışını açıklayabilir. Çekme çatlakları nedeniyle kiriş rijitliğindeki azalmayı tahmin etme yeteneğinin olmaması

elastoplastik modellerin eksikliğidir. Bu nedenle, yük yer değiştirme grafikleri için elasto-plastik tahminleri Şekil 5.21a'da gösterildiği gibi gerçek olandan çok daha rijit bir davranış göstermektedir. Malzeme parametrelerinde kalibrasyon yapılarak, Şekil 5.21b'de görülen kiriş için azaltılmış bir başlangıç rijitliği ile oldukça zayıf bir kiriş davranışını tarif eden bu problemin üstesinden gelinebilir. Çekme çatlakları, betonarme kirişler için kolonlara göre daha çok vurgulandığı için, elasto-plastik modelleme özellikle yarı gevrek malzemeler ve basınç altındaki elemanlar için uygundur [30].



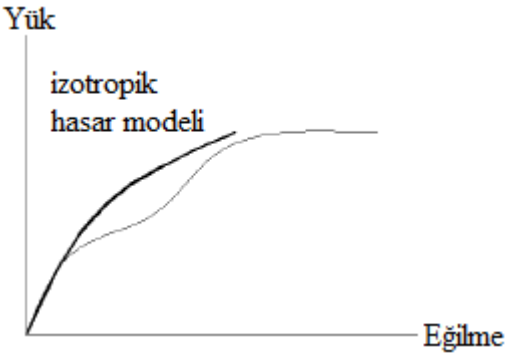
Şekil 5. 21 (a) Betonarme kiriş için elastoplastik model tahmini (b) rijitliği azaltılmış zayıf kiriş için elastoplastik model tahmini [30]

Hasar mekanizmasını temel alan modellerde, betonun, yük etkisinde çekme çatlaklarının artması betonun doğrusal olmayan davranışını ifade eder. İzotropik hasar modelleri, elastik olmayan birim şekil değiştirmelerin tek bir iç değişken (*d*) kullanılarak belirlendiği hasar teorisinin en basit halidir. Çekme çatlağının büyümesi, malzemenin dayanımında ve rijitliğinde azalmaya neden olur. İzotropik hasar teorisinin temel yapısal ilişkisi homojen bir malzeme için şu şekilde verilebilir:

$$\sigma = E(1-d)\varepsilon \tag{5.43}$$

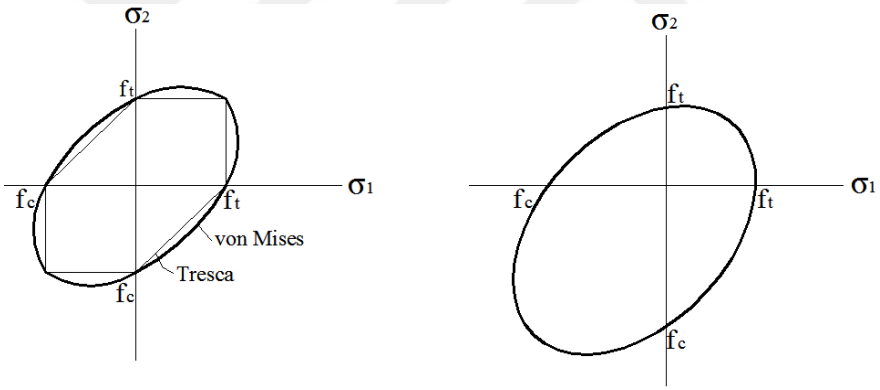
burada, şekil değiştirmelerin büyümesine bağlı olan "*d*" hasar değişkenidir ve malzemenin 0 ila 1 arasında değişen (0 <d <1) sekant rijitlik kaybının bir ölçüsüdür [24], [31].

Şekil 5.22'de gösterildiği gibi, bir izotropik hasar modeli yaklaşımları, çatlak büyümesinden dolayı rijitlik kaybını tahmin edebilse de, yük altında oluşan plastik gerilmeler nedeniyle gerçek bir kirişin şekil değiştirme kapasitesi tahmin edilenlerden daha fazladır.



Şekil 5. 22 Bir betonarme kirişin eğilme davranışı için izotropik hasar modellerinin tahmini [30]

LUSAS gibi yazılımlarda, eşit çekme ve basınç mukavemeti değerlerini kullanan klasik von Mises kriterlerinden farklı olarak, betonun çekme ve basınç dayanımına ihtiyaç duyan değiştirilmiş bir von Mises modeli tanımlanmaktadır. Şekil 5.23, iki kriter arasındaki farkı göstermektedir. Birincisi, beton benzeri malzemeler için modifiye edilebilen sünek metaller için popüler bir modeldir.



Şekil 5. 23 a) von Mises, b) geliştirilmiş von Mises akma kriteri [30]

Bir çekme deney numunesindeki akma gerilmesinin akma sınırındaki asal gerilmelere $\left(S_1:\sigma_1, S_2:\sigma_2, S_3:\sigma_3\right)$ bağlı olarak,

$$2f_t^2=\left(S_1-S_2\right)^2+\left(S_2-S_3\right)^2+\left(S_3-S_1\right)^2 \tag{5.44}$$

şeklinde verilmiştir.

von-Mises malzemesindeki akma sınırını göz önüne alan bu eşitlik tek eksenli basınç ve çekmede aynı gerilme değerlerinde meydana gelir. Geliştirilmiş von-Mises akma kriterindeki tek eksenli basınç ve çekmedeki akma gerilmeleri,

$$2 f_c f_t = (S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2 + 2(f_c - f_t)(S_1 + S_2 + S_3) \quad (5.45)$$

şeklinde yazılır [108].

Bu tez çalışmasında, Oliver ve diğ. [31] çalışmasındaki izotropik hasar modeli parametreleri kullanılmış ve plastik şekil değiştirme davranışı geliştirilmiş von-Mises akma kriteri modeliyle ifade edilmiştir.

Oliver hasar modeli öncelikle beton elemanlar için geliştirilmiştir. LUSAS [147] yazılım paketinde kullanılan Oliver hasar modelinde çok eksenli basınç altındaki izotropik homojen bir malzemenin davranışını ifade etmek için kullanılan 3 tane malzeme parametresi bulunmaktadır.

Bu parametrelerden birincisi, elastik olmayan davranışın başlangıcını, diğer bir ifadeyle çekme çatlaklarının başlangıcını ifade eden başlangıç hasar eşiğidir. Eğer doğrusal olmayan hasar modeli kullanılıyorsa, bu hasar eşiği değerinin altında malzemede hasar oluşmadığı kabul edilir.

$$\tau^* = \frac{f_t}{\sqrt{E_0}} \quad (5.46)$$

Başlangıç hasar eşiği, betonda hasarın başladığı çekme dayanımına (f_t) ve elastisite modülüne (E_0) bağlıdır.

Betonun elastisite modülü yaklaşık olarak

$$E_0 = \frac{2 f_c}{\varepsilon_0} \approx 1000 f_c \quad (5.47)$$

Burada ε_0, $\sigma = f_c$ olduğundaki birim şekil değiştirmedir ve 0,002 olarak kabul edilmiştir [24].

Hasar modelinde bulunan diğer parametre *"A"* değeri, doğrusal olmayan sonlu eleman analizinde ağ boyutuna bağlı olmayı ortadan kaldıran bir malzeme parametresidir ve çekme yüklemesi altındaki *"*G_f*"* kırılma enerjisine bağlıdır.

$$A = \left(\frac{G_f . E_0}{h . f_t^2} - \frac{1}{2} \right) \geq 0 \quad (5.48)$$

Buradaki *h* değeri, üç boyutlu sonlu eleman analizinde seçilen ağ boyutuna bağlıdır ve

$$h = \sqrt[3]{h_x h_y h_z} \tag{5.49}$$

olarak tanımlanır [108].

Köksal vd. [148], [149] çalışmalarında denklem 5.48, beton elemanlar için gerçekten işe yaramayabilir ve ağın optimum bir boyuttan daha küçük kullanıldığı durumlarda ağ boyutundan bağımsız olarak nesnel sonuçlar sağlamamaktadır.

Bu tez çalışmasında, Denklem 5.48'deki "*A*" formülü yerine, ağ boyutları beton karışımındaki en büyük agrega boyutunun yaklaşık üç katına eşit olduğu durum için Köksal vd. [143] tarafından önerilen

$$A = \frac{h}{310} \tag{5.50}$$

eşitliği kullanılmıştır.

Hasar modeli için tanımlanan üçüncü malzeme parametresi, malzemenin basınç dayanımı ile çekme dayanımı arasındaki oranı ile ifade eden η değeridir [31].

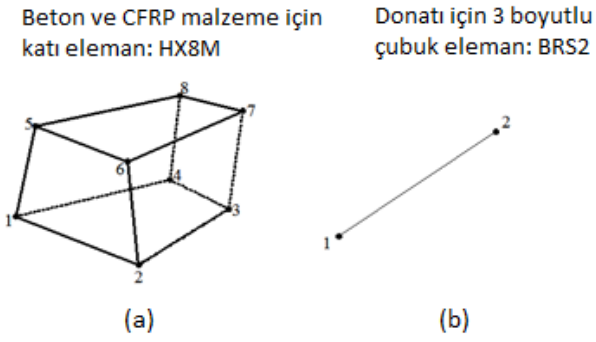
$$\eta = \frac{f_c}{f_t} \tag{5.51}$$

Ayrıca denklem 5.48'deki betondaki kırılma enerjisinin tahmini zordur. Köksal ve Karakoç [24] tarafından betonun kayma enerjisini tahmin etmek için Denklem 5.52 önerilmiştir.

$$G_f = 15,48 d_{\max} \frac{f_t^{\,2}}{E_0} \tag{5.52}$$

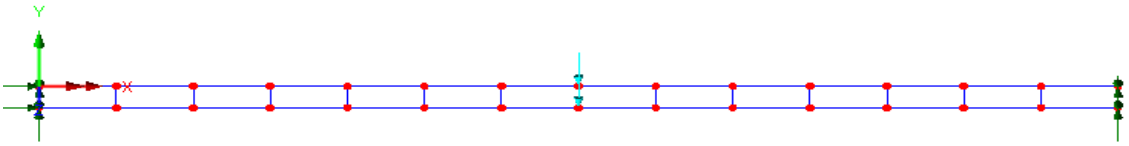
Burada "d_{max}" maksimum agrega boyutudur.

Bu tez kapsamında, CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin LUSAS yazılımı kullanılarak doğrusal olmayan sonlu eleman analizinde beton ve CFRP malzeme için sekiz düğüm noktalı altı yüzlü eleman (HX8M); donatı çeliği için iki düğüm noktalı izoparametrik çubuk eleman (BRS2) kullanılmıştır (Şekil 5.24).

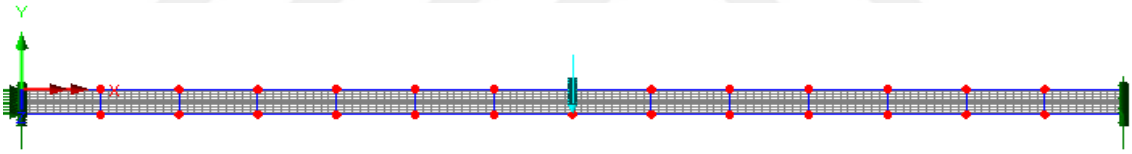


Şekil 5. 24 a) Beton ve CFRP için HX8M katı eleman b) çelik donatı için BRS2 çubuk eleman

CFRP ile güçlendirilmiş deney kirişlerinde kullanılan CFRP kumaş, kiriş ortasından uygulanan yük altında farklı boyutlarda sonlu elemana ayrılarak modellenmiştir (Şekil 5.25-5.26).

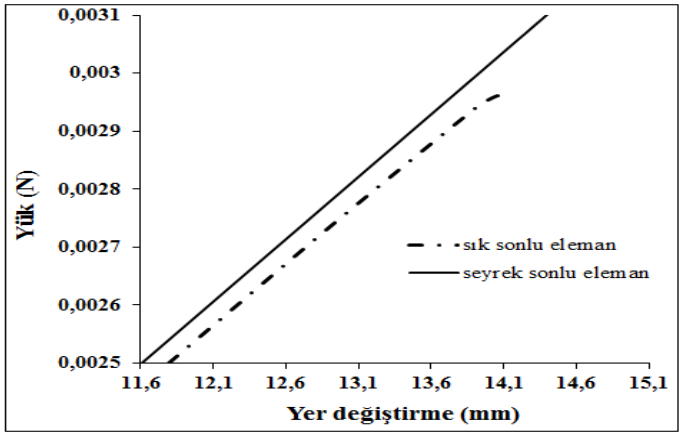


Şekil 5. 25 CFRP kumaşın seyrek sonlu elemanlı modeli



Şekil 5. 26 CFRP kumaşın sık sonlu elemanlı modeli

Bu modellerden elde edilen yük-yer değiştirme grafiği incelendiğinde iki modelleme arasında ihmal edilebilir bir fark olduğu görülmüştür (Şekil 5.27).



Şekil 5. 27 CFRP kumaşın sonlu eleman analizlerinden elde edilen yük-yer değiştirme eğrisi

BÖLÜM 6

SAYISAL MODEL SONUÇLARI VE İRDELEMELER

6.1 Literatürden Seçilen Kiriş Örnekleri için Sayısal İrdelemeler

Bu tez kapsamında literatürdeki 4 ayrı çalışmadan alınan toplam 4 adet güçlendirilmiş kirişin önerilen izotropik hasar modeli kullanılarak sonlu eleman analizi yapılmıştır. Sayısal analizden elde edilen sonuçlar ile literatürde verilen yük yer değiştirme eğrileri sunulmuştur (Şekil 6.4, 6.7, 6.10, 6.14). Bahsedilen çalışmalarda kullanılan beton, donatı ve FRP malzemeleri için malzeme özellikleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6. 1 Kirişlerde kullanılan malzemelerin özellikleri

		Beton	**Donatı**		**FRP**	
		f_c **(MPa)**	f_y **(MPa)**	**E (MPa)**	**E (MPa)**	t_f **(mm)**
SIDDIQUI	BFS-1	35	420	200000	77280	1
ESFAHANI vd.	B6-16D-1L10	23,8	350/365/406	200000	240000	0,167
SAKR	E3	40,6	520	201000	150000	1,2
WANG vd.	Y.044	64	500	200000	225000	0,111

Elasto-plastik hasar çözümü için kullanılan malzeme parametreleri ise Çizelge 6.2 ve 6.3' de görülmektedir.

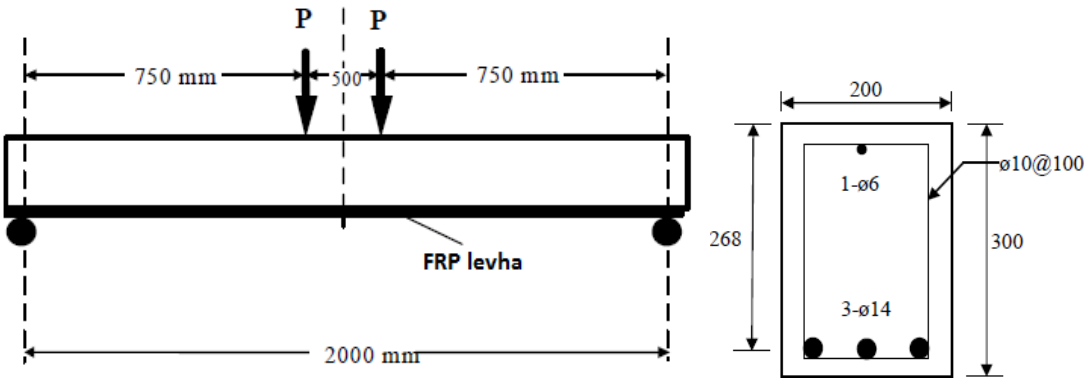
Çizelge 6. 2 Sonlu elaman analizinde kullanılan betonun (çekirdek beton) mekanik özellikleri

	Açıklama	Malzeme	Elastik	Plastik		Hasar		
			E_c (MPa)	f_{ck} (MPa)	f_t (MPa)	τ	A	η
SIDDIQUI	BFS-1	Beton	35000	35	3,5	0,0187	0,42	10
ESFAHANI vd.	B6-16D-1L10	Beton	23800	23,8	2,4	0,0156	0,35	10
WANG vd.	Y.044	Beton	23000	54	5,4	0,0356	0,63	10
SAKR	E3	Beton	40600	40,6	4	0,015	0,41	10

Çizelge 6. 3 Sonlu elaman analizinde kullanılan sanal malzemenin mekanik özellikleri

	Açıklama	Elastik	Plastik		Hasar		
		E_c (MPa)	f_{ck} (MPa)	f_t (MPa)	τ	A	η
SIDDIQUI	BFS-1	2500	7	0,7	0,014	0,173	10
ESFAHANI vd.	B6-16D-1L10	2300	7,5	0,75	0,016	0,175	10
WANG vd.	Y.044	3700	30	3	0,049	0,253	10
SAKR	E3	4060	10	1	0,016	0,203	10

Siddiqui [4] çalışmasında, eğilme ve kesme güçlendirmesi yapılan kirişlerde farklı FRP yerleşiminin yeterlilik ve etkinliğini araştırmak için iki gruba ayırdığı 6 adet betonarme kiriş üzerinde deney yapmıştır. Deney kirişleri 200x300 mm boyutlarında ve mesnetler arası mesafe 2000 mm'dir (Şekil 6.1). İlk gruptaki kirişler kesmede güçlü, eğilmede zayıf olarak; ikinci gruptaki kirişler ise kesmede zayıf, eğilmede güçlü olarak tasarlanmıştır. İki gruptan da birer tanesi kontrol numunesi diğer iki kirişte CFRP'nin farklı şekilde kullanılmasıyla güçlendirilmiştir. BFS-1 olarak isimlendirilen deney kirişi çekme yüzeyine tek kat CFRP levha yapıştırılmasıyla güçlendirilmiştir. Bu kirişin deney sırasında levhanın ayrılmasıyla göçtüğü belirtilmiştir (Şekil 6.2).

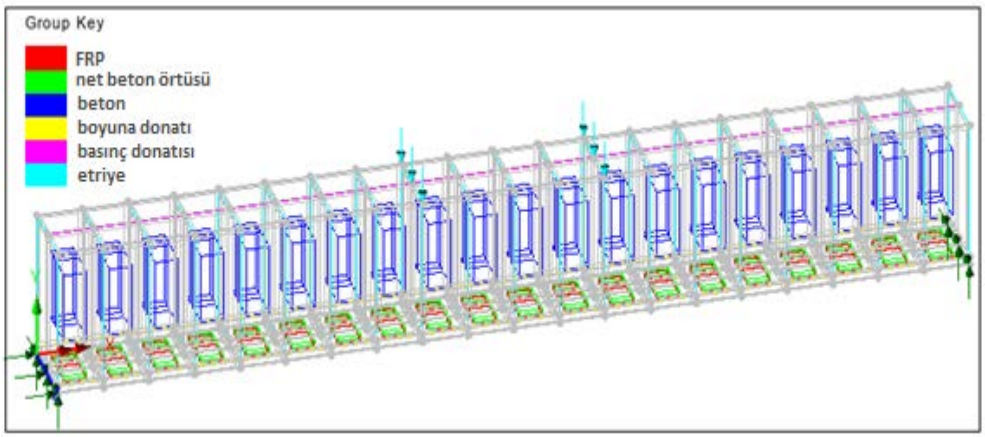


Şekil 6. 1 BFS-1 kirişi güçlendirme biçimi ve kesiti [4]

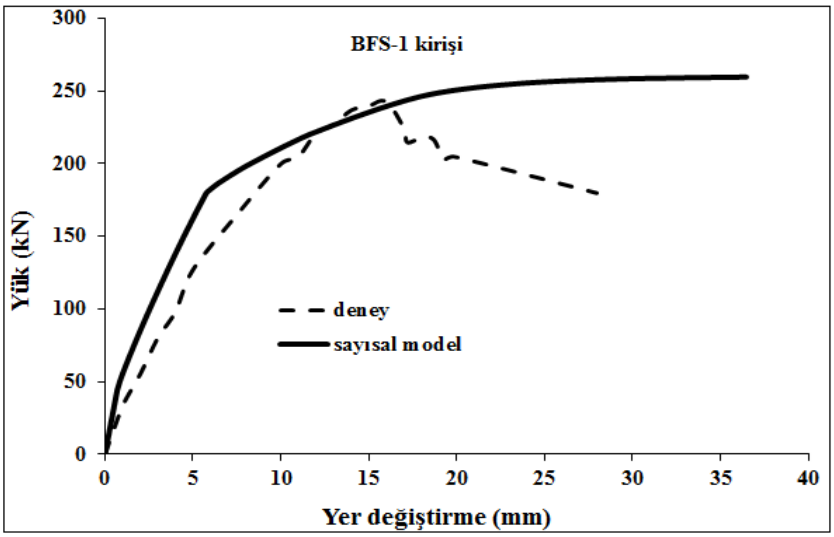


Şekil 6. 2 BFS-1 kirişinin göçme mekanizması [4]

Bu tez kapsamında BFS-1 diye adlandırılan çekme yüzeyi CFRP ile güçlendirilmiş kirişin sonlu elaman analizi yapılmıştır (Şekil 6.3). BFS-1 kirişinin deneysel ve sayısal modeline ait yük-yer değiştirme grafiği karşılaştırmalı olarak Şekil 6.4'de verilmiştir.

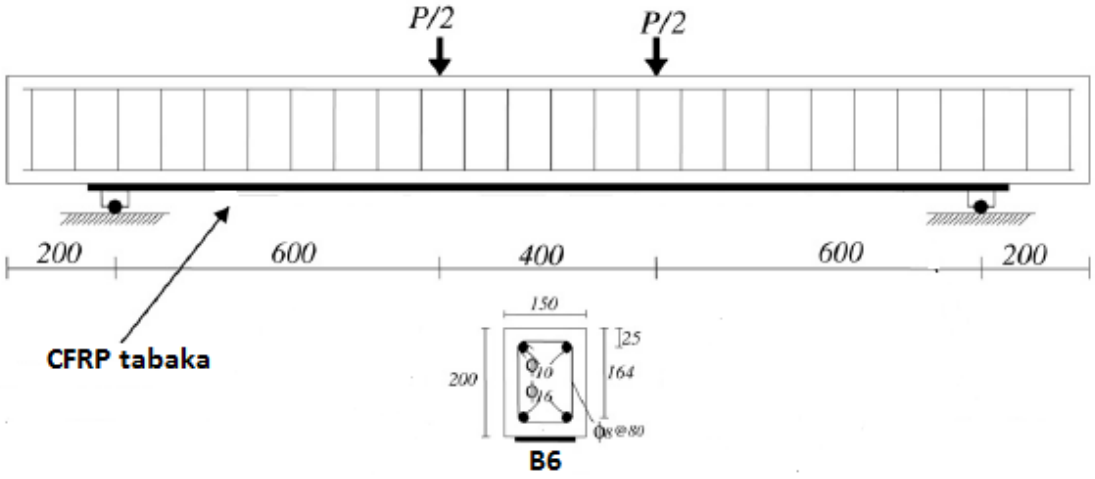


Şekil 6. 3 BFS-1 kirişinin sonlu eleman modeli



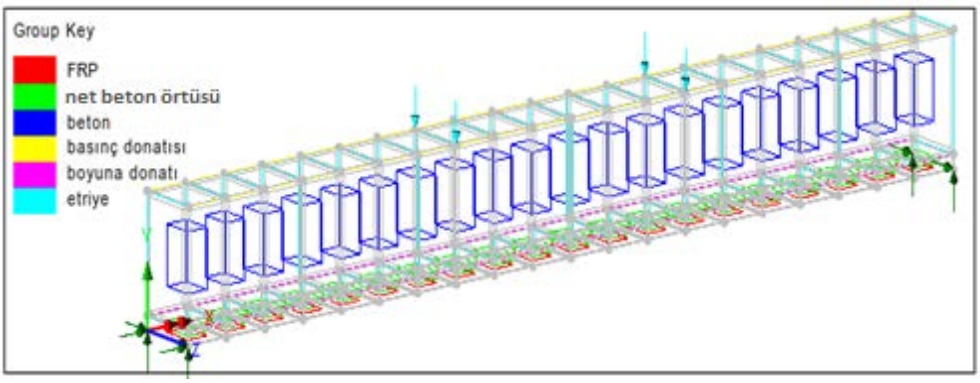
Şekil 6. 4 BFS-1 kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme ilişkileri

Esfahani vd.[3] çalışmalarında 3 adedi kontrol kirişi, farklı uzunlukta, sayıda ve genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş 150x200x2000 mm boyutlarında toplam 12 adet betonarme kiriş üretmişler ve bu kirişlerin eğilme davranışını incelemişlerdir. Kirişlerde farklı akma gerilmesine sahip 8, 10, 12, 16 ve 20 mm çapında donatı kullanılmıştır. B6-16D-1L10 olarak isimlendirilen deney kirişi çekme yüzeyine tek kat CFRP levha yapıştırılmasıyla güçlendirilmiştir (Şekil 6.5). Bu kirişin donatı aktıktan sonra CFRP tabakasının kopmasından dolayı göçtüğü belirtilmiştir.



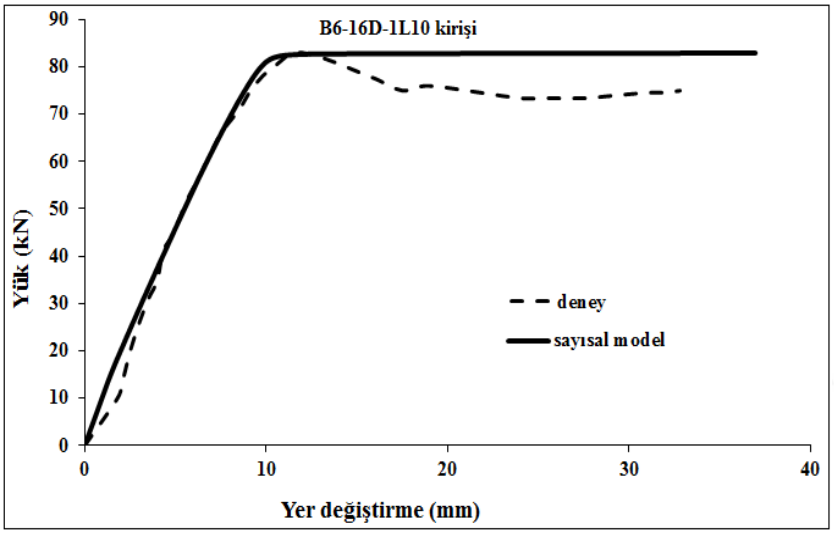
Şekil 6. 5 B6-16D-1L10 kiriş detayları [3]

Bu tez kapsamında B6-16D-1L10 diye adlandırılan çekme yüzeyi CFRP ile güçlendirilmiş kirişin sonlu elaman analizi yapılmıştır (Şekil 6.6).



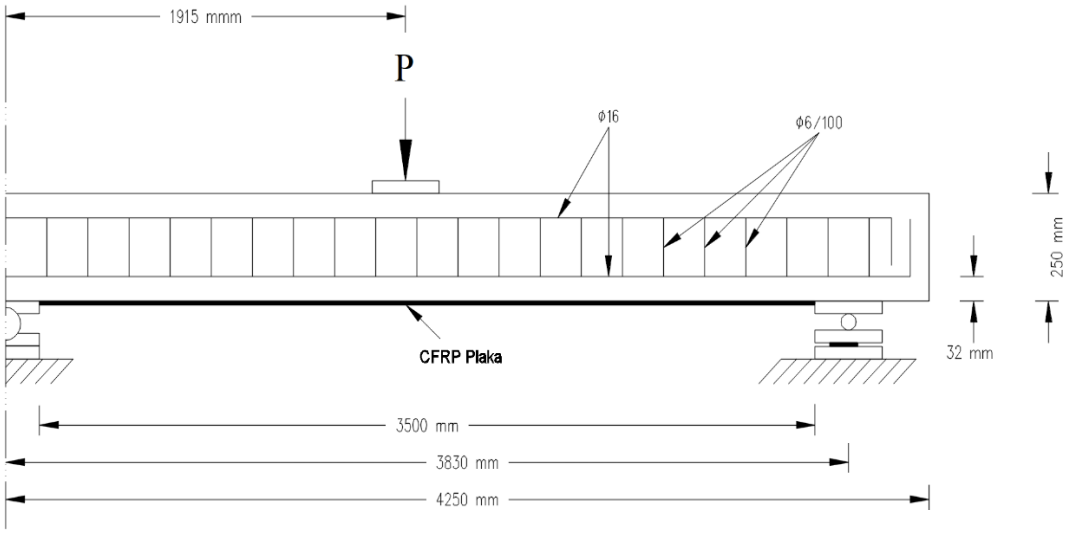
Şekil 6. 6 B6-16D-1L10 kirişinin sonlu eleman modeli

B6-16D-1L10 kirişinin deneysel ve sayısal modeline ait yük-yer değiştirme grafiği karşılaştırmalı olarak Şekil 6.7'de verilmiştir.

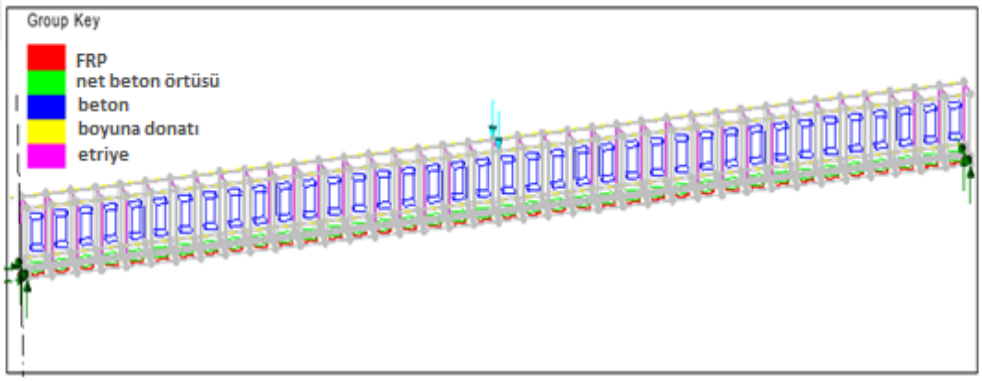


Şekil 6. 7 B6-16D-1L10 kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme ilişkileri

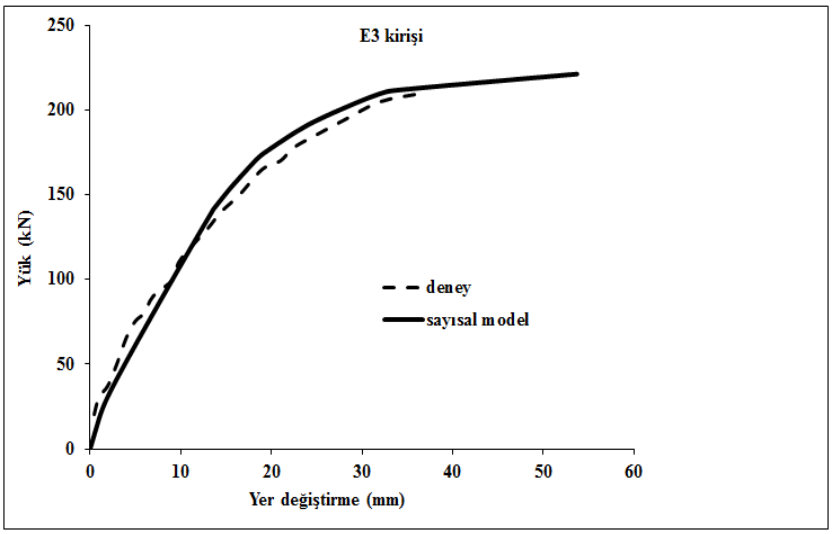
Sakr [150] çalışmasında CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişleri analiz etmek için iki boyutlu ve 3 boyutlu sonlu eleman modelleri sunmuştur. El-Refaie vd. [151] tarafından deneysel çalışma yapılmış aynı dikdörtgen kesite sahip ancak farklı uzunluktaki CFRP ile farklı şekillerde güçlendirilmiş beş simetrik betonarme sürekli kirişi kullanarak sayısal modellerin doğrulamasını yapmıştır. Bu tez kapsamında E3 diye adlandırılan çekme yüzeyi CFRP ile güçlendirilmiş kirişin sonlu eleman analizi yapılmıştır (Şekil 6.8-6.9). E3 kirişinin deneysel ve sayısal modeline ait yük-yer değiştirme grafiği karşılaştırmalı olarak Şekil 6.10'da verilmiştir.



Şekil 6. 8 E3 kirişi güçlendirme biçimi [150]



Şekil 6. 9 E3 kirişinin sonlu eleman modeli

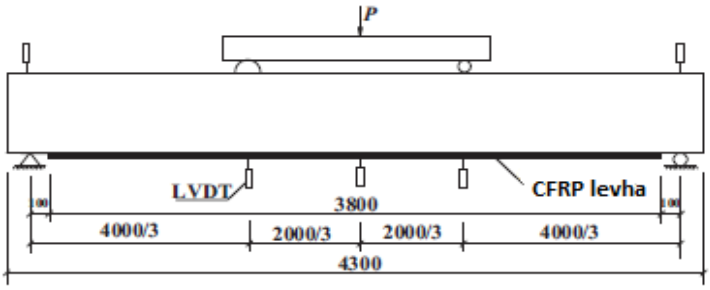


Şekil 6. 10 E3 kirişinin sonlu deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme ilişkileri

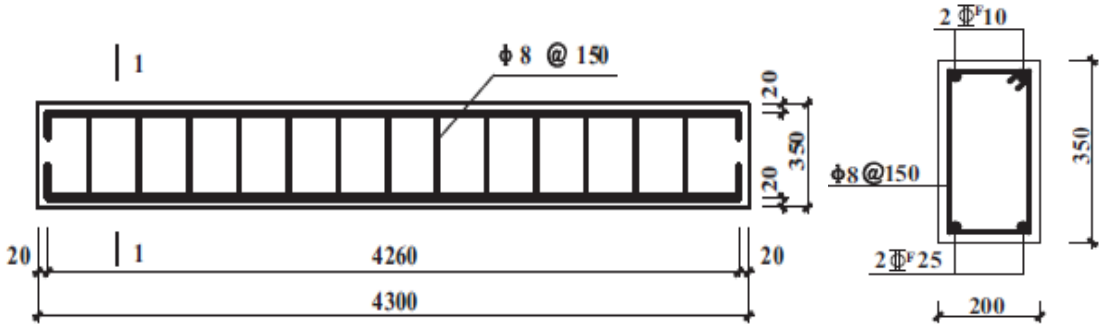
Wang vd. [152] çalışmalarında, betonarme kirişlerdeki hasar derecelerinin betonarme kirişlere dıştan yapıştırılan CFRP tabakalarının yapışma davranışları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Farklı hasar seviyelerindeki beş adet betonarme kirişi, CFRP tabakaları ile farklı biçimlerde güçlendirmiş ve dört noktalı eğilme yükü altında test etmişlerdir (Şekil 6.11). Geometrik boyutlar ve donatı düzeni Şekil 6.12'de verilmiştir. Bu test sırasında, her bir kiriş numunesi için CFRP tabakalarının ayrılmasının ortaya çıktığı ve CFRP tabakalarının kırılması veya betonun ezilmesi gerçekleşene kadar, kirişin mesnete yakın ucundan serbest ucuna doğru sıyrılmanın yayıldığını gözlemlemişlerdir. Aşağıdaki denklem tarafından ifade edilen hasar parametresi (D), her bir deney kirişinin hasar derecesini tanımlamak için seçilmiştir:

$$D = 1 - \frac{B_n}{B_0} \tag{5.53}$$

Burada, B_0, kiriş ilk kez yüklendiğinde kirişin çatlamadan önceki eğilme rijitliği, B_0 kirişin çevrimsel yüklemeden sonraki rijitliği, "*n*" kirişe uygulanan yükleme çevrimlerinin sayısını ifade etmektedir. Kirişler hasar gördükten sonra polimer çimento harcı ile tamir edildiği belirtilmiştir.

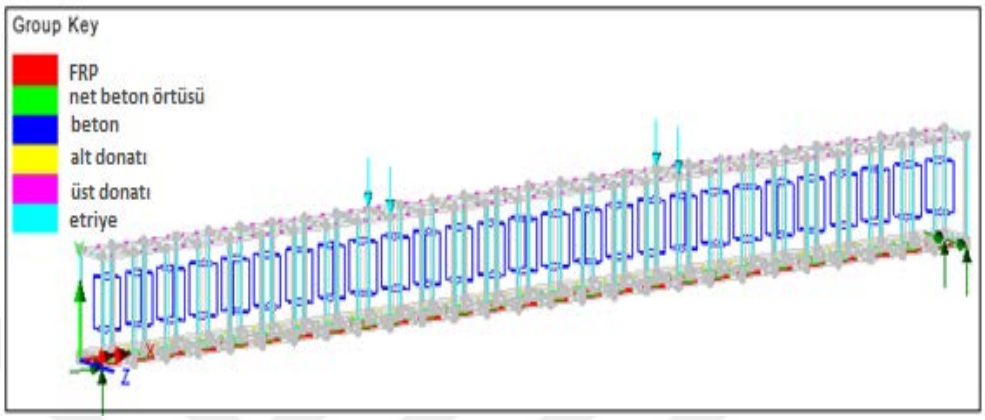


Şekil 6. 11 Y.044 kirişi için deney düzeneği [152]

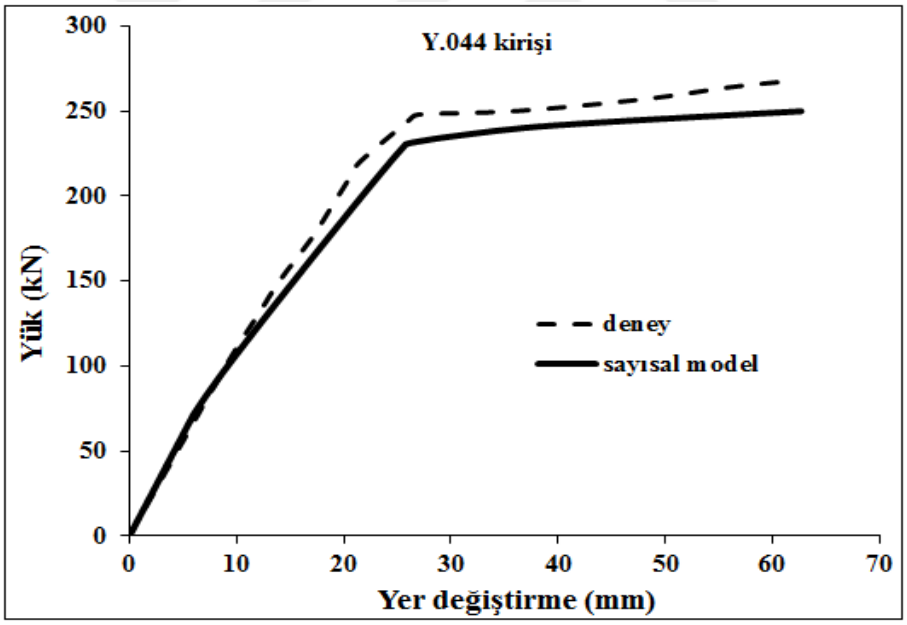


Şekil 6. 12 Y.044 deney kirişinin donatı detayı ve kesit boyutları [152]

Bu kirişin çevrimsel yükten önceki beton dayanımı 64 MPa ve hasar parametresi 0,44 olarak Wang vd. [152] çalışmalarında verilmiştir. Bu durumda kirişin beton dayanımı 35,64 MPa olmuş ve çimento harcı ile güçlendirildiği için de sayısal modelde 54 MPa olarak alınmıştır. Y.044 kirişine ait sayısal model Şekil 6.13'de yük-yer değiştirme grafiği ise Şekil 6.14'de verilmiştir.



Şekil 6. 13 Y.044 kirişinin sonlu eleman modeli



Şekil 6. 14 Y.044 kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme ilişkileri

6.2 Deney Kirişlerine Ait Üç Boyutlu Sayısal Modelleme

6.2.1 Deney Kirişlerinin Önerilen Bünyesel Modelleme Tekniği ile Sayısal Analizi

Bu tez çalışmasında deney kirişlerinde net beton örtüsü olarak tanımlanan kısım önerilen sanal malzeme yaklaşımı ile modellenmiştir. CFRP ile beton arasında tam aderans olduğu kabul edilmiştir. Kirişlerde kullanılan betonun dayanımı, donatının akma ve çekme dayanımları deneylerden elde edilmiştir. Betonun elastisite modülü Denklem 5.47 ile hesaplanmıştır. CFRP malzemeye ait elastisite modülü ve malzeme kalınlığı değerler CFRP'nin temin edildiği firmadan alınmıştır. Çalışmada, Oliver ve diğ. [31] çalışmasında yeralan izotropik hasar modeli denklemleri kullanılarak her bir deney kirişi için hasar parametreleri hesaplanmış ve plastik şekil değiştirme davranışı geliştirilmiş von Mises akma kriteri modeliyle ifade edilmiştir. Sayısal modellerde kullanılan beton ile ilgili parametreler Çizelge 6.4 ve 6.5'de verilmiştir.

Kirişlerin sayısal model analizlerinde analizin nerede sonlandırılacağına karar vermek önemli bir problemdir. Köksal ve Doran [153] FRP ile güçlendirilmiş kolonlar ile ilgili çalışmalarında FRP'nin kopma yırtılma birim şekil değiştirmesi (ε_{rup}) değerinin 0,008 alınabileceği ve FRP'nin bu değere ulaşmasıyla analizin sonlandırılabileceğinden bahsetmişlerdir. Bu tez kapsamında deney kirişlerinin sayısal analiz çözümlemelerinde CFRP malzemenin birim şekil değiştirmesinin 0,008 olduğu durumdaki birim şekil değiştirme dağılımları incelenmiş ve bu değere karşılık gelen analiz adımındaki yük yer değiştirme değerleri belirlenmiştir. Ancak bu değerlerin deney yük yer değiştirme değerlerinden daha düşük olduğu görülmüştür. Kolonların dört tarafının da FRP ile sargılandığı durumlarda kolonun köşelerinden dolayı sıyrılmanın veya kopmanın daha kolay olacağı düşünüldüğünde, deney kirişlerinin köşelerinin pahlandığı ve tam sargılanmadığı için FRP' nin daha geç sıyrılacağı bu nedenle de bu değere ulaşmasıyla analizi sonlandırmanın tam anlamıyla doğru bir yaklaşım olmadığı düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında, herbir kiriş için sayısal analiz sonuçlarından sanal malzeme olarak nitelenen çekme donatısı altında kalan net beton örtüsüne ait açıklık ortası gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri çizilmiş ve bu grafiklerin altında kalan alan ile 10 mm aralığında kabul edilen çatlak genişliği çarpılarak kırılma enerjisi (G_f) olarak bulunmuştur. Ayrıca

kırılma enerjisi Denklem 5.52 ile hasaplanmıştır. Hesaplarda (d_{max}) değeri 16 mm olarak alınmıştır. Hesapla bulunan G_f değerinin elde edildiği analiz adımı bulunmuş ve sayısal analizler burada sonlandırılmıştır. Sayısal analizlerin sonlandırıldığı adımda net beton örtüsüne ait açıklık ortası gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri çizilmiştir.

Çizelge 6. 4 Sonlu elamanlar analizinde kullanılan betonun (çekirdek beton) mekanik özellikleri

Kiriş Adı	**Malzeme**	**Elastik**	**Plastik**		**Hasar**		
		E_c **(MPa)**	f_{ck} **(MPa)**	f_t **(MPa)**	τ	A	η
K20R	Beton	20000	20	2	0,0141	0,43	10
K20KG00	Beton	20000	20	2	0,0141	0,43	10
K20KG50	Beton (I)	20000	20	2	0,0141	0,41	10
	Beton (II)	20000	20	2	0,0141	0,22	10
K20KGU	Beton (I)	20000	20	2	0,0141	0,27	10
	Beton (II)	20000	20	2	0,0141	0,39	10
K40R	Beton	20000	20	2	0,0141	0,41	10
K40KG00	Beton	20000	20	2	0,0141	0,41	10
K40KG70	Beton (I)	20000	20	2	0,0141	0,39	10
	Beton (II)	20000	20	2	0,0141	0,22	10
K40KGU	Beton (I)	20000	20	2	0,0141	0,27	10
	Beton (II)	20000	20	2	0,0141	0,37	10

Çizelge 6. 5 Sonlu elamanlar analizinde kullanılan sanal malzemenin mekanik özellikleri

Kiriş Adı	Elastik	Plastik		Hasar		
	E_c (MPa)	f_{ck} (MPa)	f_t (MPa)	τ	A	η
K20R	225	4,95	0,495	0,033	0,19	10
K20KG00	2000	6,0	0,6	0,013	0,19	10
K20KG50	2500	7,0	0,7	0,014	0,19	10
K20KGU	3000	7,5	0,75	0,014	0,19	10
K40R	225	4,95	0,495	0,033	0,25	10
K40KG00	2000	6,0	0,6	0,013	0,25	10
K40KG70	2500	7,0	0,7	0,014	0,25	10
K40KGU	3000	7,5	0,75	0,014	0,25	10

Sayısal analiz sonuçlarından ve hesaptan elde edilen G_f değerleri Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6. 6 Sayısal analiz sonuçlarından ve hesaptan elde edilen G_f değerleri

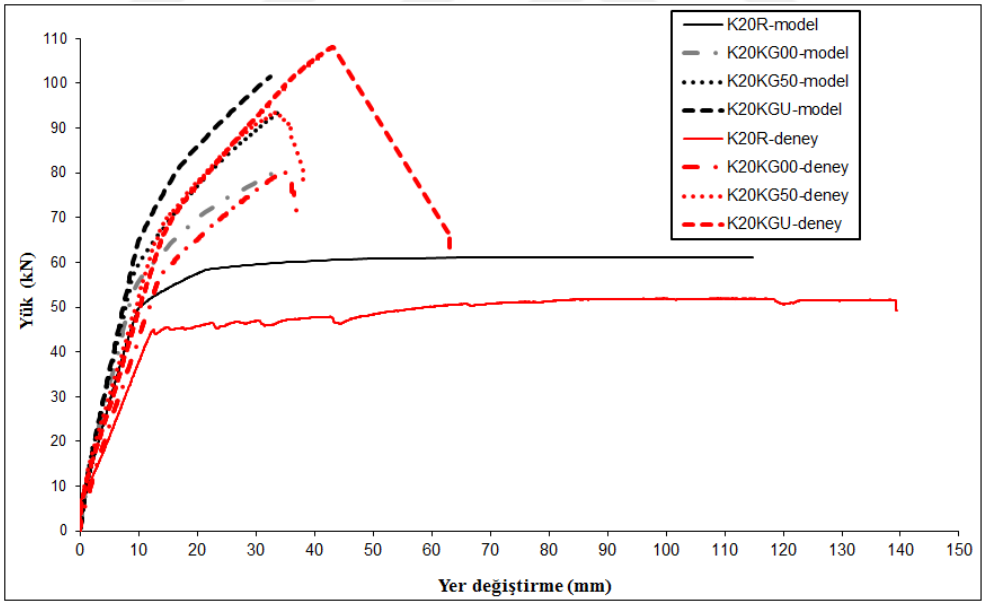
	G_f = Eğri altında kalan alanx10mm (N/mm)	Hesapla bulunan G_f (N/mm)
K20R	0,288	0,27
K20KG00	0,054	0,045
K20KG50	0,039	0,049
K20KGU	0,055	0,046
K40R	0,251	0,27
K40KG00	0,052	0,045
K40KG70	0,044	0,049
K40KGU	0,058	0,046

Kirişler için hesapla bulunan G_f değerine karşılık gelen sayısal analiz adımına ait yük yer değiştirme değerleri ve deneylerden edilen maksimum yük ve yer değiştirme değerleri Çizelge 6.7'de verilmiştir.

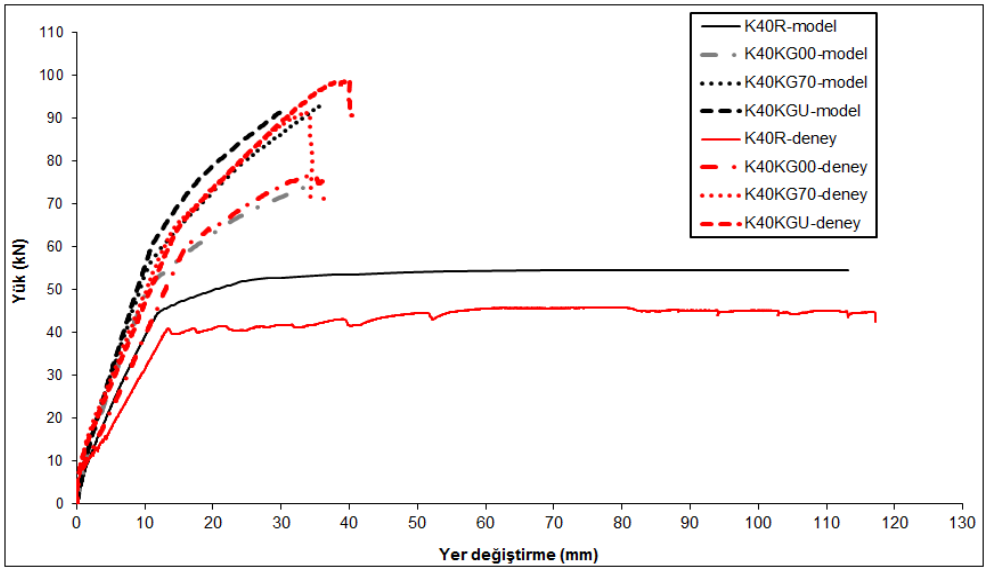
Çizelge 6. 7 Hesapla bulunan G_f değerine karşılık gelen kiriş sayısal analiz adımına ait yük yer değiştirme ve deneylerden edilen yük yer değiştirme değerleri

	SAYISAL MODEL		DENEY	
	Yük (kN)	**Yer değiştirme (mm)**	**Yük (kN)**	**Yer değiştirme (mm)**
K20R	61,20	114,88	51,97	139,35
K20KG00	80,84	34,15	80,43	36,93
K20KG50	-	-	93,56	39,15
K20KGU	101,60	32,4	108,19	63,07
K40R	-	-	45,87	117,13
K40KG00	73,05	32,00	76,78	36,51
K40KG70	-	-	91,43	34,56
K40KGU	92,02	30,31	98,95	41,82

1. grup ve 2. grup deney kirişlerine ait deneysel açıklık ortası yük-yer değiştirme sonuçları ile sayısal modellerin analizleri sonucu elde edilen açıklık ortası yük-yer değiştirme grafikleri Şekil 6.15 ve 6.16'da verilmiştir.



Şekil 6. 15 1. Grup deney kirişlerine ait deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri



Şekil 6. 16 2. Grup deney kirişlerine ait deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri

6.2.2 Sonuçların Karşılaştırılması

Bu bölümde LUSAS [147] sonlu eleman yazılımı ile sayısal analizi yapılan 1. grup ve 2. grup deney kirişlerine ait yük-yer değiştirme eğrileri deneysel çalışmadan elde edilmiş yük-yer değiştirme eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Herbir kiriş için sanal malzemede sayısal çözümleme sonucunda oluşan gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri sunulmuştur.

CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerde sayısal analizler sonucunda CFRP'de oluşan birim şekil değiştirme dağılımları incelenmiş ve göçme bölgelerindeki CFRP malzemenin düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirme değerleri tablolar halinde sunulmuştur.

CFRP malzemedeki birim şekil değiştirme dağılımları aşağıda tanımlanan durumlar için ayrı ayrı değerlendirilmiştir:

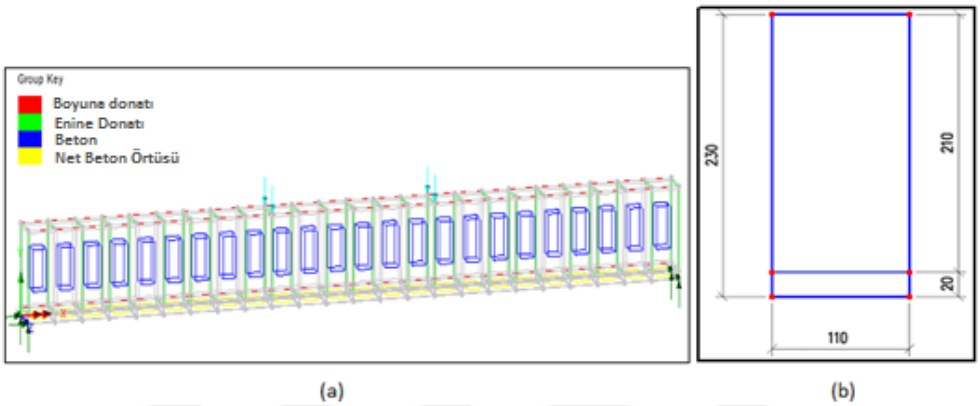
1. durum: CFRP malzemede açıklık ortasındaki birim şekil değiştirmenin maksimum 0,008 olduğu durum.

2. durum: Deneyde elde edilen maksimum yükün sayısal analizde karşı geldiği analiz adımındaki durum (Bu durum K20KG00 haricindeki kirişlerde analizlerin kırılma enerjisine bağlı olarak sonlandırılmadığı; analizlerin devam etmesi halinde incelenebilmiştir).

3. durum: Hesapla bulunan kırılma enerjisi G_f değerine karşılık gelen sayısal analiz adımındaki birim şekil değiştirmeyi gösteren durum.

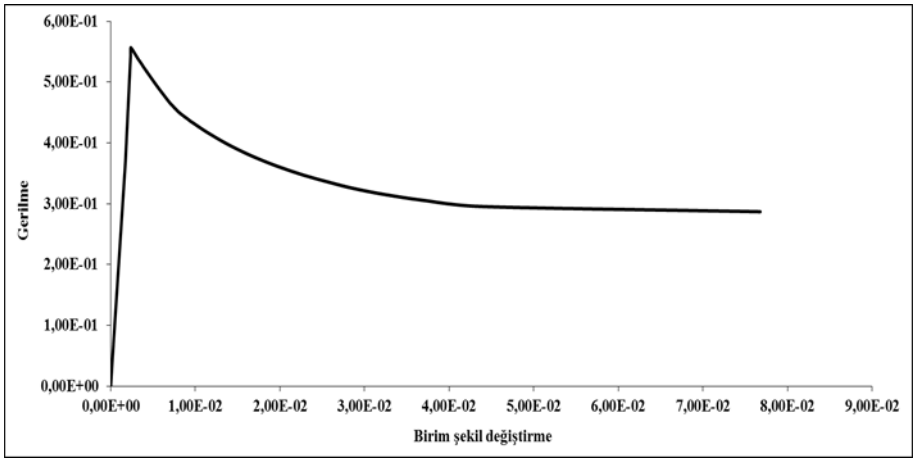
6.2.2.1 K20R Deney Kirişi

K20R deney kirişi 20 mm net beton örtüsüne sahip, güçlendirilmemiş referans kirişidir. Deney kirişine ait sayısal model Şekil 6.17a ve modelin 2 boyutlu kesiti Şekil 6.17b'de verilmiştir.



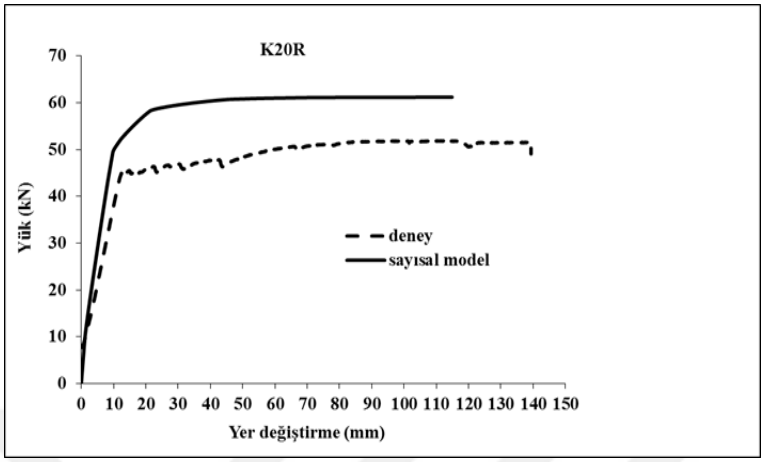
Şekil 6. 17 (a) K20R deney kirişinin sayısal modeli (b) 2 boyutlu kesiti

Bu kiriş deney esnasında 51,97 kN maksimum yük seviyesinde 99,76 mm yer değiştirme yapmıştır. Kirişin taşıdığı yük yaklaşık bu değerde sabit kalırken yer değiştirme artarak maksimum 139,35 mm olmuştur. Bu kirişe ait hesapla bulunan G_f değeri 0,27 N/mm olup, bu değere karşılık gelen sayısal analiz adımında analiz sonlandırılmıştır. Analizin sonlandırıldığı adıma karşılık gelen sanal malzemenin açıklık ortasındaki gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 6.18'de verilmiştir.



Şekil 6. 18 K20R deney kirişinin gerilme birim şekil değiştirme grafiği

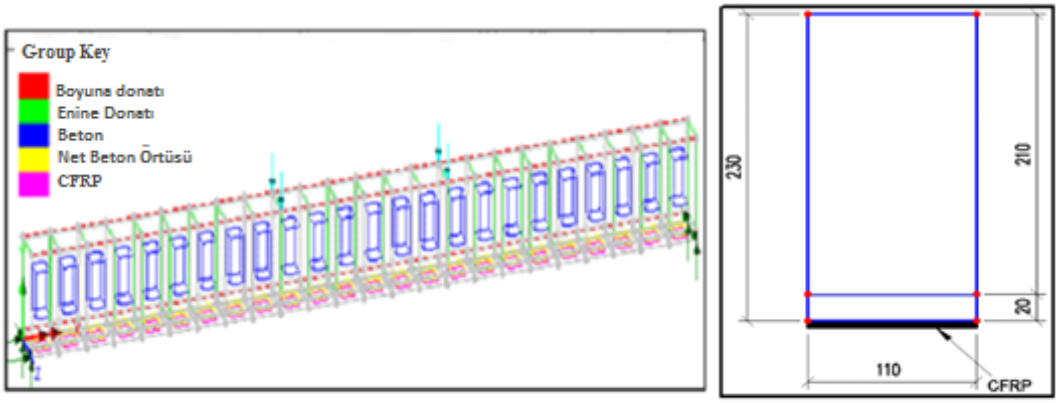
Şekil 6.19'da kirişin deneysel ve sayısal modeline ait açıklık ortası yük- yer değiştirme eğrileri verilmiştir.



Şekil 6. 19 K20R deney kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri

6.2.2.2 K20KG00 Deney Kirişi

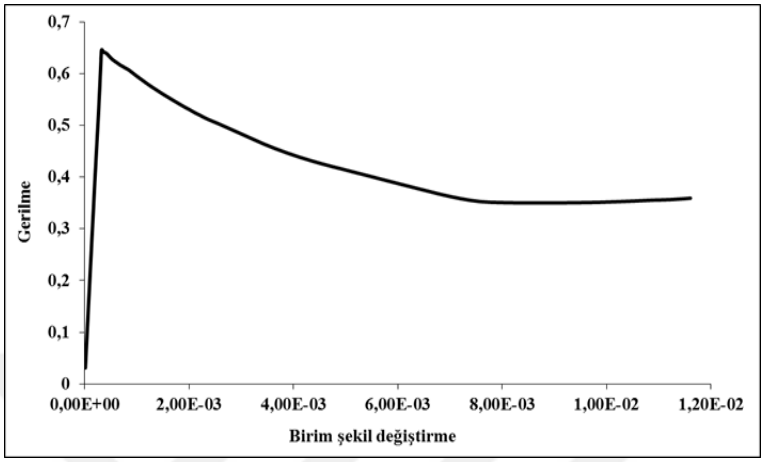
K20KG00 deney kirişi 20 mm net beton örtüsüne sahip, çekme yüzeyine tek kat CFRP kumaş yapıştırılarak güçlendirilmiş kiriştir. Deney kirişine ait sayısal model Şekil 6.20a ve modelin 2 boyutlu kesiti Şekil 6.20b'de verilmiştir.



Şekil 6. 20 (a) K20KG00 deney kirişinin sayısal modeli (b)2 boyutlu kesiti

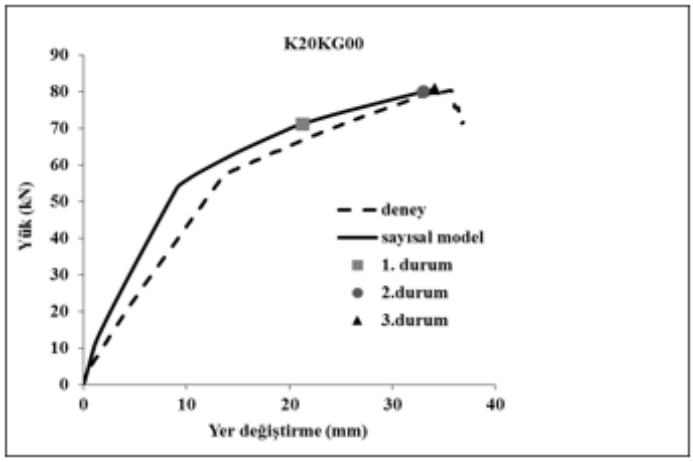
Deney kirişi K20KG00, deney esnasında 80,43 kN maksimum yük seviyesinde 35,72 mm yer değiştirme yapmıştır. Kirişin taşıdığı yük miktarında azalma olurken, yer değiştirme artarak maksimum 36,93 mm olmuştur. Beton yüzeyde çatlaklar oluşmuş, CFRP kumaş beton yüzeyinden sıyrılmış ve kopmuştur.

Bu kirişe ait hesapla bulunan G_f değeri 0,045 N/mm olup, bu değere karşılık gelen sayısal analiz adımında analiz sonlandırılmıştır. Analizin sonlandırıldığı adıma karşılık gelen sanal malzemenin açıklık ortasındaki gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 6.21'de verilmiştir.



Şekil 6. 21 K20KG00 deney kirişinin gerilme birim şekil değiştirme grafiği

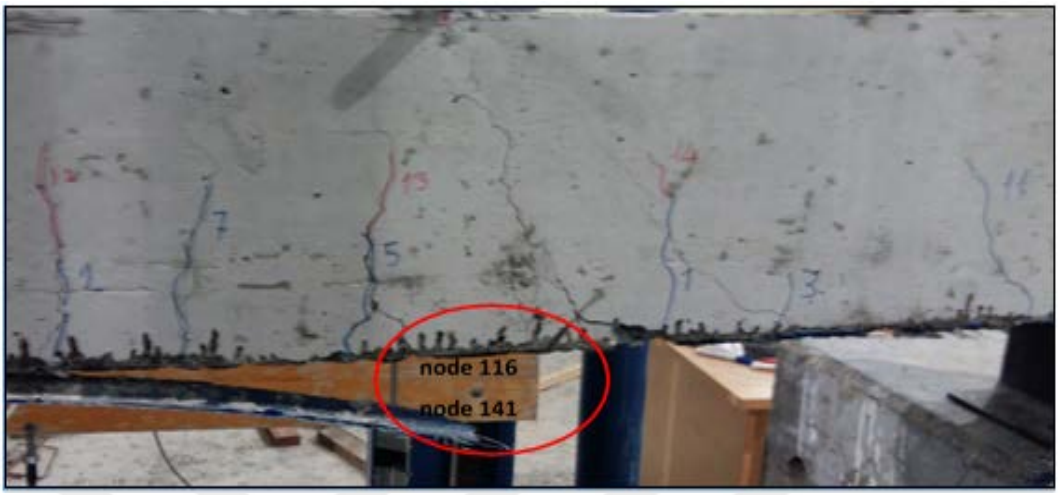
Şekil 6.22'de kirişin deneysel ve sayısal modeline ait açıklık ortası yük-yer değiştirme eğrileri verilmiştir.



Şekil 6. 22 K20KG00 deney kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri

Ayrıca eğri üzerinde 1., 2. ve 3. durumdaki yük yer değiştirme değerleri gösterilmiştir. Bu kirişte sayısal analiz sonucunda CFRP kumaşın kirişten sıyrıldığı ve koptuğu noktalar yaklaşık olarak belirlenmiş ve bu noktalardaki CFRP kumaştaki birim şekil değiştirme dağılımları incelenmiştir (Şekil 6.23-6.26).

1., 2. ve 3. durum için CFRP malzemenin sıyrıldığı ve koptuğu düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirme değerleri ile bu durumlardaki açıklık ortası yük ve yer değiştirme değerleri Çizelge 6.8-6.9'da verilmiştir.



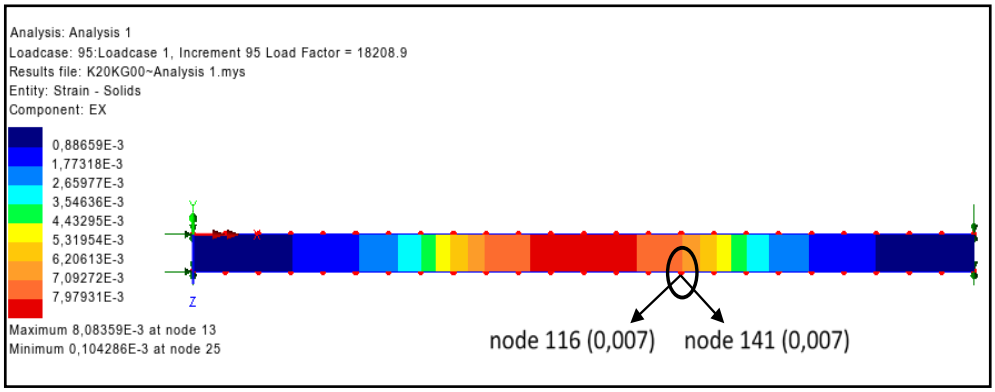
Şekil 6. 23 K20KG00 deney kirişinde CFRP kumaşın sıyrıldığı ve koptuğu noktalar

Çizelge 6. 8 K20KG00 deney kirişinde CFRP malzemenin sıyrıldığı düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirme değerleri

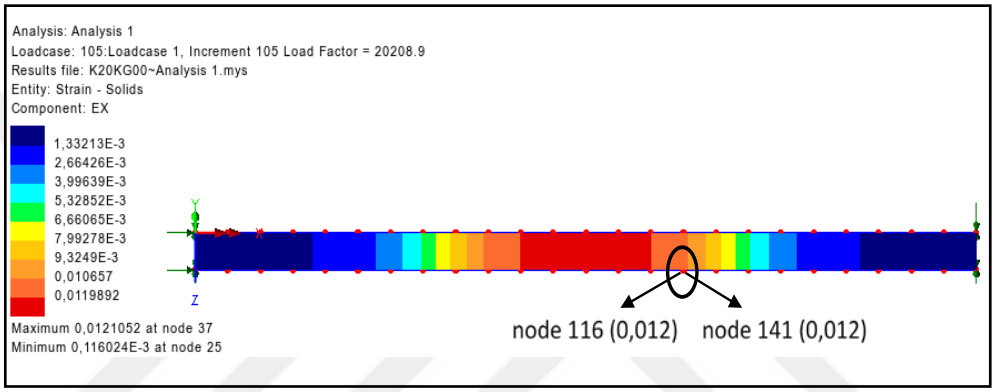
	Nokta No	**1. durum**	**2.durum**	**3. durum**
Birim şekil değiştirme	116	0,007	0,012	0,012
	141	0,007	0,012	0,012

Çizelge 6. 9 K20KG00 deney kirişinde 1., 2. ve 3. durum için açıklık ortası yük-yer değiştirme değerleri

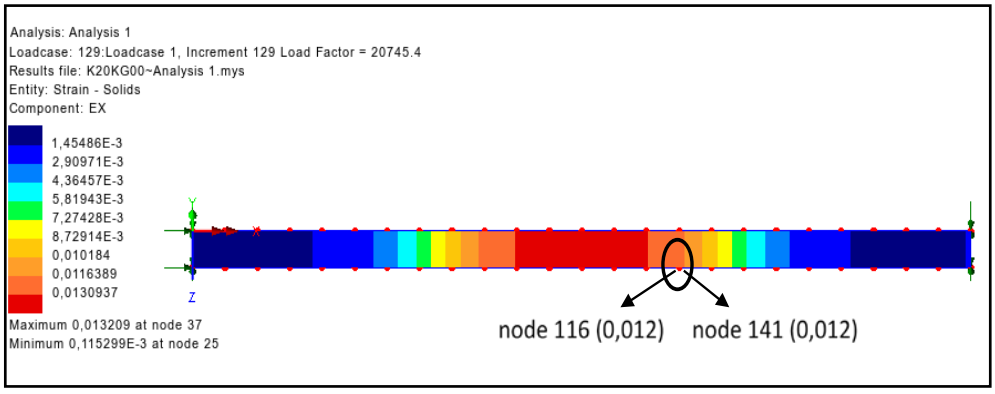
	1. durum	**2.durum**	**3. durum**
Yük (kN)	71,24	80,04	80,84
Yer değiştirme (mm)	21,27	32,99	34,15



Şekil 6. 24 K20KG00 deney kirişinde CFRP malzemedeki açıklık ortası birim şekil değiştirmenin max. 0,008 olduğu durumdaki birim şekil değiştirme dağılımı



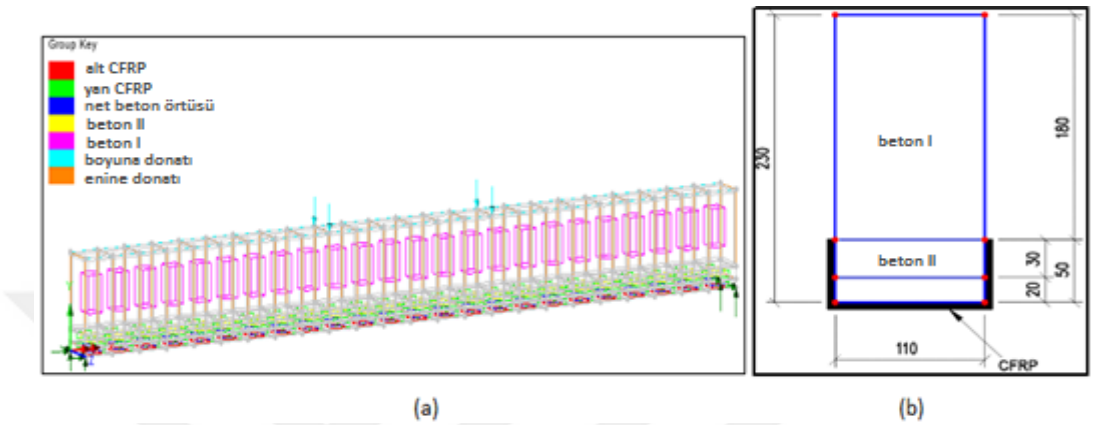
Şekil 6. 25 K20KG00 deney kirişinde deneyde elde edilen maksimum yükün sayısal analizde karşı geldiği analiz adımındaki CFRP malzemedeki birim şekil değiştirme dağılımı



Şekil 6. 26 K20KG00 deney kirişinde hesapla bulunan G_f değerine karşılık gelen sayısal analiz adımında CFRP kumaşın birim şekil değiştirme dağılımı

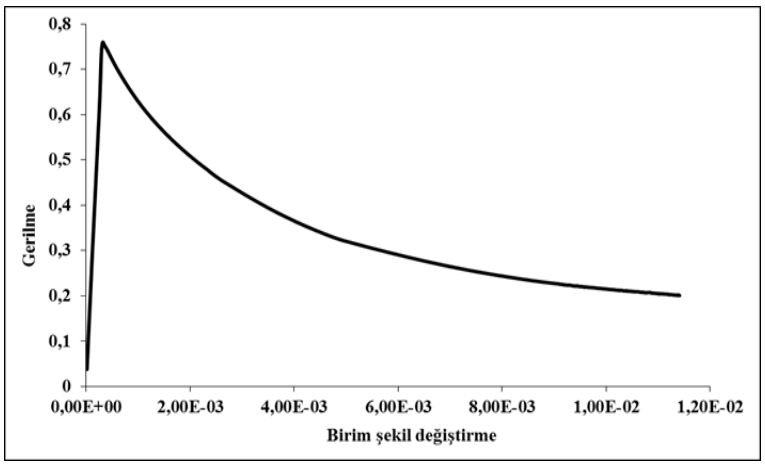
6.2.2.3 K20KG50 Deney Kirişi

K20KG50 deney kirişi 20 mm net beton örtüsüne sahip, çekme yüzeyine ve çekme donatısını içine alacak şekilde yan yüzeylere 50 mm yüksekliğinde tek kat CFRP kumaş yapıştırılarak güçlendirilmiş kiriştir. Deney kirişine ait sayısal model Şekil 6.27a ve modelin 2 boyutlu kesiti Şekil 6.27b'de verilmiştir.



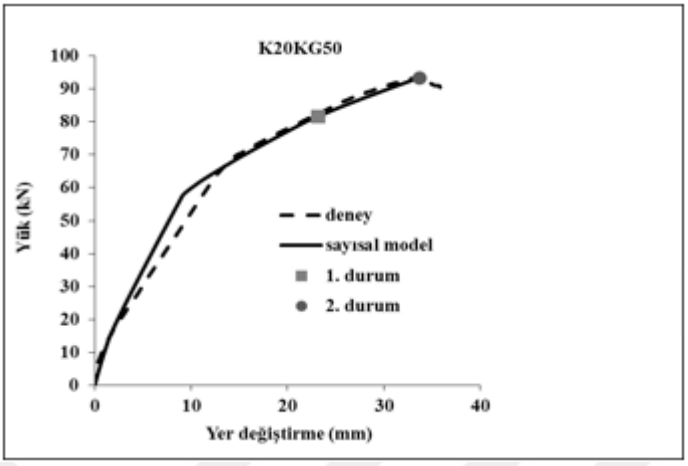
Şekil 6. 27 (a) K20KG50 deney kirişinin sayısal modeli (b)2 boyutlu kesiti

Deney kirişi K20KG50, deney esnasında 93,56 kN maksimum yük seviyesinde 33,88 mm yer değiştirme yapmıştır. Kirişin taşıdığı yük miktarında azalma olurken, yer değiştirme artarak maksimum 39,15 mm olmuştur. Kirişin açıklık ortasına yakın bölgesinde geniş çatlaklar oluşmuş ve CFRP kumaş beton yüzeyden sıyrılmıştır. Bu kirişe ait hesapla bulunan G_f değeri 0,049 N/mm olup, sayısal analiz bu değere ulaşmadan sonlanmıştır. Sayısal analizin son adımına karşılık gelen sanal malzemenin açıklık ortasındaki gerilme birim şekil değiştirme grafiği Şekil 6.28'de verilmiştir.



Şekil 6. 28 K20KG50 deney kirişinin gerilme birim şekil değiştirme grafiği

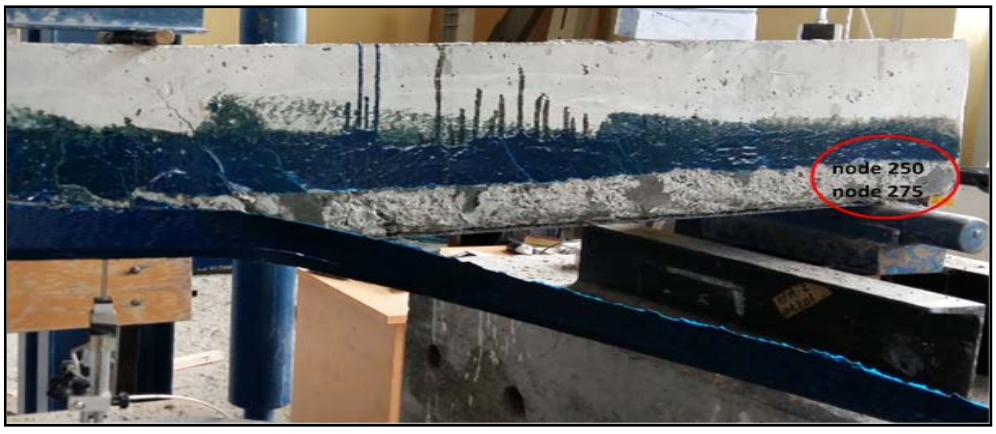
Şekil 6.29'da kirişin deneysel ve sayısal modeline ait açıklık ortası yük- yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Ayrıca eğri üzerinde 1. ve 2. durumdaki yük yer değiştirme değerleri gösterilmiştir.



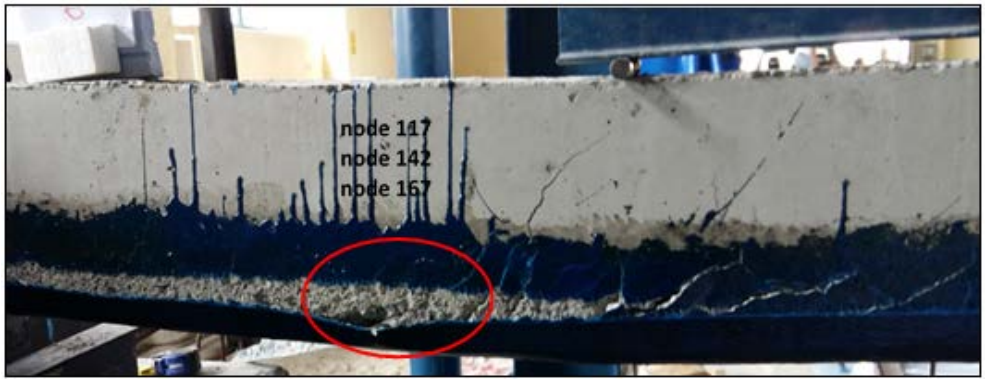
Şekil 6. 29 K20KG50 deney kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri

Bu kirişte sayısal analiz sonucunda CFRP kumaşın kirişten sıyrıldığı noktalar yaklaşık olarak belirlenmiş ve bu noktalardaki CFRP kumaştaki birim şekil değiştirme dağılımları incelenmiştir (Şekil 6.30-6.33).

1., 2. ve 3. durum için CFRP malzemenin sıyrıldığı düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirme değerleri ile bu durumlardaki açıklık ortası yük ve yer değiştirme değerleri Çizelge 6.10-6.11'de görülmektedir.



Şekil 6. 30 K20KG50 deney kirişinin ön yüzünde CFRP kumaşın sıyrıldığı noktalar



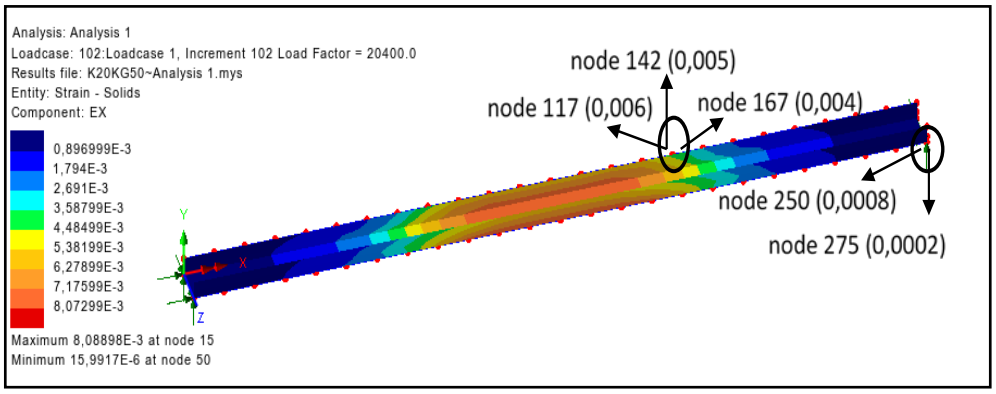
Şekil 6. 31 K20KG50 deney kirişinin arka yüzünde CFRP kumaşın sıyrıldığı noktalar

Çizelge 6. 10 K20KG50 deney kirişinde CFRP malzemenin sıyrıldığı düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirme değerleri

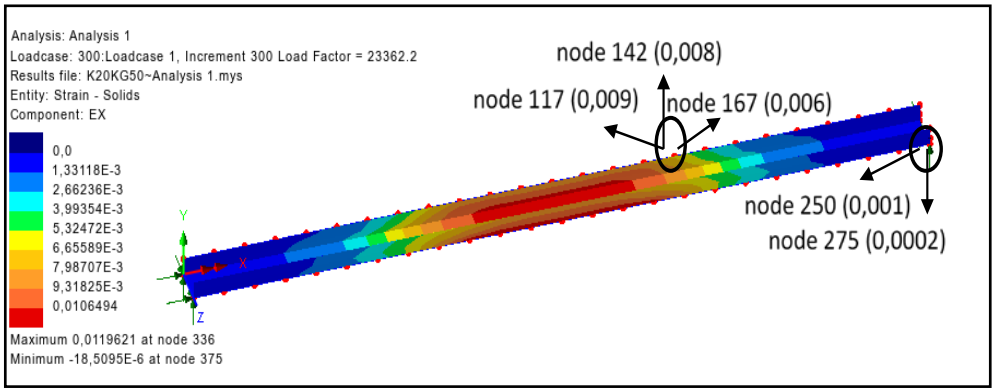
	Nokta No	1. durum	2.durum	3. durum
Birim şekil değiştirme	117	0,006	0,007	-
	142	0,005	0,007	-
	167	0,004	0,005	-
	250	0,0008	0,001	-
	275	0,0002	0,0002	-

Çizelge 6. 11 K20KG50 deney kirişinde 1., 2. ve 3. durum için açıklık ortası yük-yer değiştirme değerleri

	1. durum	2.durum	3. durum
Yük (kN)	81,6	93,45	-
Yer değiştirme (mm)	23,13	33,71	-



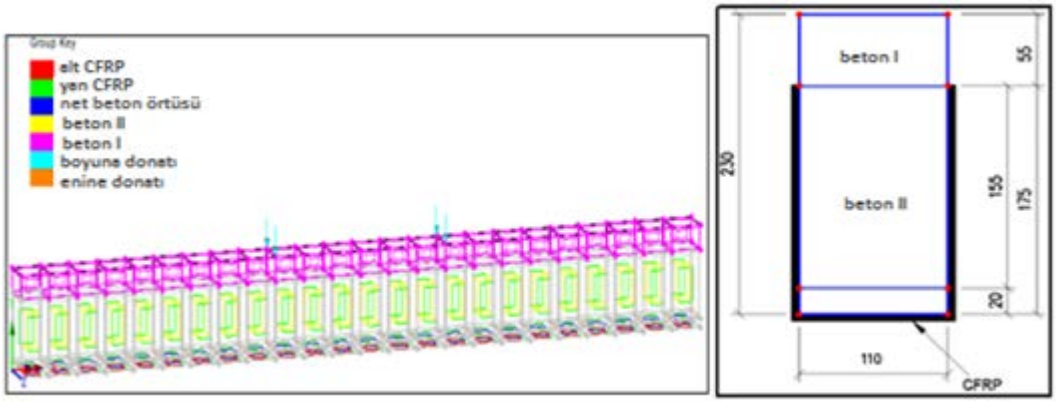
Şekil 6. 32 K20KG50 deney kirişinde CFRP malzemedeki açıklık ortası birim şekil değiştirmenin max. 0.008 olduğu durumdaki birim şekil değiştirme dağılımı



Şekil 6. 33 K20KG50 deney kirişinde deneyde elde edilen maksimum yükün sayısal analizde karşı geldiği analiz adımındaki CFRP malzemedeki birim şekil değiştirme dağılımı

6.2.2.4 K20KGU Deney Kirişi

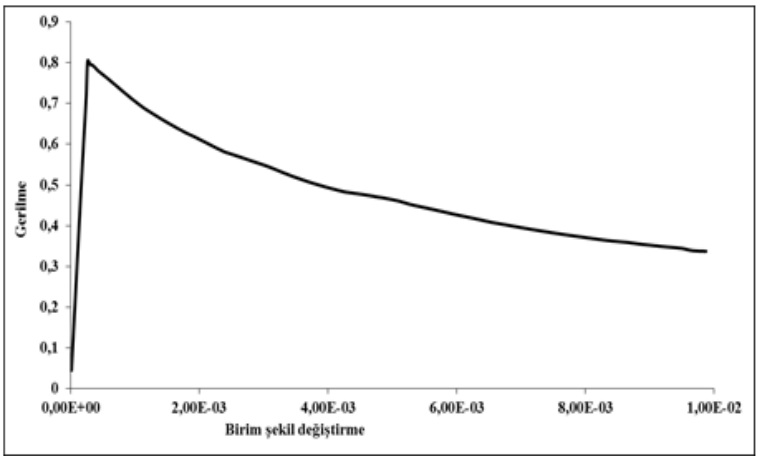
K20KGU deney kirişi 20 mm net beton örtüsüne sahip, çekme yüzeyine ve yan yüzeylerde 175 mm yüksekliğinde U şeklinde tek kat CFRP kumaş yapıştırılarak güçlendirilmiş kiriştir. Deney kirişine ait sayısal model Şekil 6.34a ve modelin 2 boyutlu kesiti Şekil 6.34b'de verilmiştir.



Şekil 6. 34 (a) K20KGU deney kirişinin sayısal modeli (b) 2 boyutlu kesiti

Deney kirişi K20KGU, deney esnasında maksimum 108,19 kN yük değerine ulaşmıştır. Deney kirişi K20KGU'nun bu yük seviyesinde 43,15 mm yer değiştirme yaptığı gözlenmiştir. Kirişin taşıdığı yük miktarında azalma olurken yer değiştirme artarak maksimum 63,07 mm olmuştur. Bu kirişe ait hesapla bulunan G_f değeri 0,046 N/mm olup, bu değere karşılık gelen sayısal analiz adımında analiz sonlandırılmıştır. Analizin

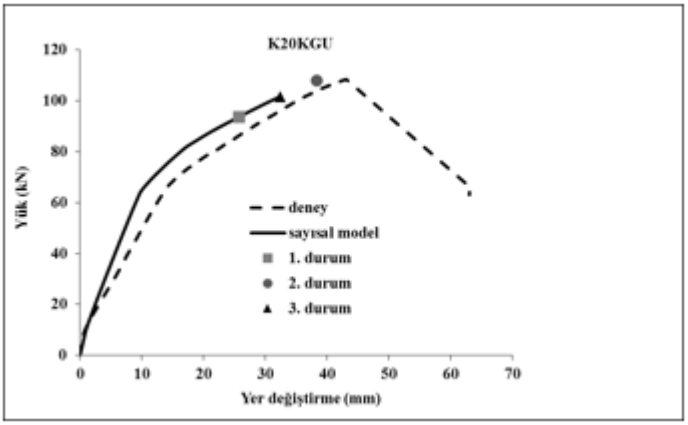
sonlandırıldığı adıma karşılık gelen sanal malzemenin açıklık ortasındaki gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 6.35'de verilmiştir.



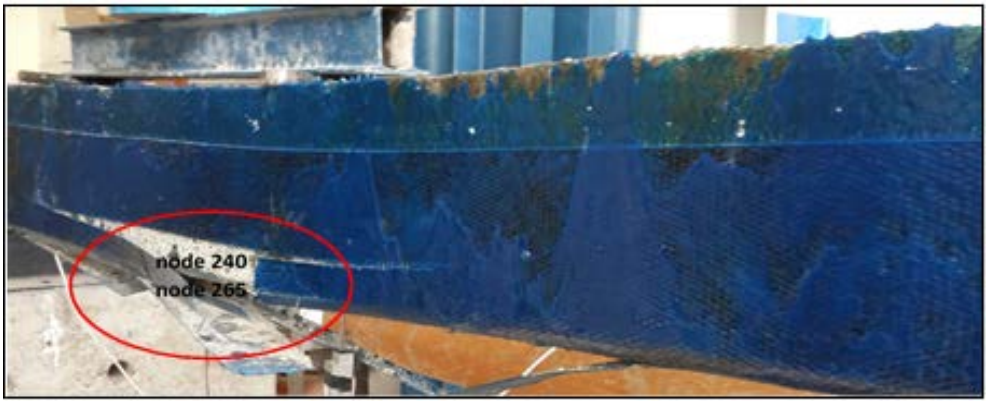
Şekil 6. 35 K20KGU deney kirişinin gerilme birim şekil değiştirme grafiği

Şekil 6.36'da kirişin deneysel ve sayısal modeline ait açıklık ortası yük- yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Ayrıca eğri üzerinde 1., 2. ve 3. durumdaki yük yer değiştirme değerleri gösterilmiştir. Bu kirişte sayısal analiz sonucunda CFRP kumaşın kirişten sıyrıldığı ve koptuğu noktalar yaklaşık olarak belirlenmiş ve bu noktalardaki CFRP kumaştaki birim şekil değiştirme dağılımları incelenmiştir (Şekil 6.37-6.41).

1., 2. ve 3. durum için CFRP malzemenin sıyrıldığı ve koptuğu düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirme değerleri ile bu durumlardaki açıklık ortası yük ve yer değiştirme değerleri Çizelge 6.12-6.13'de verilmiştir.



Şekil 6. 36 K20KGU deney kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri



Şekil 6. 37 K20KGU deney kirişinin ön yüzünde CFRP kumaşın sıyrıldığı noktalar



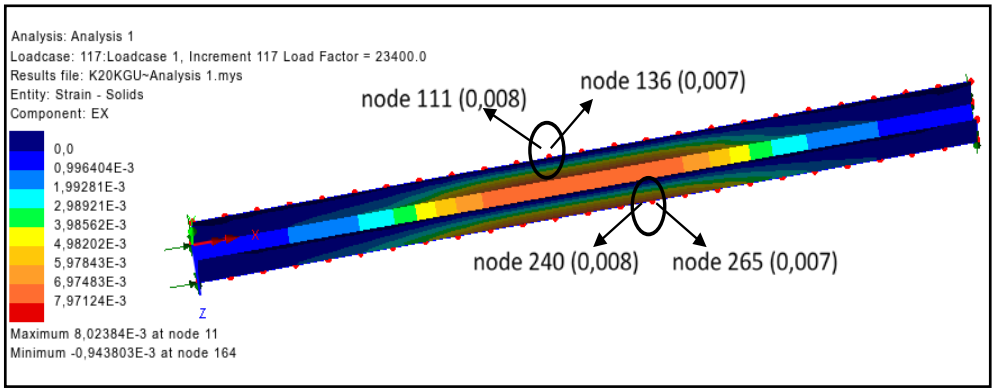
Şekil 6. 38 K20KGU deney kirişinin arka yüzünde CFRP kumaşın sıyrıldığı noktalar

Çizelge 6. 12 K20KGU deney kirişinde CFRP malzemenin sıyrıldığı düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirme değerleri

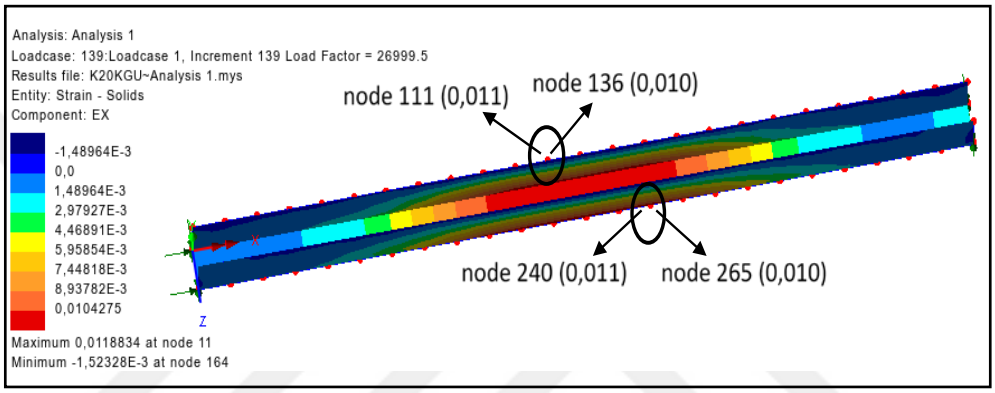
	Nokta No	**1. durum**	**2.durum**	**3. durum**
Birim şekil değiştirme	111	0,008	0,011	0,010
	136	0,007	0,010	0,009
	240	0,008	0,011	0,010
	265	0,007	0,010	0,009

Çizelge 6. 13 K20KGU deney kirişinde 1., 2. ve 3. durum için açıklık ortası yük-yer değiştirme değerleri

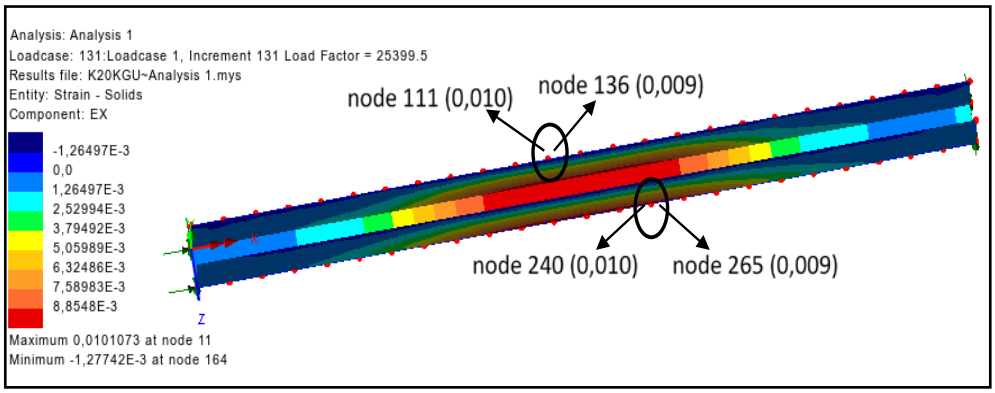
	1. durum	**2.durum**	**3. durum**
Yük (kN)	93,6	108,00	101,6
Yer değiştirme (mm)	25,74	38,26	32,40



Şekil 6. 39 K20KGU deney kirişinde CFRP malzemedeki açıklık ortası birim şekil değiştirmenin max. 0.008 olduğu durumdaki birim şekil değiştirme dağılımı



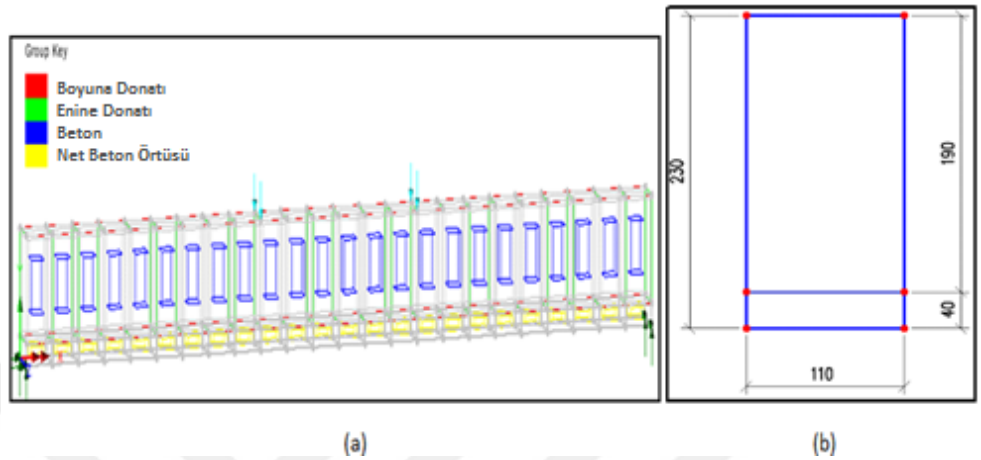
Şekil 6. 40 K20KGU deney kirişinde deneyde elde edilen maksimum yükün sayısal analizde karşı geldiği analiz adımındaki CFRP malzemedeki birim şekil değiştirme dağılımı



Şekil 6. 41 K20KGU deney kirişinde hesapla bulunan G_f değerine karşılık gelen sayısal analiz adımında CFRP kumaşın birim şekil değiştirme dağılımı

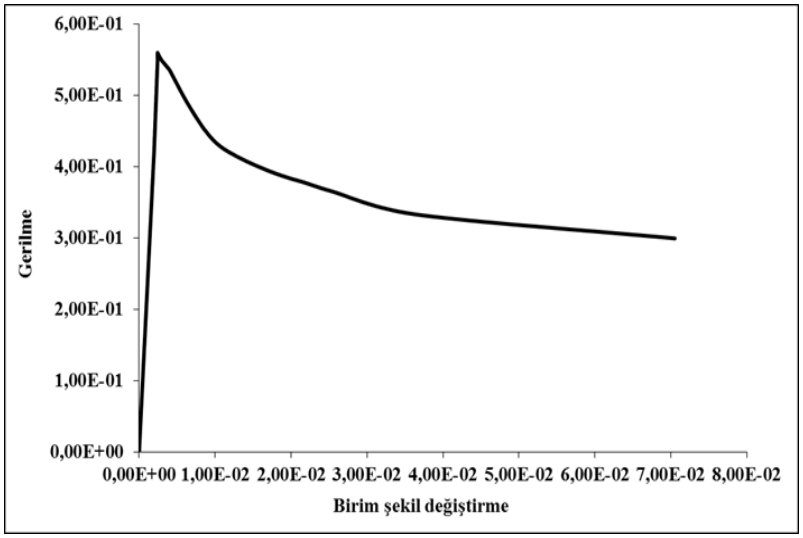
6.2.2.5 K40R Deney Kirişi

K40R deney kirişi 40 mm net beton örtüsüne sahip, güçlendirilmemiş referans kirişidir. Deney kirişine ait sayısal model Şekil 6.42a ve modelin 2 boyutlu kesiti Şekil 6.42b'de verilmiştir.



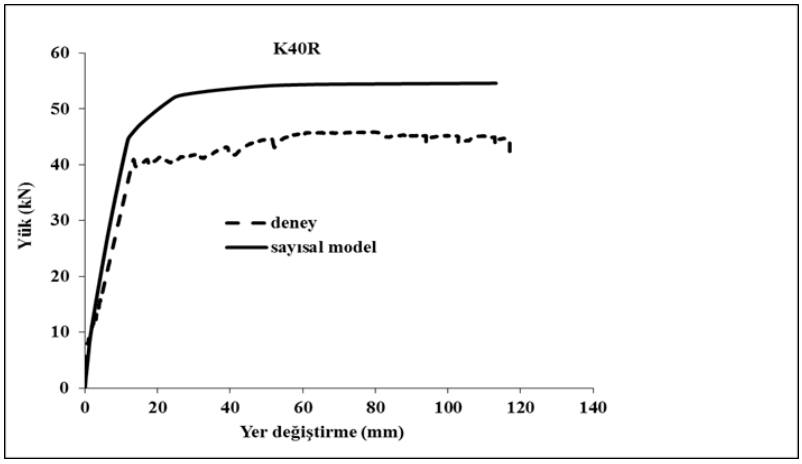
Şekil 6. 42 (a) K40R deney kirişinin sayısal modeli (b) 2 boyutlu kesiti

Bu kiriş deney esnasında 45,87 kN yük seviyesinde 79,32 mm yer değiştirme yapmıştır. Kirişin taşıdığı yük yaklaşık bu değerde sabit kalırken yer değiştirme artarak maksimum 117,13 mm olmuştur. Bu kirişe ait hesapla bulunan G_f değeri 0,27 N/mm olup, sayısal analiz bu değere ulaşmadan sonlanmıştır. Analizin son adımına karşılık gelen sanal malzemenin açıklık ortasındaki gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 6.43'de verilmiştir.



Şekil 6. 43 K40R deney kirişinde kirişinin gerilme birim şekil değiştirme grafiği

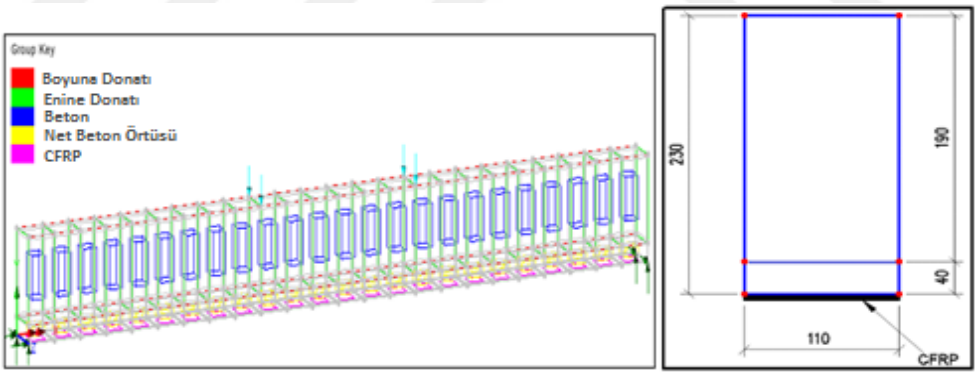
Şekil 6.44'de kirişin deneysel ve sayısal modeline ait açıklık ortası yük- yer değiştirme eğrileri verilmiştir.



Şekil 6. 44 K40R deney kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri

6.2.2.6 K40KG00 Deney Kirişi

K40KG00 deney kirişi 40 mm net beton örtüsüne sahip, çekme yüzeyine tek kat CFRP kumaş yapıştırılarak güçlendirilmiş kiriştir. Deney kirişine ait sayısal model Şekil 6.45a ve modelin 2 boyutlu kesiti Şekil 6.45b'de verilmiştir.

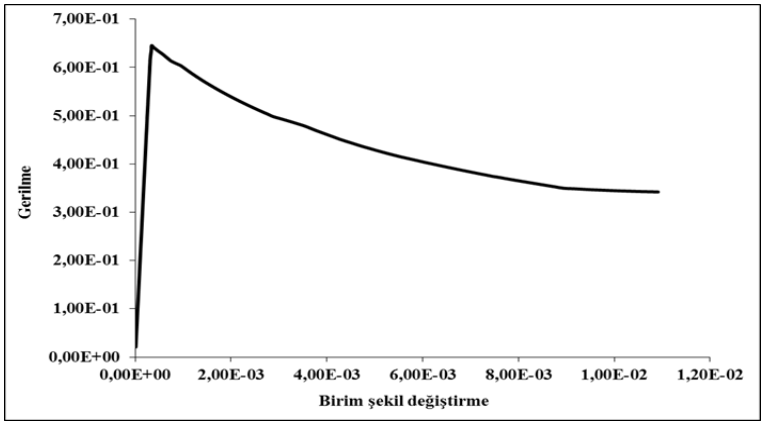


Şekil 6. 45 (a) K40KG00 deney kirişinin sayısal modeli (b) 2 boyutlu kesiti

Deney kirişi K40KG00, deney esnasında 76,78 kN maksimum yük seviyesinde 34,63 mm yer değiştirme yapmıştır. Kirişin taşıdığı yük miktarında azalma olurken, yer değiştirme artarak maksimum 36,51 mm olmuştur. Beton yüzeyde çatlaklar oluşmuş ve CFRP kumaş beton yüzeyinden sıyrılmıştır.

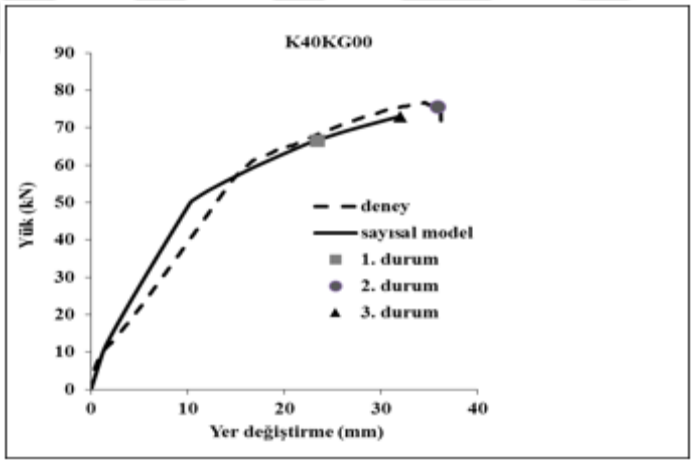
Bu kirişe ait hesapla bulunan G_f değeri 0,045 N/mm olup, bu değere karşılık gelen sayısal analiz adımında analiz sonlandırılmıştır. Analizin sonlandırıldığı adıma karşılık

gelen sanal malzemenin açıklık ortasındaki gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 6.46'da verilmiştir.



Şekil 6. 46 K40KG00 deney kirişinin gerilme birim şekil değiştirme grafiği

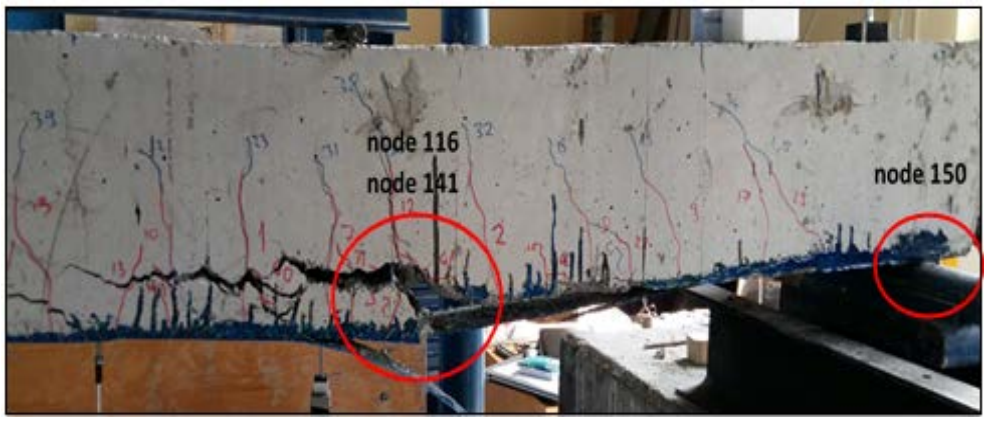
Şekil 6.47'de kirişin deneysel ve sayısal modeline ait açıklık ortası yük- yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Ayrıca eğri üzerinde 1., 2. ve 3. durumdaki yük yer değiştirme değerleri gösterilmiştir.



Şekil 6. 47 K40KG00 deney kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri

Bu kirişte sayısal analiz sonucunda CFRP kumaşın kirişten sıyrıldığı ve koptuğu noktalar yaklaşık olarak belirlenmiş ve bu noktalardaki CFRP kumaştaki birim şekil değiştirme dağılımları incelenmiştir (Şekil 6.48-6.51).

1., 2. ve 3. durum için CFRP malzemenin sıyrıldığı düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirme değerleri ile bu durumlardaki açıklık ortası yük ve yer değiştirme değerleri Çizelge 6.14-6.15'de verilmiştir.



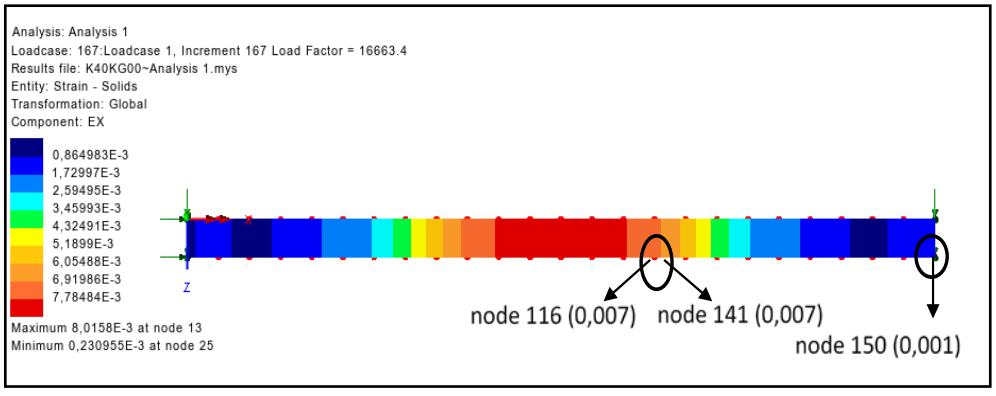
Şekil 6. 48 K40KG00 deney kirişinde CFRP kumaşın sıyrıldığı noktalar

Çizelge 6. 14 K40KG00 deney kirişinde CFRP malzemenin sıyrıldığı düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirme değerleri

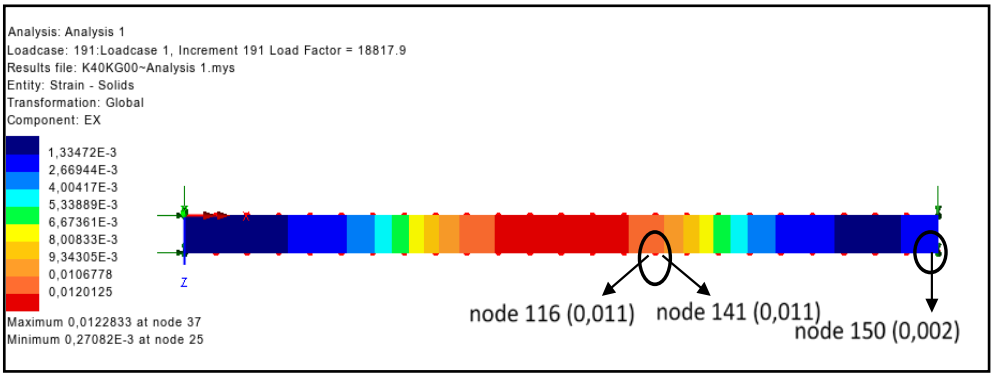
	Nokta No	**1. durum**	**2.durum**	**3. durum**
Birim şekil değiştirme	116	0,007	0,011	0,011
	141	0,007	0,011	0,011
	150	0,001	0,002	0,002

Çizelge 6. 15 K40KG00 deney kirişinde 1., 2. ve 3. durum için açıklık ortası yük-yer değiştirme değerleri

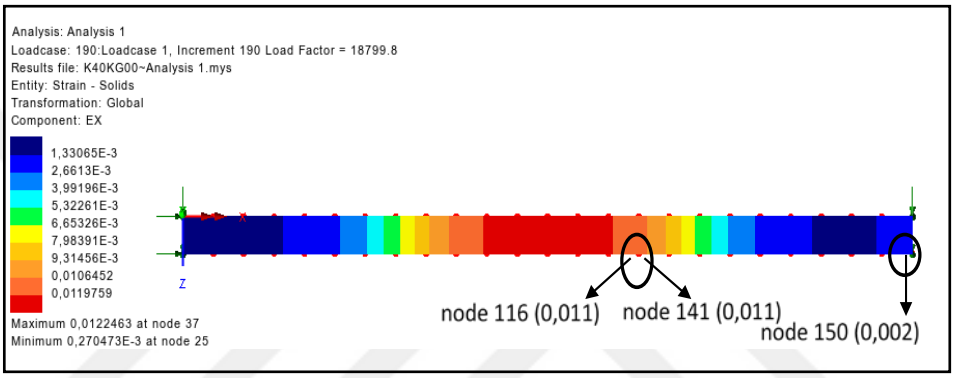
	1. durum	**2.durum**	**3. durum**
Yük (kN)	66,65	75,69	73,05
Yer değiştirme (mm)	23,42	35,91	32,00



Şekil 6. 49 K40KG00 deney kirişinde CFRP malzemedeki açıklık ortası birim şekil değiştirmenin max. 0.008 olduğu durumdaki birim şekil değiştirme dağılımı



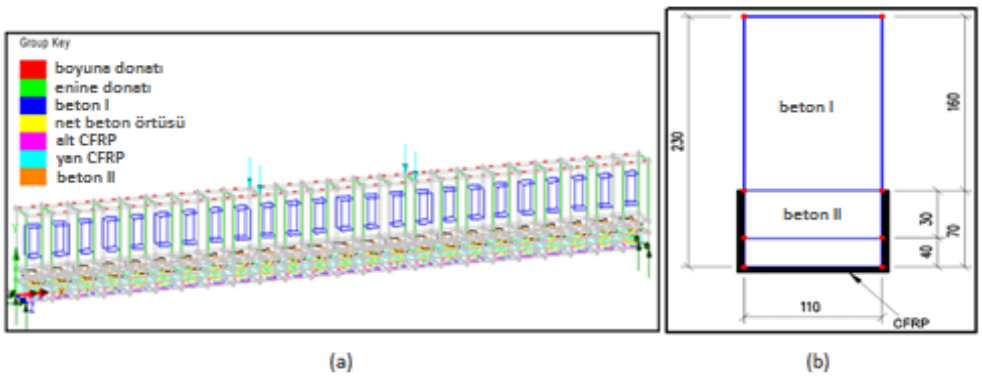
Şekil 6. 50 K40KG00 deney kirişinde deneyde elde edilen maksimum yükün sayısal analizde karşı geldiği analiz adımındaki CFRP malzemedeki birim şekil değiştirme dağılımı



Şekil 6. 51 K40KG00 deney kirişinde hesapla bulunan G_f değerine karşılık gelen sayısal analiz adımında CFRP kumaşın birim şekil değiştirme dağılımı

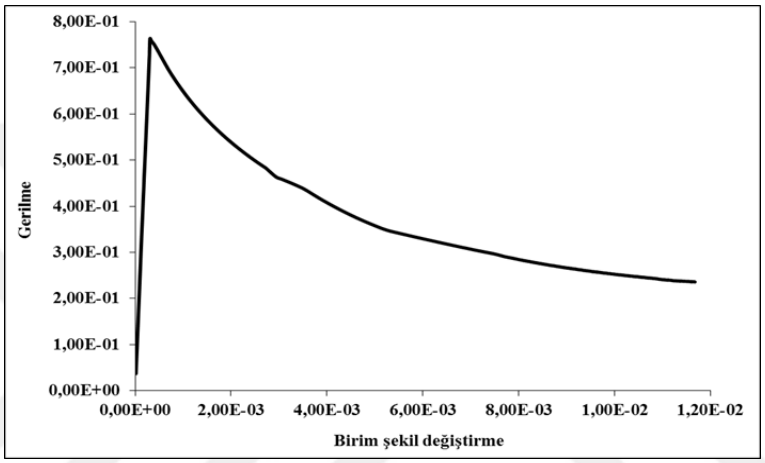
6.2.2.7 K40KG70 Deney Kirişi

K40KG70 deney kirişi 40 mm net beton örtüsüne sahip, çekme yüzeyine ve çekme donatısını içine alacak şekilde yan yüzeylerde 70 mm yüksekliğinde tek kat CFRP kumaş yapıştırılarak güçlendirilmiş kiriştir. Deney kirişine ait sayısal model Şekil 6.52a ve modelin 2 boyutlu kesiti Şekil 6.52b'de verilmiştir.



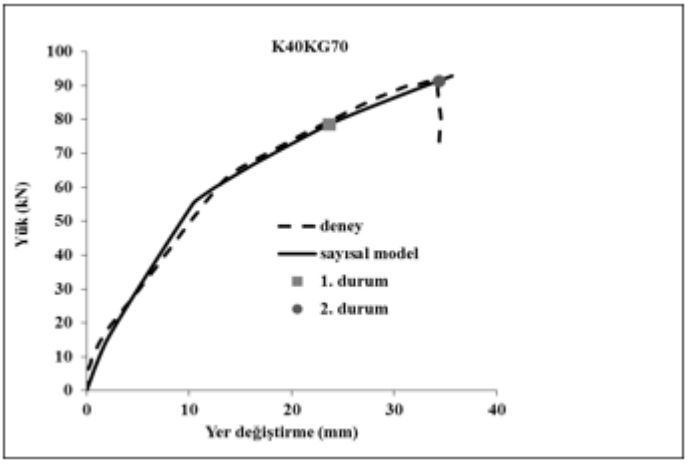
Şekil 6. 52 (a) K40KG70 deney kirişinin sayısal modeli (b)2 boyutlu kesiti

Deney kirişi K40KG70, deney esnasında 91,43 kN maksimum yük seviyesinde 33,82 mm yer değiştirme yapmıştır. Kirişin taşıdığı yük miktarında azalma olurken, yer değiştirme artarak maksimum 34,56 mm olmuştur. Kirişin açıklık ortasına yakın bölgesinde geniş çatlaklar oluşmuş ve CFRP kumaş beton yüzeyden sıyrılmıştır. Bu kirişe ait hesapla bulunan G_f değeri 0,049 N/mm olup, sayısal analiz bu değere ulaşmadan sonlanmıştır. Sayısal analizin son adımına karşılık gelen sanal malzemenin açıklık ortasındaki gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 6.53'de verilmiştir.



Şekil 6. 53 K40KG70 deney kirişinin gerilme birim şekil değiştirme grafiği

Şekil 6.54'de kirişin deneysel ve sayısal modeline ait açıklık ortası yük- yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Ayrıca eğri üzerinde 1. ve 2. durumdaki yük yer değiştirme değerleri gösterilmiştir.



Şekil 6. 54 K40KG70 deney kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri

Bu kirişte sayısal analiz sonucunda CFRP kumaşın kirişten sıyrıldığı noktalar yaklaşık olarak belirlenmiş ve bu noktalardaki CFRP kumaştaki birim şekil değiştirme dağılımları incelenmiştir (Şekil 6.55-6.57).

1., 2. ve 3. durum için CFRP malzemenin sıyrıldığı düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirme değerleri ile bu durumlardaki açıklık ortası yük ve yer değiştirme değerleri Çizelge 6.16-6.17'de verilmiştir.



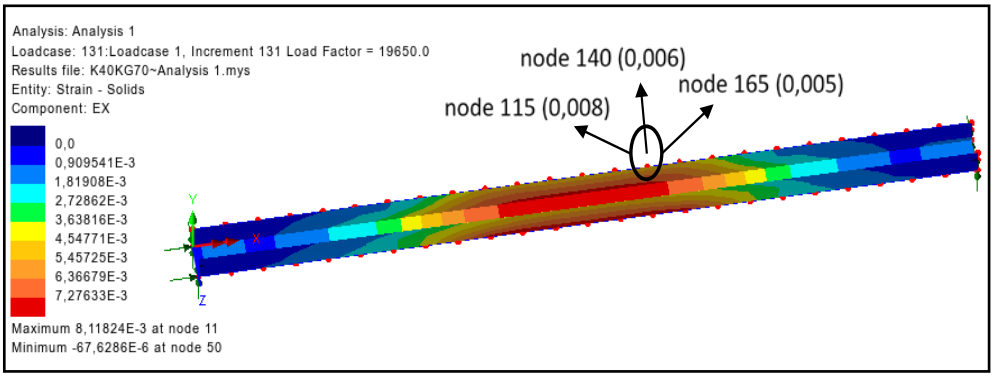
Şekil 6. 55 K40KG70 deney kirişinde CFRP kumaşın sıyrıldığı noktalar

Çizelge 6. 16 K40KG70 deney kirişinde CFRP malzemenin sıyrıldığı düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirme değerleri

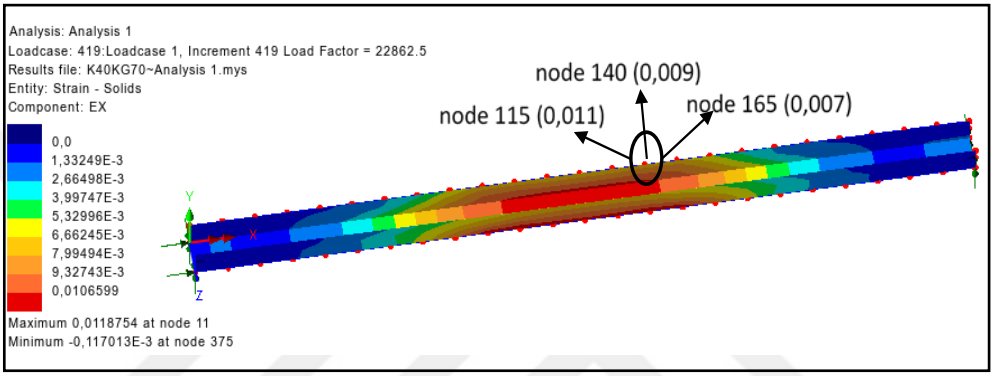
	Nokta No	**1. durum**	**2.durum**	**3. durum**
Birim şekil değiştirme	116	0,008	0,011	-
	140	0,006	0,009	-
	165	0,005	0,007	-

Çizelge 6. 17 K40KG70 deney kirişinde 1., 2. ve 3. durum için açıklık ortası yük-yer değiştirme değerleri

	1. durum	**2.durum**	**3. durum**
Yük (kN)	78,60	91,45	-
Yer değiştirme (mm)	23,66	34,36	-



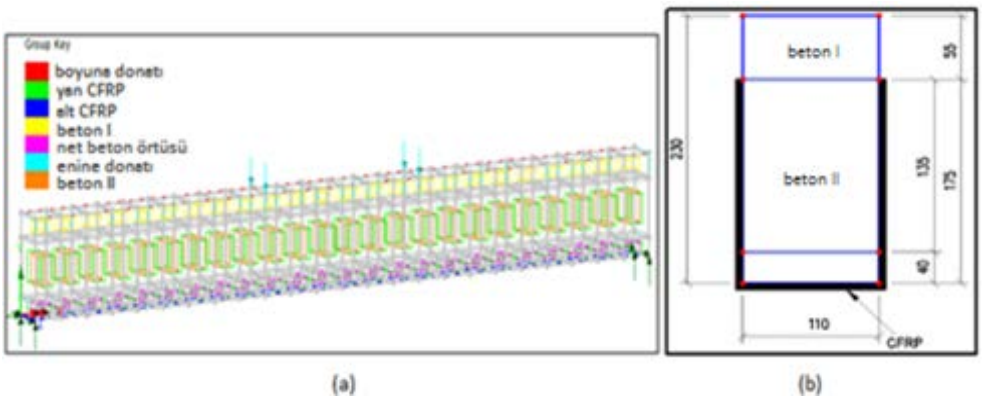
Şekil 6. 56 K40KG70 deney kirişinde CFRP malzemedeki açıklık ortası birim şekil değiştirmenin max. 0.008 olduğu durumdaki birim şekil değiştirme dağılımı



Şekil 6. 57 K40KG70 deney kirişinde deneyde elde edilen maksimum yükün sayısal analizde karşı geldiği analiz adımındaki CFRP malzemedeki birim şekil değiştirme dağılımı

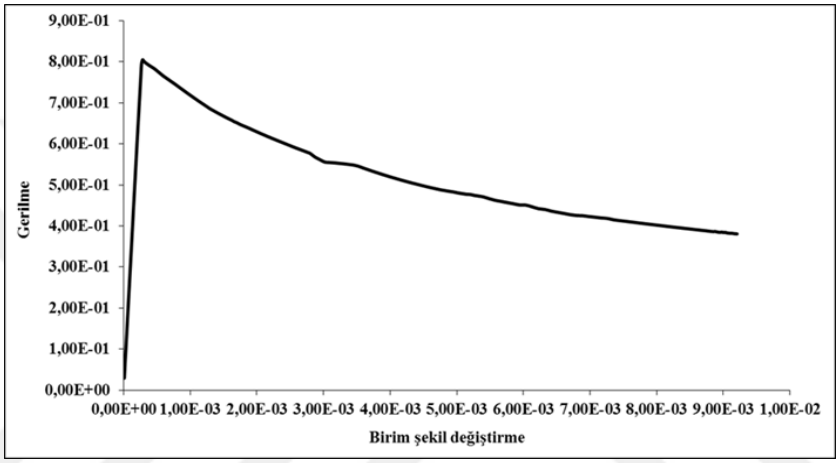
6.2.2.8 K40KGU Deney Kirişi

K40KGU deney kirişi 40 mm net beton örtüsüne sahip, çekme yüzeyine ve yan yüzeylerde 175 mm yüksekliğinde U şeklinde tek kat CFRP kumaş yapıştırılarak güçlendirilmiş kiriştir. Deney kirişine ait sayısal model Şekil 6.58a ve modelin 2 boyutlu kesiti Şekil 6.58b'de verilmiştir.



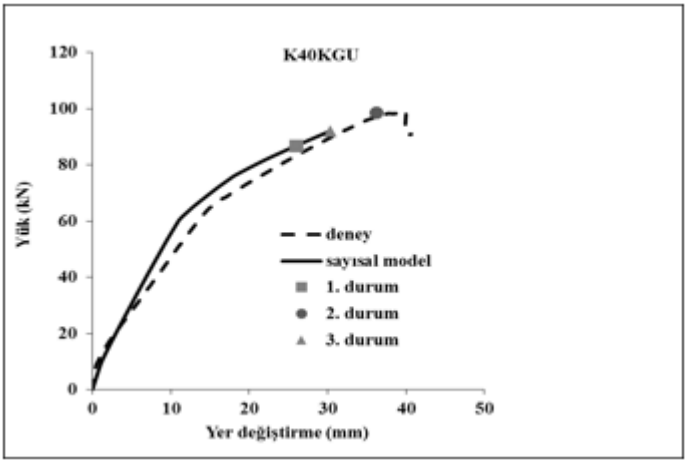
Şekil 6. 58 (a) K40KGU deney kirişinin sayısal modeli (b) 2 boyutlu kesiti

Deney kirişi K40KGU, deney esnasında maksimum 98,95 kN yük değerine ulaşmıştır. Deney numunesi K40KGU'nun bu yük seviyesinde 40,04 mm yer değiştirme yaptığı gözlenmiştir. Kirişin taşıdığı yük miktarında azalma olurken yer değiştirme miktarı artarak maksimum 41,82 mm olmuştur. CFRP kumaş beton yüzeyden sıyrılmış ve kopmuştur. Bu kirişe ait hesapla bulunan G_f değeri 0,046 N/mm olup, bu değere karşılık gelen sayısal analiz adımında analiz sonlandırılmıştır. Analizin sonlandırıldığı adıma karşılık gelen sanal malzemenin açıklık ortasındaki gerilme-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 6.59'da verilmiştir.



Şekil 6. 59 K40KGU deney kirişinin gerilme birim şekil değiştirme grafiği

Şekil 6.60'da kirişin deneysel ve sayısal modeline ait açıklık ortası yük- yer değiştirme eğrileri verilmiştir. Ayrıca eğri üzerinde 1., 2. ve 3. durumdaki yük yer değiştirme değerleri gösterilmiştir.



Şekil 6. 60 K40KGU deney kirişinin deneysel ve sayısal model yük-yer değiştirme eğrileri

Bu kirişte sayısal analiz sonucunda CFRP kumaşın kirişten sıyrıldığı ve koptuğu noktalar yaklaşık olarak belirlenmiş ve bu noktalardaki CFRP kumaştaki birim şekil değiştirme dağılımları incelenmiştir (Şekil 6.61-6.64).

1., 2. ve 3. durum için CFRP malzemenin sıyrıldığı ve koptuğu düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirme değerleri ile bu durumlardaki açıklık ortası yük ve yer değiştirme değerleri Çizelge 6.18-6.19'da verilmiştir.



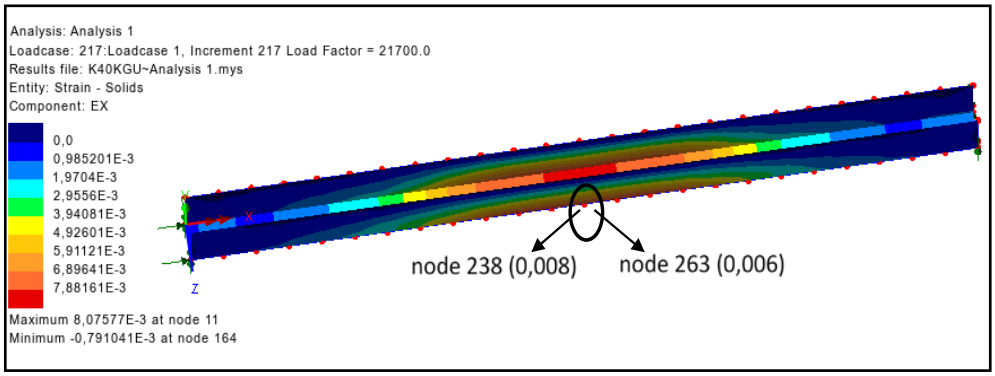
Şekil 6. 61 K40KGU deney kirişinde CFRP kumaşın sıyrıldığı noktalar

Çizelge 6. 18 K40KGU deney kirişinde CFRP malzemenin sıyrıldığı düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirme değerleri

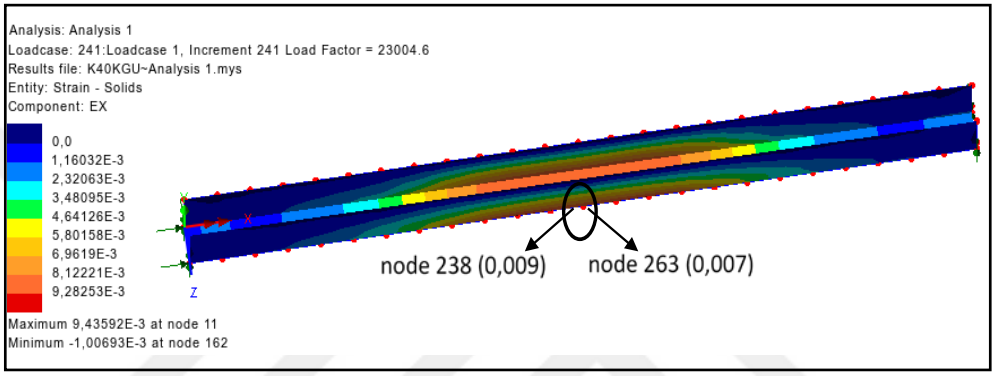
	Nokta No	**1. durum**	**2.durum**	**3. durum**
Birim şekil değiştirme	238	0,008	0,011	0,009
	263	0,006	0,008	0,007

Çizelge 6. 19 K40KGU deney kirişinde 1., 2. ve 3. durum için açıklık ortası yük-yer değiştirme değerleri

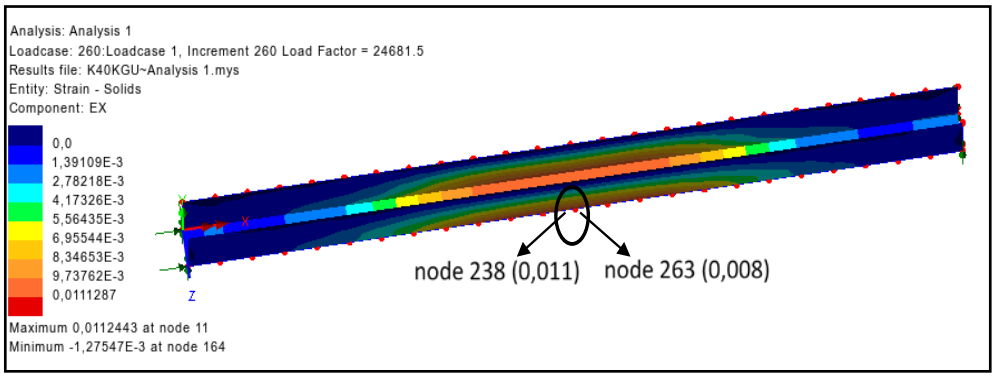
	1. durum	**2.durum**	**3. durum**
Yük (kN)	86,80	98,73	92,02
Yer değiştirme (mm)	25,98	36,22	30,31



Şekil 6. 62 K40KGU deney kirişinde CFRP malzemedeki açıklık ortası birim şekil değiştirmenin max. 0.008 olduğu durumdaki birim şekil değiştirme dağılımı



Şekil 6. 63 K40KGU deney kirişinde deneyde elde edilen maksimum yükün sayısal analizde karşı geldiği analiz adımındaki CFRP malzemedeki birim şekil değiştirme dağılımı



Şekil 6. 64 K40KGU deney kirişinde hesapla bulunan G_f değerine karşılık gelen sayısal analiz adımında CFRP kumaşın birim şekil değiştirme dağılımı

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

Güçlendirme yöntemlerinin genel amacı yapı elemanın ya da sisteminin dayanımını, sünekliğini ve rijitliğini talep edilen düzeye getirerek yapının performansında bir iyileşme sağlamaktır. Yapıların güçlendirilmesinde, geleneksel tekniklere ek olarak yeni teknikler geliştirilmekte ve yapı sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Yirmi yıldan fazla bir süreden beri lif takviyeli polimer malzemeler betonarme elemanların güçlendirilmesinde kullanılan yeni teknikler arasında yer almaktadır.

Bu tez çalışmasında CFRP ile dıştan güçlendirmenin kirişlerin eğilme dayanımını arttırmadaki etkinliği araştırılmış ve dıştan CFRP kumaşın yapıştırılması ile sağlanan kuşatmanın betonarme kirişlerin eğilme dayanımına olan etkisi irdelenmiştir. Bu yapılırken, çekme donatısı altında kalan, çok düşük gerilme seviyelerinde çatlayan ve bu nedenle tasarımda dikkate alınmayan çekme donatısı altında kalan net beton örtüsünün; güçlendirilmiş kirişin eğilme dayanımına olan etkisi deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır.

Deneysel çalışmada kirişin sadece alt bölgesine CFRP kumaş yapıştırılmasıyla yapılan güçlendirme, kirişin alt yüzeyi ile birlikte çekme donatısını içine alacak şekilde yan yüzeylere CFRP kumaş yapıştırılmasıyla yapılan güçlendirme ve kirişin alt yüzeyi ile birlikte yan yüzeylerinin büyük bir kısmına CFRP kumaşın U şeklinde yapıştırılması ile yapılan güçlendirme olmak üzere üç farklı güçlendirme biçiminin kirişin eğilme dayanımına olan etkisi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Deneysel çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Betonarme kirişlerin eğilme davranışını iyileştirmek için CFRP kumaşların kirişe dıştan yapıştırılması ile güçlendirilmiş kirişlerde ölçüm yapılan açıklık ortasında maksimum yer değiştirmelerde referans kirişlere oranla kayda değer bir azalma meydana geldiği görülmüştür. Bu oran K20KG00 deney kirişinde %73,5, K20KG50 deney kirişinde %71,9 ve K20KGU deney kirişinde %54,7; K40KG00 deney kirişinde %68,8, K40KG70 deney kirişinde %70,5 ve K40KGU kirişinde ise % 64,3' dür. Ancak kirişlerin yük taşıma kapasiteleri söz konusu olduğunda, referans kirişlere oranla kayda değer bir artış meydana gelmiştir. Bu oran K20KG00, K20KG50 ve K20KGU kirişlerinde sırasıyla %54,8, %80,0 ve %108,2; K40KG00, K40KG70 ve K40KGU kirişinde ise sırasıyla %67,4, %99,3 ve %115,7'dir. Bu sonuçlar sadece CFRP'nin kiriş alt yüzeyine yapıştırılmasıyla yapılan güçlendirme biçimine göre diğer iki güçlendirme biçiminin taşıma gücü açısından son derece etkin olduğunu göstermektedir.

2. Net beton örtüsü 20 mm olan deney kirişlerinin (K20R, K20KG00, K20KG50 ve K20KGU) taşıdığı maksimum yükler, net beton örtüsü 40 mm olan deney kirişlerinin (K40R, K40KG00, K40KG70 ve K40KGU) taşıdığı maksimum yüklerden sırasıyla %11,7, %4,5, %2,3 ve %8,5 daha fazladır. Yalın kirişler için gözlenen % 11,7'lik fark, 216 mm ve 196 mm olarak seçilen etkili derinlik değerlerindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Aynı kirişlerin sadece alt ve çekme donatısı üzerine kadar yapılan sargılama durumlarında ise bu farklılığın önemli oranda ortadan kalktığı gözlenmiştir. Alt yüzeye CFRP yapıştırılarak yapılan güçlendirme ve sargılama, kirişin eğilme momenti taşıma gücünü artıracaktır. Nitekim yaklaşık olarak düşey yükün 30 kN civarında arttığı deneysel olarak belirlenmiştir. Ek olarak çekme donatısı altında kalan net beton örtüsünün sargılanması durumunda ise yalın kirişe oranla artışın 40 ila 45 kN arasında olduğu saptanmıştır. Bunun en önemli nedeninin, daha önceki bir çalışmada irdelendiği üzere (Köksal vd.) alt yüzeye yapıştırılan CFRP'nin kapasitesinin artması olduğu belirlenmiştir. Bu ise çekme donarısı altında kalan net beton örtüsü boyunca yapılan sargılamanın CFRP sargının betondan sıyrılmasını önemli oranda geciktirmiş olmasıdır. Bu noktadan yola çıkılarak, beton örtüsünü içine alan sargılamanın depreme karşı güçlendirilecek olan kirişler için etkin ve başarılı bir yöntem olacağı sonucuna

ulaşılmıştır. Bu şekilde maliyeti yüksek olan CFRP sargılama da etkin kullanım ve ekonomik açıdan optimum bir çözüm seçilmiş olacaktır.

3. Deney kirişlerinin referans kirişlere oranla eğilme kapasitelerindeki artışın (%) birim alanda kullanılan CFRP kumaş miktarı K20KG00 deney kirişinde 3,65, K20KG50 deney kirişinde 3,2, K20KGUdeney kirişinde 2,16; K40KG00 deney kirişinde 4,49, K40KG70 deney kirişinde 3,42, K40KGU deney kirişinde 2,31 olarak hesaplanmıştır.

4. Betonarme kirişlerin eğilme dayanımını artırmak üzere kullanılan CFRP kumaşların kiriş yüzeyine dıştan yapıştırılması sonucunda kirişin şekil değiştirmesinde bir azalma olduğu gözlenmiştir. Bunun tasarımda dikkate alınması gereken bir durum olduğu düşünülmektedir. Yönetmelikler kapsamında betonarme binalarda genellikle süneklik düzeyi yüksek kirişlerin tasarlandığı göz önüne alındığında kirişin çekme bölgesinde kullanılan FRP malzeme miktarına bir sınır getirilmesi gerektiği düşünülebilir. Bu sınırı belirlemek için daha çok deneysel veriye ve ileri düzeyde sayısal çalışmaya ihtiyaç olduğu açıktır.

5. Betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde sadece kirişin alt yüzeyine CFRP yapıştırılması yerine net beton örtüsünü içine alarak çekme donatısını da kapsayan kiriş yan yüzeylerinde küçük bir kısma da CFRP yapıştırılmasının kirişlerin eğilme performansı açısından daha uygun bir seçenek olduğu söylenebilir. Fakat eğilme dayanımının artmasına rağmen tüm güçlendirme biçimlerinde yer değiştirme miktarında kontrol numunesinden elde edilen değere oranla azalma söz konusudur. Bu sebeple, istenilen seviyede sünek davranış elde edilebilmesi için kullanılan CFRP miktarının yönetmelikler kapsamında sınırlandırılmasının uygun olacağı düşünülmektedir.

6. Betonarme kirişlerin eğilme dayanımını artırmak için CFRP kumaşın dıştan yapıştırılması ile yapılan güçlendirmede kirişin sadece alt yüzüne CFRP uygulanması yerine alt yüz ve çekme donatısını içine alacak şekilde kiriş yan yüzlerinin bir kısmına özellikle çekme donatısının üst yüzeyini aşacak biçimde CFRP uygulamasının daha uygun olacağı söylenebilir. Süneklik açısından neredeyse hiçbir fark gözlenmemiştir.

Donatı altındaki mekanik olarak daha zayıf olan net beton örtüsünün kirişin eğilme dayanımına olan etkisini sayısal olarak araştırmak üzere bu çalışmada, doğrusal olmayan üç boyutlu sonlu eleman analizlerinde bu zayıf kısım için sanal malzeme tanımlaması ve buna bağlı bünyesel davranış modeli kullanılması tercih edilmiştir. Sayısal analizlerde betonun elasto-plastik davranışını tanımlamak için geliştirilmiş von Mises akma kriteri ve Oliver hasar modeli beraberce kullanılmıştır. Elasto plastik analizlerde CFRP ve beton, hexahedral katı eleman olarak modellenmiştir. CFRP kumaş ile beton arasında tam aderans olduğu kabulü yapılmıştır. Deney kirişlerinin doğrusal olmayan 3 boyutlu sonlu eleman analizlerinde LUSAS sonlu eleman yazılımı kullanılmıştır.

Kirişlerin sayısal analiz sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

1. Önerilen modelleme yaklaşımında sadece çekme donatısı altında kalan ve betonarme yönetmeliklerinde taşıma gücü yönteminde dikkate alınmayan net beton örtüsü için donatı üstündeki beton kısma nazaran daha zayıf sanal bir malzeme modeli kullanılmıştır. Sonlu eleman analizlerinde tercih edilen elasto-plastik hasar modeli hem zayıf hem de normal beton için kullanılmıştır. Ancak, zayıf sanal bir malzeme olarak tanımlanan donatı altı beton CFRP ile etkileşimde olduğu için kullanılan sargı miktar ve biçimine bağlı olarak çekme donatısı altında kalan net beton için bünyesel modelin ihtiyaç duyduğu parametreler için öneriler geliştirilmiştir.

2. Kirişlerin doğrusal olmayan sonlu eleman analizlerinin sonlandırılması için özellikle kirişlerin güçlendirilmesi durumunda betonarme yönetmeliklerinde dikkate alınmayan donatı altı betonun belirleyici olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle bu bölge için geliştirilen zayıf sanal malzeme yaklaşımında kırılma enerjisi değerine ulaşıldığı noktada analizler sonlandırılmıştır. Kiriş üzerindeki en kritik noktada (zayıf sanal malzeme) $\sigma-\varepsilon$ eğrilerinden kırılma enerjileri hesaplanmış ve G_f için öngörülen değerlere ulaşıldığında analizler sonlandırılmıştır. Bu aşamada belirleyici olan çatlak önü bölgesi genişliği değeridir. Kırılma enerjisinin belirlenmesinde belirleyici olan çatlak önü bölgesi genişliğidir. Tez çalışmasında çatlak genişliği optimum boyut 10 mm olarak alındığında kırılma enerjisinin makul değerlerde olduğu görülmüştür. Oliver hasar modelinde boyut etkisinin kırılma

enerjisine olan etkiyi tam yansıtmadığı görülmüş ve çatlak önü bant genişliğinin 10 mm olarak önerilebileceği sonucuna varılmıştır.

3. Bu yaklaşımla modellenen kirişlerden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla yeterli uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

[1] Al-Amery, R. ve Al-Mahaidi, R., (2006). “Coupled Flexural-Shear Retrofitting of RC Beams Using CFRP Straps", Composite Structures, 75: 457-464.

[2] Toutanji, H., Zhao, L. ve Zhang, Y., (2006). “Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Externally Strengthened with CFRP Sheets Bonded with an Inorganic Matrix", Engineering Structures, 28: 557-566.

[3] Esfahani, M.R., Kianoush, M.R. ve Tajari, A.R., (2007). “Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by CFRP Sheets", Engineering Structures, 29: 2428-2444.

[4] Siddiqui, N.A., (2009). “Experimental Investigation of RC Beams Strengthened with Externally Bonded FRP Composites”, Latin American Journal of Solids and Structures, 6: 343-362.

[5] Barris, C., Torres, L., Turon, A., Baena, M. ve Catalan, A., (2009). “An Experimental Study of the Flexural Behaviour of GFRP RC Beams and Comparison with Prediction Models”, Composite Structures, 91: 286-295.

[6] Kotynia, R., (2012). “Bond Between FRP and Concrete in Reinforced Concrete Beams Strengthened with Near Surface Mounted and Externally Bonded Reinforcement”, Construction and Building Materials, 32: 41–54.

[7] Dong, J., Wang, Q. ve Guan, Z., (2013). “Structural Behaviour of RC Beams with External Flexural and Flexural–shear Strengthening by FRP Sheets”, Composites: Part B, 44: 604–612.

[8] Reda, R.M., Sharaky, I.A., Ghanem, M., Seleem, M.H. ve Sallam, H.E.M., (2016). “Flexural Behaviour of RC Beams Strengtened by NSM GFRP Bars Having Different End Conditions”, Composite Structures, 147: 131-142.

[9] Nayak, A.N., Kumari, A. ve Swain, R.B., (2018). “Strengthening of RC Beams Using Externally Bonded Fibre Reinforced Polymer Composites”, Structures, 14: 137-152.

[10] Huang, L., Zhao, L. ve Yan, L., (2018). “Flexural Performance of RC Beams Strengthened with Polyester FRP Composites”, International Journal of Civil Engineering, 16: 715-724.

[11] Norris, T., Saadatmanesh, H. ve Ehsani, R.M., (1997). “Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets”, Journal of Structural Engineering, 123(7): 903-911.

[12] Park, R., ve Paulay, T., (1975). Reinforced Concrete Structures. John Wiley&Sons, Inc., New York.

[13] Aram, M.R., Czaderski, C. ve Motavalli, M., (2008). “Debonding Failure Modes of Flexural FRP-Strengthened RC Beams”, Composites Part B: Engineering, 39(5), 826-841.

[14] Godat, A., Qu, Z., Lu, X.Z., Labossière, P., Ye, L.P. ve Neale, K.W., (2010). "Size Effects for Reinforced Concrete Beams Strengthened in Shear with CFRP Strips", Journal Of Composites For Construction, 14(3): 260-271.

[15] Huang, J., (2011). “Finite Element Modeling (FEM) of GFRP Bar Reinforced Concrete Beam: Flexural Behavior”, Advanced Materials Research, Vols. 255-260: 3114-3118.

[16] Almusallam, T.H. ve Al-Salloum, Y.A., (2006). “Durability of GFRP Rebars in Concrete Beams Under Sustained Loads at Severe Environments,” Journal of Composite Materials, 40(7): 623-637.

[17] Chen, G.M., Teng, J.G. ve Chen, J.F., (2012). "Process of Debonding in RC Beams Shear-Strengthened with FRP U-strips or Side Strips", International Journal of Solids and Structures, 49: 1266-1282.

[18] Jankowiak, I., (2012). “Analysis of RC Beams Strengthened by CFRP Strips-Experimental and FEA study”, Archives of Civil and Mechanical Engineering, 12: 376-388.

[19] Oudah, F. ve El-Hacha, R., (2012). "A New Ductility Model of Reinforced Concrete Beams Strengthened Using Fiber Reinforced Polymer Reinforcement", Composites Part B, 43: 3338-3347.

[20] Hawileh, R.A., (2012). “Nonlinear Finite Element Modeling of RC Beams Strengthened with NSM FRP Rods” Construction and Building Materials, 27: 461-471.

[21] Ye, S., Sun, Y. ve Xiong, G.J., (2011). “A Simple and Rational Beam Segment Model for Analyzing Intermediate Crack-induced Debonding in FRP-strengthened Beams”, Construction and Building Materials, 25: 1332-1337.

[22] Karakoç, C., Aktan, S., Doran, B. ve Koksal, H.O., (2013). “Nonlinear Behaviour of RC Beams Wrapped with FRP Composites”, Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics (VEESD 2013), 28-30 August 2013, Vienna, 484-594.

[23] Doran, B., Koksal, H.O, Polat, Z. and Karakoç, C., (1998). “The Use of Drucker-Prager Criterion in the Analysis of Reinforced Concrete Elements by Finite Elements”, Teknik Dergi, 9(2): 1617-1625.

[24] Köksal, H.O. ve Karakoç, C., (1999). “An Isotropic Damage Model for Concrete”, Materials and Structures, 32: 611-617.

[25] Lubliner, J., Oliver, J., Ollers, S. ve Onate, E. (1989). “Plastic Damage Model for Concrete”, International Journal of Solids and Structures, 25(3): 299-326.

[26] Ianniruberto, U. ve Imbimbo, M., (2004). “Role of Fiber Reinforced Plastic Sheets in Shear Response of Reinforced Concrete Beams: Experimental and Analytical Results”, Journal of Composites for Construction, 8(5): 415-424.

[27] Akram, A., Hameed, R., Siddiqi, Z.A., Riaz, M.R. ve Ilyas, M., (2014).“Finite Element Modeling of RC Beams Strengthened in Flexure Using FRP Material”, Arabian Journal for Science and Engineering.,39: 8573–8584.

[28] Sellier, A., Cazaux-Ginestet, G. ve Buffo-Lacarriere, LX.B., (2013). “Orthotropic Damage Coupled with Localized Crack Reclosure Processing Part I: Constitutive Laws”, Engineering Fracture Mechanics, 97: 148–167.

[29] Hameed, R., (2010). “Apport d’un Renfort de Fibres sur les Performance des Structures en Beton Arme pour les Applications Parasismiques” (in French). PhD thesis, University of Toulouse-Paul Sabatier III, Toulouse.

[30] Aktan, S., Polat, K., Köksal, H.O., Doran, B. ve Deliktaş, B., (2014). “Numerical Modeling for the Flexural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Sheets”, 11. International Congress on Advances in Civil Engineering, 21-25 October 2014, İstanbul.

[31] Oliver, J., Cervera, M., Oller, S. and Lubliner, J. (1990). “Isotropic Damage Models and Smeared Crack Analysis of Concrete”, II International Conference on Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures, 2nd ICCAADCS, Austria, 945-958.

[32] Hawileh R.A., Rasheed H.A. Abdalla J.A. ve Al-Tamimi A.K., (2014). “Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded Hybrid Fiber Reinforced Polymer Systems”, Materials and Design, 53: 972-982.

[33] Sayed, A.M., Wang, X. ve Wu, Z., (2014). “Finite Element Modeling of the Shear Capacity of FC Beams Strengthened with FRP Sheets by Considering Different Failure Modes”, Construction and Building Materials, 59: 169-179.

[34] Ha,S.K., Khalid, H.R., Park, S.M. ve Lee, H.K., (2015). “Interfacial Crack-induced Debonding Behavior of Sprayed FRP Laminate Bonded to RC Beams”, Composite Structures, 128: 176-187.

[35] Al-Rousan, R.Z., (2015).“Effect of CFRP Schemes on the Flexural Behavior of RC beams Modeled by Using a Nonlinear Finite-element Analysis”, Mechanics of Composite Materials, 51(4): 437-446.

[36] Wang, X., Sayed, A.M., ve Wu., Z., (2015).“Modeling of the Flexural Fatigue Capacity of RC Beams Strengthened with FRP Sheets Based on Finite-Element Simulation”, Journal of Structural Engineering, 17(5): 1-16.

[37] Kim, N., Shin, Y.S., Choi, E. ve Kim, H.S., (2015). “Relationships Between Interfacial Shear Stresses and Moment Capacities of RC Beams Strengthened with Various Types of FRP Sheets”, Construction and Building Materials, 93: 1170-1179.

[38] Oehlers, D.J., Visintin, P., ve Lucas, W., (2016).“Flexural Strength and Ductility of FRP-Plated RC Beams: Fundamental Mechanics Incorporating Local and Global IC Debonding” Journal of Composites for Construction, 20(2), p.04015046.

[39] Köksal H.O., Altinsoy F., Aktan S., Karahan N.Ş., Çankaya R., (2017). "Üç Noktalı Eğilme Altındaki Betonarme Kirişlerde Karbon Lifli Polimerin Etkin ve Ekonomik Kullanımı", Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, cilt.3, 1-16.

[40] Hassan, N.Z., Sherif, A.G. ve Zamarawy, A.H., (2017). “Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams with Opening Strengthened Using FRP”, Ain Shams Engineering Journal, 8: 531-537.

[41] Ibrahim, V.F., (2007). Strengthening of R.C Beams with Opening Created After Casting Using F.R.P., MSc. Thesis, Faculty of Engineering Helwan University, Cairo.

[42] Ahmed, A., (2010). Behavior of FRP-Strengthened Reinforced Concrete Beams Under Fire Conditions, PhD. Thesis, Michigan State University, Michigan.

[43] Roylance, D., (2000), Introduction to Composite Materials, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

[44] Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T. ve Lam, L., (2003). “Behaviour and Strength of FRP-Strengthened RC structures: a State-of-art Review”, Structures&Buildings 1: 51-62.

[45] Bagherpour, S., (2012). Fibre Reinforced Polyester Composites, INTECH Open Access Publisher, London.

[46] Kahalid, S.Z., Shinde, S.B., ve Pathan, K.M., “Civil Engineering Application and Research of FRP in India as Compared to China”, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), 49-53, www.iosrjournals.org.

[47] Megalooikonomou, K.G., (2007). Modelling of FRP-Confinement of Rectangular RC Sections, MSc. Thesis, Earthquake Engineering, Rose School, Pavia, Italy.

[48] Tuakta, C., (2005). Use of Fiber Reinforced Polymer Composite in Bridge Structures, MSc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Civil and Environmental Engineering.

[49] Piggott, M., (2004). Load Bearing Fiber Composites, 2nd Edition, Kluwer Academic Publishers, Boston.

[50] Bank, L. C., Gentry, T. R. ve Barkatt, A. (1995). "Accelerated test methods to determine the long-term behavior of FRP composite structures: environmental effects", Journal of Reinforced Plastics and Composites, 14(6): 559.

[51] Campbell, F.C., (2010). Structural Composite Materials, ASM International.

[52] Günaslan, S.E., Karaşin, A., ve Öncü M.E., (2014),“Properties of FRP Materials for Strengthening”, IJISET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, 1(9): 656-660.

[53] Kompozitsan, Kırpılmış Karbon Elyaf, http://www.kompozitsan.com/tr/86-kirpilmi%C5%9F-karbonelyaf/24 Eylül 2017

[54] Bank, L.C.,(2006). Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, ISBN: 978-0-471-68126-7

[55] Alsalihi, M.A.J., (2014). Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymer Bars After Exposure to Elevated Temperatures, University of Wisconsin-Milwaukee, http://dc.uwm.edu/etd

[56] Dost Kimya, Elyaf Katkılar, https://www.dostkimya.com/tr/urunler/elyaf-katkilar//cam-elyaf-kirpilmis/ 23 Eylül 2017.

[57] Balaguru, P., Nanni, A. ve Giancaspro, J., (2009). FRP Composites for Reinforced and Prestressed Concrete Structures A Guide Fundamentals and Design for Repair and Retrofit, First Edition, Taylor&Francis, New York.

[58] Teijin Aramid, Products, Short Cut Fiber, https://www.teijinaramid.com/en/product/short-cut-fiber/ 23 Eylül 2017.

[59] FIB, 2001, Bulletin 14, Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures, Technical Report, Task Group 9.3 FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures, July 2001.

[60] Mallick, P.K., (2007), Fiber-Reinforced Composites, Third Edition, CRC Press Taylor&Francis Group, NewYork.

[61] Bai, J., (2013). Advanced Fibre-reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications, Woodhead Publishing, Cambridge.

[62] Nordin, H., (2003). Fibre Reinforced Polymers in Civil Engineering, Flexural Strengthening of Concrete Structures with Prestressed Nera Surface Mounted CFRP Rods, Licentiate Thesis, Lulea University of Technology, Sweden.

[63] Potyrała, P.B., (2011. Use of Fibre Reinforced Polymer Composites in Bridge Construction. State of the Art in Hybrid and All-Composite Structures., MSc.Thesis, Universitat Politecnica De Catalunya, Barcelona.

[64] Aliyu, A.A., (2014). "Using Fiber Reinforced Polymer Composites In Bridge Structures", MSc Thesis, Graduate Program in Civil Engineering, Zirve University, İstanbul.

[65] ACI Committee 440 (2008). Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-08), Farmington Hills (MI), American Concrete Institute.

[66] Appleton, N., Introduction to FRP in Construction https://www.buildoffsite.com/content/uploads/2017/12/NCC-forBuildoffsite-Composites-in-Construction-2017.pdf, 15 Şubat 2018.

[67] Busel, J.P. ve Lockwood, J.D., (2000). Product Selection Guide: FRP Composite Products for Bridge Applications, The Market Development Alliance of the Composites Industry.

[68] Atadero, R. ve Karbhari, V.M., (2006). Development of Resistance Factors for LFRD Design For FRP Strengthening of Reinforced Concrete Bridges, Structural System Research Report, The University of California.

[69] Masuelli, M.A.,(2013). Introduction of Fibre-Reinforced Polymers – Polymers and Composites: Concepts, Properties and Processes, INTECH Open Access Publisher, London, DOI: 10.5772/54629.

[70] Triantafillou, T.,(1998). "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites", ACI Structural Journal, 95(2): 107-115.

[71] Atadero, R.A. (2006). Development of Load and Resistance Factor Design for FRP Strengthening of Reinforced Concrete Structures, PhD. Thesis, Structural Engineering, University of California, San Diego.

[72] Täljsten, B.,(2006). FRP Strengthening of Existing Concrete Structures, Design Guideline, Structural Engineering Department of Civil Engineering, Luleå University of Technology, Sweden.

[73] Garden, H.N., ve Hollaway, L.C., (1998). "An Experimental Study of the Failure Modes of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed Carbon Composite Plates", Composites Part B: Engineering 29(4): 411-424.

[74] Thomason, J. L., Yang, L. ve Meier, R., (2014). "The Properties of Glass Fiber After Conditioning at Composite Recycling Temperatures", Composites Part A: Applied Science Manufacturing, 61: 201-208.

[75] Garden, H.N., Hollaway, L.C., ve Thorne, A.M.,(1998). "The Strengthening and Deformation Behaviour of Reinforced Concrete Beams Upgraded Using Prestressed Composites ", RILEM Materials and Structures, 31: 247-258.

[76] Castro, Protasio F. ve Carino, Nicholas J., (1998)."Tensile and Nondestructive Testing of FRP Bars" Journal of Composites for Construction, 2(1): 17-27.

[77] Gunes, O., (2004). A fracture Based Approach to Understanding Debonding in FRP Bonded Structural Members, PhD. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (MA).

[78] Kompozitsan, CFRP, GFRP ve AFRP kumaş, http://www.kompozitsan.com/tr/, 25 Nisan 2018.

[79] Uomoto, T., Mutsuyoshi, H., Katsuki, F., ve Misra, S. (2002). "Use of Fiber Reinforced Polymer Composites as Reinforcing Material for Concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, 14: 191.

[80] Plevris, N. , Triantafillou, T.C. ve Veneziano, D., (1995). "Reliability of RC Members Strengthened with CFRP Laminates", Journal of Structural Engineering, ASCE, 121(7): 1037-1044.

[81] Meier U. ve Winistorfer A., (1995). "Retrofitting of Structures Through External Bonding of CFRP Sheets" Proceedings of the 2nd International Symposium on Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Ghent, 1995 (TAERWE L. (edition.)), 509–516.

[82] Karbhari V.M. ve Seible F., (2000). “Fiber Reinforced Composites - Advanced Materials Forrenewal of Civil Infrastructure”, Applied Composite Materials 7: 95-124.

[83] Taranu, N., Isopescu, D.N. ve Oprisan, G., (2008). Fibre Reinforced Polymer Composites as Internal and External Reinforcements for Building Elements, Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy, Constructions, Architecture Section, 7-20.

[84] Guadagnini M., (2002). Shear Behaviour and Design of FRP RC Beams, PhD Thesis, The University of Sheffield, Sheffield.

[85] Pilakoutas K. ve Guadagnini M., (2001). “Shear of FRP RC: a Review of the State-of—the-art”, In Composites in Construction a Reality, Proceedings of the International Workshop, 20-21 July 2001, Capri.

[86] Teng J.G., Chen J. F., Smith S.T. ve Lam L., (2002). FRP –Strengthened RC Structures, John Wiley & Sons Ltd., Chichester , New York.

[87] Thomsen, H., Spacone, E., Limkatanyu, S., ve Camata, G., (2004). “Failure Mode Analyses of Reinforced Concrete Beams Strengthened in Flexure with Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymers”, Journal of Composites for Construction, 8(2): 123-131.

[88] Bonacci, J. F., ve Maalej, M., (2001). ‘‘Behavioral Trends of RC Beams Strengthened with Externally Bonded FRP.’’ Journal of Composites for Construction, 5(2): 102–113.

[89] Seim, W., Hormann, M., Karbhari, V., and Seible, F., (2001). ‘‘External FRP Poststrengthening of Scaled Concrete Slabs.’’ Journal of Composites for Construction, 5(2): 67–75.

[90] Mayo, R., Nanni, A., Watkins, S., Barker, M., ve Boothby, M., (2000).‘‘Strengthening of Bridge G-270 with Externally Bonded CFRP Sheets.’’ Technical Report R198-012, Missouri Dept. of Transportation, Springfield.

[91] Radfar, S., Foret, G. ve Sab, K., (2012). Failure Mode Analyses of Fibre Reinforced Polymer Plated Reinforced Concrete Beams, 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, June 2012, Italy.

[92] Fanning, P., ve Kelly, O., (2001).‘‘Ultimate Response of RC Beams Strengthened with CFRP Plates.’’ J. Compos. Constr., 5(2): 112–127.

[93] Sebastian, W. (2001). ‘‘Significance of Midspan Debonding Failure in FRP-Plated Concrete Beams.’’ ASCE Journal of Structural Engineering, 127 (7): 792–798.

[94] Zarnic, R., Gostic, S., Bosiljkov, V., ve Bokan, V., (1999). ‘‘Improvement of Bending Load-Bearing Capacity by Externally Bonded Plates.’’ Proc., Creating with Concrete, R. K. Dhir and N. A. Henderson, eds., Thomas Telford, London, 433–442.

[95] Obaidat, Y.T., (2010). Structural Retrofitting of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fibre Reinforced Polymer, Licentiate Dissertation, Department of Construction Sciences Structural Mechanics**,** Lund University, Sweden.

[96] TS EN 12390-6 (2010). Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini, TSE, Ankara.

[97] TS 500 (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, TSE, Ankara.

[98] TS 708 (2016). Çelik - Betonarme için - Donatı çeliği, TSE, Ankara.

[99] BASF, MasterBrace P 3500, https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/EB%20Construction%20Chemcials%20-%20US/Construction%20Systems/Data%20Guides/MasterBrace/basf-masterbrace-p-3500-tds.pdf, 16 Ocak 2017.

[100] BASF, MasterBrace P 4500, https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/EB%20Construction%20Chemcials%20-%20US/Construction%20Systems/Data%20Guides/MasterBrace/basf-masterbrace-sat-4500-tds.pdf, 16 Ocak 2017.

[101] BASF, MasterBrace FIB 300/50 CFS, https://assets.master-builders-solutions.basf.com/Shared%20Documents/PDF/Turkish%20%28Turkey%29/MasterBrace%20FIB%20%28Eski%20Ad%C4%B1%20Mbrace%20Fibre%29.pdf, 16 Ocak 2017.

[102] Donald, B.J.M., (2007). Practical Stress Analysis with Finite Elements, First Published, Glasnevin Publishing, Glasnewin.

[103] Rao, S.S., (1982). The Finite Element Method In Engineering, First Edition, Pergamon Press, Oxford.

[104] Hutton, V.D., (2004). Fundemantals of Finite Element Analysis, First Edition, Mc-Graw Hill Companies, New York.

[105] Arıkan, S., Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislikte Uygulamaları, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

[106] Mühendishane, Çetin, A., mühendishane.org (Çetin, A. Web Eğitim Platformu), 14 Aralık 2017.

[107] Kwon, Y.W. ve Bang, H., (2000). The Finite Element Method Using Matlab, Secon Edition, CRC Press, New York.

[108] Aktan, S., (2016). Düzlem İçi Yükler Etkisindeki Yığma Duvarlarda Bünyesel Modelleme, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[109] Küsin, C.C., (2009). Jet Grout Yöntemi ile İyileştirilen Zeminlerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Sayısal Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

[110] Köksal, H.O., (1992). Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, MSc. Thesis, Boğaziçi University, İstanbul.

[111] Tekin, E., (2017). Geoteknik Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi, İMO, Ankara.

[112] Zor, M., Mechanics of Materials, http://kisi.deu.edu.tr//mehmet.zor/MUKSORU/konu_7_AKMA_VE_KIRILMA_KRITERLERI.pdf, 15 Aralık 2017.

[113] Demir, C., Makine Mühendisliğinde Sonlu Elemanlar Yöntemi, http://www.yildiz.edu.tr/~cdemir/sonlu_elemanlar.pdf, 15 Haziran 2018.

[114] Aydoğan, M., Yapı Sistemlerinde Sonlu Elemanlar Yöntemi , http://www.imogaziantep.org.tr/resimler/dosya_ekler/163b412846f30e4_ek.pdf, 14 Ekim 2017.

[115] Liu, Y., (2003). Introduction to the Finite Element Method, Lecture Notes, University of Cincinnati, Cincinnati, http://www.iust.ac.ir/files/mech/madoliat_bcc09/pdf/yijun_liu_nummeth_20040121_fem.pdf, 18 Mayıs 2018.

[116] Yu, H-S., (2006). Plasticity and Geotechnics, Springer Science and Business Media, New York.

[117] Chen, W.F. ve Mizuno, E., (1990). Nonlinear Analysis in Soil Mechanics Theory and Implementation, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.

[118] Chen, W. F., (2007). Plasticity In Reinforced Concrete", First Published, J. Ross Publishing.

[119] Dede, T., (2009). Farklı Kriterler Kullanılarak Betonarme Kirişlerin Malzeme Bakımından Doğrusal Olmayan Davranışının Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

[120] Yu, M., Ma, G. ve Li, J. (2009). Structural Plasticity Limit, Shakedown and Dynamic Plastic Analyses of Structures, Zhejiang University Press, Hangzhou and Springer, Berlin.

[121] Saxena, A., (1998). Nonlinear Fracture Mechanics for Engineers, CRC Press, New York.

[122] Way, C., (2016). Plasticity in Physics, The English Press, New York.

[123] Doran, B.,(2001). Boşluklu Perdelerin Elastik-Plastik Analizi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[124] Jafarov, O., (2016). Lifli Polimerle Güçlendirilmiş Yığma Duvarların Modellenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[125] Davis, R.O. ve Selvadurai, A.P.S., (2002). Plasticity and Geomechanics, First Published, Cambridge University Press, New York.

[126] Chakrabarty, J., (2006). Theory of Plasticity, Third Edition, Elsevier Butterworth –Heinemann.

[127] Chen W.F. ve Han, D.J., (2007). Plasticity for Structural Engineers, J. Ross Publishing.

[128] Borja, R.I., (2013). PlasticityModeling & Computation, Springer, Heidelberg.

[129] Han, W. ve Reddy, B.D. (2013). Plasticity Mathematical Theory and Numerical Analysis, Second Edition, Springer, New York.

[130] Kachanov, L.M., (2004). Fundamentals of the Theory of Plasticity, North-Holland Publishing, Amsterdam.

[131] Korkut, S., von Mises Gerilmesi, https://www.serdarkorkut.com/2017/05/22/von-mises-gerilmesi/, 10 Aralık 2017.

[132] Maekawa, K., Pimanmas, A. ve Okamura, H. (2003). Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, First Published, Spon Press, London.

[133] Kelly, P., (2013). Solid Mechanics Part II: Engineering Solid Mechanics, Section 8.Plasticity,http://homepages.engineering.auckland.ac.nz/~pkel015/SolidMechanicsBooks/Part_II/index.html, 15 Mayıs 2018.

[134] Arslan, G. (2007). "Sensitivity study of the Drucker–Prager modeling parameters in the prediction of the nonlinear response of reinforced concrete structures", Materials and Design, 28: 2596-2603.

[135] Shing, P.B. ve Manzouri, T., (2004). Analysis of Unreinforced Masonry Structures Using Elastic/Viscoplastic Models, SÍSMICA 2004 - 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Porto.

[136] Yıldırım, H., (2007). Yığma Yapı Elemanları İçin İzotropik Hasar Modeli Geliştirilmesi ve Sonlu Eleman Uygulamaları, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[137] Hofstetter, G. ve Meschke G., (2011). Numerical Modelling of Concrete Cracking, International Centre for Mechanicals Sciences Courses and Lectures - No. 532, Springer, New York.

[138] Gasch, T. ve Ansell A. (2016). Cracking in Quasi-Brittle Materials Using Isotropic Damage Mechanics, COMSOL Conference, Münih.

[139] Ibrahimbegovic, A., (2009). Nonlinear Solid Mechanics Theoretical Formulations and Finite Element Solution Methods, Springer, New York.

[140] Cabot, G.P. ve Mazars J. , Damage Models for Concrete, https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01572309, 26 Ağustos 2017.

[141] Oudni, N. ve Bouafia, Y. (2016). Implementation of a Damage Model in a Finite Element Program for Computation of Structures Under Dynamic Loading, Frattura ed Integrità Strutturale, 35:278-284.

[142] de-Pouplana, I. ve Oñate E., An Isotropic Damage Model for Geomaterials in the KRATOS framework, https://www.scipedia.com/public/Pouplana_2015, 13.01.2018

[143] Köksal, H.O., Doran, B., Ozsoy, A.E. ve Alacalı, S.N. (2004). "Nonlinear Modeling of Concentrically Loaded Reinforced Blockwork Masonry Columns",Canadian Journal of Civil Engineering. 31(6):1012-1023.

[144] Bazant, Z.P. ve Oh, B.H., (1983). “Crack Band Theory for Fracture of Concrete”, Materials and Structures, 16(93): 155-177.

[145] Kim, J-K., Fracture mechanics and Size Effect of Concrete, KAIST Civil and Environmental Engineering, https://slideplayer.com/slide/10218587/, 13 Temmuz 2018.

[146] Červenka, J., Červenka., V. ve Laserna, S., (2018). “On Crack Band Model in Finite Element Analysis of Concrete Fracture in Engineering Practice”, Engineering Fracture Mechanics, 197: 27-47.

[147] LUSAS Finite Element System. FEA Ltd, Surrey, UK.

[148] Köksal, H.O, Doran, B. and Turgay, T. (2009). “A Practical Approach for Modelling FRP Wrapped Concrete Columns”. Construction and Building Materials, 23(3):1429–1437.

[149] Köksal, H.O., Karakoç, C. and Tokuç, M.O. (2004). “Damage Analyses of RC Members”, ACE 2004, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.

[150] Sakr, M.A. (2018). “Finite Element Modeling of Debonding Mechanisms in Carbon Fiber Reinforced Polymer-Strengthened Reinforced Concrete Continuous Beams”, Structural Concrete, 19: 1002–1012.

[151] El-Refaie S.A., Ashour A.F. ve Garrity S.W., (2003). “CFRP Strengthened Continuous Concrete Beams”, Proceedings of the Institution Civil Engineers: Structures and Buildings, 156(4): 395–404.

[152] Wang, X-L., Zhao, G-Q., Li, K. ve Li, M-F-H., (2018). “Effect of Damage Parameter Variation on Bond Characteristics of CFRP-sheets Bonded to Concrete Beams”, Construction and Building Materials, 185: 184–192.

[153] Köksal, H.O., ve Doran, B., (2011). “Stress- Strain Model for Fibre- Reinforced Polymer Confined Rectangular Columns”, Structures and Buildings, 164: 391-408.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : İlknur DALYAN

Doğum Tarihi ve Yeri : 16.02.1982, Çanakkale

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : ilknurdalyan@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Y. Lisans	İnşaat Mühendisliği/Yapı	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2007
Lisans	Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2005
Lise		Çanakkale İbrahim Bodur Lisesi (Y.D.A)	2000

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2012-	T.C. İçişleri Bakanlığı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı/Deprem Dairesi	İnşaat Mühendisi
2010-2012	Çanakkale İl Özel İdaresi	İnşaat Mühendisi
2007-2010	İstanbul Büyükşehir Belediyesi	İnşaat Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Dalyan, İ. ve Şahin, B., (2018). "Comparison of Building Design Criteria Under Earthquake Effect According to 2007 and 2018 Turkish Design Code" 1st International Symposium on Graduate Research in Science (ISGRS 2018), October 4-6, 2018, İstanbul.

2. Dalyan, İ., Köksal, T. S., Tekin, B. M. ve Kılıç, N., (2018). "An Interactive Web Application Prepared for Earthquake Hazard Maps of Turkey", 3.International Conference on Civil and Environmental Engineering, April 24-27 2018, Çeşme.

3. Ayaydın, M., Dalyan, İ. ve Doran, B., (2018). "Nonlinear Analysis Of RC Beams Wrapped with CFRP", International Conference on Civil and Environmental Engineering, April 24-27 2018, Çeşme.

4. Dalyan, İ., Doran, B., Aktan, S. ve Köksal, H. O., (2017). "Farklı Tekniklerle Güçlendirilmis Betonarme Kirişlerin Egilme Davranısı", 4. Uluslararası Deprem Mühendisligi ve Sismoloji Konferansı, 11 - 14 Ekim 2017, Eskişehir.

5. Çeken, U., Dalyan, İ., Kılıç, N., Köksal, T.S. ve Tekin, B.M., (2017). "Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması", 4. Uluslararası Deprem Mühendisligi ve Sismoloji Konferansı, 11 - 14 Ekim 2017, Eskişehir.

Proje

1. "Lifli Polimerlerle Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Eğilme Performansının Belirlenmesi", BAP Doktora, 2016-05-01-DOP06, Araştırmacı, 2016-Devam Ediyor.

2. "Yüksek Binalarda Kurulacak Yapı Sağlığı İzleme Sistemi Standardının Belirlenmesi ve Örnek Uygulaması", UDAP, Yardımcı Araştırmacı, 2017-Devam Ediyor.

3. "Bursa Tarihi Minarelerinin Deprem Performanslarının Analitik ve Deneysel Yaklaşımlar ile İncelenmesi ve Hasargörebilirlik Eğrilerinin Elde Edilmesi", UDAP, Yardımcı Araştırmacı, 2018-Devam Ediyor.